

## 第4章 地質解析

本章は、4-1 液状化強度試験及び残留強度試験、4-2 液状化の検討及び評価、4-3 二次元浸透流解析の構成となっている。4-1 液状化強度試験及び残留強度試験では、トレンチから採取した乱れの少ない試料を用いた液状化試験及び液状化後の残留強度試験について述べた。4-2 液状化の検討及び評価では、Palu 低地内で行ったボーリング調査や SWS 結果を踏まえ、本震災で生じた液状化について評価した。4-3 二次元浸透流解析では、本震災で生じた液状化の状況を反映した2次元浸透流解析を行い、地震発生前後の地下水位（被圧分布含む）や地下水湧出量の試算を行った。

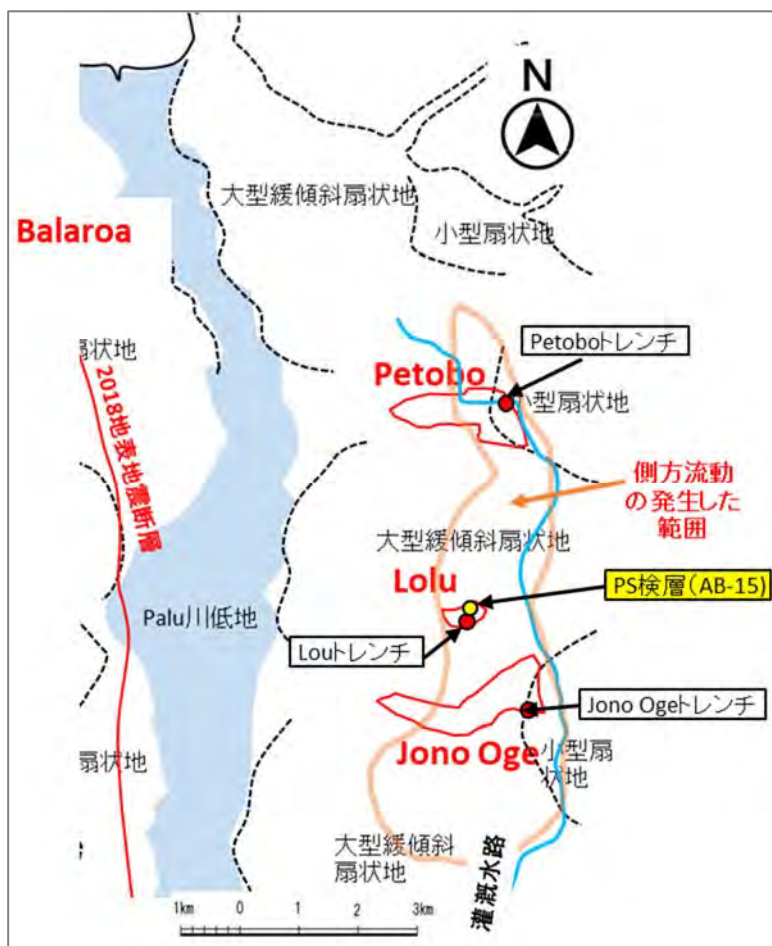
### 4-1 液状化強度試験及び残留強度試験

#### 4-1-1 試験の目的

トレンチで確認した移動層と不動層の境界にある流動層を対象に、乱れの少ない試料を用いた液状化強度及び液状化後の残留強度試験を行うことによって、液状化の程度及び長距離流動に関連する残留強度の発現状況を確認することを目的とした。

#### 4-1-2 試料の採取方法

試験試料は、3-4 で詳述した Petobo・Lolu 及び Jono Oge のトレンチから採取した。トレンチによる採取場所を、図 4-1 に示した。試料は、平滑に整形したトレンチの小段に、先端を鋭利にしたステンレスパイプを押し込み、表 4-1 に示すよう、Petobo では2種延べ14本、Lolu では2種延べ14本、Jono Oge では1種延べ10本の円柱供試体試料を採取した。試料は直径7cm×高さ15cmのチューブ試料として採取し、日本の試験室に運搬した。



出典：JICA 調査団作成

図 4-1 トレンチ実施位置とP-S 検層を実施したボーリング位置 (AB-15)

### 4-1-3 運搬及び管理方法

試験試料は Palu からの運搬時には有用な鉱物が含まれていないことの証明、日本への輸入手続きでは植物防疫法に基づく許可申請を行った上で運搬した。液状化試験に用いたトレンチからの採取試料は、不飽和（乾燥状態）であったため、採取時のステンレスパイプに入った状態で入念にラッピング・緩衝材を入れて、乱さないように精密機器扱い（手荷物）として空輸した。なお、液状化試験には用いていないが飽和帯から採取したボーリング調査の UDS（三重管採取サンプル）は凍結し、試験室まで試料を運搬した。

表 4-1 液状化試験の供試体採取場所

| トレンチ場所   | 試料名・試料採取本数                                    |
|----------|---|
| Petobo   | Petobo1（深さ 3.5m）；10 本<br>Petobo2（深さ 1.2m）；4 本 |
| Lolu     | Lolu1（深さ 3.5m）；10 本<br>Lolu2（深さ 4.5m）；4 本     |
| Jono Oge | Jono Oge（深さ 5.2m）；10 本                        |

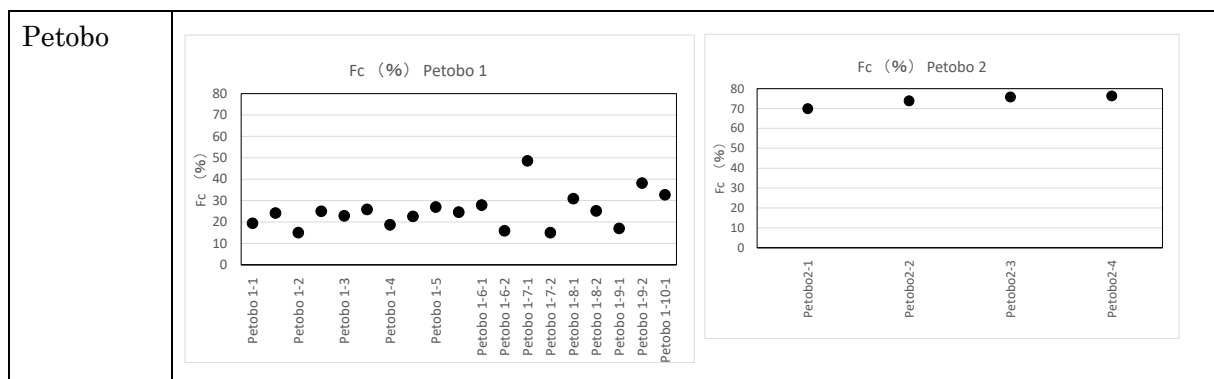
出典：JICA 調査団作成

### 4-1-4 供試体の特徴

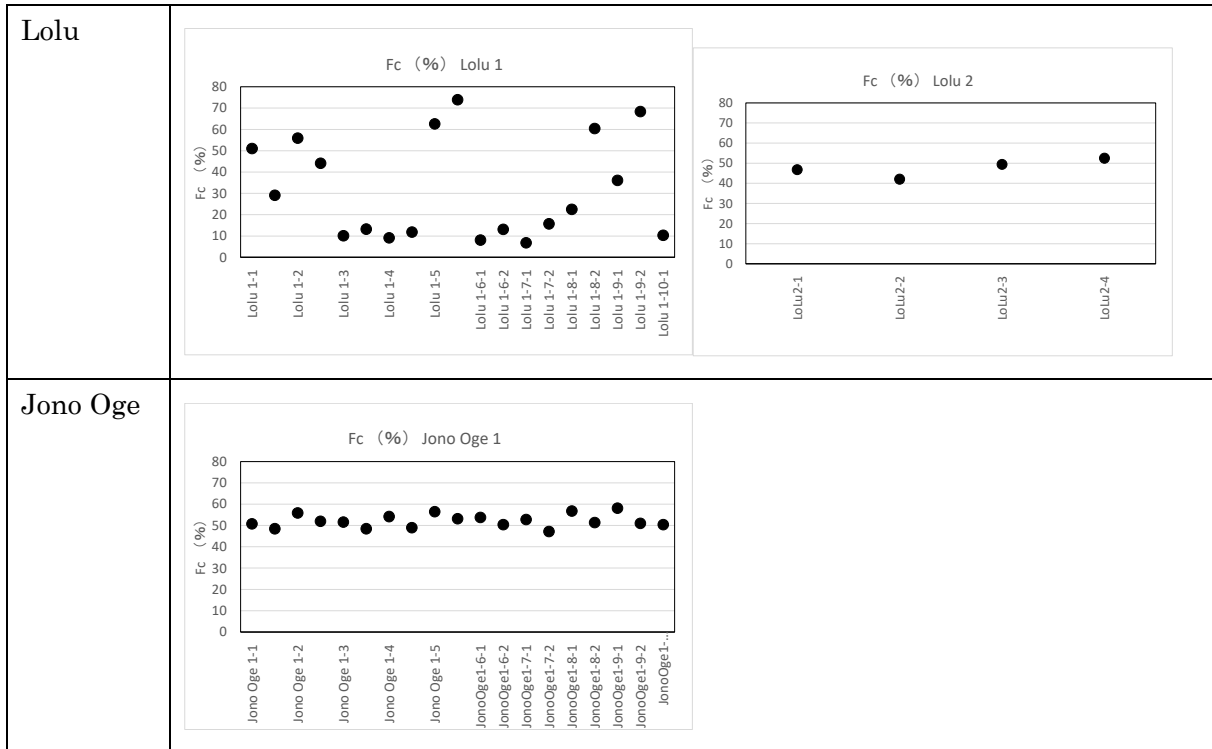
#### (1) 試験試料の細粒分含有率 (Fc)

試料番号は、同じ場所から採取した試料は同じ番号を付し、枝番号はチューブの番号、後述のねじりせん断試験試料は同じチューブ試料を 2 つに分けたため、1・2 を付している（図 4-3 参照）。

同じ試料として採取した供試体毎の細粒分含有率(Fc)を図 4-2 に、各供試体の写真を図 4-3 に示した。同一試料として採取した試料は、概ね同じ細粒分含有率を示すが、移動層と不動地盤の境界層を対象としたため、互層であったものがレンズ状に砂分を含むものがあつた。Lolu1 の試料は、目視観察でもはっきりと判る程度の粗砂～シルトに別れ、試料毎に細粒分含有率が異なる試料であつた。Lolu1 の物理特性のばらつきの原因は、流動化したためシルト質砂の層準に粗砂のレンズ様ブロックが不規則に含まれることによる。試料によってはレンズとして含まれる粗砂が主体となる結果となつた。


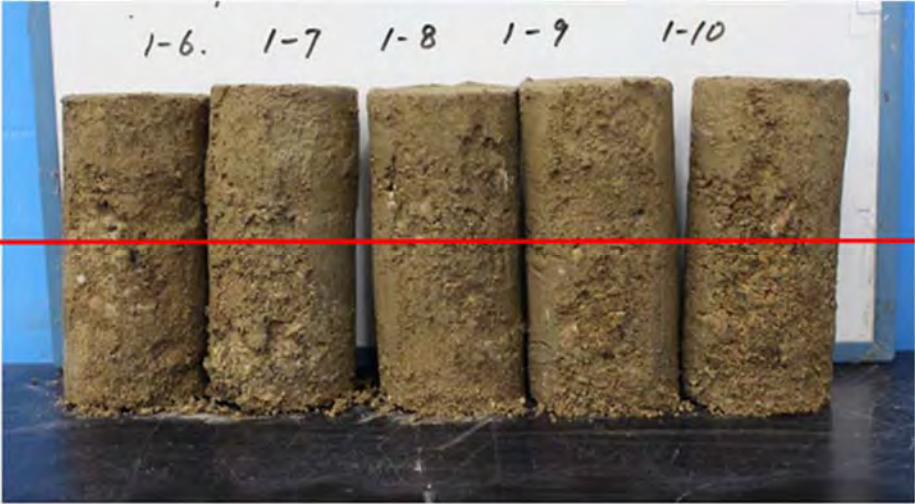



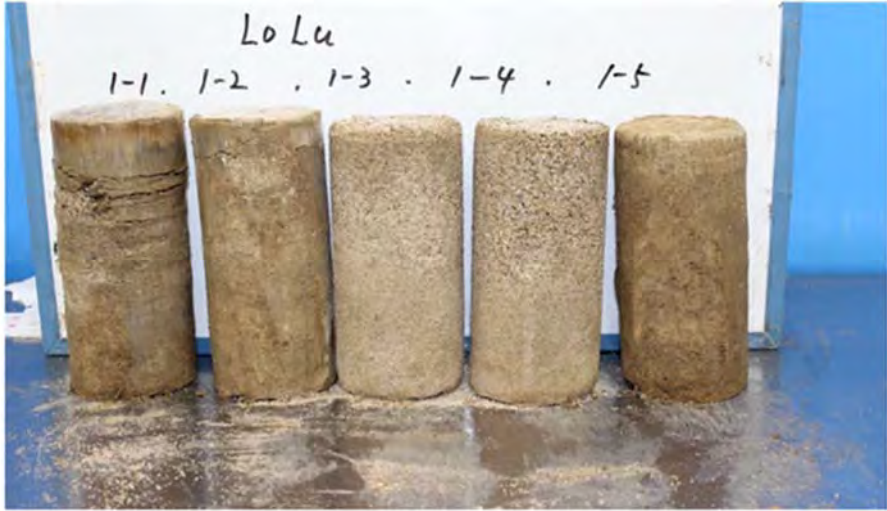
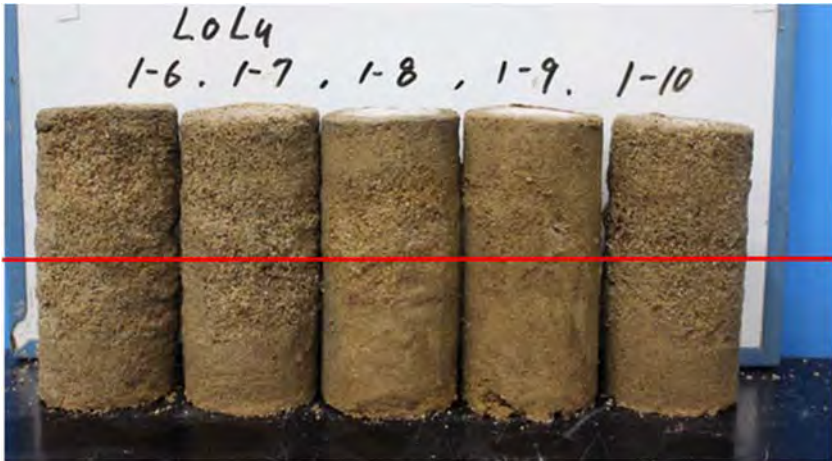






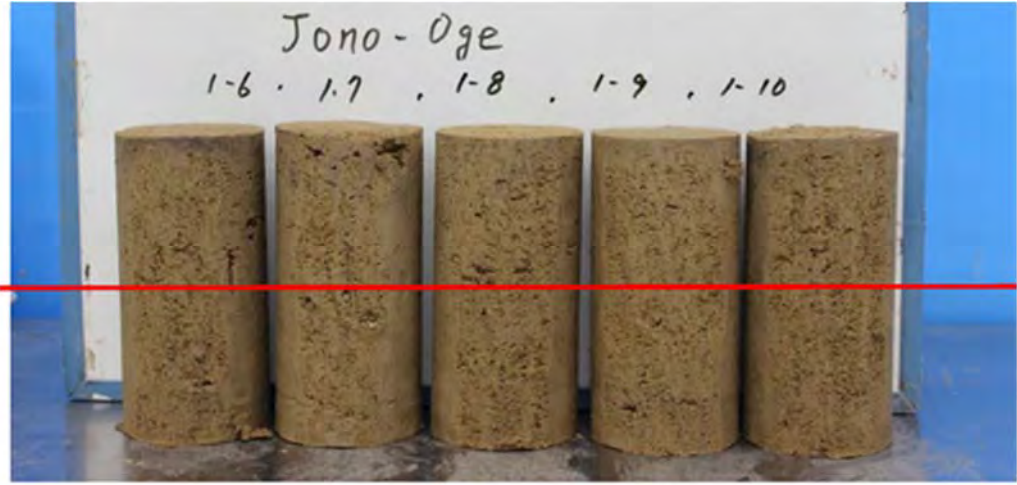
出典：JICA 調査団作成

図 4-2 供試体毎の細粒分含有率 (Fc)

| 供試体の状況             |  |
|--------------------|--|
| Petobo<br>1-1~1-5  |  <p style="text-align: center;">1-1 (三軸液状化) 1-2 (三軸液状化) 1-3 (三軸液状化) 1-4 (三軸液状化) 1-5 (静的三軸)</p>   |
| Petobo<br>1-6~1-10 |  <p style="text-align: center;">1-6-1 (ねじり液状化) 1-7-1 (ねじり液状化) 1-8-1 (FL) 1-9-1 (FL) 1-10-1 (ねじり液状化)<br/>           1-6-2 (ねじり液状化) 1-7-2 (ねじり液状化) 1-8-2 (FL) 1-9-2 (静的ねじり)</p> <p>※中空ねじり試験試料確保のため、赤線で試料を2分割して試験を行った。</p> |
| Petobo<br>2-1~2-4  |  <p style="text-align: center;">2-1 (三軸液状化) 2-2 (三軸液状化) 2-3 (三軸液状化) 2-4 (三軸液状化)</p>  |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <p>Lolu<br/>1-1~1-5</p>  |  <p>1-1 (静的三軸) 1-2 (三軸液状化) 1-3 (三軸液状化) 1-4 (三軸液状化) 1-5 (三軸液状化)</p>   |
| <p>Lolu<br/>1-6~1-10</p> |  <p>1-6-1 (ねじり液状化) 1-7-1 (ねじり液状化) 1-8-1 (FL) 1-9-1 (FL) 1-10-1 (静的ねじり) 1-6-2 (ねじり液状化) 1-7-2 (ねじり液状化) 1-8-2 (FL) 1-9-2 (静的ねじり)</p> <p>※中空ねじり試験試料確保のため、赤線で試料を2分割して試験を行った。</p> |
| <p>Lolu<br/>2-1~2-4</p>  |  <p>2-1 (三軸液状化) 2-2 (三軸液状化) 2-3 (三軸液状化) 2-4 (三軸液状化)</p>  |



|                              |  |
|------------------------------|--|
| <p>Jono Oge<br/>1-1~1-5</p>  |  <p>1-1 (三軸液状化) 1-2 (三軸液状化) 1-3 (三軸液状化) 1-4 (三軸液状化) 1-5 (静的三軸)</p>   |
| <p>Jono Oge<br/>1-6~1-10</p> |  <p>1-6-1 (ねじり液状化) 1-7-1 (ねじり液状化) 1-8-1 (FL) 1-9-1 (FL) 1-10-1 (静的ねじり) 1-6-2 (ねじり液状化) 1-7-2 (ねじり液状化) 1-8-2 (FL) 1-9-2 (静的ねじり)</p> <p>※中空ねじり試験試料確保のため、赤線で試料を2分割して試験を行った。</p> |

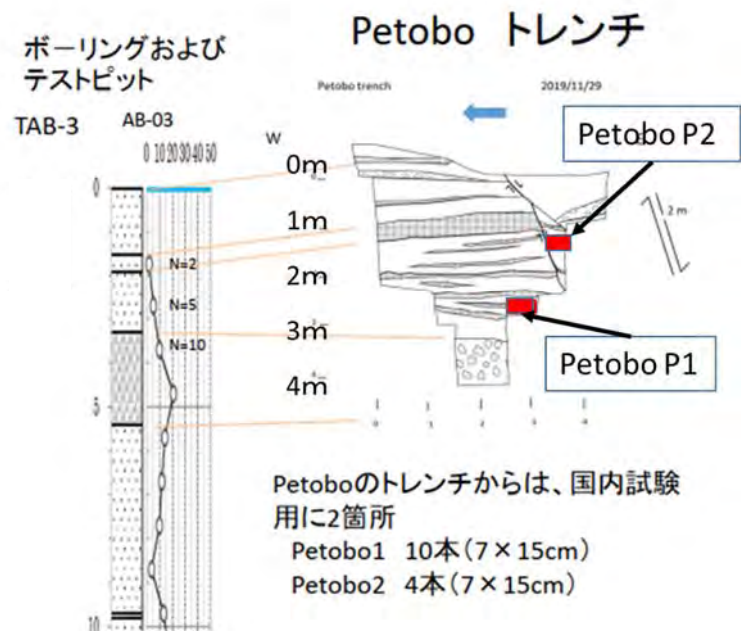
出典：JICA 調査団作成

図 4-3 液状化試験の供試体写真（整形前）

## (2) 採取試料と N 値の対比

トレンチを AB-3 ボーリングの脇で行った Petobo の試料では、AB-3 孔との対比は図 4-4 に示すとおりである。試料採取箇所は P1 試料・P2 試料ともに N 値 5 と対比している。

なお、トレンチ近傍にボーリングボーリング調査がない Lolu のトレンチ、Jono Oge のトレンチからは周辺のボーリングデータを参考としている。



出典：JICA 調査団作成

図 4-4 Petobo トレンチとボーリング AB-3 との対比  
(離れ 2m)

## (3) 採取時・運搬時の乱れの評価

試料採取から運搬、試験の過程において採取試料が乱されないよう十分注意したが、実際に乱れていないことを確認するため、繰返し三軸試験で繰返し载荷を与える前に超音波パルス法によりせん断波の伝搬速度  $V_s$  を測定し、原位置で同様の地層で PS 検層を行って測定した  $V_s$  と比較した結果から標準貫入試験結果との対応関係を検討した。ただし、ここでは全ての採取位置で PS 検層等を行うことが出来なかったため、周辺地盤で測定した N 値などを参考に乱れの評価を行った。表 4-2 に周辺地盤の N 値から推定される原地盤の  $V_s$  と試験室で繰返し三軸試験を行う前の供試体で測定した  $V_s$  を示した。また、両者の結果を比較して図 4-5 に示す。この図を見ると原位置と試験供試体では、推定を含む誤差の範囲内であることから、著しい乱れが発生していないと判断される。また、試験供試体の  $V_s$  は、採取深度に応じて  $80 \sim 100 \text{ kN/m}^2$  の拘束圧を加えた状態で測定したものである。

なお、インドネシア国では PS 検層が一般的ではなく十分な経験を有していないと判断し、ボーリング完了後に日本人技術者と計測機器を用いて行い、Nalodo 発生地域では AB-15 孔の 1 箇所を実施している。

表 4-2 近傍  $N$  値から推定した  $V_s$  と超音波パルス法で求めた供試体の  $V_s$

| 供試体      | 採取深度・近傍 $N$ 値    | 地盤状況と周辺の計測結果 (PS検層・SPT試験) から想定される $V_s$ (m/sec) |     | 供試体の超音波パルス試験による $V_s$ (m/sec)<br>圧密後 (背圧200kN/m <sup>2</sup> ・拘束圧80~100kN/m <sup>2</sup> ) |     |     |     |     | 平均 $F_c$ (%) |
|----------|------------------|---|-----|--|-----|-----|-----|-----|--------------|
|          |                  | 最小  | 最大  | 平均   | 供試体 |     |     |     |              |
| Petobo1  | 3.5m N=5         | 134   | 134 | 153  | 150 | 150 | 154 | 157 | 19.0         |
| Petobo2  | 1.2m N=5 (粘性土)   | 170   | 170 | 193  | 191 | 192 | 201 | 186 | 74.0         |
| Jono Oge | 5.2m N=3~6       | 110   | 144 | 186  | 183 | 181 | 203 | 178 | 53.1         |
| Lolu1砂   | 3.5m N=3~6       | 110   | 144 | 132  | 129 | 134 |     |     | 9.6          |
| Lolu1細   | 3.5m N=3~6 (粘性土) | 144   | 181 | 132  | 132 | 131 |     |     | 59.3         |
| Lolu2    | 4.5m N=3~6       | 110   | 144 | 140  | 140 | 140 | 142 | 139 | 47.7         |

出典：JICA 調査団作成

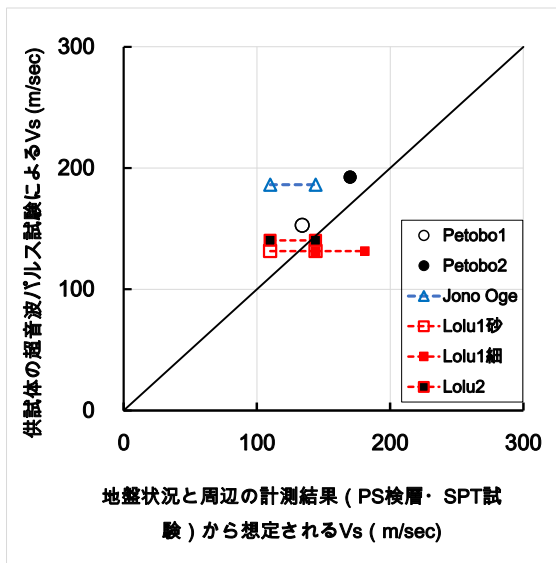
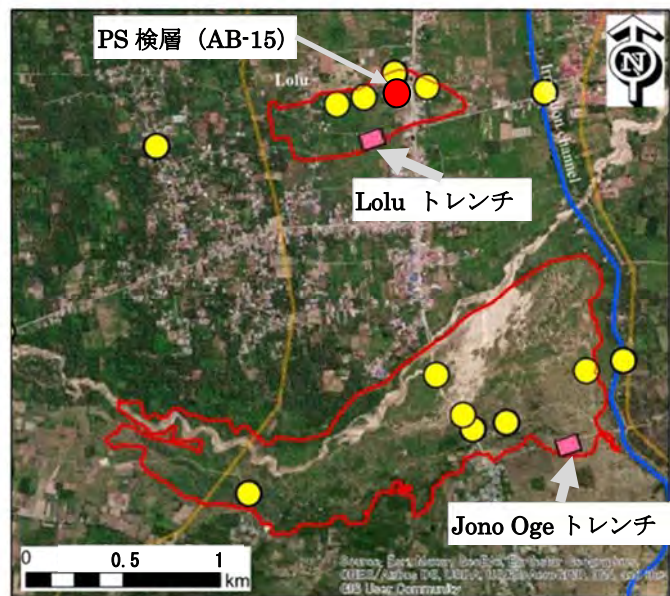


図 4-5 原位置と供試体の  $V_s$  の比較

出典：JICA 調査団作成



● JICA ボーリング調査

出典：JICA 調査団作成

図 4-6- Lolu・Jono Oge トレンチと周辺のボーリング



#### 4-1-5 試験結果の評価

4-1-4 で示した供試体に対し、三軸液状化試験装置およびねじりせん断試験装置を用いて、静的・動的力学特性を求めるため以下の試験を行った。

- 1) 三軸試験装置による単調載荷試験
- 2) ねじりせん断試験装置による単調載荷試験
- 3) 三軸試験装置による液状化試験
- 4) ねじりせん断試験装置による液状化試験およびその後の単調載荷試験
- 5) ねじりせん断試験装置による繰返し載荷後の単調載荷試験

これらの試験の内容、結果については、本技術協力の最終報告書の付属書□-3（データ集）に一式とりまとめた。以下にはこれらの試験から得られた、1) 単調載荷における応力-ひずみ関係、2) 液状化強度特性、3) 液状化後の残留強度特性、4) 繰返し載荷が変形特性に与える影響、について述べる。

なお、いずれも地下水位以下の土に地震が襲った状況を想定し、試験にあたっては供試体を完全飽和させ、サンプリング深度に相当する拘束圧を加え、非排水状態で単調載荷や繰返し載荷を行った。Petobo、Jono Oge、Loluの供試体に加えた有効拘束圧  $\sigma'_c$  は、それぞれ 90kN/m<sup>2</sup>、100kN/m<sup>2</sup>、80kN/m<sup>2</sup>である。また、バックプレッシャーは三軸試験装置では 200kN/m<sup>2</sup>、ねじりせん断試験装置では300kN/m<sup>2</sup>ほど加えた。

##### (1) 単調載荷における応力～ひずみ関係

繰返し載荷は与えず単調載荷だけ与えた試験は、三軸試験装置とねじりせん断試験装置の両方を用いて、3つの地区で1供試体ずつ行った。

三軸試験装置を用いて圧縮試験を行った結果を図 4-7 に示す。軸ひずみ～軸差応力関係を見ると、Petobo と Lolu の供試体では軸ひずみとともに軸差応力は大きくなり、ピークは生じない結果となった。特に Lolu の供試体では軸ひずみとともに軸差応力が大きく増加した。Jono Oge の供試体ではピークは出たが、その後の軸差応力の低下は少しであった。軸ひずみ～過剰間隙水圧関係を見ると Petobo と Lolu の供試体では軸ひずみが 2%付近まで間隙水圧は上昇し、その後低下していった。Jono Oge の供試体では低下することはなかったが、軸ひずみが 5%程度以降はわずかしか上昇しなかった。応力経路を見ると Petobo と Lolu の供試体では変相点を越えた後、破壊線に沿って上昇していく傾向となった。Jono Oge の供試体ではピーク後に少し原点側に動いたところで軸ひずみが 15%に達した。

次に、ねじりせん断試験装置を用いた試験結果を図 4-8 に示す。せん断ひずみ～せん断応力関係を見ると、3つの地区の供試体ともせん断ひずみとともにせん断応力は大きくなり、ピークは生じない結果となった。なお、Lolu の 1-10-1 の供試体はせん断ひずみが 15%程度まではせん断応力が他の供試体より小さくなったが、この供試体の相対密度が 27.4%と極端に小さいことによると考えられる。ただし、それでもひずみが大きくなるとせん断応力が急上昇する不思議な結果となった。せん断ひずみ～過剰間隙水圧関係を見ると、いずれの供試体でも数%のせん断ひずみまで間隙水圧は上昇し、ピークを越えた後低下していった。ピーク時は有効拘束圧の 30%付近まで上昇した。応力経路においても、いずれの供試体も変相点を越えた後破壊線に沿って上昇していく結果となった。

これらのことより、単調載荷試験ではいずれの供試体も通常の緩詰め～中密の砂質土と同様な挙動を示したと言えよう。

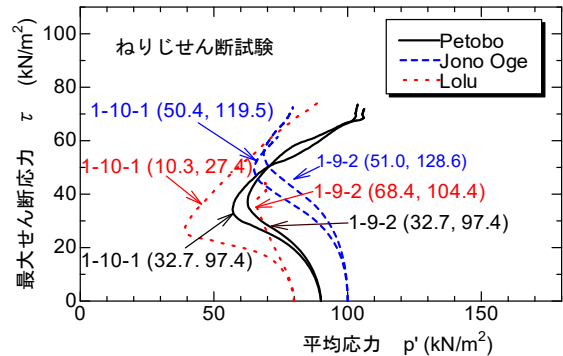
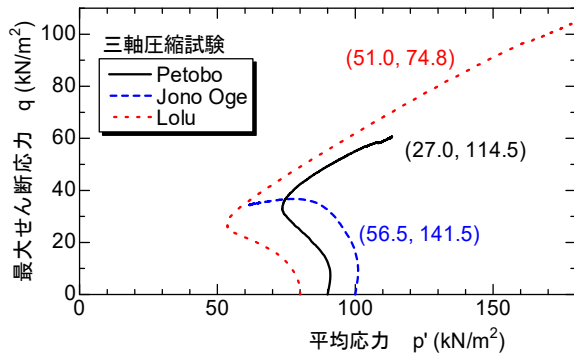
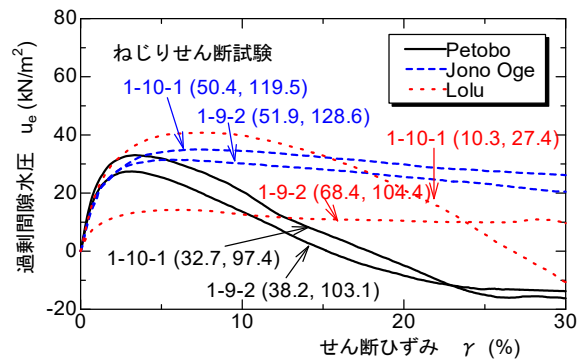
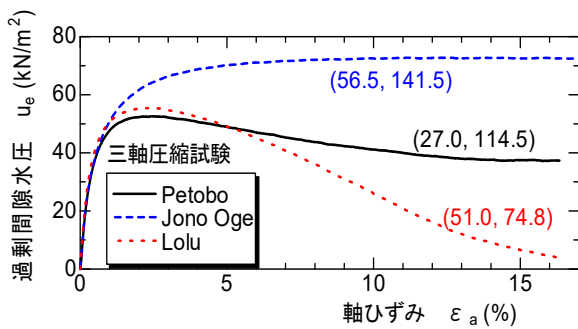
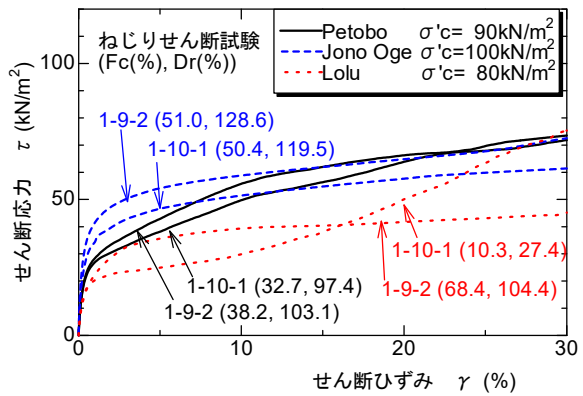
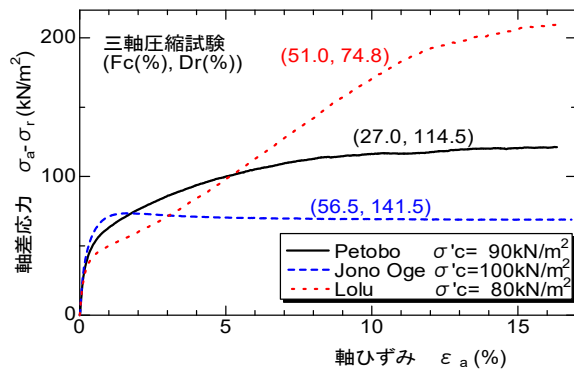


図 4-7 三軸圧縮試験装置による単調載荷試験でのひずみ～応力関係、ひずみ～間隙水圧関係、応力経路

図 4-8 ねじりせん断試験装置による単調載荷試験でのひずみ～応力関係、ひずみ～間隙水圧関係、応力経路

## (2) 液状化強度特性

液状化強度を求める試験は三軸試験装置を用いて Petobo と Lolu で 2 シリーズずつ、Jono Oge で 1 シリーズの試験を行った。また、ねじりせん断試験装置を用いて 3 つの地区で 1 供試体ずつ行った。繰返し荷重は一定振幅の正弦波荷重を三軸試験では軸方向に、ねじりせん断試験では水平方向に加えた。

まず、三軸試験装置を用いた液状化試験を行った結果のうち、繰返し応力振幅比  $R$  ( $\sigma_d/(2\sigma'_v)$ ) ~ 繰返し荷重回数  $N_c$  関係 (液状化強度曲線) を図 4-9 に示す。ただし、液状化発生の判断は軸ひずみ両振幅  $DA=5\%$  としている。20 回の繰返しで液状化する応力比 (液状化強度比)  $R_{L20}$  ( $DA=5\%$ ) は Petobo の供試体 No.1-1~1-4 では 0.180、No.2-1~2-4 では 0.285 となった。同じ地区の試験結果でも両者で  $R_{L20}$  が大きく異なっている。これは、前者の細粒分含有率  $F_c$  は 15~23% (平均 19.0%) と多くないのに対し、後者は 70~76% (平均 74.0%) と多いので、その違いによるものであろう。Jono Oge の供試体では  $R_{L20}$  ( $DA=5\%$ ) = 0.256 となった。Lolu の 4 本の供試体の  $F_c$  をみると、供試体 1-2 と 1-5 では  $F_c$  が 60% 前後 (平均 59.3%)、供試体 1-3 と 1-4 では 10% 前後 (平均 9.6%) と大きく二つに分かれており、また、繰返し応力比振幅比 ~ 繰返し荷重回数関係もそれぞれで大きく異なっていた。そこで、二つに分けて  $R_{L20}$  を推定すると、それぞれ 0.215、0.145 となった。

次に、ねじりせん断試験装置を用いて液状化試験を行った結果のうち、繰返し応力振幅比  $R$  ( $\tau_d/\sigma'_c$ ) ~ 繰返し荷重回数  $N_c$  関係 (液状化強度曲線) を図 4-10 に示す。ねじりせん断試験での液状化発生の判断は、せん断ひずみ両振幅  $\gamma DA=7.5\%$  としている。20 回の繰返しで液状化する応力比 (強度比)  $R_{L20}$  ( $\gamma DA=7.5\%$ ) は、Petobo ( $F_c=26.9\%$ ) で 0.165、Jono Oge ( $F_c=51.1\%$ ) で 0.277、Lolu ( $F_c=10.9\%$ ) で 0.148 となった。

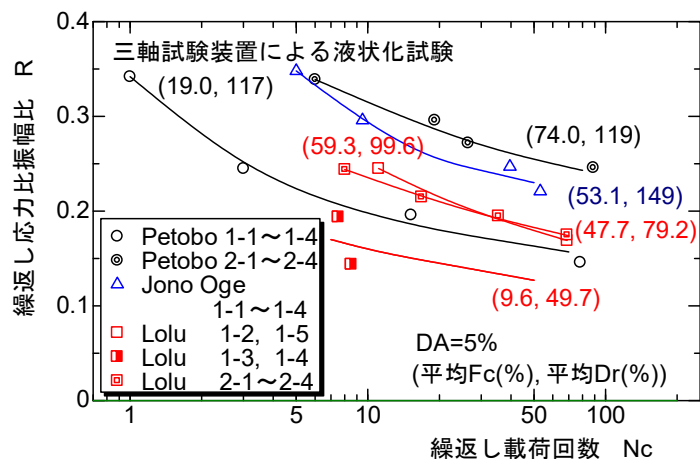


図 4-9 三軸試験装置による液状化試験結果

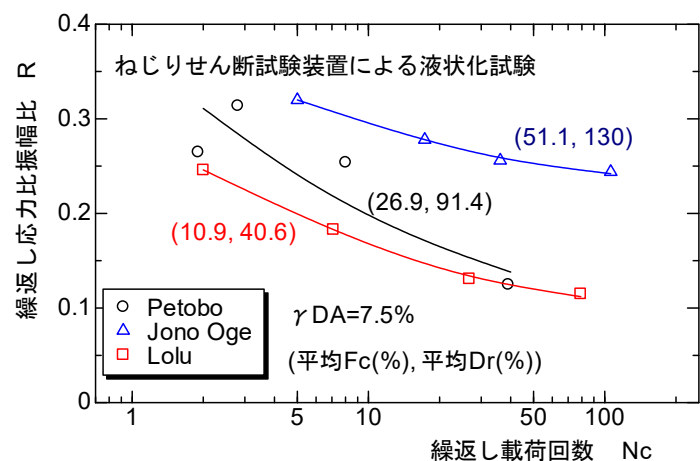


図 4-10 ねじりせん断試験装置による液状化試験結果

図 4-9 と図 4-10 の液状化強度曲線と  $F_c$  の関係を見てみると、 $F_c$  が多いほど上に位置する結果となった。そこで、表 4-3 に液状化強度比  $R_{L20}$  (DA=5%、 $\gamma$  DA=7.5%) と  $F_c$ 、相対密度  $Dr$  をまとめ、 $R_{L20}$

表 4-3 液状化強度比のまとめ

| 試験装置   | 地区       | 供試体No.                     | $R_{L20}$ | $F_c$ (%) | $Dr$ (%) |
|--------|----------|----------------------------|-----------|-----------|----------|
| 三軸     | Petobo   | 1-1~1-4                    | 0.180     | 19.0      | 117.0    |
|        |          | 2-1~2-4                    | 0.285     | 74.0      | 119.0    |
|        | Jono Oge | 1-1~1-4                    | 0.256     | 53.1      | 149.0    |
|        | Lolu     | 1-2と1-5                    | 0.215     | 59.3      | 99.6     |
|        |          | 1-3と1-4                    | 0.145     | 9.6       | 49.7     |
| ねじりせん断 | Petobo   | 1-6-1, 1-6-2, 1-7-1, 1-7-2 | 0.165     | 26.9      | 91.4     |
|        | Jono Oge | 1-6-1, 1-6-2, 1-7-1, 1-7-2 | 0.277     | 51.1      | 130.0    |
|        | Lolu     | 1-6-1, 1-6-2, 1-7-2, 1-7-1 | 0.148     | 10.9      | 40.6     |

( DA=5% 、  $\gamma$  DA=7.5%) と  $F_c$  の関係をプロットしてみたのが図 4-11 である。多少のばらつきはあるが全体に右上がりになっていて、細粒分が多いほど液状化強度比が大きい傾向となった。ただし、液状化強度には細粒分含有率に加えて密度も大きく影響するはずである。このパラメータとして相対密度  $Dr$  を今回はとっており、 $Dr$  が大きいほど液状化強度が大きいとも言える可能性がある。ところが、相対密度を求めるときの最大・最小密度自体も細粒分含有率の影響を受け、見た目と同じような締まり具合でも図 4-12 に示すように細粒分含有率が多いと相対密度の値が大きく出る傾向にある。したがって、厳密な言い方は出来ないが、図 4-11 をもとに、細粒分が多いほど液状化強度比が大きい傾向にあると単純に言って良いであろう。そして、液状化強度比  $R_{L20}$  (DA=5%、 $\gamma$  DA=7.5%) が 0.15~0.3 の範囲のため、今回試験を行った土は液状化し易い土~やや液状化し難い土と見做せる。また、三軸試験装置とねじりせん断試験装置による試験結果は同様の値となっていると言える。

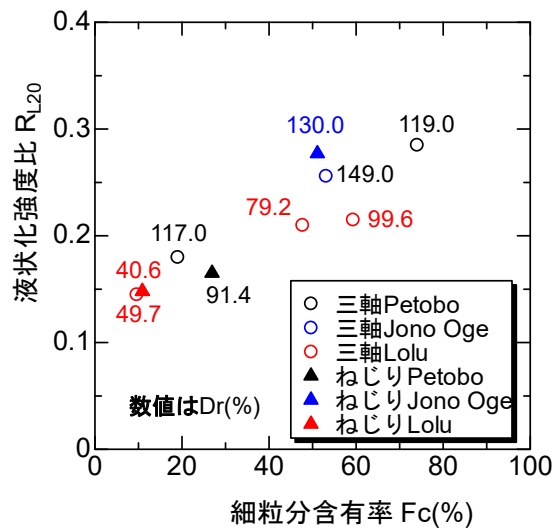


図 4-11 細粒分含有率と液状化強度比の関係

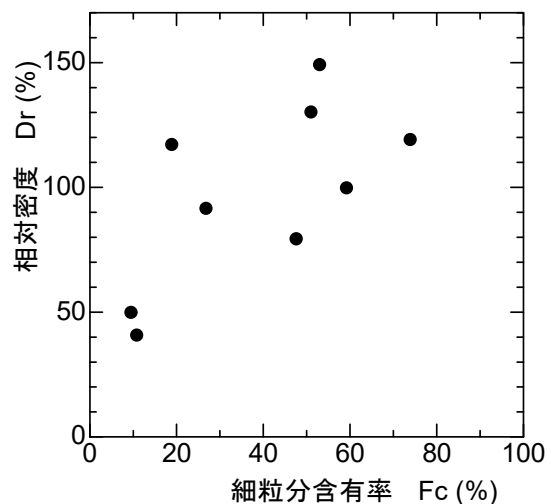


図 4-12 細粒分含有率と相対密度の関係

ところで、繰返し载荷中の挙動を見るために、三軸試験装置を用いた液状化試験での応力経路を描くと図 4-13 となる。ただし、各地区の試験のうち 20 波前後で液状化した供試体だけ取り出してある。また、横軸の平均主応力は (有効軸応力+2×有効側圧) /3 の

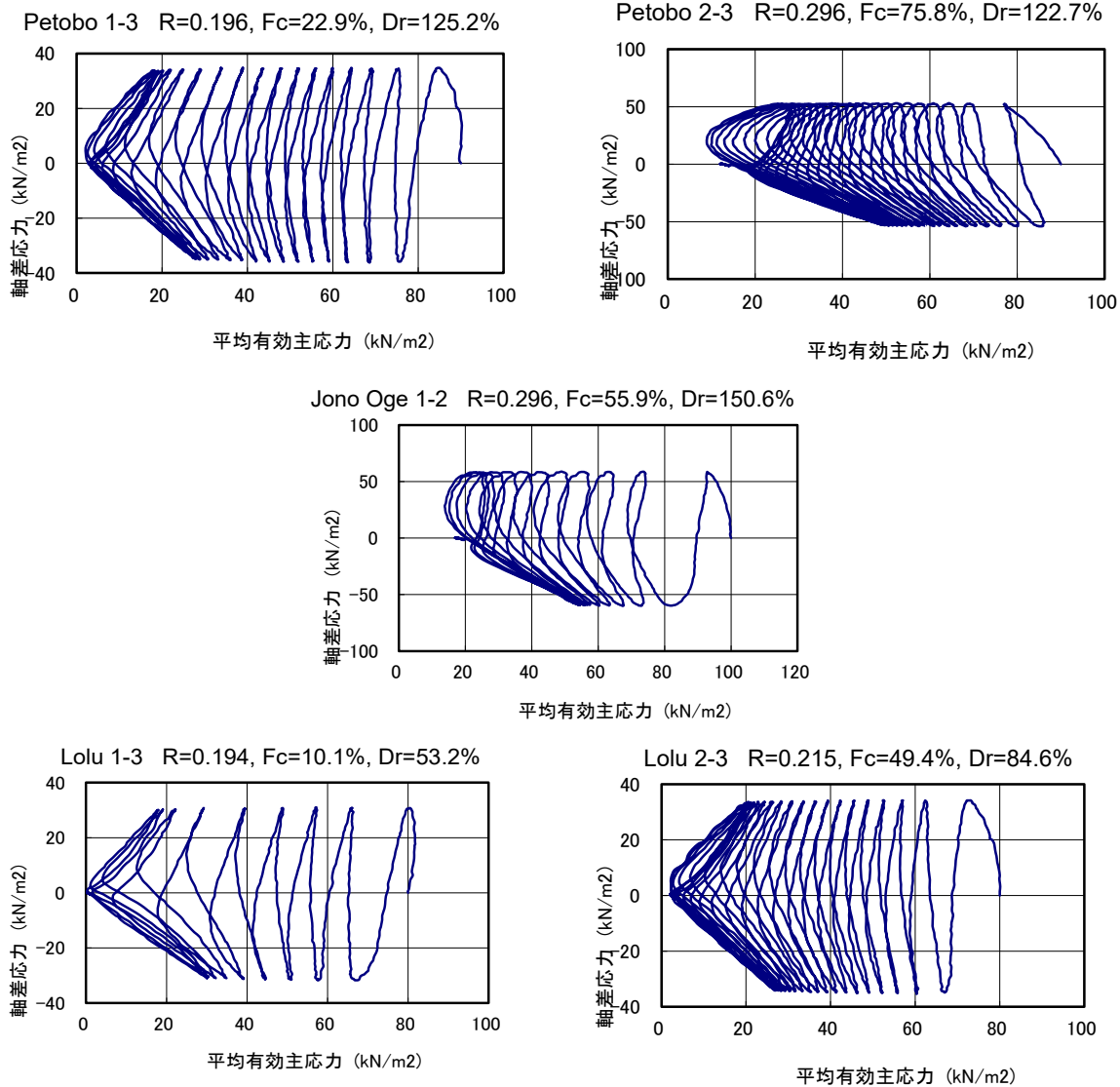


図 4-13 繰返し三軸試験装置による液状化試験での応力経路例

値で表している。5 つの応力経路の形を比較してみると細粒分含有率の影響を受けているようである。載荷開始から数波での圧縮側と伸張側の間隙水圧の出方では、細粒分含有率が多いほど伸張側の間隙水圧の出方が少ない傾向となった。また、液状化して大きく変形した段階においては、細粒分が多いと過剰間隙水圧は有効拘束圧まで上昇しない結果となった。

### (3) 液状化後の残留強度特性

(2) で述べた液状化強度を求めた試験のうち、ねじりせん断試験装置を用いた試験では、液状化発生後に繰返し載荷を止め、非排水状態を保ったまま単調載荷も行った。この単調載荷過程の応力～ひずみ関係は液状化した土のせん断強度・変形特性を表している。なお、液状化に達したと判断しているせん断ひずみ両振幅は前述したように 7.5% であるが、これは試験後に整理したデータから判断したものであり、実際の試験では 15% 以上に達した段階で繰返し載荷を止めている。液状化は繰返し載荷の途中に急激に発生するため、その止めたときのひずみの値も一定値には制御し難い。したがって、単調載荷に移る時点で経験しているせ

せん断ひずみ振幅は供試体によって異なり、また、15～45%程度の大きなひずみを受けていることに留意が必要である。簡単な言い方をすると「完全液状化後に単調載荷を行った」ということになる。

この完全液状化後の単調載荷におけるせん断ひずみ～せん断応力、せん断ひずみ～過剰間隙水圧関係を3つの地区に分けて示すと図4-14～4-16となる。全体にせん断ひずみが数%までは過剰間隙水圧比が1.0付近のままで、せん断応力も小さいまをを保ち、その後間隙水圧が下がるとともにせん断応力が増加する傾向となった。ただし、Petoboの1-6-2の供試体だけは30%のせん断ひずみに達しても間隙水圧はあまり下がらずせん断応力も小さいままであった。この供試体は3波目で液状化したが、その後3波ほど加えてせん断ひずみ両振幅が45%を超えて計測不能になっている。したがって、供試体自体も上部がねじれてくびれてしまつて単調載荷に移ること自体が問題の供試体であったと言える。一方、Loluの供試体では1-6-1の供試体を除いて3つの供試体とも数%のせん断ひずみ後の間隙水圧の下がり方が他

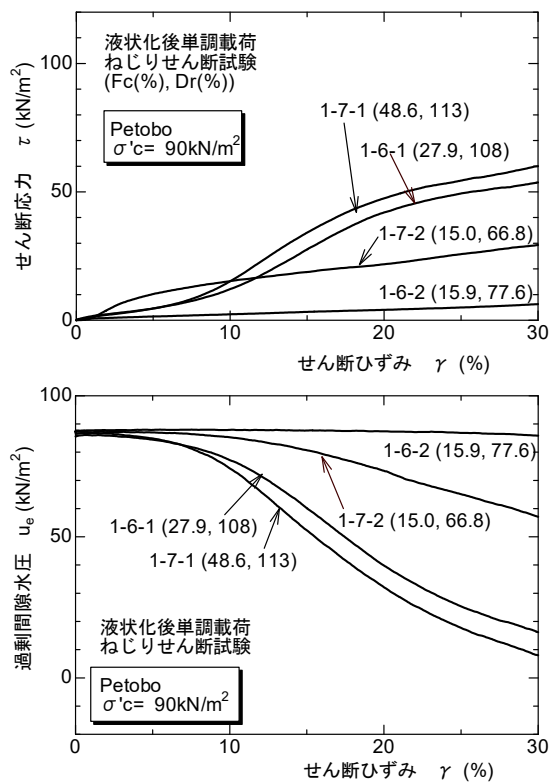


図 4-14 Petobo の試料に対するねじりせん断試験装置による液状化試験後の単調載荷時におけるひずみ～応力、ひずみ～間隙水圧関係

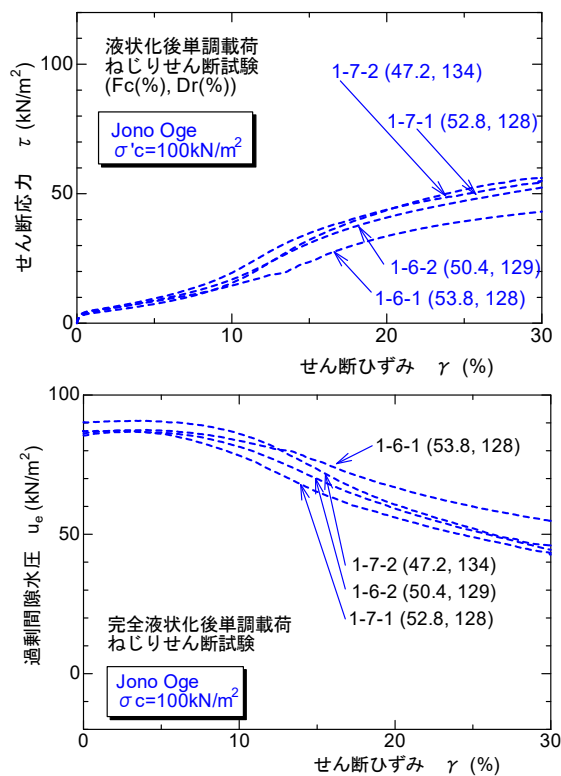


図 4-15 Jono Oge の試料に対するねじりせん断試験装置による液状化試験後の単調載荷時におけるひずみ～応力、ひずみ～間隙水圧関係



地区より大きく、せん断応力の増加割合も大きくなった。これは Lolu の試料が他地区の試料に比べて細粒分が少ない砂質土のためと考えられる。

さて、液状化した後の挙動として図 4-17 のようなタイプがあるとされている<sup>1)</sup>。これと図 4-14～4-16 を比較してみると、今回の試験結果では、繰返し荷重を与えて液状化した後でも Non-flow や Flow with limited deformation タイプに近い応力～ひずみ関係になった。なお、ピークが出なかったため残留強度は求めている。

#### (4) 繰返し荷重が変形特性に与える影響

液状化試験では前述したように液状化が発生した後も大きなひずみ振幅になるまで繰返し荷重を続けていて、激しく液状化した状態まで至らせている。これに対し、丁度液状化したあたりで繰返し荷重を止め、単調荷重に移る試験も行った。そして、液状化の判定で一般に用いられている指標の液状化に対する抵抗率（安全率） $R_L$  と単調荷重時のせん断剛性の関係を求め、繰返し荷重が変形特性に与える影響を検討した。この場合、残留変形を解析する一つの手法である「ALID」<sup>2)</sup> で用いている図 4-18 に示す荷重方法を適用してねじりせん断試験を行った。この方法ではある応力比  $R_d$  で繰返し荷重し、液状化が発生する前後で繰返し荷重を止め、その後単調荷重を行うものである。そして、液状化強度曲線を別途求めておいて、その回数で液状化する応力比  $R_L$  を  $R_d$  で除して  $R_L$  を求めるものである。また、液状化した場合その後の単調荷重試験でのせん断応力～せん断ひずみが、図 4-19 に示すように下に凸の形状になるので、それをバイリニア

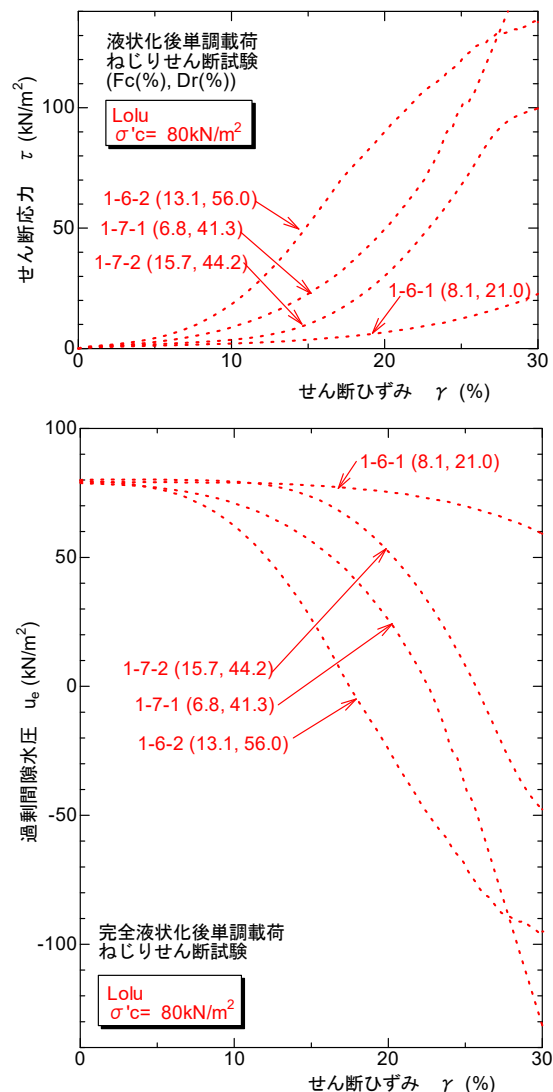


図 4-16 Lolu の試料に対するねじりせん断試験装置による液状化試験後の単調荷重時におけるひずみ～応力、ひずみ～間隙水圧関係

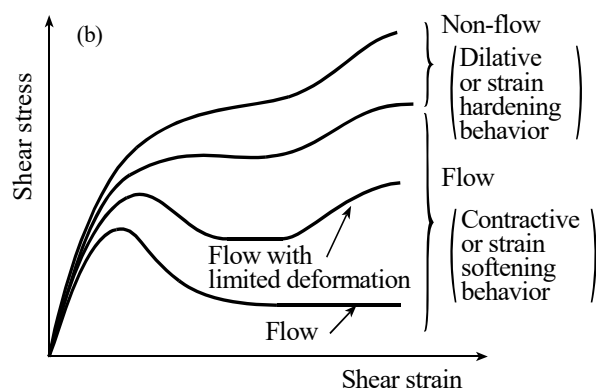


図 4-17 液状化後の挙動のイメージ<sup>1)</sup>

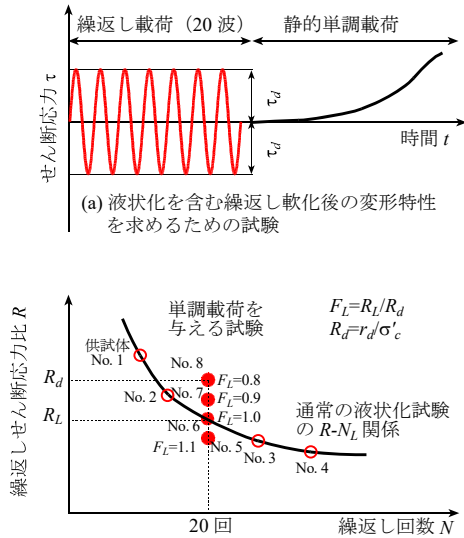


図 4-18 文献 2)における繰返し荷重後の単調荷重試験での  $F_L$  の求め方

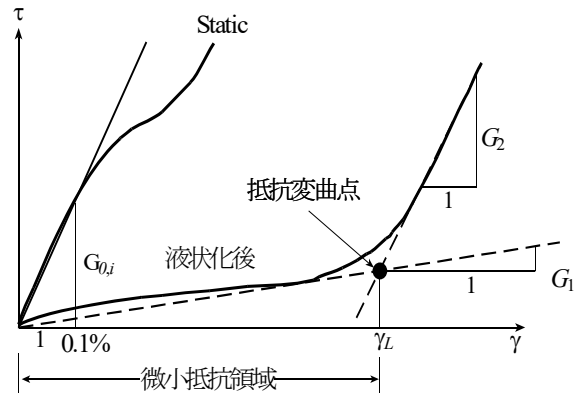


図 4-19 文献 2)におけるせん断応力-せん断ひずみのモデル化

でモデル化するものである。そして、パイリニアの第 1 勾配を  $G_1$  と表し、 $F_L$  つまり繰返し荷重による液状化の激しさがこの値に及ぼす影響を求める方法である。なお、文献 2) では繰返し荷重回数を 20 波として試験が行われているが、今回の試験では 20 波を基本としつつも、それ以前の回数でせん断ひずみ振幅が大きくなり過ぎて繰返し荷重を止めた試験もある。その場合は液状化強度曲線において止めた回数に該当する  $R_L$  を求めて  $F_L$  を算出している。

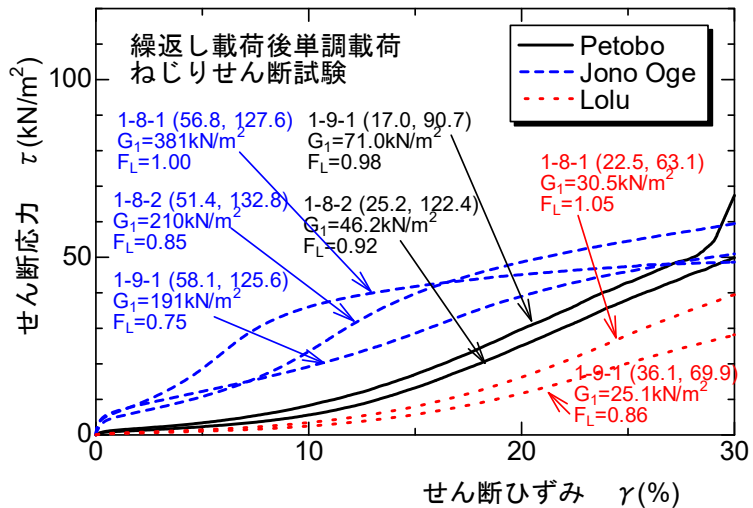


図 4-20 ねじりせん断試験装置による繰返し荷重後の単調荷重時におけるひずみ～応力関係

図 4-20 に繰返し荷重後の単調荷重時におけるせん断ひずみ～せん断応力関係を示す。また、それぞれの試験での  $F_L$  と  $G_1$  を示す。文献 2) では日本での土に対しこのような試験を行って、繰返し荷重を行わない単調荷重だけの試験での  $G_{0,i}$  (せん断ひずみが 0.1% のときの割線係数) から繰返し荷重によってせん断剛性率が低下した割合  $G_1/G_{0,i}$  と、 $F_L$ 、細粒分含有

率の間に図 4-21 に示した曲線のような関係があることが示されている。この図に今回の試験結果をプロットしてみると、データがばらついているが、液状化によるせん断剛性低下率は文献<sup>2)</sup>に示されている日本での既往のデータと同様であり、1/100~3/1000 程度となった。

### (5) 液状化試験および残留強度試験のまとめ

ボーリング調査の液状化の判定では各地点、各深度で液状化強度を推定する必要があるが、全ての地点で乱れの少ない試料を採取して液状化試験を行ってはいないので、 $N$  値や細粒分含有率から液状化強度を推定せざるを得ない。

ただし、 $N$  値や細粒分含有率から液状化強度を推定する簡易式（経験式）は世界中で数多く提案されてきていて、さらに日本国内でも多く提案されてきているので、どの方法で推定するかが問題になる。日本国内で最も広く用いられている式は道路橋示方書で用いられている式であるが、この式は日本国内の土に対して導き出されたものなので、Palu の土にも適用できるかどうか検討しておく必要がある。

そこで、3章-11項に示したブロックサンプルから求めた液状化強度比（繰返し三軸強度比） $R_L$  と、同様の層に対し調査した  $N$  値と  $F_c$  をもとに道路橋示方書の式（4章2項で後述）で推定した  $R_L$  を比較してみた。と図 4-22 にその結果を示す。

#### 1) 液状化強度特性に関して

Palu で長距離流動を発生させたと考えられる土の土質試験を行った。その結果、特に液状化し易いとかし難いとかなど、特殊な土とは思われない試験結果となった。液状化試験結果の  $R_L$  と、 $N$  値と  $F_c$  から道路橋示方書の簡易式を用いて推定した  $R_L$  は、細粒分が特に多い2つの試料を除いてほぼ同程度の値となっている。今回流動を生じた地区の表層の砂質土の  $F_c$  は 50%程度以下が大半であるので、Palu の地盤の液状化の判定にも道路橋示方書の簡易式が適用できると判断される。

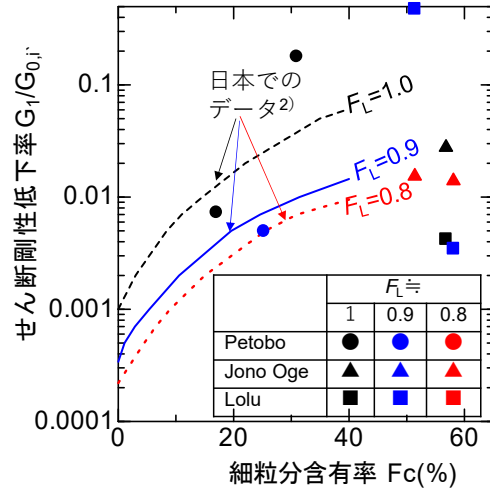
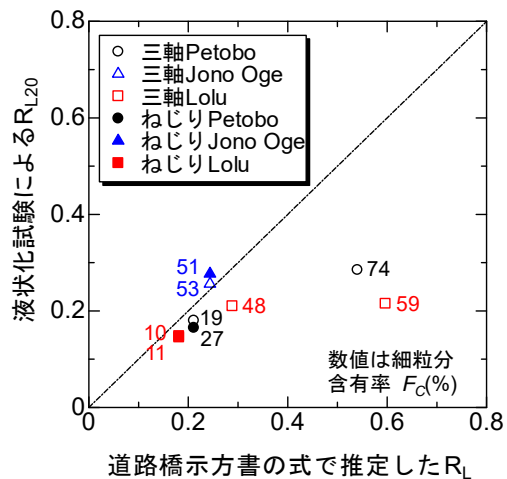


図 4-21 繰返し载荷によるせん断剛性の低下



出典：JICA 調査団データ

図 4-22 道路橋示方書の簡易式で推定した液状化強度と液状化試験結果との比較

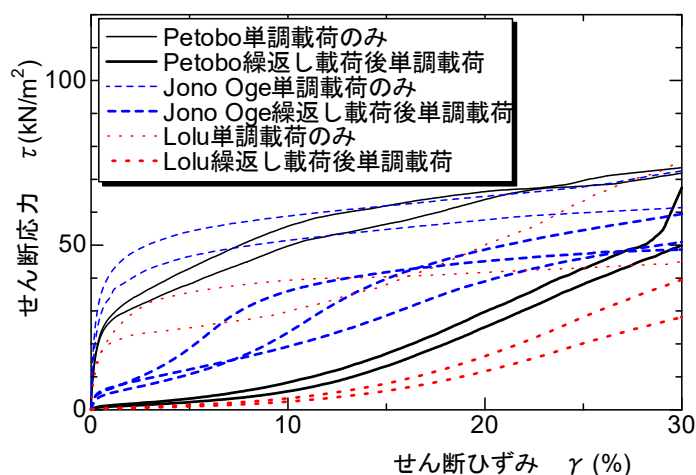
表 4-4 図 4-22 にプロットした値の設定根拠

| 地区       | 試料 | 深度<br>(m) | 繰返し三軸試験   |           | 繰返しねじり<br>せん断試験 |           | 道路橋示方書の式での $R_L$ の推定 ( $F_c$ は繰返<br>し三軸試験の供試体での値を用いた) |                     |     |          |      |       |
|----------|----|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------|---|---------------------|-----|----------|------|-------|
|          |    |           | $F_c(\%)$ | $R_{L20}$ | $F_c(\%)$       | $R_{L20}$ | N値  | $\sigma_v'(kN/m^2)$ | N1  | $C_{FC}$ | Na   | $R_L$ |
| Petobo   | P1 | 3.5       | 19        | 0.18      | 26.9            | 0.165     | 5   | 63.7                | 6.4 | 1.3      | 9.01 | 0.211 |
|          | P2 | 1.2       | 74        | 0.285     |                 |           | 2   | 21.84               | 3.7 | 4.83     | 27.4 | 0.54  |
| Jono Oge | J1 | 5.2       | 53.1      | 0.256     | 51.1            | 0.277     | 2.5   | 102.44              | 2.5 | 3.09     | 12.8 | 0.244 |
| Lolu     | L1 | 3.5       | 9.6       | 0.145     | 10.9            | 0.148     | 4.5   | 57.4                | 6   | 1        | 6    | 0.182 |
|          |    | 3.5       | 59.3      | 0.215     |                 |           | 4.5   | 57.4                | 6   | 3.61     | 28.1 | 0.597 |
|          | L2 | 4.5       | 47.7      | 0.21      |                 |           | 4.5   | 73.8                | 5.3 | 2.64     | 18.1 | 0.289 |

出典：JICA 調査団データ

2) 残留強度特性に関して

図 4-23 には、ねじりせん断試験装置にて非排水状態で単調荷のみを行った結果と、繰返し荷で液状化させた後に非排水状態で単調荷を行った結果を合わせて示す。後者では応力～ひずみ関係が下に凸になり、前者に比べてせん断剛性が大きく低下している。しかし、流動化を示す残留強度の低減傾向を示さず、本試験だけでは長距離流動現象を説明することが出来ない結果となった。



出典：JICA 調査団データ

図 4-23 中空ねじりせん断試験での応力～ひずみ関係

参考文献

- 1) Ishihara, K.: Soil behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford Engineering Science Series 46, Oxford Science Publications, 1996, pp.248
- 2) 安田進、吉田望、安達健司、規矩大義、石川敬祐：液状化に伴う残留変形の静的評価法、日本地震工学会論文集、第 16 巻、第 10 号、pp.31-50、2016.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee/16/10/16\\_10\\_31/pdf/~char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee/16/10/16_10_31/pdf/~char/ja)

## 4-2 液状化の検討及び評価

Nalodo の発生地域周辺では噴砂が認められ、沖積扇状地の扇端湧水帯にほぼ一致した範囲で広範囲の側方流動が発生している（2章参照）。また、震災直後の現地調査の段階から、液状化（インドネシア語の Likuifaksi）による災害と多くの研究者からの報告・報道があった。本検討では地震発生時の条件（地震動・地形・水位・土質）を復元もしくは想定して、地震発生時の液状化の程度を評価することを目的とした。

液状化の検討手法は、評価する対象の危険度・重要度・規模によって、以下①～③の順で、より高度な判定が行われるが、本検討では対象範囲が広大であること、液状化に関する既往の有用な調査・研究データがほとんど無いことから、「一般の土質調査・試験結果を基にした簡易な判定法」を採用し、本技術協力で行ったボーリング調査及びスウェーデンサウンディング（SWS）と室内土質試験結果に基づいて実施することとした。

- ① 一般の土質調査・試験結果を基にした簡易な判定法 **【採用】**
- ② 室内液状化試験と動的解析を行う詳細な方法
- ③ 模型振動台実験や原位置液状化試験を行う判定法

### 4-2-1 検討方法

#### （1）道路橋示方書の簡易式適用に対する考察

先に述べたように、本技術協力では、上記①の「一般的な土質調査・試験結果を基にした簡易な判定法」を採用した。以下にその検討方法について述べる。

この簡易判定方法の中にも、様々な方法が存在している。本技術協力では、基本的には日本で多用されている道路橋示方書に示される簡易式を採用することとした。これは、4-1-5 液状化強度試験において述べたが、液状化強度試験結果の  $R_L$  と、 $N$  値と  $F_c$  から道路橋示方書の簡易式を用いて推定した  $R_L$  は、細粒分が特に多い2つの試料を除いてほぼ同程度の値となったことが確認できており、今回流動を生じた地区の表層の砂質土の  $F_c$  は 50%程度以下が大半であるため、本検討においても、この道路橋示方書に示される簡易式が適用できると判断したことによる。

#### （2）検討方法

##### 1) 簡易判定方法の分類

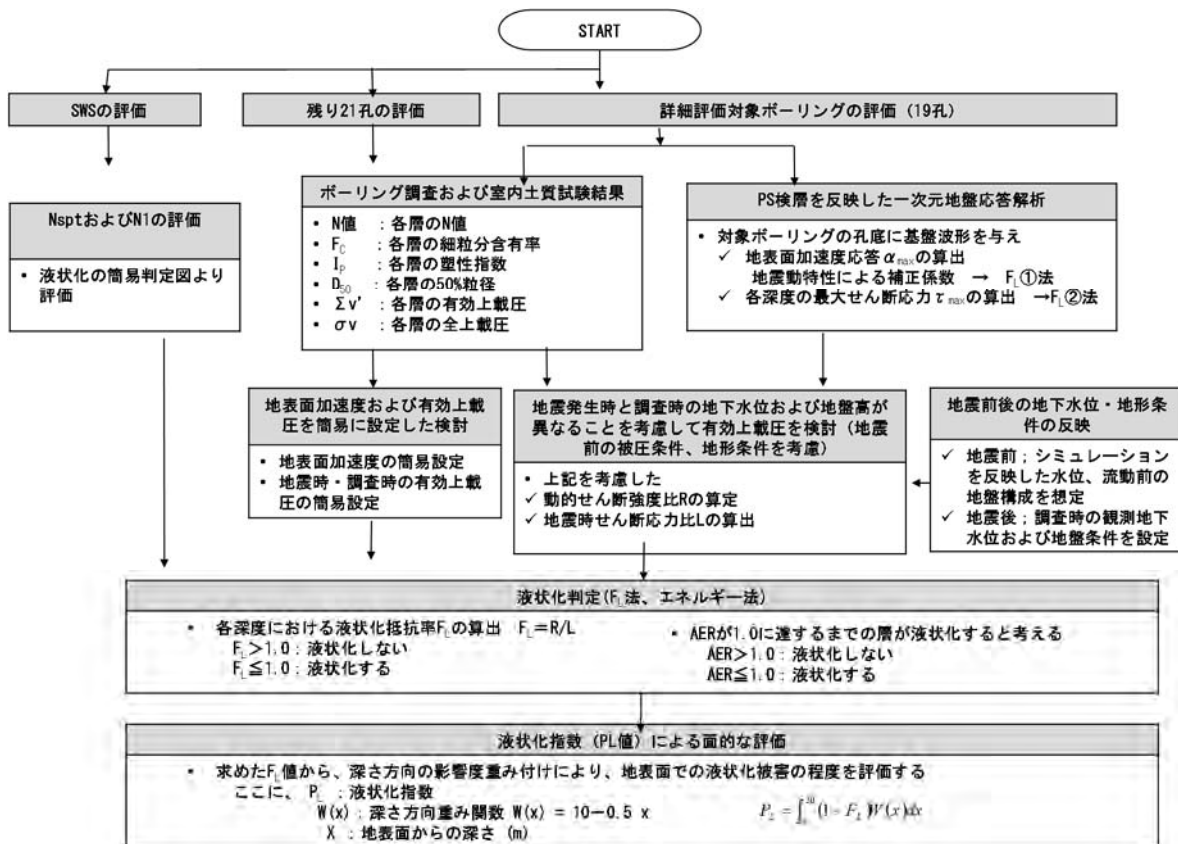
検討の対象は、第一次調査・第二次調査で行った延べ 40 孔のボーリング調査及び 33 箇所の SWS を対象とした。簡易判定法による液状化の判定は、道路橋示方書に示される簡易式を採用することを基本としたが、対象地域と地盤調査方法に応じた工夫を行った。検討方法の概要・分類を表 4-5 及び図 4-24 に示す。液状化の検討方法は、道路橋示方書 H29 に基づく応力法の液状化強度比の方法を基本とし、優先評価 19 孔を対象として累積損失エネルギーに着目したエネルギー法（國生 2013）による評価も行った。また、換算  $N$  値は評価できるが土質条件が確定できない SWS では、港湾判定チャートによる簡易判定を行った。

評価の方法は、対象地域・調査手法別に、地震動特性の設定方法・地形条件の設定方法・地下水位の設定方法（地震時・調査時）により大別される。

表 4-5 液状化の評価検討方法

|        | ボーリング調査<br>(評価優先の 19 孔)   |                           |                     | ボーリング調査<br>(残りの 21 孔)                   | SWS 調査              |
|--------|---|---------------------------|---------------------|---|---------------------|
| 対象地域   | Nalodo 発生地域及びその周辺   |                           |                     | 被災の少ない平地主体                              | Nalodo 内部主体         |
| 地震動    | PS 検層を反映した一次元地盤応答解析「SHAKE」により、地表面最大加速度・層別の最大せん断応力・各層の上昇エネルギーを評価 |                           |                     | 周辺の地盤応答解析結果を考慮して、地表面に震度 0.4G「392gal」を設定 | 等価加速度               |
| 地形条件   | 地すべりにより地盤高が大きく変化した場所は地震前を想定                                     |                           |                     | 改変なし                                    | 改変考慮なし              |
| 地下水位条件 | ボーリング調査時の区間水頭を反映<br>地震時は、2次元浸透流解析・ヒアリングなどを基に推定                  |                           |                     | 地震前の想定水位                                | 地表面付近               |
| 地盤強度   | 補正 $N$ 値  |                           |                     | 補正 $N$ 値                                | 等価 $N$ 値            |
| 土質条件   | ボーリング調査の土質試験結果を反映   |                           |                     | 同左                                      | 砂質土地盤               |
| 検討方法   | $F_L$ ①法<br>地表面に地盤応答解析から得られた最大加速度を与える                           | $F_L$ ②法<br>深度毎にせん断応力を与える | エネルギー法<br>(國生 2013) | $F_L$ ③法<br>地盤応答解析を行わず、地表面に最大加速度を与える    | 港湾基準に基づく判定チャートを簡易評価 |

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 4-24 液状化評価の方法概要



## 2) Nalodo 発生地域及びその周辺エリア（優先 19 孔）の評価方法

優先評価 19 孔のボーリング位置を図 4-26～図 4-27 に示す。優先評価 19 孔のボーリング位置は、Nalodo の発生地域内もしくは近傍にあり、強くもしくは厚く液状化が発生した可能性が高い地域である。そのため、Palu 低地で唯一取得された地震波形データから、評価対象 19 箇所地盤の地震動特性を一次元地盤応答解析「SHAKE」を用いて評価し、液状化検討に用いた。また、地震前の地盤条件及び地下水条件を可能な範囲で復元・推定した。地盤強度及び土質条件については、震災後の調査データをそのまま採用した。

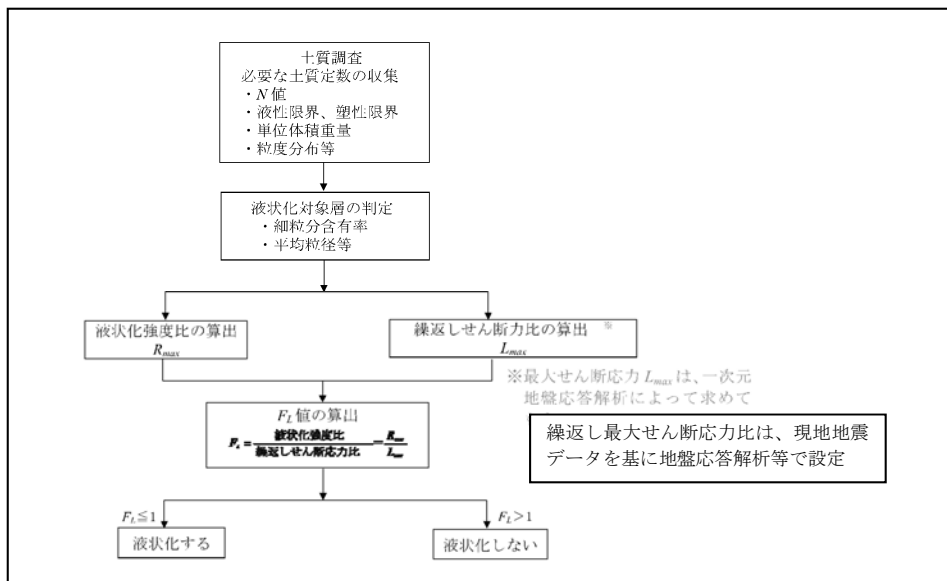
$F_L$  値法は、まず地盤内のある深さの液状化強度比（せん断応力で表した液状化強度と有効拘束圧の比） $R$  を、 $N$  値や粒径等から求める。次に、その土に地震時に加わる繰返しせん断応力比  $L$  を地表最大加速度などから推定して、両者の比をとって液状化に対する抵抗率（又は安全率とも呼ぶ） $F_L$  を次式で求める。

$$F_L = R/L$$

ここに、 $R$ 、 $R_{max}$ ：液状化強度比

$L$ 、 $L_{max}$ ：繰返しせん断応力比

算定の結果、 $F_L \leq 1$  であれば液状化の可能性があり、 $F_L > 1$  であれば可能性が小さいと判断する。図 4-25 に、 $F_L$  値法の基本的なフロー図を示す。



出典：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）p161-170、(社)日本道路協会、平成 29 年 11 月

図 4-25 液状化判定  $F_L$  法の基本フロー

ここで、2)及び後述の 3)の検討に用いた、 $F_L$  法（道路橋示方書）とエネルギー法の詳細について、示方書や参考文献を引用し、以下に詳述した。

### ① 道路橋示方書に示される液状化 $F_L$ 法

液状化判定の対象とする土層は、次の 3 条件すべてに該当する土層とした。

- 1) 地下水位が地表面から 10m 以内にあり、かつ、地表面から 20m 以内の深さに存在する飽和土層
- 2) 細粒分含有率  $F_C$  が 35%以下の土層、又は、 $F_C$  が 35%を超えても塑性指数  $I_p$  が 15 以下の土層
- 3) 50%粒径  $D_{50}$  が 10mm 以下で、かつ、10%粒径  $D_{10}$  が 1mm 以下である土層

出典：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）p161-162、(社)日本道路協会、平成 29 年 11 月

液状化判定の対象とする土層で、次式により算出される液状化に対する抵抗率  $F_L$  が 1.0 以下の土層については、液状化が生じる土層と判定した。

$$F_L = R/L \dots\dots\dots (2.1)$$

$$R = C_w R_L \dots\dots\dots (2.2)$$

$$L = rd \cdot k_{hg} \cdot \sigma_v / \sigma'_v \dots\dots\dots (2.3)$$

$$rd = 1.0 - 0.015x \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\sigma_v = \gamma t_1 h_w + \gamma t_2 (x - h_w) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\sigma'_v = \gamma' t_1 h_w + \gamma' t_2 (x - h_w) \dots\dots\dots (2.6)$$

$$C_w = R_L \text{ によって } 1 \sim 2 \text{ を採用} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

ここに、 $R$ ：動的せん断強度比  $L$ ：地震時せん断応力比  $C_w$ ：地震動特性による補正係数  $R_L$ ：繰返し三軸強度比  $rd$ ：地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数  $k_{hg}$ ：地盤面における水平震度  $\sigma_v$ ：全上載圧(kN/m<sup>2</sup>)  $\sigma'_v$ ：有効上載圧(kN/m<sup>2</sup>)  $x$ ：地表面からの深さ(m)  $\gamma t_1$ ：地下水位以浅の土の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)  $\gamma t_2$ ：地下水位以深の土の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)  $\gamma' t_2$ ：地下水位以深の土の有効単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)  $h_w$ ：地下水位の深さ(m)

出典：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）p161-164、(社)日本道路協会、平成 29 年 11 月

動的せん断強度比  $R$  は、有効上載圧による換算  $N$  値・粒度の影響を考慮した補正  $N$  値から導かれる各深さの繰返し三軸強度比  $R_L$  に地震動特性による補正係数  $C_w$  を乗じることによって算出した。

今次地震は、地震動の継続時間が短く、超せん断により基盤の  $S$  波速度よりも地盤破壊の伝搬速度が速いことが特徴である。地震動特性による補正係数  $C_w$  は、エネルギー法の液状化判定結果と  $F_L$ ①②法による結果を、地震動タイプ I とタイプ II で比較して、対応関係がよい、内陸部の直下型地震（タイプ II 地震動）の設定方法（ $R_L$  値によって 1～2 に変化）を用いた。

$$R_L = \left\{ \begin{array}{ll} 0.0882 \sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882 \sqrt{N_a/1.7 + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5}} & (14 \leq N_a) \end{array} \right\} \dots (2.8)$$

$$N_a = \left\{ \begin{array}{ll} c_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.47 & (D_{50} < 2\text{mm}) \\ \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1 & (D_{50} \geq 2\text{mm}) \end{array} \right\} \dots (2.9)$$

$$N_1 = 170N/(\sigma_{vb}' + 70) \dots (2.10)$$

$$c_{FC} = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{array} \right\} \dots (2.11)$$

ここに、 $R_L$ ：繰返し三軸強度比  $N$ ：標準貫入試験から得られる  $N$  値  $M_i$ ：有効上載圧  $100\text{kN/m}^2$  相当に換算した  $N$  値  $N_a$ ：粒度の影響を考慮した補正  $N$  値  $C_{FC}$ ：細粒分含有率による  $N$  値の補正係数  $FC$ ：細粒分含有率(%) (粒径  $75 \mu\text{m}$  以下の土粒子の通過質量百分率)  $D_{50}$ ：50%粒径(mm)

単位重量は下記の土質分類に対応する下記の一般値を採用し、平均粒径・細粒分含有率は、1m毎のペネ試料の粒度試験結果を用い、試験結果がない場合には一般値もしくは周辺地盤との関係で設定した。

| 土質分類   | 地下水位面下の<br>単位重量 $\gamma_{12}$ ( $\text{tf/m}^3$ ) | 地下水位面上の<br>単位重量 $\gamma_{11}$ ( $\text{tf/m}^3$ ) | 平均粒径<br>$D_{50}$ (mm) | 細粒分含有率<br>FC (%) |
|--------|---|---|-----------------------|------------------|
| 表土     | 1.7   | 1.5   | 0.02                  | 80               |
| シルト    | 1.75  | 1.55  | 0.025                 | 75               |
| 砂質シルト  | 1.8   | 1.6   | 0.04                  | 65               |
| シルト質細砂 | 1.8   | 1.6   | 0.07                  | 50               |
| 微細砂    | 1.85  | 1.65  | 0.1                   | 40               |
| 細砂     | 1.95  | 1.75  | 0.15                  | 30               |
| 中砂     | 2.0   | 1.8   | 0.35                  | 10               |
| 粗砂     | 2.0   | 1.8   | 0.6                   | 0                |
| 砂れき    | 2.1   | 1.9   | 2.0                   | 0                |

出典：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）p162、(社)日本道路協会、平成 29 年 11 月

地震時せん断応力比  $L$  は、 $F_L$ ①法や  $F_L$ ③法では地震応答解析から求めた地表面加速度  $A_{\max}$  を与えて、道路橋の式  $L = rd(A_{\max}/g)(\sigma_v/\sigma_v')$  で深さ方向の  $L$  を求め、 $F_L$ ②法では地震応答解析により各深度で得られた  $\tau_{\max}$  を  $\sigma'V$  で除して  $L$  を求めている。

地盤面における水平震度としては、BMKG で取得された地震波形から一次元の地盤応答解析を行い、工学的基盤面に地震波形を与え、地震動分布を算出した値を採用した。

ここで、地表面に地盤応答解析から最大水平加速度を与える方法——  $F_L$ ④法

各深度に地盤応答解析から最大水平加速度を与える方法——  $F_L$ ⑤法

検討ボーリングの位置周辺の地表面震度を一律 震度 0.4 を設定—— $F_L$ ⑥法

である。

$F_L$ 法の結果を用いて、液状化指数 ( $P_L$  値) を算定している。 $P_L$  値とは、 $F_L$  値の変化からそ

の地点における地表面での液状化の被害程度を評価する指標として提案されている（液状化の発生する深さや層厚、非液状化層の厚さが勘案されており、液状化危険度マップとして使われている）。

$P_L$  値の算出においては、以下を考慮して付加地盤の  $F_L$  値は  $P_L$  値の増分に影響しない設定とした。

- Nalodo の流動初期段階は、移動層が完全に液状化していない状況で、広範囲の地盤が移動した状況が確認されている。
- 移動層の流動開始時点の状態は、災害後に行った調査では  $N$  値・粒度分布などは正確にはわからない（想定することが困難）。また、移動して流出した地盤の土質・ $N$  値は想定域を出ない。
- $F_L$  値の地震時せん断応力比 ( $L$ ) の算出では、付加地盤部分の有効上載圧を考慮することにより、それより深部の上載圧増分を考慮することにより  $F_L$  値が正しく評価される。
- 移動層と不動地盤の境界（すべり面）に対して、それより下位層から液状化による余剰水供給される程度を評価することが必要。
- そのため、 $P_L$  値の評価では、不確定要素のある付加地盤（流出した地盤部分の仮定）の液状化の有無にかかわらず、 $P_L$  値の増分の影響しない設定とした。

液状化指数  $P_L$  値は、液状化判定の安全率  $F_L$  値の深さ方向の変化から液状化の激しさの程度を示す指標として岩崎・龍岡等の式をもとに提案されたものである。 $P_L$  値は次式で算出される。

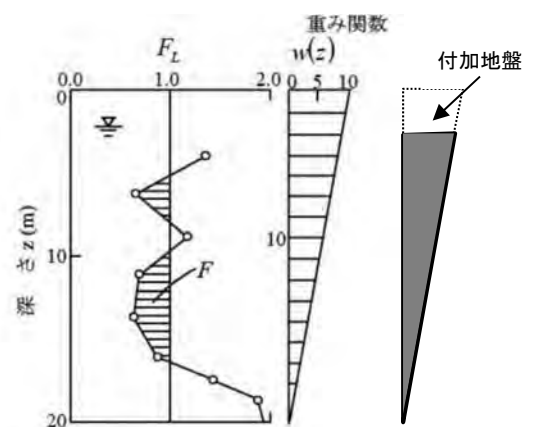
$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) \cdot w(z) dz$$

ここに、 $F_L > 1$  では  $(1 - F_L) = 0$  とし、 $w(z)$  は深さ  $z$  に対する重み関数で、 $w(z) = 10 - 0.5z$  である。

ただし、付加地盤がある場合の評価では付加地盤区間の重み関数  $w(z) = 0$  にすることにより当該区間は  $P_L$  値の増分に影響しない設定とした。

日本における過去の住宅に対する被害例から  $P_L$  値と液状化の危険度の関係は下記の 4 分類で評価されている。

本検討では、極めて危険度が高い区間を更に 20 と 30 に境界値を設け細分した。



液状化指数  $P_L$  値の求め方

| $P_L$ 値           | 液状化危険度                          |
|-------------------|---------------------------------|
| $P_L = 0$         | かなり低い。詳細な調査は不要。                 |
| $0 < P_L \leq 5$  | 低い。特に重要な構造物では詳細な調査が必要。          |
| $5 < P_L \leq 15$ | 高い。重要な構造物に対して詳細な調査が必要。液状化対策が必要。 |
| $P_L \geq 15$     | 極めて高い。詳細な調査と液状化対策が不可避。          |

出典：「岩崎・龍岡等(1980)地震時地盤液状化程度の予測について」を調査団が一部加筆

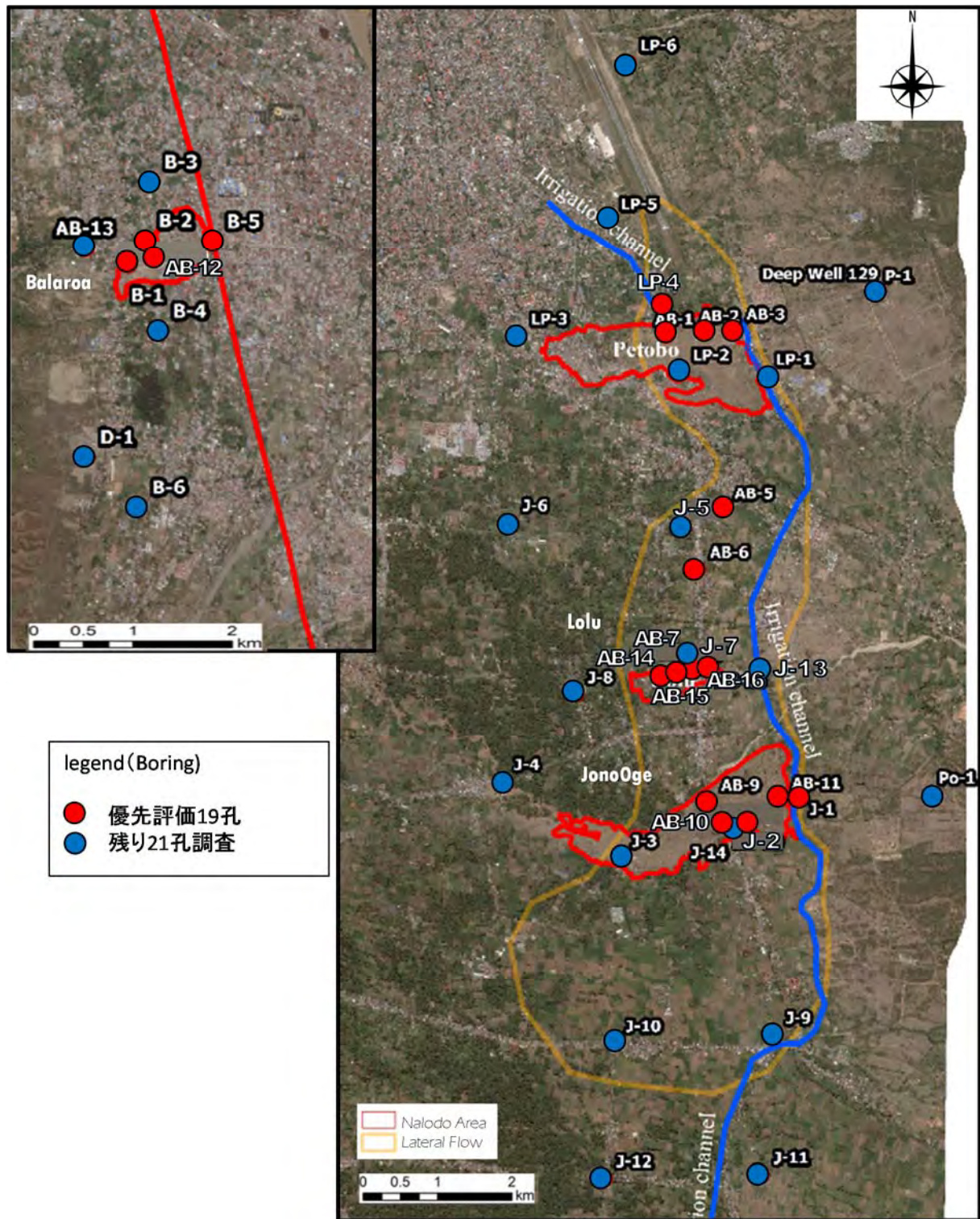
## ② エネルギー法

エネルギー法については、國生委員の過去に執筆された文献を引用させていただいき、以下に示した。

エネルギー法による液状化判定においては、砂地盤の液状化発生に必要な単位体積当たり（累積）損失エネルギー $\Delta W$  に対して、地震波によりどれだけの上昇エネルギー $E_u$  が単位面積当りに供給されるかを検討することになる。ここでは液状化発生の基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'c$ から対応する基準化ひずみエネルギー $W/\sigma'c$ を求め、これと上昇エネルギー $E_u$  とを比較することにより液状化の発生を判断する。エネルギー法による液状化判定の具体的手順は以下の通りである。

- ① 地盤を厚さ 1m の水平層に分割し、各層の  $M1$  値から  $R_L$  を求め、基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma'c$ を求める。さらに  $\Delta W/\sigma'c$ に対応した基準化ひずみエネルギー $W/\sigma'c$ を算定する。
- ② 各要素の有効上載圧  $\sigma'v$ から  $\sigma'c'=(1+2K_0)\sigma'v/3$  とし、厚さ  $H$  の各要素の  $WH$  を算定する。
- ③ 各要素について、液状化エネルギー容量  $WH$  と地震波上昇エネルギー最終値  $E_{uf}$  の比  $WH/E_{uf}$  を計算し、その値が小さい要素ほど早く液状化し易いと考え、各要素に  $i=1, 2, 3, \dots$ の番号付けをする。その順に各要素の  $WH/E_{uf}$  の値を加え合わせ、その累計（累積エネルギー比と呼び  $AER$  と表す）が 1.0 に達するまでの要素が液状化すると考える。

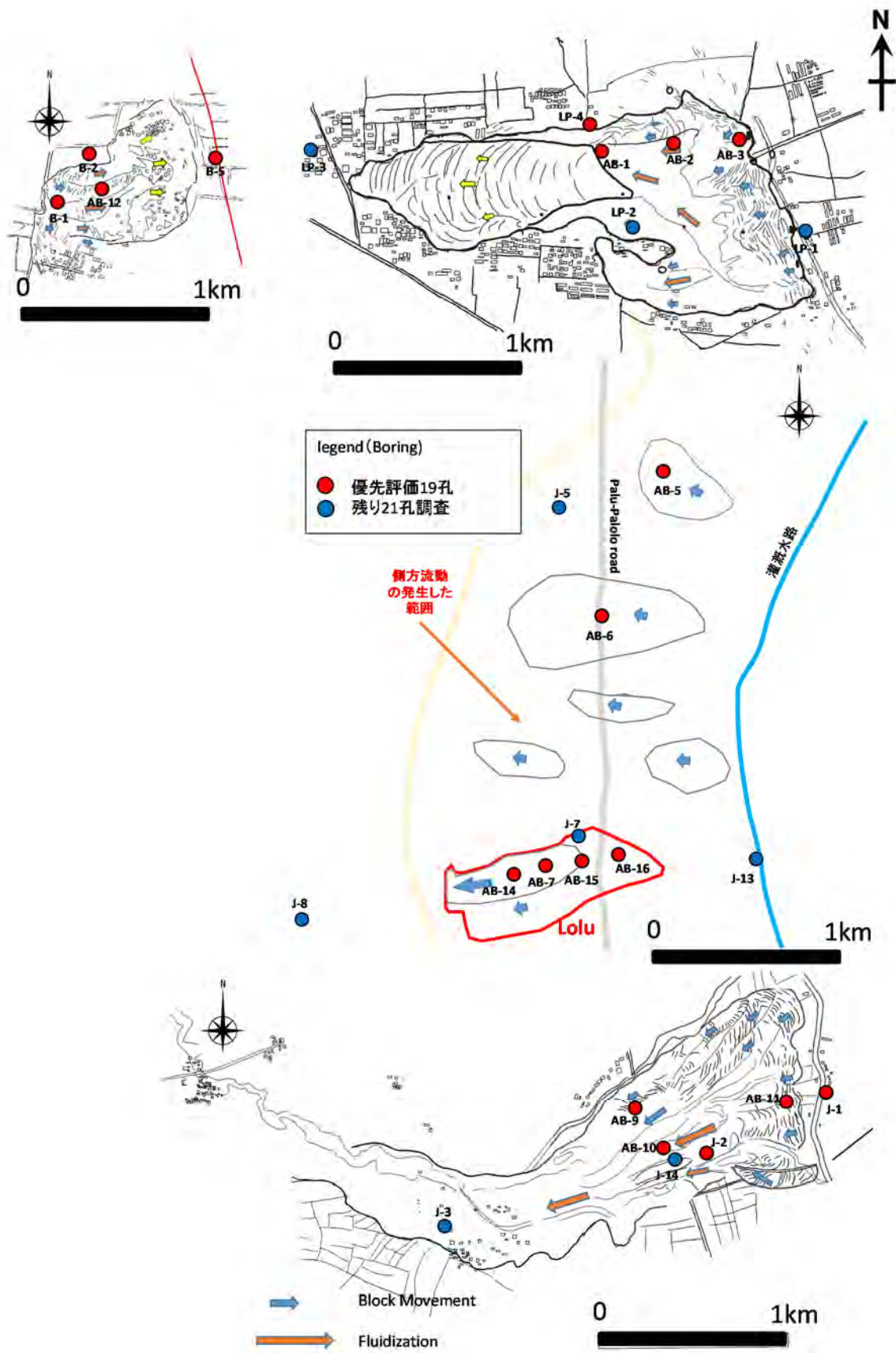
出典：國生 剛治 (2013) : エネルギーによる液状化判定法の適用性検討と  $R_L$  法との 対比, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.3, pp. 463-475, 2013.



出典：JICA 調査団作成

図 4-26 優先評価 19 孔と残り 21 孔のボーリング位置





出典：JICA 調査団作成

図 4-27 優先評価のボーリング位置 (NaIodo 内部)

### 3) 被災の少ない平地主体エリア（残り 21 孔）の評価方法

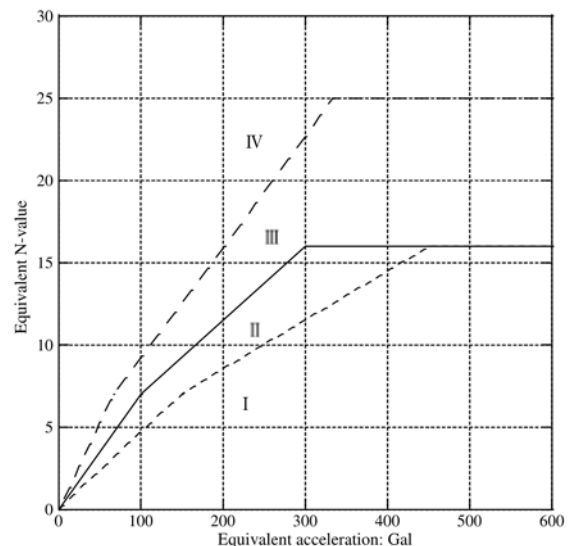
一方、ボーリング調査の残り 21 孔は、表層地盤から  $N$  値 30 以上を示す場合や地下水位が 10m より深いなど、液状化しづらいボーリングを主体とする（図 4-26～図 4-27 に青○で表示）。これらのボーリング調査では、一次元の地盤応答解析は実施せず、優先 19 孔で行った結果を参考として、やや大きめの地表面最大震度 0.4 を与え検討を  $F_L$ ③法で行った。また、地盤変状がほとんど無い地域であることもあって、地盤条件、地盤強度及び土質条件はボーリング調査データを使用した。

地下水条件については、土地利用（水田）や調査時の観測水位を考慮して設定した。動的せん断強度比  $R$  は、有効上載圧による換算  $N$  値・粒度の影響を考慮した補正  $N$  値から導かれる各深さの繰返し三軸強度比  $R_L$  に地震動特性による補正係数  $C_w$ （タイプ II 地震動）を乗じることによって算出した。地震時せん断応力比  $L$  は、一律に設定した地表面最大加速度から道路橋示方書に準拠して算出し、 $F_L$  値 ( $F_L=R/L$ ) を得た ( $F_L$ ③方法)。平面的な液状化分布の評価を行うために、液状化指数 ( $P_L$  値) を、優先 19 孔と同様に算定している。優先 19 孔との主な違いは地盤応答解析を実施することを省略して、やや大きめの地表面最大加速度を与えていることであり、それでも液状化しないと判断される箇所が多いことを示すことを考慮している。

### 4) Nalodo 内部エリア（SWS のみ）の検討

SWS の評価は、土質試料のサンプリングが行えないため、ボーリング調査やトレンチ調査で確認された細粒分質砂等の均質地盤を仮定して、換算  $N$  値から評価を行った。日本における港湾基準は液状化判定チャート（図 4-28）を用いて液状化判定を行う方法を用いている。

この図は、等価加速度と等価  $N$  値を図上にプロットすることによって液状化の程度を判定するものである。ゾーン I は液状化が発生し、ゾーン II は液状化が発生する可能性が高いことを示している。ゾーン III は液状化の可能性が低いことを示し、ゾーン IV は液状化が起こらない範囲を示す。ゾーン II とゾーン III の境界によって、液状化の有無を判定した。



出典：Sassa 等（2016）Simplified Liquefaction Prediction and Assessment Method Considering Waveforms and Durations of Earthquakes

図 4-28 港湾技術研究所報告による液状化の判定チャート

Sassa 等（2016）の原典では、図中の equivalent acceleration とは、地表最大加速の 70% を意図しており（原典の式 1 と 2）、現地の最大加速度は地盤応答解析の結果から 400gal 程度（後述の地盤応答解析参照）であることが判っているので、等価な加速度は 280gal となり、等価

限界  $N$  値は 15 と読み取れる。ただし、この  $N$  値は Equivalent  $N$ -value で、有効土被り圧力が 65kPa のときに換算した  $N$  値なので(原典の式 3)、仮に深さ 6 m で土被り圧が 40kPa の時は、 $N$  値は 12.9 が等価限界  $N$  値となる。本検討では深さ 10m で  $N < 15$ 、深さ 6m で  $N < 13$  を目安に、液状化の可能性を検討し、表層から液状化層下端までの概略の厚さを評価した。

#### 4-2-2 優先 19 孔の液状化評価 (FL①法・FL②法・エネルギー法)

##### (1) 検討パラメータの設定概要

地形・水位、土質のパラメータ設定概要は、表 4-6 に示したとおりである。

- 調査時の地下水位；調査完了時の作業前水位を基本とした。ただし、被圧が発生したのは深さ 20～30m の深部区間である事が多く、調査時  $N$  値補正の水位は、3 章で整理した掘進時の水位変動から得られる調査区間の間隙水圧分布を優先した。
- 沖積／洪積の境界；ボーリングの観察で赤色風化の影響の有無や  $N$  値分布から想定される境界深度を記載した。本深度は、3 章で整理した C14 年代測定結果の結果から、Nalodo の発生地域の沖積層の厚さは 10m 以上であることが判っている（液状化判定結果を見る場合の参考値で、計算には直接に使用していない）。
- 地表面標高；衛星データ (AW3D\_DTM の地震前・地震後) から、調査対象地点の地表面標高を確認し、大きく地盤が低下した範囲は、地震前の条件を復元するために付加地盤を設定した。
- 仮想地盤の土質条件；地震前の条件に復元するための仮想地盤は、残存する直下（ボーリング調査の最上部）の土質・ $N$  値と同じと仮定した。ただし、明らかに地震前から改変された状態の場合には周辺地盤状況を参考とした。なお、後述する液状化指数 ( $P_L$  値) 評価では、地震前の状態に復元した区間の影響を除外している。
- 地震時の被圧条件；4 章 3 項で検討した Petobo の浸透流解析結果及び地元住民からのヒアリング・住民が生活していた状況を考慮し、表層地盤に 2m の不飽和帯を設定するとともに、被圧が発生していたと考えられる場所には最大 GL+2m の被圧を設定した。ただし、これ以上に大きな被圧が地震直後の短時間に発生した可能性は否定できない。
- 地表面の最大水平震度；優先評価 19 孔の一次元地盤応答解析の結果を採用した。地盤条件によって地震動の増幅特性が異なることが知られているが、工学的基盤面相当の地盤に引き戻した（結果として引き戻し波形と観測波形はほぼ同じ波形となった）地震動に比べて、Nalodo の発生地域では 1.3～2 倍の震動増幅が算出されている。

表 4-6 優先 19 孔のパラメータ設定概要

| 位置      | ボーリング名 | ボ・リング調査時の孔内水位 (GL-m) |           | 沖積/洪積境界 (ボ・リングコアの境界深度 GL-m) | 地表面標高   |        | 付加する層厚   |          | 地震時の地下水位 (GL-m) | 地盤応答解析 (地表面水平震度) |                |                |        | 地盤流動規模     |         |
|---------|--------|----------------------|-----------|-----------------------------|---------|--------|----------|----------|-----------------|------------------|----------------|----------------|--------|------------|---------|
|         |        | 地震後(調査完了時)           | 補正N値評価の水位 |                             | 地震後(現況) | 地震発生時  | 地表面標高の変化 | 復元地盤のN値  |                 | 通常の被圧状態 (L評価)    | 水平震度 (EW)SHAKE | 水平震度 (NS)SHAKE | 地盤種別   | 地盤の固有周期 TG | 大規模流動の中 |
| Balaroa | B-1    | -1.95                | 0.00      | 23.00                       | 40.40m  | 44.40m | 4.00m    | N=6 砂質土  | -1.00m          | 0.42             | 0.44           | III 種地盤        | 0.6587 | ● 頭部       | >200    |
|         | B-2    | 2.10                 | 2.10      | 25.00                       | 55.40m  | 55.40m | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.39             | 0.34           | II 種地盤         | 0.4473 | 外          | 2m 以下   |
|         | B-5    | 0.55                 | 0.55      | 24.00                       | 19.00m  | 19.00m | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.38             | 0.30           | II 種地盤         | 0.4546 | 外          | 2m 以下   |
|         | AB-12  | -0.15                | 0.00      | 20.50                       | 29.30m  | 31.30m | 2.00m    | N=2 砂質土  | -1.00m          | 0.38             | 0.41           | II 種地盤         | 0.5017 | ● 内部       | >200    |
| Petobo  | LP-4   | 0.80                 | 0.80      | 25.00                       | 53.40m  | 53.40m | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.36             | 0.31           | II 種地盤         | 0.4282 | 外          | 20m     |
|         | AB-1   | -2.00                | 0.00      | 21.40                       | 51.80m  | 55.80m | 4.00m    | N=2 砂質土  | -2.00m          | 0.44             | 0.48           | III 種地盤        | 0.6709 | ● 頭部       | >200    |
|         | AB-2   | -3.40                | 0.00      | 22.80                       | 59.80m  | 64.80m | 5.00m    | N=2 砂質土  | -2.00m          | 0.43             | 0.47           | III 種地盤        | 0.6372 | ● 内部       | >200    |
|         | AB-3   | 4.83                 | 4.83      | 17.00                       | 72.00m  | 78.00m | 6.00m    | N=2 砂質土  | -0.50m          | 0.45             | 0.52           | III 種地盤        | 0.6675 | ● 内部       | 50m     |
| JonoOge | J-1    | 14.80                | 14.80     | 17.00                       | 83.70m  | 83.70m | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.38             | 0.26           | II 種地盤         | 0.2002 | 外          | 2m 以下   |
|         | J-2    | 3.20                 | 3.20      | 15.00                       | 64.90m  | 66.90m | 2.00m    | N=4 粘性土  | 0.00m           | 0.40             | 0.36           | II 種地盤         | 0.3767 | ● 内部       | >200    |
|         | AB-9   | 2.63                 | 2.63      | 23.00                       | 63.10m  | 65.10m | 2.00m    | N=10 砂質土 | -1.00m          | 0.34             | 0.40           | II 種地盤         | 0.3682 | ● 内部       | >200    |
|         | AB-10  | 0.81                 | 0.81      | 25.90                       | 62.40m  | 64.40m | 2.00m    | N=2 粘性土  | -1.00m          | 0.43             | 0.40           | II 種地盤         | 0.5125 | ● 内部       | >200    |
|         | AB-11  | 6.50                 | 6.50      | 11.60                       | 72.90m  | 76.90m | 4.00m    | N=3 砂質土  | 0.00m           | 0.45             | 0.49           | III 種地盤        | 0.6304 | ● 頭部       | 30m     |
| Biomaru | AB-5   | 1.68                 | 1.68      | 28.40                       | 68.90m  | 68.90m | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.41             | 0.31           | II 種地盤         | 0.4683 | 外          | 30m     |
|         | AB-6   | 3.21                 | 3.21      | 27.50                       | 69.70m  | 69.7   | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.40             | 0.30           | II 種地盤         | 0.4504 | 外          | 20m     |
|         | AB-7   | 2.00                 | 2.00      | 23.50                       | 65.00m  | 65     | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.37             | 0.36           | II 種地盤         | 0.5213 | ● 内部       | 125m    |
| Lolu    | AB-14  | 3.56                 | 3.56      | 17.80                       | 63.50m  | 63.50m | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.35             | 0.35           | II 種地盤         | 0.4697 | ● 内部       | 130m    |
|         | AB-15  | 4.97                 | 4.97      | 17.00                       | 67.70m  | 67.70m | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.35             | 0.31           | II 種地盤         | 0.4415 | ● 内部       | 30m     |
|         | AB-16  | 2.00                 | 7.01      | 19.20                       | 71.30m  | 71.30m | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.35             | 0.30           | II 種地盤         | 0.4346 | ● 内部       | 10m     |

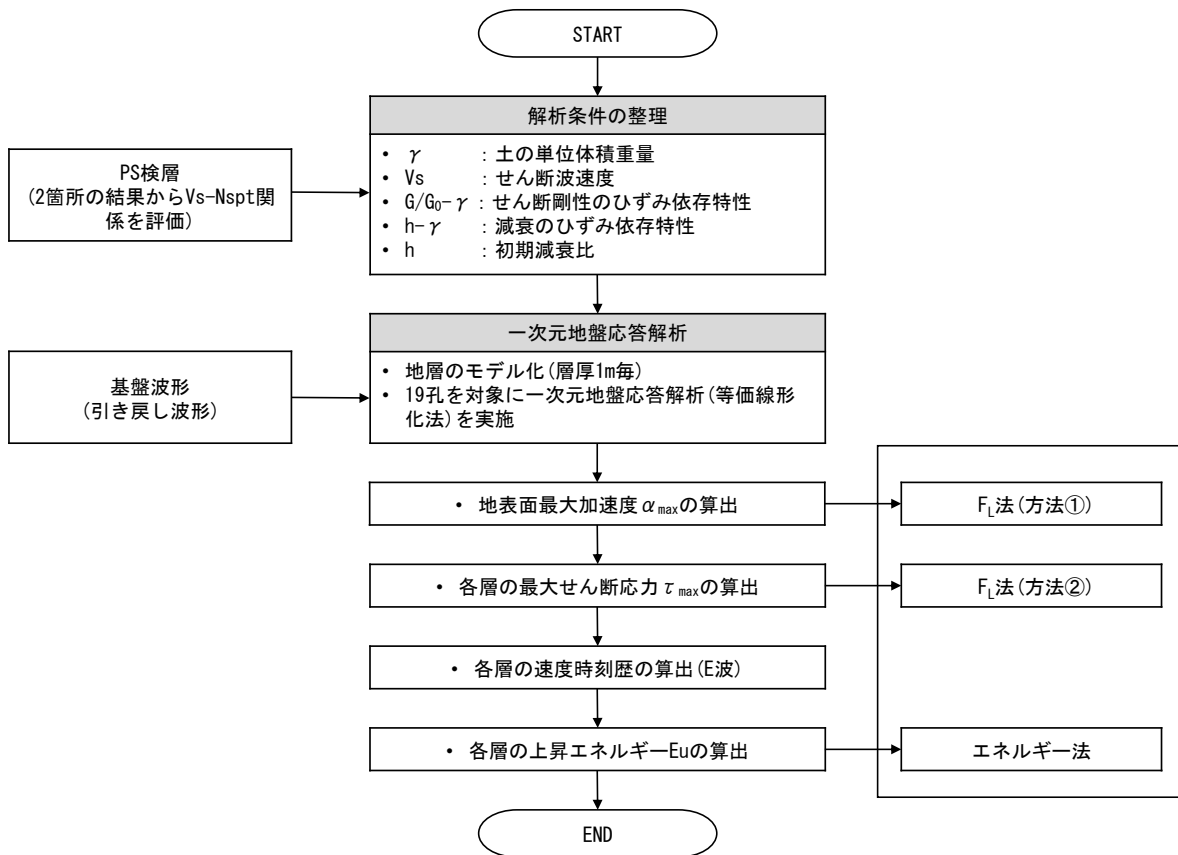
出典：JICA 調査団作成

## (2) 一次元地盤応答解析

液状化検討に用いた地震動は、P-S 検層結果分析に基づいて、地震計設置状況を考慮した観測地震波の引き戻し解析により基板波形を検討した上で、一次元地盤応答解析「SHAKE」によって検討を行った。

### 1) 検討フロー

地震動は、AB-13 孔（地震波形観測地点）と AB-15 孔（Nalodo の代表地点）の 2 箇所で行った PS 検層の結果から、S 波速度と  $N$  値の関係式を得て、検討対象孔における各層の S 波速度を用いて、一次元地盤応答解析「SHAKE」により、液状化検討に要する地表面最大加速度  $\alpha_{max}$ 、各層の最大せん断応力  $\tau_{max}$  及び各層の上昇エネルギー  $E_u$  を算出した。この一次元地盤応答解析のフローを図 4-29 に示した。



出典： JICA 調査団作成

図 4-29 一次元地盤応答解析のフロー

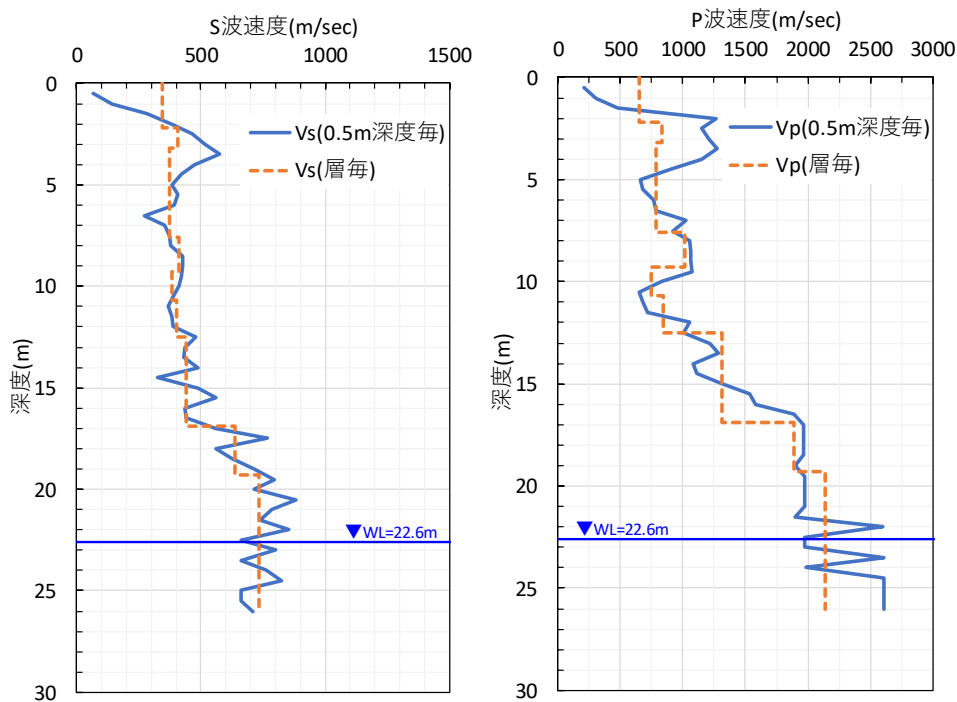


## 2-1) P S 検層の結果分析

PS 検層の分析結果を図 4-30～図 4-36 に示した。また、地震計の設置条件と観測記録を図 4-37～図 4-42 に示す。一次元地盤応答解析は「SHAKE」を用いて、地震計設置箇所の工学的基盤波形を引き戻し解析を行ったが、検討対象の工学的基盤に地震波形を与え等価線形化法を採用したものである。

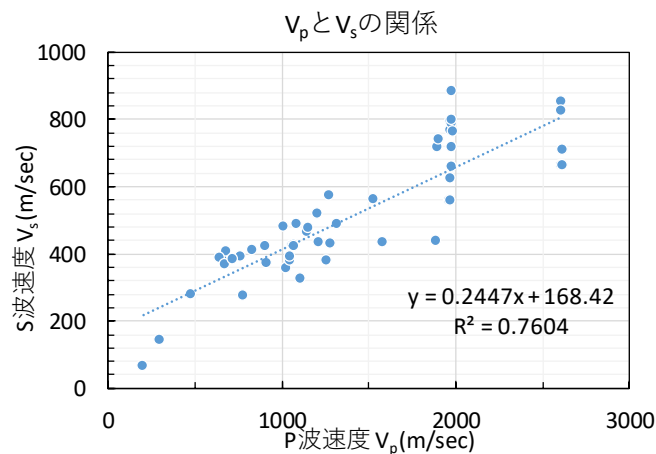
### a) せん断波速度分布

AB-13 孔の PS 検層による S 波速度分布と P 波速度分布を図 4-30 に、 $V_p$  と  $V_s$  の関係を図 4-31 に示す。



出典：JICA 調査団作成

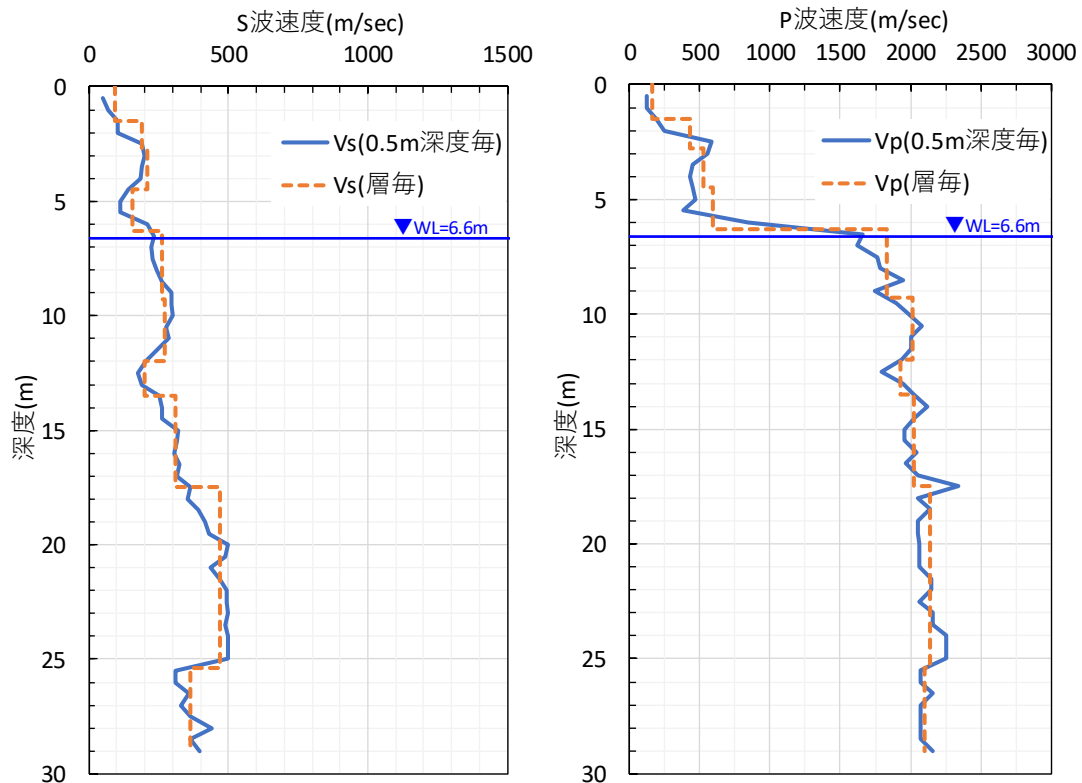
図 4-30 AB-13 PS 検層結果 (S 波速度、P 波速度分布)



出典：JICA 調査団作成

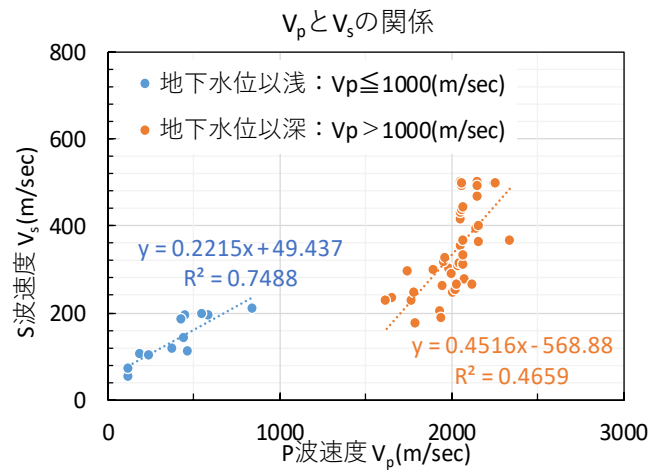
図 4-31 AB-13  $V_p$  と  $V_s$  の関係

AB-15 孔の PS 検層による S 波速度分布と P 波速度分布を図 4-32 に、 $V_p$  と  $V_s$  の関係を図 4-33 に示す。



出典：JICA 調査団作成

図 4-32 AB-15 PS 検層結果 (S 波速度、P 波速度分布)



出典：JICA 調査団作成

図 4-33 AB-15  $V_p$  と  $V_s$  の関係

地盤応答解析のパラメータを表 4-7、表 4-8 に示した。

表 4-7 地震計設置地盤の地盤応答解析のパラメータ (S 波速度、P 波速度) (AB-13)

| 深度<br>Depth<br>(m) | 地下水位<br>Groundwater<br>level<br>(m) | 土質区分<br>Type of soil | 粒度<br>Grain size    |                   |                     |                    | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content<br>Fc<br>(%) | 単位体積<br>重量<br>Unit weight<br>$\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | N値<br>SPT<br>N-Value | 50回打撃時の<br>貫入量<br>Penetration<br>Depth<br>(cm) | 換算N値<br>N-Value<br>(Conversion<br>+correct) | 換算N値<br>$\pm(\sigma_v)_{N5}$ | 有効土圧<br>Effective<br>loading<br>pressure<br>$\sigma_v$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | Primary Wave<br>Velocity<br>$V_p$<br>(m/sec) | S波速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) | ポアソン比<br>Poisson's<br>ratio<br>$\nu$ | S波速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) | S波速度<br>Normalization<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) |
|--------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------|--|---|----------------------|--|---|------------------------------|--|--|--|--------------------------------------|--|---|
|                    |                                     |                      | 礫分<br>Gravel<br>(%) | 砂分<br>Sand<br>(%) | シルト分<br>Silt<br>(%) | 粘土分<br>Clay<br>(%) |  |   |                      |  |   |                              |  |  |  |                                      |  |   |
| 0.0                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   |   |                      |  |   | 0.0                          |  |  |  |                                      |  |   |
| 0.5                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   |   |                      |  |   | 10.0                         |  | 64.71  | 0.444  |                                      | 64.71  |   |
| 1.0                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   |   |                      |  |   | 20.0                         |  | 142.23                                       | 0.354  |                                      | 142.23   |   |
| 1.5                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 9   | 30.0                         |  | 279.24                                       | 0.240  |                                      | 279.24   | 119.32  |
| 2.0                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 45  |                      |  |   | 4.0                          |  | 380.12                                       | 0.450  |                                      | 380.12   |   |
| 2.5                |                                     | Gravelly Sand        | 50.60               | 44.70             | 4.70                | 4.7                | 20.0   | 45  |                      | 45   | 6   | 50.0                         |  | 463.22                                       | 0.403  |                                      | 463.22   | 174.20  |
| 3.0                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 37  |                      | 37   | 6   | 60.0                         |  | 516.75                                       | 0.388  |                                      | 516.75   |   |
| 3.5                |                                     | Silty Gravel         | 81.9                | 12.00             | 6.10                | 6.1                | 20.0   | 50  | 11                   | 136  | 6   | 70.0                         |  | 574.23                                       | 0.372  |                                      | 574.23   | 198.52  |
| 4.0                |                                     | Silty Gravel         |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 4                    | 375  | 5   | 80.0                         |  | 475.17                                       | 0.397  |                                      | 475.17   |   |
| 4.5                |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 4                    | 375  | 5   | 90.0                         |  | 420.29                                       | 0.363  |                                      | 420.29   | 136.45  |
| 5.0                |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 6                    | 250  | 5   | 100.0                        |  | 383.85                                       | 0.242  |                                      | 383.85   |   |
| 5.5                |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 6                    | 250  | 5   | 110.0                        |  | 406.52                                       | 0.219  |                                      | 406.52   | 125.53  |
| 6.0                |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 6                    | 250  | 5   | 120.0                        |  | 390.02                                       | 0.325  |                                      | 390.02   |   |
| 6.5                |                                     | Gravelly Sand        | 57.1                | 32.00             | 10.90               | 10.9               | 20.0   | 50  |                      | 50   | 4   | 130.0                        |  | 273.01                                       | 0.430  |                                      | 273.01   | 80.85   |
| 7.0                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 10                   | 150  | 4   | 140.0                        |  | 355.71                                       | 0.432  |                                      | 355.71   |   |
| 7.5                |                                     | Sand                 | 25.70               | 51.30             | 11.30               | 23.0               | 20.0   | 37  |                      | 37   | 3   | 150.0                        |  | 371.86                                       | 0.401  |                                      | 371.86   | 106.26  |
| 8.0                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 37  |                      | 37   | 3   | 160.0                        |  | 378.79                                       | 0.425  |                                      | 378.79   |   |
| 8.5                |                                     | Gravelly Sand        | 23.20               | 55.80             | 9.60                | 11.40              | 20.0   | 50  | 6                    | 250  | 4   | 170.0                        |  | 423.76                                       | 0.405  |                                      | 423.76   | 117.36  |
| 9.0                |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 6                    | 250  | 4   | 180.0                        |  | 426.88                                       | 0.405  |                                      | 426.88   |   |
| 9.5                |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 6                    | 250  | 4   | 190.0                        |  | 421.88                                       | 0.409  |                                      | 421.88   | 113.63  |
| 10.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 200.0                        |  | 409.53                                       | 0.341  |                                      | 409.53   |   |
| 10.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 210.0                        |  | 384.90                                       | 0.223  |                                      | 384.90   | 101.11  |
| 11.0               |                                     | Silty Sand           | 13.70               | 54.60             | 14.70               | 17.00              | 20.0   | 21  |                      | 21   | 1   | 220.0                        |  | 368.62                                       | 0.287  |                                      | 368.62   | 98.01   |
| 11.5               |                                     | Silty Sand           |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  |                      | 50   | 3   | 230.0                        |  | 381.68                                       | 0.303  |                                      | 381.68   |   |
| 12.0               |                                     | Silty Sand           |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 240.0                        |  | 389.05                                       | 0.420  |                                      | 389.05   | 120.45  |
| 12.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 250.0                        |  | 478.97                                       | 0.354  |                                      | 478.97   |   |
| 13.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 260.0                        |  | 432.99                                       | 0.427  |                                      | 432.99   |   |
| 13.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 270.0                        |  | 430.11                                       | 0.436  |                                      | 430.11   | 106.11  |
| 14.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 280.0                        |  | 486.98                                       | 0.373  |                                      | 486.98   |   |
| 14.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 290.0                        |  | 325.23                                       | 0.463  |                                      | 325.23   | 78.81   |
| 15.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 300.0                        |  | 488.63                                       | 0.421  |                                      | 488.63   |   |
| 15.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 310.0                        |  | 562.46                                       | 0.422  |                                      | 562.46   | 134.05  |
| 16.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 320.0                        |  | 433.62                                       | 0.459  |                                      | 433.62   |   |
| 16.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 330.0                        |  | 438.01                                       | 0.472  |                                      | 438.01   | 102.77  |
| 17.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 340.0                        |  | 558.09                                       | 0.456  |                                      | 558.09   |   |
| 17.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 350.0                        |  | 1966.44                                      | 0.410  |                                      | 1966.44  | 768.14  |
| 18.0               |                                     | Gravelly Silty Sand  | 15.20               | 57.10             | 15.00               | 12.70              | 20.0   | 20  |                      | 20   | 1   | 360.0                        |  | 559.17                                       | 0.456  |                                      | 559.17   | 177.59  |
| 18.5               |                                     | Gravelly Silty Sand  |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 20  |                      | 20   | 1   | 370.0                        |  | 623.40                                       | 0.444  |                                      | 623.40   | 142.14  |
| 19.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 380.0                        |  | 714.31                                       | 0.417  |                                      | 714.31   |   |
| 19.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 390.0                        |  | 1895.66                                      | 0.403  |                                      | 1895.66  | 179.02  |
| 20.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 400.0                        |  | 1972.92                                      | 0.424  |                                      | 1972.92  |   |
| 20.5               |                                     | Gravelly Sand        | 24.90               | 60.00             | 15.10               | 15.1               | 20.0   | 50  | 4                    | 375  | 2   | 410.0                        |  | 715.31                                       | 0.424  |                                      | 715.31   | 195.99  |
| 21.0               |                                     | Gravelly Sand        |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 2   | 420.0                        |  | 1974.25                                      | 0.376  |                                      | 1974.25  |   |
| 21.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 2   | 430.0                        |  | 784.38                                       | 0.407  |                                      | 784.38   | 881.91  |
| 22.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 2   | 440.0                        |  | 1976.63                                      | 0.411  |                                      | 1976.63  | 737.95  |
| 22.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 2   | 450.0                        |  | 852.89                                       | 0.440  |                                      | 852.89   | 162.05  |
| 23.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 20.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 460.0                        |  | 2603.55                                      | 0.438  |                                      | 2603.55  | 659.88  |
| 23.5               |                                     | C Sand               | 3.40                | 94.20             | 2.40                | 2.4                | 11.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 247.5                        |  | 1979.63                                      | 0.403  |                                      | 1979.63  | 166.37  |
| 24.0               |                                     | C Sand               |                     |                   |                     |                    | 11.0   | 50  | 10                   | 150  | 3   | 253.0                        |  | 798.59                                       | 0.466  |                                      | 798.59   | 600.44  |
| 24.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 11.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 258.5                        |  | 2607.00                                      | 0.413  |                                      | 2607.00  | 164.71  |
| 25.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 11.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 264.0                        |  | 1982.09                                      | 0.444  |                                      | 1982.09  | 661.16  |
| 25.5               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 11.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 269.5                        |  | 2808.96                                      | 0.466  |                                      | 2808.96  | 826.17  |
| 26.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 11.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 280.5                        |  | 2610.70                                      | 0.466  |                                      | 2610.70  | 661.38  |
| 26.0               |                                     |                      |                     |                   |                     |                    | 11.0   | 50  | 5                    | 300  | 3   | 286.0                        |  | 708.83                                       | 0.460  |                                      | 708.83   | 161.61  |

出典：JICA 調査団作成

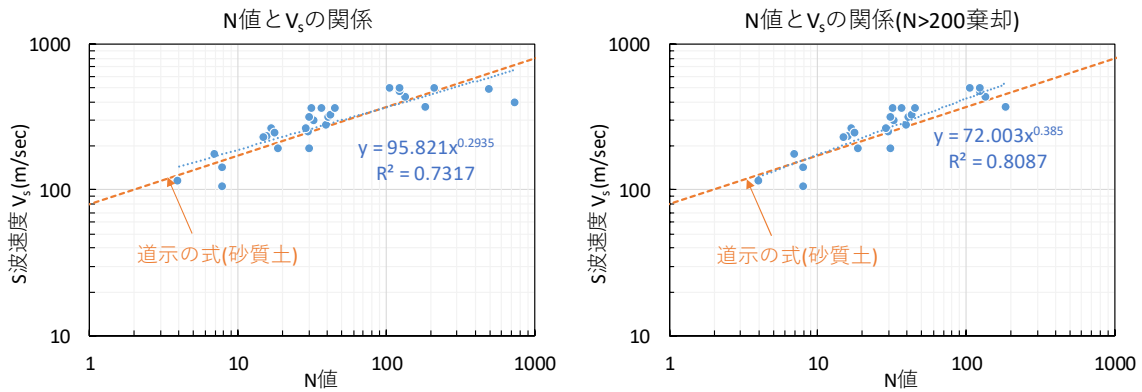
表 4-8 NaIodo 発生地域代表地盤の地盤応答解析のパラメータ (S波速度, P波速度) (AB-15)

| 深度<br>Depth<br>(m) | 地下水位<br>Groundwater<br>level<br>(m) | 土質区分<br>Type of soil      | 粒度<br>Grain size    |                   |                     | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content<br>Fc<br>(%) | 単位体積<br>重量<br>Unit weight<br>$\gamma$<br>( $kN/m^3$ ) | N値<br>SPT<br>N-Value | 50回打撃時の<br>貫入量<br>Penetration<br>Depth<br>(cm) | 換算N値<br>N-Value<br>(Conversion<br>+correct) | 換算N値<br>$\div (\sigma_v)^{0.5}$ | 有効土動圧<br>Effective<br>loading<br>pressure<br>$\sigma_v$<br>( $kN/m^2$ ) | P波速度<br>Primary Wave<br>Velocity<br>$V_p$<br>(m/sec) | S波速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) | ポアソン比<br>Poisson's<br>ratio<br>$\nu$ | S波速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) | S波速度<br>Normalization<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) |
|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--|---|----------------------|--|---|---------------------------------|---|--|--|--------------------------------------|--|---|
|                    |                                     |                           | 礫分<br>Gravel<br>(%) | 砂分<br>Sand<br>(%) | シルト分<br>Silt<br>(%) |  |   |                      |  |   |                                 |   |  |  |                                      |  |   |
| 0.0                |                                     | Silty Sand / Gravely Sand |                     |                   |                     |  | 19.5  |                      |  |   | 0.0                             | 195.20  | 60.89  | 0.491  |                                      |  |   |
| 1.0                |                                     | Silty Sand / Gravely Sand |                     |                   |                     |  | 19.5  |                      |  |   | 19.5                            | 119.60  | 70.86  | 0.290  |                                      |  |   |
| 1.5                |                                     | Silty Sand / Gravely Sand |                     |                   |                     |  | 19.5  |                      |  |   | 29.3                            | 185.54  | 103.93   | 0.275  |                                      | 44.69  |   |
| 2.0                |                                     | Silty Sand / Gravely Sand | 6.10                | 76.70             | 17.20               | 17.2   | 19.5  |                      | 8  | 8   | 30.0                            | 245.34  | 101.37   | 0.397  |                                      |  |   |
| 2.5                |                                     | Sand / Gravely Sand       | 28.5                | 60.70             | 10.80               | 10.8   | 19.5  |                      | 31   | 31  | 48.8                            | 586.58  | 191.23   | 0.441  |                                      | 72.37  |   |
| 3.0                |                                     | Sand / Gravely Sand       | 24.3                | 58.10             | 17.60               | 17.6   | 19.5  |                      | 19   | 19  | 68.3                            | 451.92  | 191.75   | 0.390  |                                      | 66.71  |   |
| 4.0                |                                     | Gravely Sand              |                     |                   |                     |  | 19.5  |                      | 8  | 8   | 87.8                            | 448.66  | 140.02   | 0.386  |                                      | 45.75  |   |
| 4.5                |                                     | Silty Sand / Gravely Sand |                     | 59.10             | 27.60               | 13.30  | 19.5  |                      | 4  | 4   | 107.3                           | 380.93  | 114.35   | 0.450  |                                      | 35.53  |   |
| 5.0                |                                     | Silty Sand / Gravely Sand | 10.00               | 73.60             | 16.40               | 16.4   | 19.5  |                      | 16   | 16  | 126.8                           | 1658.78   | 231.59   | 0.490  |                                      | 69.02  |   |
| 6.0                |                                     | Sand                      | 30.70               | 52.60             | 9.80                | 6.80   | 19.5  |                      | 15   | 15  | 146.3                           | 1768.08   | 225.90   | 0.492  |                                      | 64.96  |   |
| 7.0                | ▼5.6                                | Sandy Silt / Gravely Sand | 9.70                | 53.40             | 25.40               | 11.50  | 36.9  |                      | 17   | 17  | 165.8                           | 1950.10   | 260.53   | 0.491  |                                      | 72.61  |   |
| 7.5                |                                     | Gravely Sand / Sand       | 0.30                | 65.10             | 17.90               | 16.70  | 34.6  |                      | 33   | 33  | 185.3                           | 1895.29   | 296.77   | 0.487  |                                      | 80.44  |   |
| 8.5                |                                     | Sandy Silt                | 13.20               | 78.70             | 8.10                |  | 8.1   |                      | 40   | 40  | 195.0                           | 2080.79   | 275.42   | 0.491  |                                      | 72.81  |   |
| 9.5                |                                     | Gravely Sand              | 6.70                | 87.90             | 5.40                |  | 5.4   |                      | 18   | 18  | 218.5                           | 2084.44   | 243.72   | 0.489  |                                      | 62.98  |   |
| 10.0               |                                     | Gravely Sand              | 19.10               | 65.30             | 15.60               |  | 15.6  |                      | 7  | 7   | 243.0                           | 2052.26   | 351.98   | 0.485  |                                      | 84.86  |   |
| 11.0               |                                     | Gravely Sand              | 48.40               | 22.90             | 28.70               |  | 51.6  |                      | 30   | 30  | 273.0                           | 2129.67   | 263.85   | 0.492  |                                      | 62.03  |   |
| 12.0               |                                     | Gravely Sand              | 32.90               | 52.50             | 14.60               |  | 14.6  |                      | 29   | 29  | 282.8                           | 2035.71   | 262.86   | 0.492  |                                      | 64.10  |   |
| 13.0               |                                     | Sandy Silt                | 18.90               | 73.10             | 8.00                |  | 8.0   |                      | 41   | 41  | 302.3                           | 1959.91   | 314.29   | 0.487  |                                      | 75.38  |   |
| 13.5               |                                     | Gravely Sand              | 13.70               | 72.70             | 13.60               |  | 13.6  |                      | 43   | 43  | 312.0                           | 2044.11   | 306.80   | 0.488  |                                      | 76.34  |   |
| 14.5               |                                     | Silt / Gravely Sand       | 35.30               | 48.50             | 12.00               |  | 12.0  |                      | 50   | 50  | 341.3                           | 2343.40   | 364.71   | 0.488  |                                      | 84.86  |   |
| 15.5               |                                     | Silt / Gravely Sand       | 23.70               | 63.30             | 13.00               |  | 13.0  |                      | 50   | 50  | 351.0                           | 2052.26   | 351.98   | 0.485  |                                      | 89.81  |   |
| 17.0               |                                     | Gravely Sand              | 96.70               | 2.80              | 0.50                |  | 0.5   |                      | 50   | 50  | 370.5                           | 2056.83   | 424.43   | 0.477  |                                      | 97.25  |   |
| 18.0               |                                     | Gravely Sand              | 40.10               | 48.90             | 11.00               |  | 11.0  |                      | 50   | 50  | 390.0                           | 2058.13   | 499.13   | 0.469  |                                      | 109.48   |   |
| 18.5               |                                     | Gravely Sand              | 22.90               | 61.70             | 8.40                | 7.00   | 15.4  |                      | 125  | 125   | 409.5                           | 2050.46   | 433.93   | 0.477  |                                      | 103.19   |   |
| 19.0               |                                     | Gravely Sand              | 29.30               | 67.20             | 3.50                |  | 3.5   |                      | 125  | 125   | 429.0                           | 2151.14   | 466.91   | 0.475  |                                      | 106.24   |   |
| 20.0               |                                     | Gravely Sand              | 24.90               | 70.90             | 4.20                |  | 4.2   |                      | 107  | 107   | 445.5                           | 2154.01   | 500.57   | 0.471  |                                      | 106.09   |   |
| 20.5               |                                     | Gravely Sand              | 14.20               | 57.00             | 14.90               | 13.90  | 28.8  |                      | 214  | 214   | 465.0                           | 2233.61   | 495.93   | 0.473  |                                      | 106.11   |   |
| 21.0               |                                     | Gravely Sand              | 23.10               | 49.30             | 13.60               | 14.00  | 27.6  |                      | 31   | 31  | 493.3                           | 2065.41   | 310.24   | 0.488  |                                      | 65.70  |   |
| 21.5               |                                     | Gravely Sand              | 2.30                | 52.30             | 21.30               | 24.10  | 45.4  |                      | 46   | 46  | 516.8                           | 2155.91   | 359.90   | 0.486  |                                      | 75.48  |   |
| 22.0               |                                     | Silty Sand                | 58.80               | 27.10             | 14.10               |  | 14.1  |                      | 32   | 32  | 526.5                           | 2069.48   | 331.19   | 0.487  |                                      | 75.37  |   |
| 22.5               |                                     | F Sand                    |                     |                   |                     |  |   |                      | 37   | 37  | 555.8                           | 2070.90   | 362.85   | 0.484  |                                      | 74.73  |   |
| 23.0               |                                     | Sand / Silt               | 1.90                | 73.30             | 24.80               |  | 24.8  |                      |  |   | 546.0                           | 2070.45   | 439.83   | 0.476  |                                      |  |   |
| 23.5               |                                     | Sand / Silt               | 87.40               | 12.60             |                     |  | 12.6  |                      |  |   | 565.5                           | 2161.38   | 397.77   | 0.482  |                                      |  |   |
| 24.0               |                                     | Sand                      |                     |                   |                     |  | 19.5  |                      |  |   |                                 |   |  |  |                                      |  |   |
| 24.5               |                                     |                           |                     |                   |                     |  | 19.5  |                      |  |   |                                 |   |  |  |                                      |  |   |
| 25.0               |                                     |                           |                     |                   |                     |  | 19.5  |                      |  |   |                                 |   |  |  |                                      |  |   |

出典：JICA 調査団作成

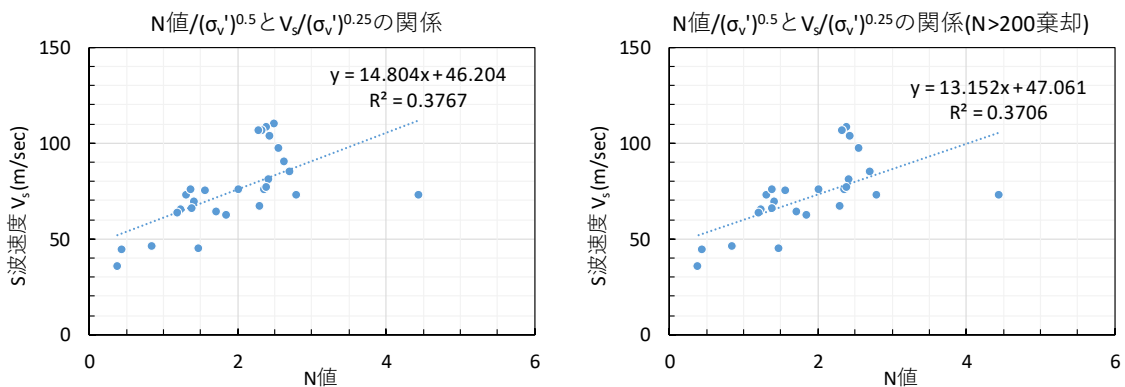
## b) N値とVsの相関関係

AB-15 孔の N 値と Vs の関係を図 4-34～図 4-36 に示す。AB-15 は全体として、砂質土が主体となる。深度 8～9m と 12～13m の 2 箇所粘性土層が介在するが、これら粘性土層は砂分を多く含んでいることから砂質土として扱うこととする。次頁に示すように粘性土のデータを省いた場合でも N 値と Vs の関係は変わらず、N 値と Vs は相関が良い。また、道路橋示方書の砂質土の推定式と比較しても整合性が確認できる。



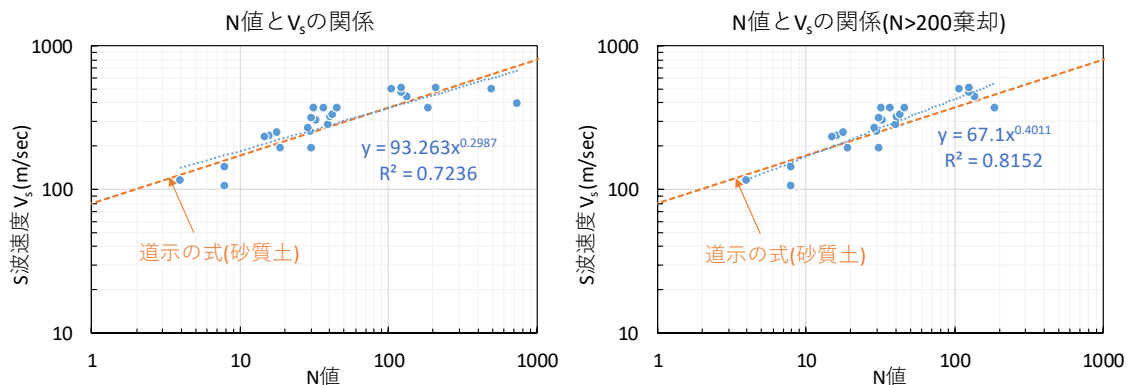
出典：JICA 調査団作成

図 4-34 N値とVsの相関関係(AB-15)



出典：JICA 調査団作成

図 4-35 N値/(σv' 0.5)とVs/(σv' 0.25)の相関関係(AB-15)



出典：JICA 調査団作成

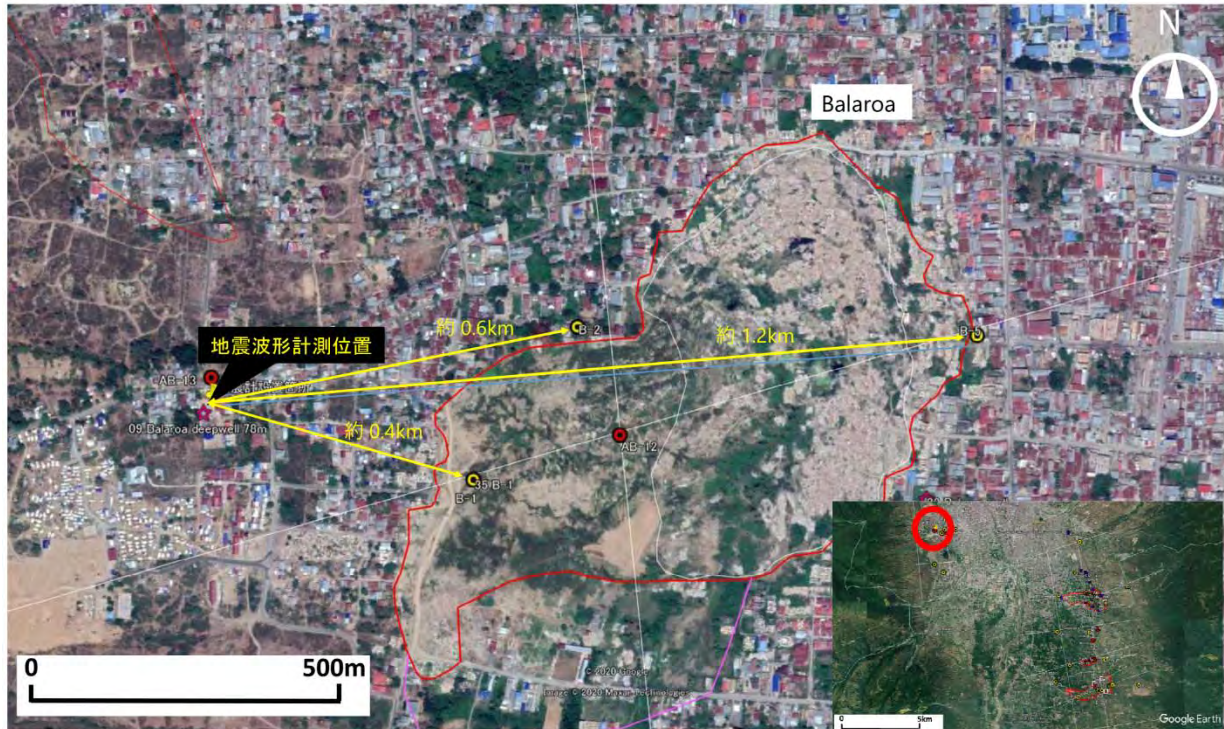
図 4-36 N値とVsの相関関係(AB-15) Sandy Silt 含まない場合



## 2-2) 地震計記録

### a) 地震波形計測位置

地震波形計測位置を図 4-37 に示す。地震計設置位置の近傍で行った PS 検層(AB-13)の結果を用いて、工学的基盤での地震波形を求める。



出典：JICA 調査団作成

図 4-37 地震計設置箇所

### b) 地震計の設置深度の推定

観測局の外観と内部設置状況を図 4-38、図 4-39 に示す。



出典：JICA 調査団作成

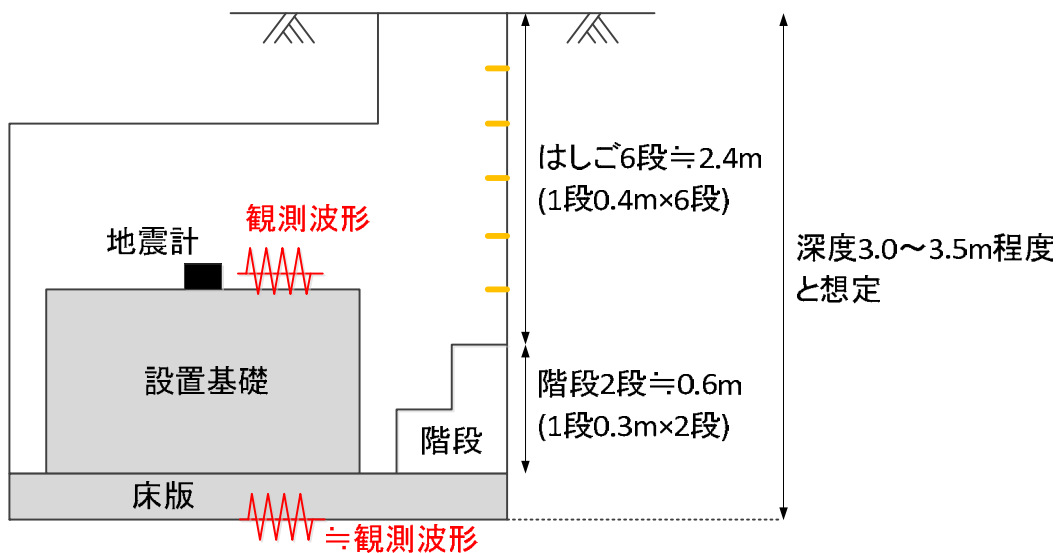
図 4-38 BMKG Palu 観測局の外観と内部状況



出典：JICA 調査団作成

図 4-39 地震計設置の基礎

床版上面の深度は、タイル1枚の寸法、はしご段の段数、階段の高さなどから、GL-3.0m に設置されたものと判断した。図 4-40 に示すように設置基礎と床版を剛体とみなせば、地震計が観測する波形は、床版底面位置における波形と概ね等しい。引き戻し解析を行う AB-13 における深度 3.0~4.0m は  $V_s \geq 400(\text{m/sec})$  となる十分堅固な地盤であることから、観測波形入力位置の $\pm 1.0\text{m}$ の誤差による解析結果への影響は極めて軽微であると考えられる。したがって本検討では、観測波形入力位置を深度 3.0m として引き戻し解析を行うこととした。



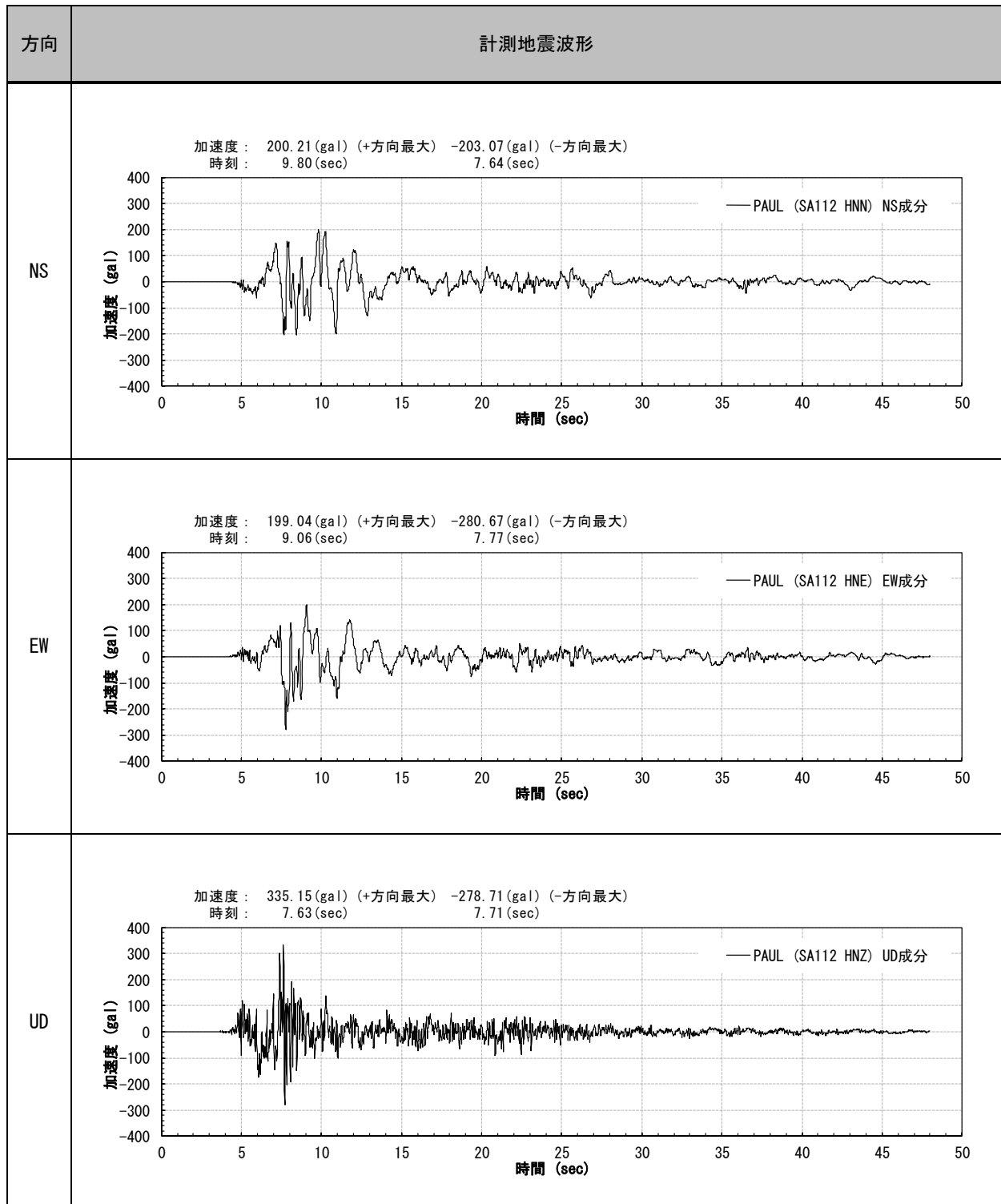
設置基礎と床版を剛体と見なせば、観測波形は床版底面における振動と概ね等しい

出典：JICA 調査団作成

図 4-40 観測局 床版の深度

c) 計測地震波形

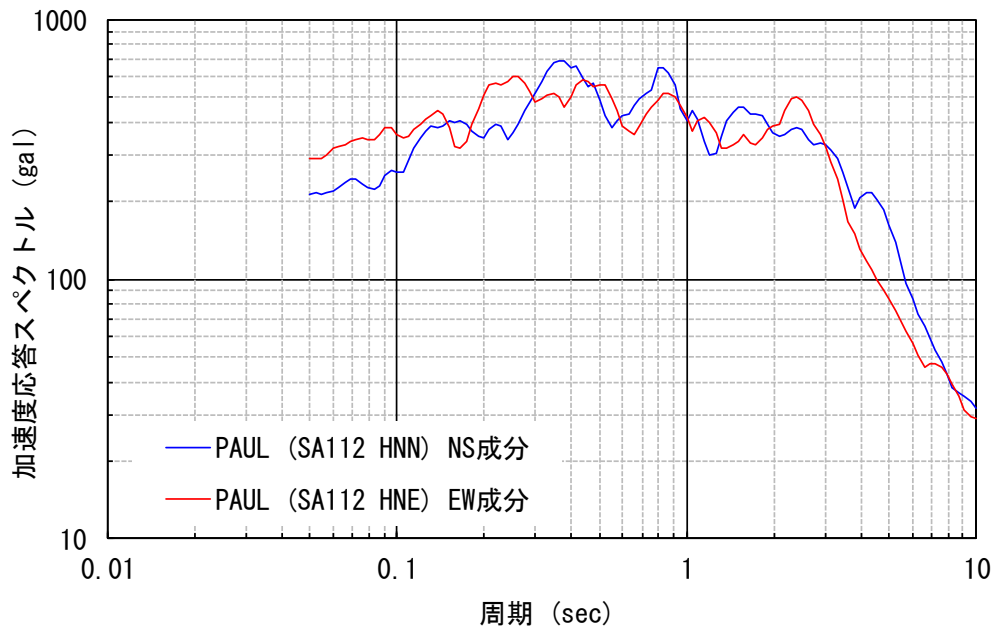
計測地震波形を図 4-41 に示す。



出典 : BMKG 観測波形を基に JICA 調査団作成

図 4-41 計測地震波形

計測地震波形について、NS 方向と EW 方向の加速度応答スペクトルを図 4-42 に示す。



出典：JICA 調査団作成

図 4-42 加速度応答スペクトル(NS, EW)

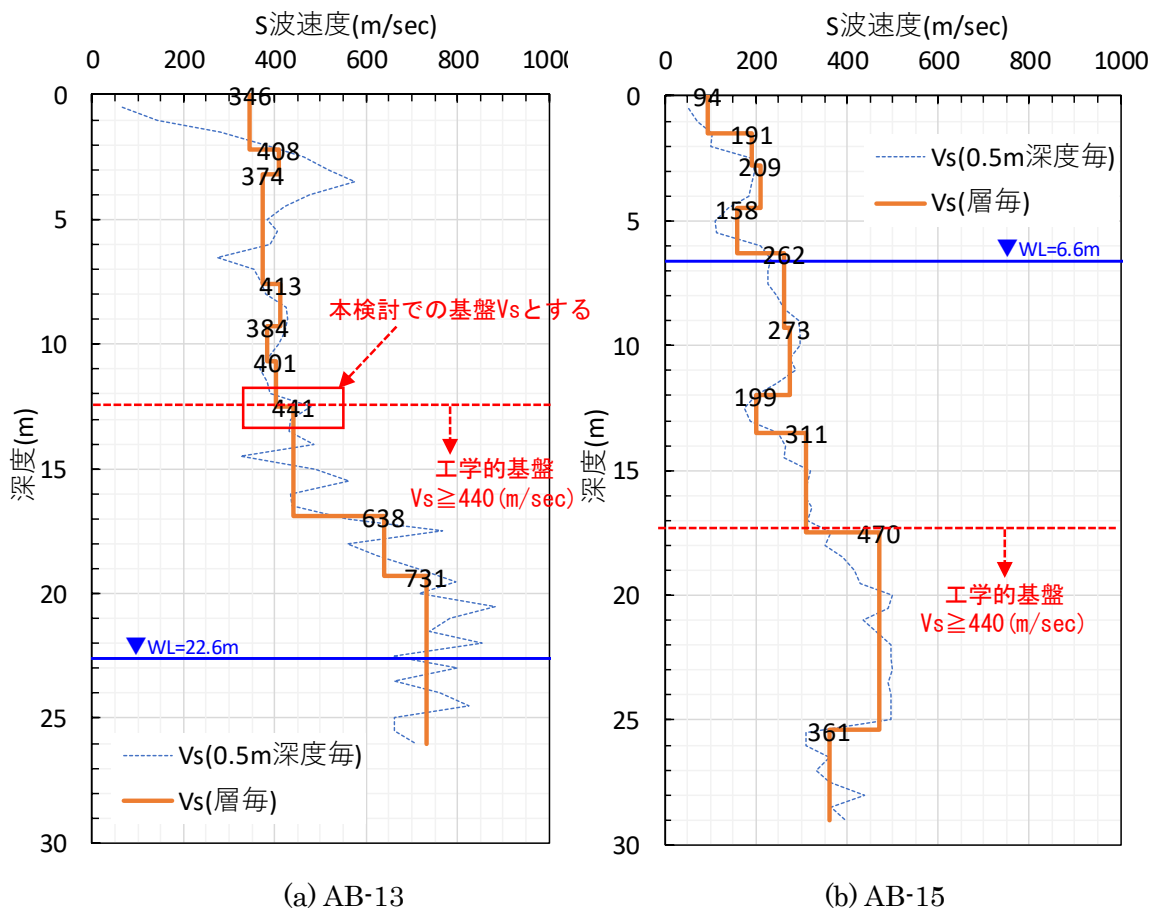
## 2-3) 一次元地盤応答解析 (SHAKE)

### a) 工学的基盤の設定

AB-13 と AB-15 の S 波速度分布を図 4-43 に示す。本検討における工学的基盤は、以下の理由から  $V_s=440(\text{m/sec})$  とする。

- ① AB-13 では深度 19(m)以深から  $V_s \geq 700(\text{m/sec})$  で一定となるの層を確認できるが、AB-15 では最大でも  $V_s \approx 470(\text{m/sec})$  程度となる。
- ②  $V_s \geq 700(\text{m/sec})$  を工学的基盤とした場合、AB-15 の S 波速度最大値と乖離が大きくなることから望ましくない。

①、②から、本検討では、AB-13 における  $V_s=440(\text{m/sec})$  を工学的基盤と設定する。その他の液化化判定を行うボーリング結果は、 $V_s \geq 440(\text{m/sec})$  となる層が現れた深度を工学的基盤とし、基盤の  $V_s$  は  $440(\text{m/sec})$  で統一する。



出典：JICA 調査団作成

図 4-43 AB-13 と AB-15 の S 波速度分布



b) 解析ケース

各検討ボーリングについて地震波形 2 ケース、地下水位 1 ケースで検討を行う。

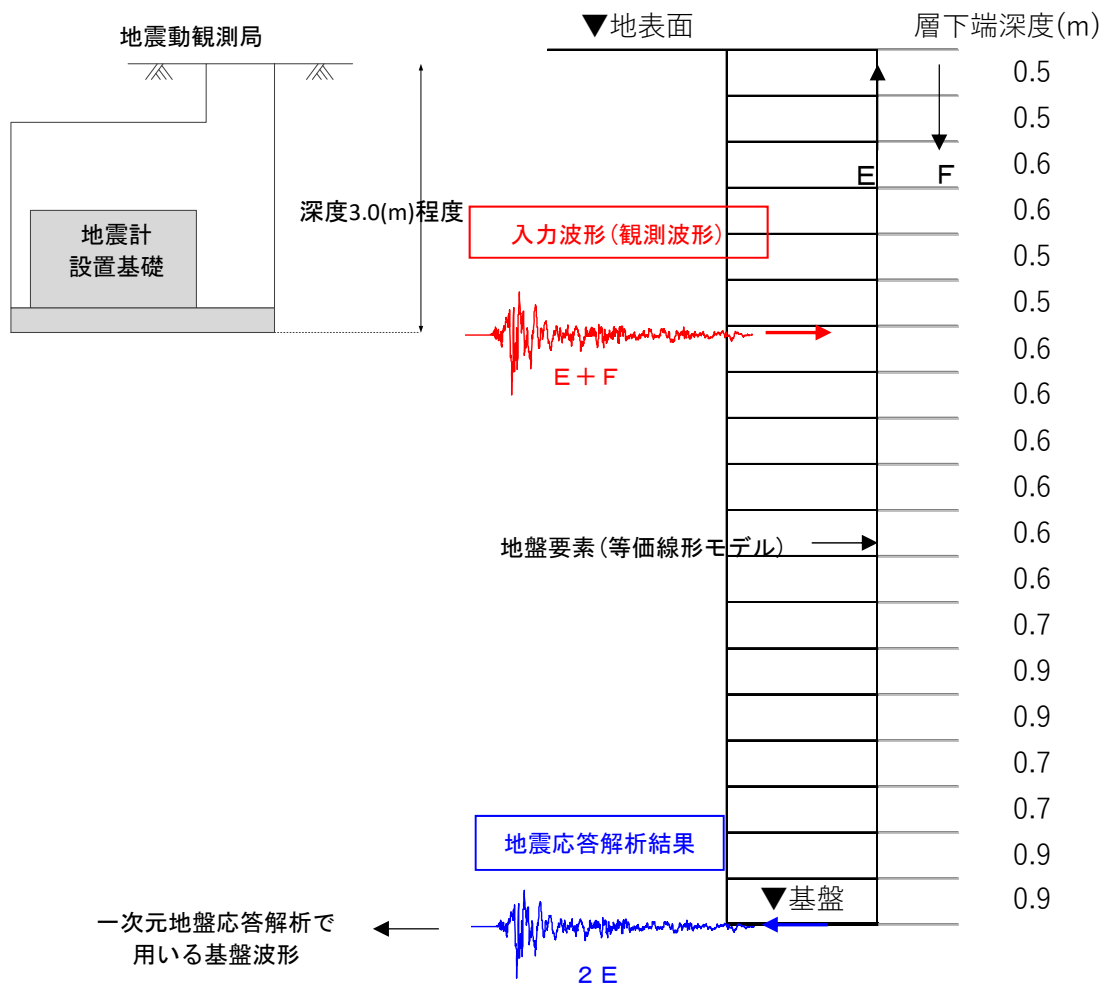
- 地震波形：NS 波形, EW 波形(2 ケース)
- 地下水位：地震前想定地下水位(1 ケース)

c) 解析条件

① 入力地震波形(引き戻し解析)

解析モデル

地震動の引き戻し解析は、地震動観測局の近傍で実施されたボーリング AB-13 の地層をモデル化して検討する。引き戻し解析の解析モデルを図 4-44 に示す。



出典：JICA 調査団作成

図 4-44 引き戻し解析 解析モデル(AB-13)

## 地盤条件

等価線形化法に適用する地盤定数を表 4-9 に示す。単位体積重量は道路橋示方書を参考に一般値を設定する。基盤面から地表面までの基本固有周期から、I 種地盤相当に設定する。

表 4-9 地盤定数 (AB-13)

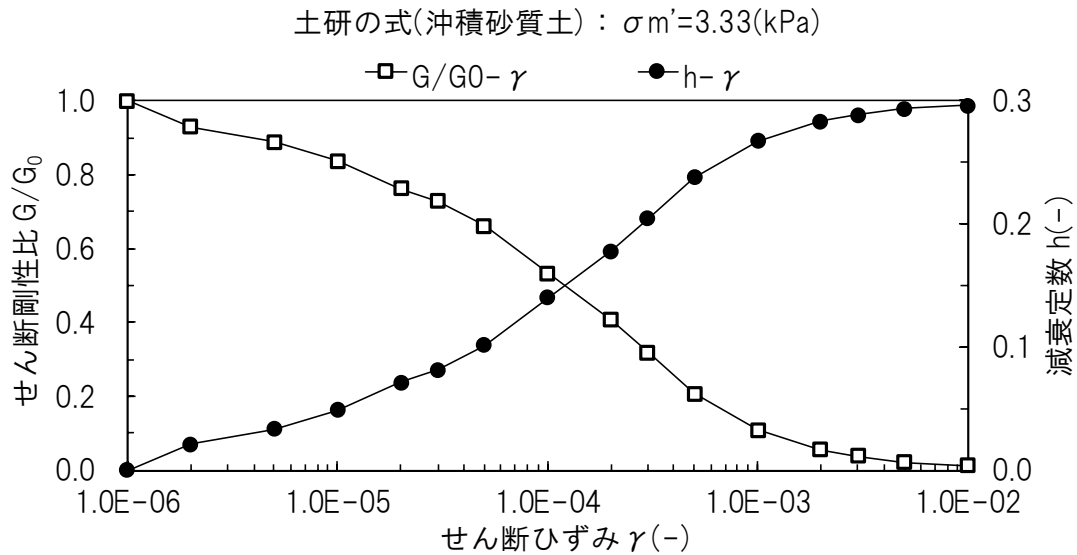
|          |                         |
|----------|-------------------------|
| ボーリング名   | AB-13                   |
| 重力加速度    | 9.8 (m/s <sup>2</sup> ) |
| 水の単位体積重量 | 10 (kN/m <sup>3</sup> ) |
| 地下水位深度   | 22.6 (m)                |

| 深度<br>Depth<br>(m)  | 層厚<br>Layer<br>thickness<br>(m) | 層厚<br>Layer<br>thickness<br>(m) | 土質区分<br>Type of<br>Soil | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight<br>$\gamma_t$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated<br>weight<br>$\gamma_{sat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | せん断波<br>速度<br>Shear<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) | 有効上載圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure<br>$\sigma_v'$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 有効拘束圧<br>(層中心)<br>effective<br>confining<br>pressure<br>$\sigma_m'$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ひずみ<br>依存式<br>G/G <sub>0</sub> - $\gamma$<br>h- $\gamma$ | 地盤の<br>基本固有周<br>期T <sub>G</sub> の算出<br>natural<br>period<br>(H <sub>i</sub> /V <sub>si</sub> )<br>(sec) |
|---|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--|---|---|--|---|--|---|
| 0.5   | 0.5                             | 2.2                             | 礫質土                     | 20.0   | 21.0  | 346   | 5.00   | 3.33  | 沖積砂質土  | 0.0014  |
| 1.0   | 0.5                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 346   | 15.00  | 10.00   | 沖積砂質土  | 0.0014  |
| 1.6   | 0.6                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 346   | 26.00  | 17.33   | 沖積砂質土  | 0.0017  |
| 2.2   | 0.6                             | 1.0                             | 礫質土                     | 20.0   | 21.0  | 346   | 38.00  | 25.33   | 沖積砂質土  | 0.0017  |
| 2.7   | 0.5                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 408   | 49.00  | 32.67   | 沖積砂質土  | 0.0012  |
| 3.2   | 0.5                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 408   | 59.00  | 39.33   | 沖積砂質土  | 0.0012  |
| 3.8   | 0.6                             | 4.3                             | 礫質土                     | 20.0   | 21.0  | 374   | 70.00  | 46.67   | 沖積砂質土  | 0.0016  |
| 4.4   | 0.6                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 374   | 82.00  | 54.67   | 沖積砂質土  | 0.0016  |
| 5.0   | 0.6                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 374   | 94.00  | 62.67   | 沖積砂質土  | 0.0016  |
| 5.6   | 0.6                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 374   | 106.00   | 70.67   | 沖積砂質土  | 0.0016  |
| 6.2   | 0.6                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 374   | 118.00   | 78.67   | 沖積砂質土  | 0.0016  |
| 6.8   | 0.6                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 374   | 130.00   | 86.67   | 沖積砂質土  | 0.0016  |
| 7.5   | 0.7                             | 1.8                             | 礫質土                     | 20.0   | 21.0  | 374   | 143.00   | 95.33   | 沖積砂質土  | 0.0019  |
| 8.4   | 0.9                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 413   | 159.00   | 106.00  | 沖積砂質土  | 0.0022  |
| 9.3   | 0.9                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 413   | 177.00   | 118.00  | 沖積砂質土  | 0.0022  |
| 10.0  | 0.7                             | 1.4                             | 礫質土                     | 20.0   | 21.0  | 384   | 193.00   | 128.67  | 沖積砂質土  | 0.0018  |
| 10.7  | 0.7                             |                                 |                         | 20.0   | 21.0  | 384   | 207.00   | 138.00  | 沖積砂質土  | 0.0018  |
| 11.6  | 0.9                             | 1.8                             | 砂質土                     | 19.0   | 20.0  | 401   | 222.55   | 148.37  | 沖積砂質土  | 0.0022  |
| 12.5  | 0.9                             |                                 |                         | 19.0   | 20.0  | 401   | 239.65   | 159.77  | 沖積砂質土  | 0.0022  |
| 地盤の基本固有周期T <sub>G</sub> =4 × Σ (H <sub>i</sub> /V <sub>si</sub> ) : |                                 |                                 |                         |  |   |   |  |   |  | 0.1312  |
|   |                                 |                                 |                         |  |   |   |  |   |  | I 種地盤   |

出典：JICA 調査団作成

### ひずみ依存特性

等価線形化法に適用するひずみ依存特性は、土研の式を適用する。AB-13層は礫質土が主体であることから、次ページを参考に沖積砂質土のひずみ依存特性を準用する。土研式による沖積砂質土の繰返しせん断特性（極浅層の1層目）の事例を図4-45に示す。この場合には、深さ方向に拘束圧に応じて $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ は変えて計算している（計算方法は次ページに示した）。



出典：JICA 調査団作成

図 4-45 沖積砂質土の繰返しせん断特性 1層目の例

土研の式(沖積砂質土の繰返しせん断特性 1層目の例)

| せん断ひずみ<br>$\gamma$<br>(-) | せん断剛性比(98kPa時)<br>$G/G_0$ $p=98\text{kPa}$ | $m(\gamma) - m(\gamma=10^{-6})$ | ひずみ依存特性 : $\sigma m' = 3.33(\text{kPa})$ |              |
|---------------------------|--|---------------------------------|--|--------------|
|                           |  |                                 | $G/G_0 - \gamma$                         | $h - \gamma$ |
| 1.0E-06                   | 1.000                                      | 0.000                           | 1.000                                    | 0.000        |
| 2.0E-06                   | 0.989                                      | 0.018                           | 0.931                                    | 0.021        |
| 5.0E-06                   | 0.978                                      | 0.028                           | 0.890                                    | 0.033        |
| 1.0E-05                   | 0.959                                      | 0.040                           | 0.838                                    | 0.049        |
| 2.0E-05                   | 0.928                                      | 0.058                           | 0.763                                    | 0.071        |
| 3.0E-05                   | 0.905                                      | 0.064                           | 0.729                                    | 0.081        |
| 5.0E-05                   | 0.867                                      | 0.080                           | 0.661                                    | 0.102        |
| 1.0E-04                   | 0.789                                      | 0.116                           | 0.533                                    | 0.140        |
| 2.0E-04                   | 0.689                                      | 0.156                           | 0.407                                    | 0.178        |
| 3.0E-04                   | 0.606                                      | 0.190                           | 0.319                                    | 0.204        |
| 5.0E-04                   | 0.500                                      | 0.260                           | 0.208                                    | 0.238        |
| 1.0E-03                   | 0.356                                      | 0.350                           | 0.109                                    | 0.267        |
| 2.0E-03                   | 0.228                                      | 0.422                           | 0.055                                    | 0.284        |
| 3.0E-03                   | 0.170                                      | 0.448                           | 0.037                                    | 0.289        |
| 5.0E-03                   | 0.108                                      | 0.476                           | 0.022                                    | 0.294        |
| 1.0E-02                   | 0.058                                      | 0.480                           | 0.011                                    | 0.297        |

出典：JICA 調査団作成

### (3) 沖積砂質土

豊浦砂に関する繰返し中空ねじり試験の結果は、間隙比の影響をあまり受けないが、拘束圧依存性はあるとして、次の式のように整理できるとした。

$$\frac{G}{G_{\gamma=10^{-6}}} = \left( \frac{G}{G_{\gamma=10^{-6}}} \right)_{h=98\text{kPa}} \left( \frac{\sigma'_m}{98} \right)^{m(\gamma)-m(10^{-6})} \quad (7.13)$$

ここで、 $\sigma'_m$ は有効拘束圧である。式(7.13)に基づきせん断剛性比を決めるには基準拘束圧(98kPa)のせん断剛性比とべき $m(\gamma)-m(10^{-6})$ が必要である。このうち、べきの一部 $m(\gamma)$ は図7.4の豊浦砂のデータで示されている。さらに同じ図で $\gamma=10^{-6}$ における $m$ の値を読み取り、差分として $m(\gamma)-m(10^{-6})$ を計算すると表7.7のようになる<sup>44)</sup>。この表には基準拘束圧に対するせん断剛性比も示されている。

表 7.7 沖積砂質土の繰返しせん断特性

| $\gamma$           | $G/G_0$ | $m(\gamma)-m(\gamma=10^{-6})$ | $\gamma$           | $G/G_0$ | $m(\gamma)-m(10^{-6})$ |
|--------------------|---------|-------------------------------|--------------------|---------|------------------------|
| $10^{-6}$          | 1.000   | 0.000                         | $2 \times 10^{-4}$ | 0.689   | 0.156                  |
| $2 \times 10^{-6}$ | 0.989   | 0.018                         | $3 \times 10^{-4}$ | 0.606   | 0.190                  |
| $5 \times 10^{-6}$ | 0.978   | 0.028                         | $5 \times 10^{-4}$ | 0.500   | 0.260                  |
| $10^{-5}$          | 0.959   | 0.040                         | $10^{-3}$          | 0.356   | 0.350                  |
| $2 \times 10^{-5}$ | 0.928   | 0.058                         | $2 \times 10^{-3}$ | 0.228   | 0.422                  |
| $3 \times 10^{-5}$ | 0.905   | 0.064                         | $3 \times 10^{-3}$ | 0.170   | 0.448                  |
| $5 \times 10^{-5}$ | 0.867   | 0.080                         | $5 \times 10^{-3}$ | 0.108   | 0.476                  |
| $10^{-4}$          | 0.789   | 0.116                         | $10^{-2}$          | 0.058   | 0.480                  |

$G/G_0$ は、平均有効主応力98kPaにおける値

また、豊浦砂以外の砂に関する実験結果をまとめると、多少の細粒分を含む砂を含め、図7.8に示されるようにほぼ同様な傾向となることも示されている。したがって、沖積砂質土のせん断剛性比のひずみ依存性はおおむね式(7.13)で表すことができる。

次に減衰特性は次のように表される<sup>44)</sup>。

$$h = 0.3(1 - G/G_0) \quad (7.14)$$

これらを、代表的な拘束圧について計算すると、図7.9のようになる。図より、拘束圧が大きくなると剛性比が大きくなり、減衰が小さくなる、すなわち、非線形化しにくくなることがわかる。

なお、この実験は、排水条件で行われているが、本書で示すこれ以外のほとんどの試験が非排水条件で行われているのに対して大きな違いがある。これについては6.7.2項で論

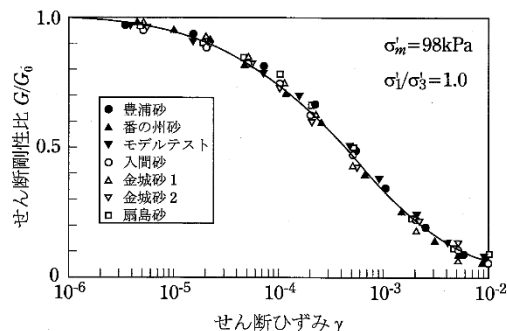


図 7.8 各種の砂に対するせん断剛性比のひずみ依存性<sup>43)</sup>

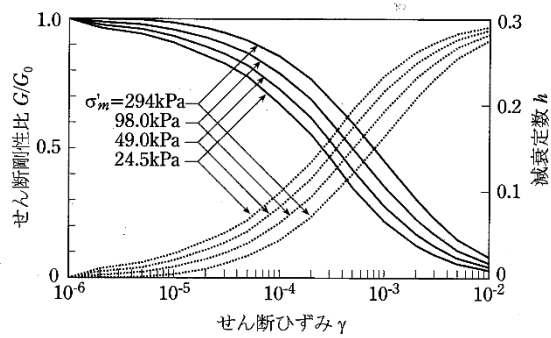


図 7.9 砂質土に対する繰返しせん断特性

じているが、図 6.15 に示したように、せん断剛性には大きな差はない。しかし、ひずみの大きい領域の減衰定数はかなり違っており、非排水条件の減衰は小さい。これは、後に示す図 7.31 でも見ることができる。

#### (4) 洪積砂質土、礫質土

文献<sup>44)</sup>では洪積砂質土については、国生・佐々木の報告<sup>45)</sup>を引用しつつも、その結果が豊浦砂に類似しているとの理由から、沖積砂質土の関係を適用してもよいとしている。また、礫質土については、文献<sup>44)</sup>の発行時点(1982年)では適当な実験データがないので、洪積砂質土のデータを用いることを勧めている。ただし、状況に応じて試料を採取して繰返しせん断試験を行う必要性を指摘している。

出典；地盤の地震応答解析(鹿島出版会)、平成 22 年 10 月、p.100

### 等価線形化法計算条件

その他計算条件については、表 4-10 に示すとおりとした。

表 4-10 等価線形化法の計算条件

| 項目                                | 条件   |
|-----------------------------------|--|
| 複素剛性の計算方法                         | $G^* = G(1 + 2ih)$ (理論：非粘性 Voigt モデル)  |
| 地震動の方向                            | 1 方向   |
| 散乱の減衰の考慮                          | 考慮しない  |
| 周波数カット                            | 20Hz   |
| 最大ひずみから有効ひずみを求めるためにかける係数 $\alpha$ | 0.65   |
| 有効ひずみの周波数依存性                      | 杉戸らの方法<br>$\gamma_{eff} = \alpha \cdot \gamma_{max} \cdot (F(\omega)/F_{max})^a$ $a = 1.0 \text{ (原論文では 1.0)}$ |

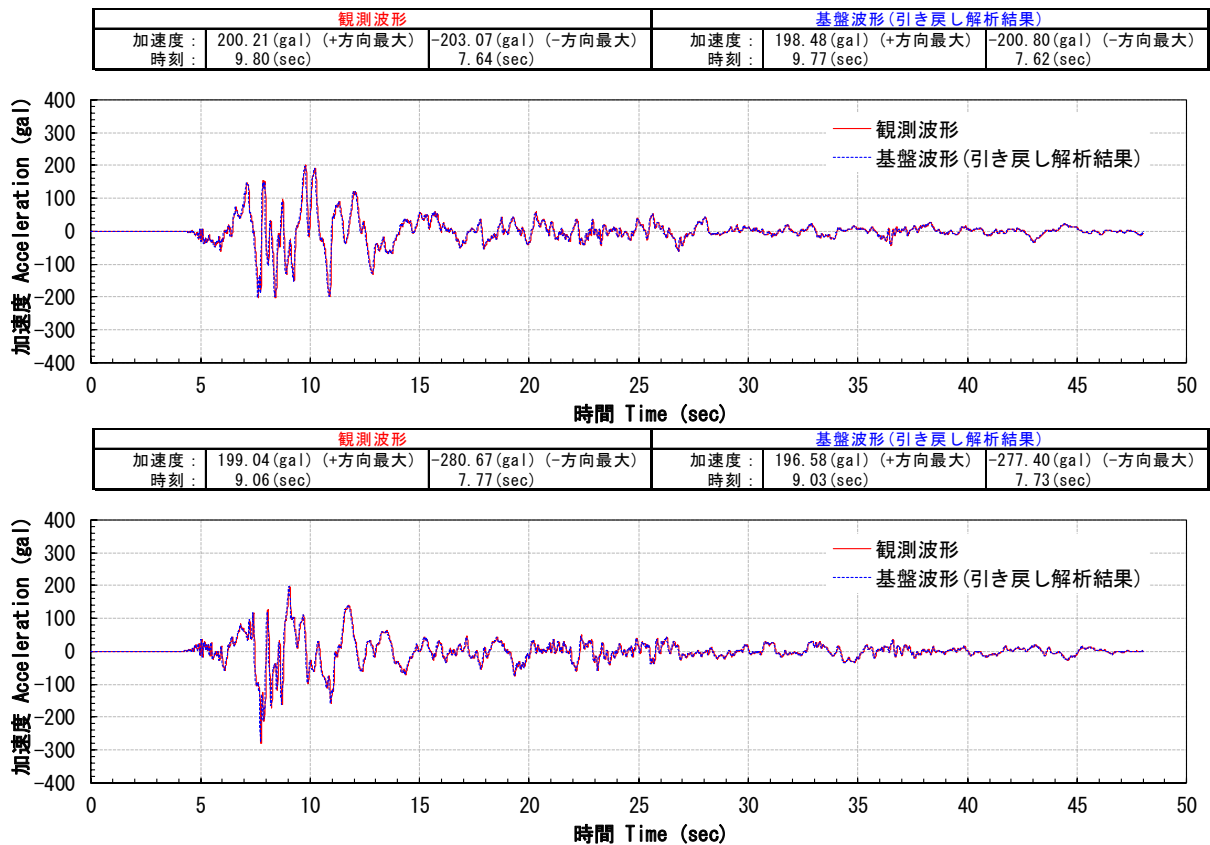
出典：JICA 調査団作成



### (3) 一次元地盤応答解析(等価線形化法)

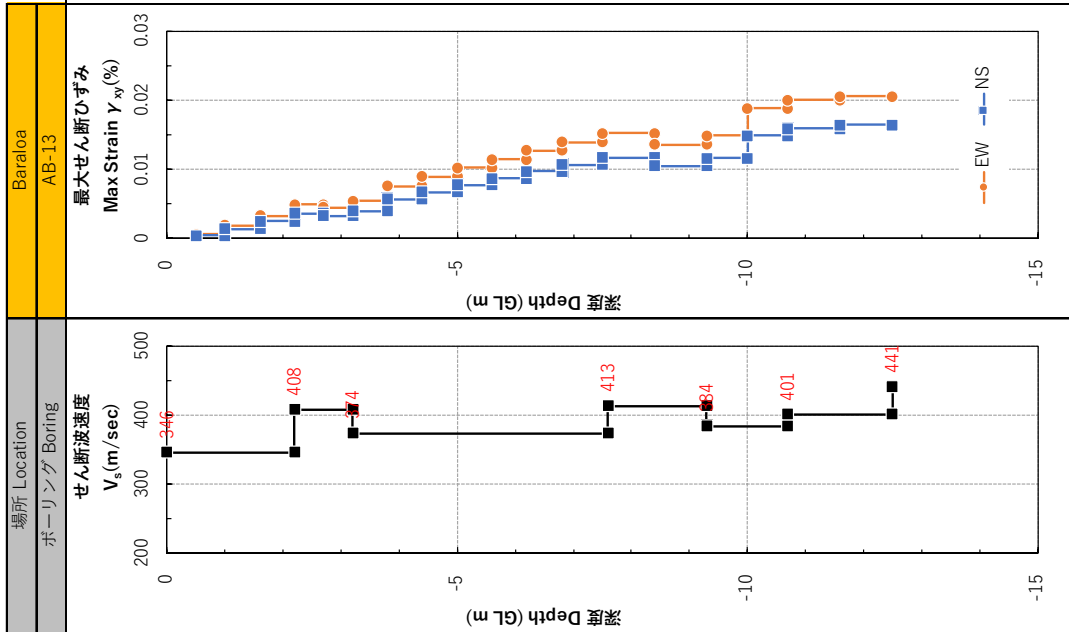
#### 解析結果(入力地震波形)

一次元地盤応答解析(等価線形化法)により求めた基盤波形を図 4-46 に示す。この基盤波形を用いて、各ボーリングについてを実施し、液状化判定を行うこととする。なお、深さ 12.5m以深で工学的基盤面を与えているが、地震計設置地盤は Vs350m/sec 以上の良く締まった巨礫層にあり、引き戻した基盤波形は、観測波形とほとんど同じ波形となった。



出典 : JICA 調査団作成

図 4-46 地震計設置箇所の観測波形と基盤波形(引き戻し波形)  
AB-13 (上 ; NS 波形、下 ; EW 波形)



出典：JICA 調査団作成  
 図 4-47 最大応答分布 引き戻し解析結果 AB-13

(4) 一次元地盤応答解析(等価線形化法)

・B-1

ボーリングB-1は液状化により地表面標高が4m程度低下しているため、解析では表層地盤4mを付加してモデル化する。  
表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①：B-1の表層4mは、下流側にあるB-2の表層と同じ土質と仮定する。

赤枠②：試験値の無い土質については、コア写真を参考に概ね同じ土質の試験値を準用する。

赤枠③：計測値はN値500であることから、1層下のN値40を準用する。

基礎条件：35層目、 $\gamma=20.0$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s=440$  (m/sec)、線形弾性

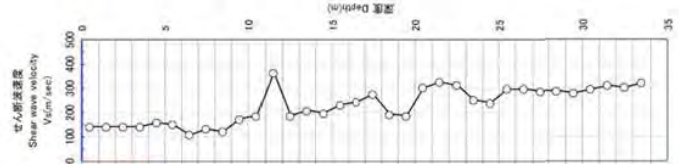
ボーリングB-1コア



| ボーリング名                 |  | B-1       |  |
|------------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深度 OL-             |  | 0.00 (m)  |  |
| 平均地盤深度(土中2/3)の標準深度 OL- |  | 23.00 (m) |  |

| 深度<br>(層下層)<br>Depth | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth | 層厚<br>Layer<br>thickness | 粒状土   |       |       | 細粒分<br>含有率<br>fraction<br>content<br>FC | N値    | 状態    | 湿重量<br>Wet unit<br>weight | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効土圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure | 有効土圧<br>(層中心)<br>confining<br>pressure | 土質<br>区分<br>O, G, T<br>h-T | 基礎の<br>基本固有周期<br>T <sub>b</sub> の算出<br>natural<br>period |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|---|-------|-------|---------------------------|--|--------------------------------------|--|--|----------------------------|--|
|                      |                                 |                          | 層分    | 砂分    | シルト分  |   |       |       |                           |  |                                      |  |  |                            |  |
| 1.0                  | 1.0                             | 0.00                     | 61.39 | 32.46 | 6.16  | 38.8                                    | 6     | 緩いL/O | 17.0                      | 18.0                                     | 144                                  | 4.00   | 2.67                                   | 沖積砂質土                      | 0.0070   |
| 2.0                  | 0.00                            | 61.39                    | 32.46 | 6.16  | 38.6  | 6                                       | 緩いL/O | 17.0  | 18.0                      | 144                                      | 12.00                                | 8.00   | 4.00                                   | 沖積砂質土                      | 0.0070   |
| 3.0                  | 1.0                             | 0.00                     | 61.39 | 32.46 | 6.16  | 38.6                                    | 6     | 緩いL/O | 17.0                      | 18.0                                     | 144                                  | 20.00  | 13.33                                  | 沖積砂質土                      | 0.0070   |
| 4.0                  | 1.0                             | 0.00                     | 61.39 | 32.46 | 6.16  | 38.6                                    | 6     | 緩いL/O | 17.0                      | 18.0                                     | 144                                  | 28.00  | 18.67                                  | 沖積砂質土                      | 0.0070   |
| 5.0                  | 1.0                             | 15.46                    | 56.09 | 24.85 | 3.57  | 28.5                                    | 8     | 緩いL/O | 17.0                      | 18.0                                     | 180                                  | 36.00  | 24.00                                  | 沖積砂質土                      | 0.0052   |
| 6.0                  | 2.0                             | 1.0                      | 15.46 | 56.09 | 24.85 | 3.57                                    | 28.5  | 砂質土   | 17.0                      | 18.0                                     | 152                                  | 44.00  | 29.33                                  | 沖積砂質土                      | 0.0066   |
| 7.0                  | 3.0                             | 1.0                      | 4.14  | 59.77 | 29.28 | 6.80                                    | 36.1  | 砂質土   | 17.0                      | 18.0                                     | 110                                  | 52.00  | 34.67                                  | 沖積砂質土                      | 0.0091   |
| 8.0                  | 4.0                             | 1.0                      | 6.61  | 60.60 | 23.40 | 9.39                                    | 32.8  | 砂質土   | 17.0                      | 18.0                                     | 134                                  | 60.00  | 40.00                                  | 沖積砂質土                      | 0.0075   |
| 9.0                  | 5.0                             | 1.0                      | 7.07  | 65.50 | 16.00 | 8.44                                    | 24.4  | 砂質土   | 17.0                      | 18.0                                     | 123                                  | 68.00  | 45.33                                  | 沖積砂質土                      | 0.0081   |
| 10.0                 | 6.0                             | 1.0                      | 8.98  | 64.76 | 21.16 | 5.08                                    | 26.5  | 砂質土   | 17.0                      | 18.0                                     | 175                                  | 76.00  | 50.67                                  | 沖積砂質土                      | 0.0057   |
| 11.0                 | 7.0                             | 1.0                      | 5.38  | 67.47 | 19.31 | 7.83                                    | 27.1  | 砂質土   | 17.0                      | 18.0                                     | 197                                  | 84.00  | 56.00                                  | 沖積砂質土                      | 0.0053   |
| 12.0                 | 8.0                             | 1.0                      | 97.40 | 30.10 | 9.27  | 3.22                                    | 12.5  | 硬質土   | 20.0                      | 21.0                                     | 365                                  | 93.00  | 62.33                                  | 沖積砂質土                      | 0.0027   |
| 13.0                 | 9.0                             | 1.0                      | 3.74  | 74.25 | 17.44 | 4.53                                    | 22.0  | 砂質土   | 17.0                      | 18.0                                     | 187                                  | 103.00   | 68.67                                  | 沖積砂質土                      | 0.0053   |
| 14.0                 | 10.0                            | 1.0                      |       |       |       | 30.5                                    | 22.0  | 砂質土   | 17.0                      | 18.0                                     | 209                                  | 111.00   | 74.00                                  | 沖積砂質土                      | 0.0048   |
| 15.0                 | 11.0                            | 1.0                      |       |       |       | 30.5                                    | 14    | 緩いL/O | 17.0                      | 18.0                                     | 199                                  | 119.00   | 79.33                                  | 沖積砂質土                      | 0.0050   |
| 16.0                 | 12.0                            | 1.0                      | 7.30  | 72.19 | 14.00 | 6.51                                    | 21    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 332                                  | 128.00   | 85.33                                  | 沖積砂質土                      | 0.0043   |
| 17.0                 | 13.0                            | 1.0                      |       |       |       | 30.5                                    | 24    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 245                                  | 138.00   | 92.00                                  | 沖積砂質土                      | 0.0041   |
| 18.0                 | 14.0                            | 1.0                      |       |       |       | 30.5                                    | 33    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 277                                  | 148.00   | 98.67                                  | 沖積砂質土                      | 0.0036   |
| 19.0                 | 15.0                            | 1.0                      |       |       |       | 30.5                                    | 13    | 緩いL/O | 17.0                      | 18.0                                     | 193                                  | 157.00   | 104.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0052   |
| 20.0                 | 16.0                            | 1.0                      | 4.85  | 72.47 | 16.56 | 6.31                                    | 12    | 緩いL/O | 17.0                      | 18.0                                     | 187                                  | 165.00   | 110.00                                 | 沖積砂質土                      | 0.0053   |
| 21.0                 | 17.0                            | 1.0                      |       |       |       | 30.5                                    | 14    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 304                                  | 174.00   | 116.00                                 | 沖積砂質土                      | 0.0033   |
| 22.0                 | 18.0                            | 1.0                      |       |       |       | 30.5                                    | 21    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 304                                  | 184.00   | 122.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0031   |
| 23.0                 | 19.0                            | 1.0                      | 1.17  | 73.90 | 15.86 | 9.08                                    | 48    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 327                                  | 184.00   | 122.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0032   |
| 24.0                 | 20.0                            | 1.0                      |       |       |       | 30.5                                    | 26    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 252                                  | 204.00   | 136.00                                 | 沖積砂質土                      | 0.0040   |
| 25.0                 | 21.0                            | 1.0                      |       |       |       | 35.8                                    | 23    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 241                                  | 210.00   | 142.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0042   |
| 26.0                 | 22.0                            | 1.0                      |       |       |       | 19.7                                    | 40    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 298                                  | 224.00   | 149.33                                 | 沖積砂質土                      | 0.0034   |
| 27.0                 | 23.0                            | 1.0                      |       |       |       | 13.7                                    | 40    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 298                                  | 224.00   | 149.33                                 | 沖積砂質土                      | 0.0034   |
| 28.0                 | 24.0                            | 1.0                      | 18.45 | 67.88 | 10.48 | 3.18                                    | 37    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 289                                  | 244.00   | 162.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0035   |
| 29.0                 | 25.0                            | 1.0                      |       |       |       | 14.1                                    | 34    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 289                                  | 244.00   | 162.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0035   |
| 30.0                 | 26.0                            | 1.0                      |       |       |       | 14.1                                    | 34    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 289                                  | 244.00   | 162.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0035   |
| 31.0                 | 27.0                            | 1.0                      |       |       |       | 14.1                                    | 34    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 289                                  | 244.00   | 162.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0035   |
| 32.0                 | 28.0                            | 1.0                      | 15.46 | 70.47 | 10.77 | 3.28                                    | 38    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 295                                  | 274.00   | 182.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0034   |
| 33.0                 | 29.0                            | 1.0                      |       |       |       | 14.1                                    | 45    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 312                                  | 284.00   | 189.33                                 | 沖積砂質土                      | 0.0032   |
| 34.0                 | 30.0                            | 1.0                      |       |       |       | 14.1                                    | 45    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 304                                  | 294.00   | 196.00                                 | 沖積砂質土                      | 0.0033   |
| 34.0                 | 34.0                            | 1.0                      |       |       |       | 14.1                                    | 49    | 密L/O  | 19.0                      | 20.0                                     | 322                                  | 304.00   | 202.67                                 | 沖積砂質土                      | 0.0031   |

基礎の基本固有周期 $T_b = k \times L / (V_s)$  単位: 秒





・B-2

表の赤枠については以下のように設定する。

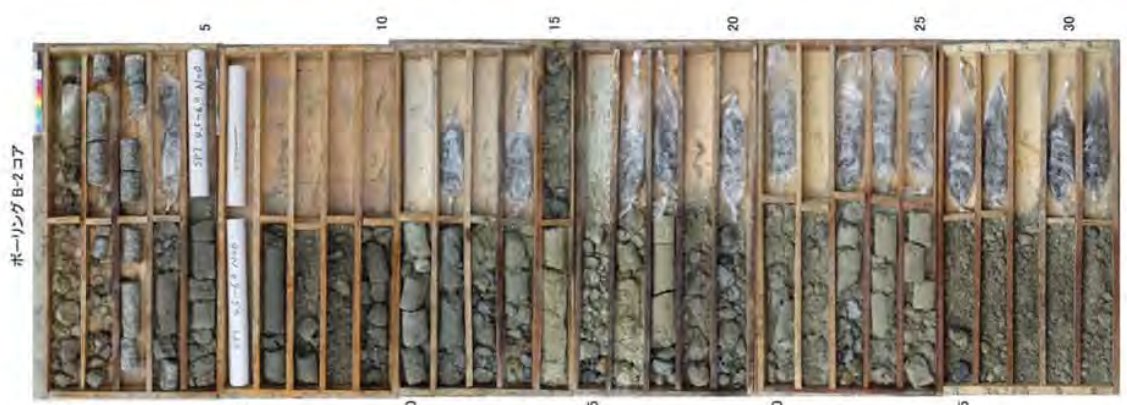
赤枠①：計測値は1~3層目はN値500、5~6層目はN値50、7~8層目はN値50、9~10層目はN値50、11~12層目はN値50、13~14層目はN値50、15~16層目はN値50、17~18層目はN値50、19~20層目はN値50、21~22層目はN値50、23~24層目はN値50、25~26層目はN値50、27~28層目はN値50、29~30層目はN値50

赤枠②：①より、4層目の値を準用する。

赤枠③：試験値の無い土質については、コア写真を参考に概ね同じ土質の試験値を準用する。

赤枠④：計測値はN値500であることから、1層下のN値65を準用する。

基礎条件：31層目、 $\gamma = 20.0$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s = 440$  (m/sec)、線形弾性



| ボーリング名     |  | B-2      |           |
|------------|--|----------|-----------|
| 地下水位深度 GL- |  | 0.00 (m) | 25.00 (m) |

| 深度<br>(層下層)<br>Depth | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth | 層厚<br>Layer<br>thickness | 粒度<br>Grain size |                      | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態<br>State | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効上載圧<br>(過中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure | 有効拘束圧<br>(過中心)<br>effective<br>confining<br>pressure | O'や<br>依存式<br>G, G <sub>v</sub> , γ<br>h-T | 増進の<br>基本固有周期<br>natural<br>period |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|----------------------|---|-------------------------|---------------|-------------|------------------------------------|--|--------------------------------------|---|--|--|------------------------------------|
|                      |                                 |                          | 篩分<br>Drinel     | シルト分<br>Silt<br>Clay |   |                         |               |             |                                    |  |                                      |   |  |  |                                    |
| 1.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 17.98            | 52.10                | 23.01                                     | 6.90                    | (N)           | (%)         | 38.6                               | 18.0                                     | 144                                  | 4.00  | 2.67   | 0.0070                                     | 沖積砂質土                              |
| 2.0                  | 2.0                             | 1.0                      | 15.30            | 67.39                | 15.62                                     | 1.69                    | 17.3          | 砂質土         | 38.8                               | 18.0                                     | 144                                  | 12.00   | 8.00   | 0.0070                                     | 沖積砂質土                              |
| 3.0                  | 3.0                             | 1.0                      | 18.58            | 53.14                | 21.44                                     | 8.87                    | 28.3          | 砂質土         | 38.8                               | 18.0                                     | 144                                  | 20.00   | 13.33  | 0.0070                                     | 沖積砂質土                              |
| 4.0                  | 4.0                             | 1.0                      | 0.00             | 61.39                | 32.46                                     | 6.16                    | 38.6          | 砂質土         | 38.6                               | 18.0                                     | 144                                  | 28.00   | 18.67  | 0.0070                                     | 沖積砂質土                              |
| 5.0                  | 5.0                             | 1.0                      | 17.98            | 52.10                | 23.01                                     | 6.90                    | 38.6          | 砂質土         | 38.6                               | 18.0                                     | 144                                  | 30.00   | 24.00  | 0.0070                                     | 沖積砂質土                              |
| 6.0                  | 6.0                             | 1.0                      | 17.98            | 52.10                | 23.01                                     | 6.90                    | 38.6          | 砂質土         | 38.6                               | 18.0                                     | 144                                  | 44.00   | 29.33  | 0.0070                                     | 沖積砂質土                              |
| 7.0                  | 7.0                             | 1.0                      | 17.98            | 52.10                | 23.01                                     | 6.90                    | 28.9          | 砂質土         | 28.9                               | 20.0                                     | 267                                  | 52.00   | 35.33  | 0.0037                                     | 沖積砂質土                              |
| 8.0                  | 8.0                             | 1.0                      | 15.30            | 67.39                | 15.62                                     | 1.69                    | 17.3          | 砂質土         | 17.3                               | 20.0                                     | 301                                  | 83.00   | 47.00  | 0.0033                                     | 沖積砂質土                              |
| 9.0                  | 9.0                             | 1.0                      | 18.58            | 53.14                | 21.44                                     | 8.87                    | 28.3          | 砂質土         | 28.3                               | 20.0                                     | 325                                  | 73.00   | 48.67  | 0.0031                                     | 沖積砂質土                              |
| 10.0                 | 10.0                            | 1.0                      | 18.69            | 54.21                | 20.51                                     | 6.59                    | 27.1          | 砂質土         | 27.1                               | 20.0                                     | 325                                  | 83.00   | 55.33  | 0.0031                                     | 沖積砂質土                              |
| 11.0                 | 11.0                            | 1.0                      | 11.85            | 45.52                | 32.41                                     | 10.42                   | 42.8          | 砂質土         | 42.8                               | 20.0                                     | 325                                  | 83.00   | 82.00  | 0.0031                                     | 沖積砂質土                              |
| 12.0                 | 12.0                            | 1.0                      | 13.23            | 61.59                | 23.19                                     | 1.99                    | 25.2          | 砂質土         | 25.2                               | 20.0                                     | 277                                  | 103.00  | 88.67  | 0.0031                                     | 沖積砂質土                              |
| 13.0                 | 13.0                            | 1.0                      | 13.23            | 61.59                | 23.19                                     | 1.99                    | 25.2          | 砂質土         | 25.2                               | 20.0                                     | 277                                  | 113.00  | 75.33  | 0.0036                                     | 沖積砂質土                              |
| 14.0                 | 14.0                            | 1.0                      | 25.2             | 25.2                 | 25.2                                      | 25.2                    | 36            | 砂質土         | 36                                 | 20.0                                     | 286                                  | 133.00  | 82.00  | 0.0035                                     | 沖積砂質土                              |
| 15.0                 | 15.0                            | 1.0                      | 43.2             | 43.2                 | 43.2                                      | 43.2                    | 65            | 砂質土         | 65                                 | 20.0                                     | 359                                  | 133.00  | 88.67  | 0.0028                                     | 沖積砂質土                              |
| 16.0                 | 16.0                            | 1.0                      | 22.14            | 34.69                | 28.27                                     | 14.89                   | 43.2          | 砂質土         | 43.2                               | 20.0                                     | 359                                  | 143.00  | 95.33  | 0.0028                                     | 沖積砂質土                              |
| 17.0                 | 17.0                            | 1.0                      | 43.2             | 43.2                 | 43.2                                      | 43.2                    | 83            | 砂質土         | 83                                 | 20.0                                     | 378                                  | 153.00  | 102.00   | 0.0026                                     | 沖積砂質土                              |
| 18.0                 | 18.0                            | 1.0                      | 43.2             | 43.2                 | 43.2                                      | 43.2                    | 74            | 砂質土         | 74                                 | 20.0                                     | 378                                  | 163.00  | 108.67   | 0.0031                                     | 沖積砂質土                              |
| 19.0                 | 19.0                            | 1.0                      | 24.34            | 61.69                | 11.09                                     | 2.88                    | 14.0          | 砂質土         | 14.0                               | 20.0                                     | 359                                  | 173.00  | 115.33   | 0.0028                                     | 沖積砂質土                              |
| 20.0                 | 20.0                            | 1.0                      | 14.0             | 14.0                 | 14.0                                      | 14.0                    | 72            | 砂質土         | 72                                 | 20.0                                     | 374                                  | 183.00  | 122.00   | 0.0027                                     | 沖積砂質土                              |
| 21.0                 | 21.0                            | 1.0                      | 29.4             | 29.4                 | 29.4                                      | 29.4                    | 74            | 砂質土         | 74                                 | 20.0                                     | 378                                  | 193.00  | 126.67   | 0.0026                                     | 沖積砂質土                              |
| 22.0                 | 22.0                            | 1.0                      | 14.32            | 59.25                | 24.17                                     | 2.26                    | 26.4          | 砂質土         | 26.4                               | 20.0                                     | 372                                  | 203.00  | 135.33   | 0.0027                                     | 沖積砂質土                              |
| 23.0                 | 23.0                            | 1.0                      | 29.4             | 29.4                 | 29.4                                      | 29.4                    | 69            | 砂質土         | 69                                 | 20.0                                     | 386                                  | 213.00  | 142.00   | 0.0027                                     | 沖積砂質土                              |
| 24.0                 | 24.0                            | 1.0                      | 29.4             | 29.4                 | 29.4                                      | 29.4                    | 75            | 砂質土         | 75                                 | 20.0                                     | 386                                  | 223.00  | 148.67   | 0.0026                                     | 沖積砂質土                              |
| 25.0                 | 25.0                            | 1.0                      | 26.1             | 26.1                 | 26.1                                      | 26.1                    | 75            | 砂質土         | 75                                 | 20.0                                     | 386                                  | 233.00  | 155.33   | 0.0026                                     | 沖積砂質土                              |
| 26.0                 | 26.0                            | 1.0                      | 23.9             | 23.9                 | 23.9                                      | 23.9                    | 69            | 砂質土         | 69                                 | 20.0                                     | 368                                  | 243.00  | 162.00   | 0.0027                                     | 沖積砂質土                              |
| 27.0                 | 27.0                            | 1.0                      | 23.9             | 23.9                 | 23.9                                      | 23.9                    | 72            | 砂質土         | 72                                 | 20.0                                     | 374                                  | 253.00  | 168.67   | 0.0027                                     | 沖積砂質土                              |
| 28.0                 | 28.0                            | 1.0                      | 12.98            | 63.10                | 21.48                                     | 2.44                    | 23.9          | 砂質土         | 23.9                               | 20.0                                     | 368                                  | 263.00  | 175.33   | 0.0022                                     | 沖積砂質土                              |
| 29.0                 | 29.0                            | 1.0                      | 23.9             | 23.9                 | 23.9                                      | 23.9                    | 74            | 砂質土         | 74                                 | 20.0                                     | 378                                  | 273.00  | 182.00   | 0.0026                                     | 沖積砂質土                              |
| 30.0                 | 30.0                            | 1.0                      | 23.9             | 23.9                 | 23.9                                      | 23.9                    | 75            | 砂質土         | 75                                 | 20.0                                     | 380                                  | 283.00  | 188.67   | 0.0026                                     | 沖積砂質土                              |



増進の基本固有周期 T<sub>n</sub> = 4 × Σ (H<sub>i</sub>/V<sub>s<sub>i</sub>)</sub>

0.4473

2 層数

・B-5

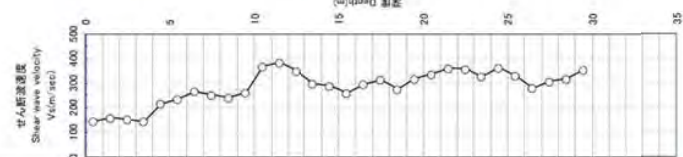
表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①：試験値の無い土質については、コア写真を参考に概ね同じ土質の試験値を準用する。  
 基礎条件：31層目、 $\gamma = 19.0$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s = 440$  (m/sec)、線形弾性

ボーリングB-5コア



| ボーリング名             |      | B-5                   |      |                  |              |             |  |                      |               |      |  |  |  |   |  |                                   |   |
|--------------------|------|-----------------------|------|------------------|--------------|-------------|--|----------------------|---------------|------|--|--|--|---|--|-----------------------------------|---|
| 地下水位深度 GL-         |      | 0.00 (m)              |      |                  |              |             |  |                      |               |      |  |  |  |   |  |                                   |   |
| 沖積品積層表土コアの境界深度 GL- |      | 24.00 (m)             |      |                  |              |             |  |                      |               |      |  |  |  |   |  |                                   |   |
| 深度 (層下層)<br>Depth  | (m)  | 層厚<br>Layer thickness | (m)  | 粒徑<br>Grain size |              |             | 細粒分<br>Fine fraction content<br>FC (%) | 土質区分<br>Type of Soil | N値<br>N-Value | 状態   | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit weight<br>$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit weight<br>$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | せん断波<br>速度<br>Shear Wave Velocity<br>$V_s$ (m/sec) | 有効上層圧<br>(層中心)<br>effective overburden pressure<br>$\sigma'_v$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 有効側層圧<br>(層中心)<br>effective confining pressure<br>$\sigma'_h$ (kN/m <sup>2</sup> ) | ひずみ<br>G, $\epsilon_1$ - $\gamma$ | 地盤の<br>基本固有周期<br>T <sub>n</sub> の算出<br>natural period<br>(H/V <sub>s</sub> )<br>(sec) |
|                    |      |                       |      | 層分<br>Clayel     | シルト分<br>Silt | 粘土分<br>Clay |  |                      |               |      |  |  |  |   |  |                                   |   |
|                    |      |                       | (%)  | (%)              | (%)          | (%)         |  |                      |               |      |  |  |  |   |  |                                   |   |
| 1.0                | 1.0  | 1.0                   | 0.00 | 13.87            | 39.96        | 46.67       | 86.3                                   | 粘性土                  | 3             | 緩いもの | 14.0   | 15.0   | 144  | 2.50  | 1.67   | 沖積粘性土                             | 0.0059  |
| 2.0                | 2.0  | 1.0                   | 0.00 | 14.56            | 41.01        | 44.42       | 85.4                                   | 粘性土                  | 4             | 緩いもの | 14.0   | 15.0   | 159  | 7.50  | 5.00   | 沖積粘性土                             | 0.0053  |
| 3.0                | 3.0  | 1.0                   | 0.00 | 68.92            | 18.04        | 13.05       | 31.1                                   | 砂質土                  | 7             | 緩いもの | 17.0   | 18.0   | 152  | 14.00   | 9.33   | 沖積砂質土                             | 0.0066  |
| 4.0                | 4.0  | 1.0                   | 0.00 | 30.81            | 33.78        | 35.61       | 68.4                                   | 粘性土                  | 3             | 緩いもの | 14.0   | 15.0   | 144  | 20.50   | 13.67  | 沖積粘性土                             | 0.0069  |
| 5.0                | 5.0  | 1.0                   | 0.00 | 13.74            | 40.50        | 45.75       | 89.3                                   | 粘性土                  | 10            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 215  | 27.50   | 18.33  | 沖積粘性土                             | 0.0066  |
| 6.0                | 6.0  | 1.0                   | 0.00 | 13.61            | 42.75        | 43.64       | 86.4                                   | 粘性土                  | 13            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 235  | 38.50   | 24.33  | 沖積粘性土                             | 0.0043  |
| 7.0                | 7.0  | 1.0                   | 1.05 | 14.80            | 41.96        | 42.19       | 84.2                                   | 粘性土                  | 19            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 267  | 45.50   | 30.33  | 沖積粘性土                             | 0.0037  |
| 8.0                | 8.0  | 1.0                   | 0.00 | 31.35            | 37.12        | 31.12       | 68.7                                   | 粘性土                  | 14            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 241  | 63.50   | 42.33  | 沖積粘性土                             | 0.0041  |
| 9.0                | 9.0  | 1.0                   | 0.00 | 45.73            | 29.64        | 24.63       | 54.3                                   | 粘性土                  | 18            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 262  | 72.50   | 48.33  | 沖積粘性土                             | 0.0038  |
| 10.0               | 10.0 | 1.0                   | 0.00 | 10.05            | 40.47        | 49.48       | 90.0                                   | 粘性土                  | 50            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 368  | 81.50   | 54.33  | 沖積粘性土                             | 0.0027  |
| 11.0               | 11.0 | 1.0                   | 1.13 | 16.06            | 42.08        | 40.73       | 82.8                                   | 粘性土                  | 57            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 385  | 90.50   | 60.33  | 沖積粘性土                             | 0.0026  |
| 12.0               | 12.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 82.3                                   | 粘性土                  | 43            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 350  | 89.50   | 66.33  | 沖積粘性土                             | 0.0029  |
| 13.0               | 13.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 78.9                                   | 砂質土                  | 40            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 298  | 109.00  | 72.67  | 沖積砂質土                             | 0.0034  |
| 14.0               | 14.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 38.9                                   | 砂質土                  | 37            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 289  | 119.00  | 79.33  | 沖積砂質土                             | 0.0035  |
| 15.0               | 15.0 | 1.0                   | 0.00 | 61.06            | 27.73        | 11.21       | 38.9                                   | 砂質土                  | 28            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 290  | 129.00  | 86.00  | 沖積砂質土                             | 0.0039  |
| 16.0               | 16.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 39.9                                   | 砂質土                  | 39            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 295  | 130.00  | 92.67  | 沖積砂質土                             | 0.0034  |
| 17.0               | 17.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 39.9                                   | 砂質土                  | 31            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 314  | 148.50  | 99.00  | 沖積砂質土                             | 0.0032  |
| 18.0               | 18.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 89.9                                   | 粘性土                  | 21            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 276  | 157.50  | 105.00   | 沖積粘性土                             | 0.0038  |
| 19.0               | 19.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 89.9                                   | 粘性土                  | 31            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 317  | 168.50  | 111.00   | 沖積粘性土                             | 0.0031  |
| 20.0               | 20.0 | 1.0                   | 0.00 | 16.11            | 30.00        | 58.89       | 89.9                                   | 粘性土                  | 32            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 317  | 168.50  | 111.00   | 沖積粘性土                             | 0.0031  |
| 21.0               | 21.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 89.9                                   | 粘性土                  | 38            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 336  | 175.50  | 123.00   | 沖積粘性土                             | 0.0028  |
| 22.0               | 22.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 89.9                                   | 粘性土                  | 47            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 361  | 184.50  | 129.00   | 沖積粘性土                             | 0.0028  |
| 23.0               | 23.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 89.9                                   | 粘性土                  | 46            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 358  | 193.50  | 129.00   | 沖積粘性土                             | 0.0028  |
| 24.0               | 24.0 | 1.0                   | 0.00 | 11.14            | 41.34        | 47.52       | 88.9                                   | 粘性土                  | 35            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 327  | 202.50  | 135.00   | 沖積粘性土                             | 0.0031  |
| 25.0               | 25.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 89.9                                   | 粘性土                  | 48            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 363  | 211.50  | 141.00   | 沖積粘性土                             | 0.0028  |
| 26.0               | 26.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 90.1                                   | 粘性土                  | 36            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 330  | 220.50  | 147.00   | 沖積粘性土                             | 0.0030  |
| 27.0               | 27.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 90.1                                   | 粘性土                  | 22            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 280  | 229.50  | 153.00   | 沖積粘性土                             | 0.0036  |
| 28.0               | 28.0 | 1.0                   | 0.00 | 9.85             | 40.84        | 49.30       | 90.1                                   | 粘性土                  | 29            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 307  | 238.50  | 159.00   | 沖積粘性土                             | 0.0033  |
| 29.0               | 29.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 90.1                                   | 粘性土                  | 32            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 317  | 247.50  | 165.00   | 沖積粘性土                             | 0.0031  |
| 30.0               | 30.0 | 1.0                   |      |                  |              |             | 90.1                                   | 粘性土                  | 45            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 356  | 256.50  | 171.00   | 沖積粘性土                             | 0.0028  |



地盤の基本固有周期  $T_n = 2.0 \sqrt{H/V_s}$



・ AB-12

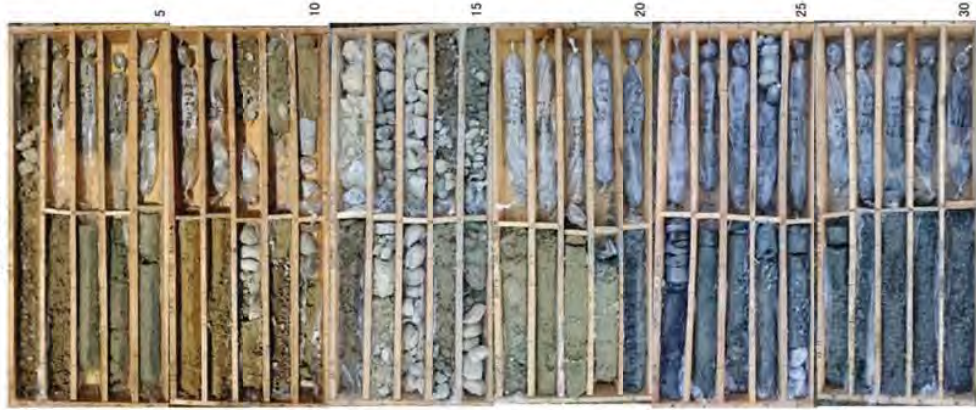
ボーリング AB-12 は液状化により地表面標高が 2m 程度低下しているため、解析では表層地盤 2m を付加してモデル化する。  
表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①： ボーリングコアにおける表層地盤(深度 1m まで)と概ね同じ土質であると仮定する。

赤枠②： 礫層主体の層では N 値が極体に大きい値を計測するため、解析では基礎の V<sub>s</sub> を適用する。

基礎条件： 30 層目、 $\gamma = 20.0$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s = 440$  (m/sec)、線形弾性

ボーリング AB-12 コア



| ボーリング名                 |  | AB-12     |  |
|------------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深度 OL-             |  | 0.00 (m)  |  |
| 沖積洪積層厚(ボーリングの標準深さ) OL- |  | 20.50 (m) |  |

| 深さ<br>(層下指)<br>Depth<br>(m) | ボーリング<br>コア深さ<br>(層下指)<br>Depth<br>(m) | 層厚<br>Layer<br>thickness<br>(m) | 粒径<br>Grain size |              |             | 細砂分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>constant<br>FC<br>(%) | N値   | 状態  | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight<br>$T_w$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight<br>$T_{sat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | せん断速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) | 有効上載圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure<br>$\sigma_v'$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 有効拘束圧<br>(層中心)<br>affactive<br>confining<br>pressure<br>$\sigma_h'$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ひずみ<br>体形式<br>$\sigma/\sigma_v' - \gamma$ | 基礎の<br>基本固有周期<br>$T_b$ の算出<br>natural<br>period<br>(H/V <sub>s</sub> )<br>(sec) |  |
|-----------------------------|--|---------------------------------|------------------|--------------|-------------|---|------|-----|---|---|---|--|---|---|---|--|
|                             |  |                                 | 礫分<br>Gravel     | シルト分<br>Silt | 粘土分<br>Clay |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 10                          | 10                                     | 1.0                             | 0                | 0            | 0           | 0   | 2    | 細い砂 | 17.0  | 18.0  | 84  | 4.00   | 2.67  | 沖積砂質土                                     | 0.0106  |  |
| 20                          | 10                                     | 1.0                             | 0                | 0            | 0           | 0   | 2    | 細い砂 | 17.0  | 18.0  | 84  | 12.00  | 8.00  | 沖積砂質土                                     | 0.0106  |  |
| 30                          | 10                                     | 1.0                             | 5.80             | 69.70        | 10.60       | 13.80   | 24.4 | 砂質土 | 17.0  | 18.0  | 84  | 20.00  | 13.33   | 沖積砂質土                                     | 0.0106  |  |
| 40                          | 20                                     | 1.0                             | 0.20             | 66.20        | 15.10       | 18.50   | 33.6 | 砂質土 | 17.0  | 18.0  | 84  | 28.00  | 18.67   | 沖積砂質土                                     | 0.0106  |  |
| 50                          | 30                                     | 1.0                             | 0.40             | 65.80        | 14.40       | 14.30   | 29.7 | 砂質土 | 17.0  | 18.0  | 110   | 38.00  | 24.00   | 沖積砂質土                                     | 0.0091  |  |
| 60                          | 40                                     | 1.0                             | 15.30            | 57.70        | 22.40       | 14.30   | 10   | 砂質土 | 17.0  | 18.0  | 175   | 44.00  | 29.33   | 沖積砂質土                                     | 0.0057  |  |
| 70                          | 50                                     | 1.0                             | 7.70             | 84.20        | 8.10        | 8.1   | 16   | 砂質土 | 17.0  | 18.0  | 309   | 52.00  | 34.67   | 沖積砂質土                                     | 0.0048  |  |
| 80                          | 60                                     | 1.0                             | 20.80            | 56.00        | 23.20       | 23.2  | 45   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 312   | 61.00  | 40.67   | 沖積砂質土                                     | 0.0032  |  |
| 90                          | 70                                     | 1.0                             |                  |              |             |   | 300  | 砂質土 | 20.0  | 21.0  | 440   | 71.50  | 47.67   | 沖積砂質土                                     | 0.0023  |  |
| 100                         | 80                                     | 1.0                             |                  |              |             |   | 214  | 砂質土 | 20.0  | 21.0  | 440   | 82.50  | 55.00   | 沖積砂質土                                     | 0.0023  |  |
| 110                         | 90                                     | 1.0                             |                  |              |             |   | 300  | 砂質土 | 20.0  | 21.0  | 440   | 93.50  | 62.33   | 沖積砂質土                                     | 0.0023  |  |
| 120                         | 100                                    | 1.0                             |                  |              |             |   | 1500 | 砂質土 | 20.0  | 21.0  | 440   | 104.50   | 69.67   | 沖積砂質土                                     | 0.0023  |  |
| 130                         | 110                                    | 1.0                             |                  |              |             |   | 1500 | 砂質土 | 20.0  | 21.0  | 440   | 115.50   | 77.00   | 沖積砂質土                                     | 0.0023  |  |
| 140                         | 120                                    | 1.0                             |                  |              |             |   | 1500 | 砂質土 | 20.0  | 21.0  | 440   | 126.50   | 84.33   | 沖積砂質土                                     | 0.0023  |  |
| 150                         | 130                                    | 1.0                             |                  |              |             |   | 1500 | 砂質土 | 20.0  | 21.0  | 440   | 137.50   | 91.67   | 沖積砂質土                                     | 0.0023  |  |
| 160                         | 140                                    | 1.0                             |                  |              |             |   | 1500 | 砂質土 | 20.0  | 21.0  | 440   | 148.50   | 99.00   | 沖積砂質土                                     | 0.0023  |  |
| 170                         | 150                                    | 1.0                             |                  |              |             |   | 25   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 248   | 159.00   | 106.00  | 沖積砂質土                                     | 0.0040  |  |
| 180                         | 160                                    | 1.0                             | 0.80             | 97.80        | 31.40       | 15.4  | 30   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 267   | 169.00   | 112.67  | 沖積砂質土                                     | 0.0037  |  |
| 190                         | 170                                    | 1.0                             | 62.60            | 18.80        | 18.60       | 31.4  | 33   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 277   | 179.00   | 119.33  | 沖積砂質土                                     | 0.0036  |  |
| 200                         | 180                                    | 1.0                             | 9.90             | 54.40        | 20.20       | 15.50   | 40   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 298   | 189.00   | 126.00  | 沖積砂質土                                     | 0.0034  |  |
| 210                         | 190                                    | 1.0                             | 9.80             | 51.70        | 22.40       | 16.10   | 38.5 | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 343   | 199.00   | 132.67  | 沖積砂質土                                     | 0.0029  |  |
| 220                         | 200                                    | 1.0                             | 0.20             | 37.20        | 38.90       | 23.70   | 62.6 | 粘性土 | 18.0  | 19.0  | 300   | 208.50   | 139.00  | 沖積砂質土                                     | 0.0033  |  |
| 230                         | 210                                    | 1.0                             | 2.10             | 62.50        | 22.20       | 13.10   | 35.4 | 砂質土 | 18.0  | 20.0  | 219   | 218.00   | 145.33  | 沖積砂質土                                     | 0.0037  |  |
| 240                         | 220                                    | 1.0                             | 28.50            | 41.40        | 30.10       | 30.1  | 47   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 317   | 228.00   | 152.00  | 沖積砂質土                                     | 0.0032  |  |
| 250                         | 230                                    | 1.0                             | 18.20            | 52.80        | 28.00       | 28.0  | 63   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 354   | 238.00   | 158.67  | 沖積砂質土                                     | 0.0028  |  |
| 260                         | 240                                    | 1.0                             | 18.20            | 38.80        | 35.90       | 34.30   | 40   | 粘性土 | 16.0  | 19.0  | 342   | 247.50   | 165.00  | 沖積砂質土                                     | 0.0028  |  |
| 270                         | 250                                    | 1.0                             | 8.30             | 61.20        | 30.50       | 12.30   | 58   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 343   | 257.00   | 171.33  | 沖積砂質土                                     | 0.0029  |  |
| 280                         | 260                                    | 1.0                             | 0.60             | 93.50        | 4.50        | 4.50  | 69   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 344   | 267.00   | 178.00  | 沖積砂質土                                     | 0.0029  |  |
| 290                         | 270                                    | 1.0                             | 14.60            | 83.00        | 2.40        | 2.4   | 75   | 砂質土 | 19.0  | 20.0  | 380   | 277.00   | 184.67  | 沖積砂質土                                     | 0.0026  |  |
| 300                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 310                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 320                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 330                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 340                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 350                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 360                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 370                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 380                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 390                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 400                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 410                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 420                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 430                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 440                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 450                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 460                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 470                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 480                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 490                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 500                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 510                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 520                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 530                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 540                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 550                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 560                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 570                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 580                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 590                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 600                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 610                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 620                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 630                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 640                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 650                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 660                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 670                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 680                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 690                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 700                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 710                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 720                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 730                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 740                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 750                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 760                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 770                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 780                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 790                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 800                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 810                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 820                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 830                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 840                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 850                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 860                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 870                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 880                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 890                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 900                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 910                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 920                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 930                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 940                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 950                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 960                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 970                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 980                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 990                         |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |
| 1000                        |  |                                 |                  |              |             |   |      |     |   |   |   |  |   |   |   |  |

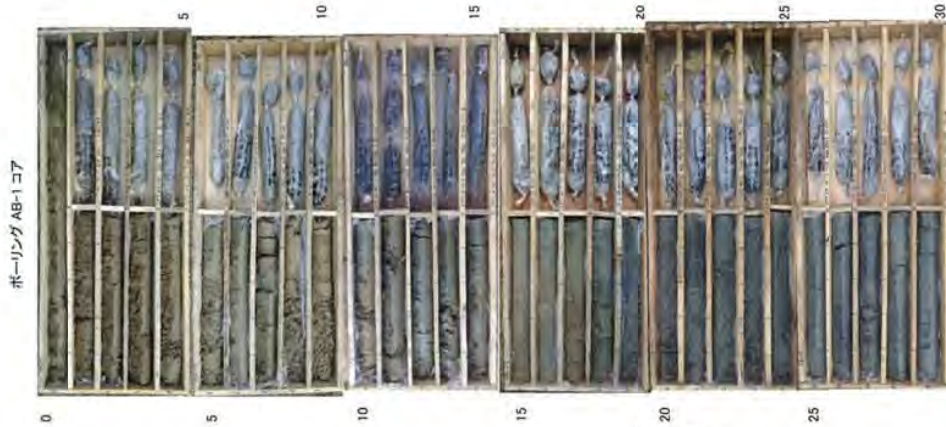




・AB-1

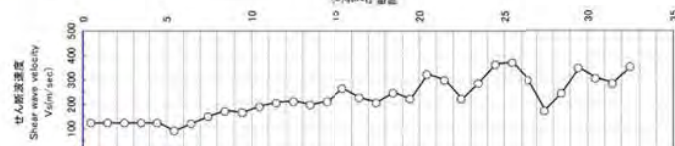
ボーリングAB-1は液状化により地表面標高が4m程度低下しているため、解析では表層地盤4mを付加してモデル化する。  
 表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①：ボーリングコアにおける表層地盤(深さ1mまで)と概ね同じ土質であると仮定する。  
 基礎条件：34層目、 $\gamma_s=20.0$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s=440$  (m/sec)、線形弾性



| ボーリング名                 |  | AB-1      |  |
|------------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深さ OL=             |  | 0.00 (m)  |  |
| 沖積浜積層厚(ボーリングの基準深さ) OL= |  | 21.40 (m) |  |

| 深度<br>(層下深)<br>Depth | ボーリング<br>コア深さ<br>(層下深)<br>Depth | 層厚<br>Layer<br>thickness | 粒置         |              |             | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content<br>FC (%) | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態    | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効上載圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure | 有効側載圧<br>(層中心)<br>confining<br>pressure | U-イキ<br>依存式<br>$G/\Delta\sigma_v = T$<br>$h = \gamma$ | 増幅の<br>基本固有周期<br>$T_b$ の算出<br>natural<br>period<br>(H/V)<br>(sec) |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|------------|--------------|-------------|---|-------------------------|---------------|-------|------------------------------------|--|--------------------------------------|---|---|---|---|
|                      |                                 |                          | 砂分<br>Sand | シルト分<br>Silt | 粘土分<br>Clay |   |                         |               |       |                                    |  |                                      |   |   |   |   |
| 1.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 0.00       | 0.00         | 0.00        | 0.00  | 粘土土                     | 2             | 硬いL/O | 14.0                               | 15.0                                     | 126                                  | 2.50  | 1.67                                    | 沖積粘性土   | 0.0079  |
| 2.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 11.40      | 48.60        | 20.50       | 56.3  | 粘性土                     | 2             | 硬いL/O | 14.0                               | 15.0                                     | 126                                  | 7.50  | 5.00                                    | 沖積粘性土   | 0.0079  |
| 3.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 16.80      | 64.30        | 12.70       | 44.4  | 粘性土                     | 2             | 硬いL/O | 14.0                               | 15.0                                     | 126                                  | 12.50   | 8.33                                    | 沖積粘性土   | 0.0079  |
| 4.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 0.40       | 69.00        | 17.50       | 33.0  | 粘性土                     | 2             | 硬いL/O | 14.0                               | 15.0                                     | 126                                  | 17.50   | 11.67                                   | 沖積粘性土   | 0.0079  |
| 5.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 15.50      | 55.80        | 16.70       | 28.7  | 粘性土                     | 13            | 硬いL/O | 14.0                               | 15.0                                     | 126                                  | 22.50   | 15.00                                   | 沖積粘性土   | 0.0079  |
| 6.0                  | 2.0                             | 1.0                      | 23.70      | 68.90        | 7.40        | 7.4   | 砂質土                     | 16            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 183                                  | 69.00   | 46.00                                   | 沖積砂質土   | 0.0052  |
| 7.0                  | 3.0                             | 1.0                      | 9.60       | 68.60        | 12.30       | 21.5  | 砂質土                     | 17            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 209                                  | 71.00   | 51.33                                   | 沖積砂質土   | 0.0048  |
| 8.0                  | 4.0                             | 1.0                      | 4.50       | 43.70        | 24.50       | 51.8  | 粘性土                     | 8             | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 214                                  | 85.00   | 56.67                                   | 沖積粘性土   | 0.0047  |
| 9.0                  | 5.0                             | 1.0                      | 12.80      | 63.70        | 13.70       | 23.5  | 砂質土                     | 17            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 214                                  | 102.00  | 62.33                                   | 沖積砂質土   | 0.0047  |
| 10.0                 | 6.0                             | 1.0                      | 0.80       | 34.60        | 34.60       | 64.6  | 粘性土                     | 19            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 287                                  | 110.50  | 73.67                                   | 沖積粘性土   | 0.0037  |
| 11.0                 | 7.0                             | 1.0                      | 0.20       | 51.60        | 29.90       | 56.8  | 粘性土                     | 12            | 硬いL/O | 18.0                               | 19.0                                     | 229                                  | 119.50  | 79.67                                   | 沖積粘性土   | 0.0044  |
| 12.0                 | 8.0                             | 1.0                      | 3.70       | 68.90        | 7.40        | 7.4   | 砂質土                     | 16            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 209                                  | 128.00  | 85.33                                   | 沖積砂質土   | 0.0048  |
| 13.0                 | 9.0                             | 1.0                      | 9.60       | 68.60        | 12.30       | 21.5  | 砂質土                     | 17            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 214                                  | 137.00  | 91.33                                   | 沖積砂質土   | 0.0048  |
| 14.0                 | 10.0                            | 1.0                      | 4.50       | 43.70        | 24.50       | 51.8  | 粘性土                     | 8             | 硬いL/O | 18.0                               | 19.0                                     | 214                                  | 146.00  | 97.33                                   | 沖積粘性土   | 0.0045  |
| 15.0                 | 11.0                            | 1.0                      | 12.80      | 63.70        | 13.70       | 23.5  | 砂質土                     | 17            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 214                                  | 146.00  | 97.33                                   | 沖積砂質土   | 0.0045  |
| 16.0                 | 12.0                            | 1.0                      | 0.80       | 34.60        | 34.60       | 64.6  | 粘性土                     | 19            | 硬いL/O | 18.0                               | 19.0                                     | 287                                  | 155.00  | 103.33                                  | 沖積粘性土   | 0.0031  |
| 17.0                 | 13.0                            | 1.0                      | 0.20       | 51.60        | 29.90       | 56.8  | 粘性土                     | 12            | 硬いL/O | 18.0                               | 19.0                                     | 229                                  | 164.00  | 109.33                                  | 沖積粘性土   | 0.0031  |
| 18.0                 | 14.0                            | 1.0                      | 3.70       | 68.90        | 7.40        | 7.4   | 砂質土                     | 16            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 249                                  | 173.00  | 115.33                                  | 沖積砂質土   | 0.0031  |
| 19.0                 | 15.0                            | 1.0                      | 9.60       | 68.60        | 12.30       | 21.5  | 砂質土                     | 17            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 249                                  | 182.00  | 121.33                                  | 沖積砂質土   | 0.0035  |
| 20.0                 | 16.0                            | 1.0                      | 0.30       | 70.10        | 15.90       | 29.6  | 砂質土                     | 25            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 288                                  | 192.00  | 128.00                                  | 沖積砂質土   | 0.0027  |
| 21.0                 | 17.0                            | 1.0                      | 2.50       | 76.00        | 21.50       | 21.5  | 砂質土                     | 50            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 325                                  | 192.00  | 128.00                                  | 沖積砂質土   | 0.0027  |
| 22.0                 | 18.0                            | 1.0                      | 38.30      | 55.50        | 6.50        | 6.2   | 砂質土                     | 41            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 301                                  | 195.00  | 130.00                                  | 沖積砂質土   | 0.0046  |
| 23.0                 | 19.0                            | 1.0                      | 7.00       | 59.30        | 17.90       | 33.7  | 粘性土                     | 15            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 224                                  | 174.00  | 116.00                                  | 沖積粘性土   | 0.0046  |
| 24.0                 | 20.0                            | 1.0                      | 40.00      | 33.80        | 28.40       | 69.0  | 粘性土                     | 24            | 硬いL/O | 16.0                               | 19.0                                     | 288                                  | 182.50  | 121.67                                  | 沖積粘性土   | 0.0035  |
| 25.0                 | 21.0                            | 1.0                      | 7.80       | 46.60        | 7.80        | 7.7   | 砂質土                     | 68            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 368                                  | 192.00  | 128.00                                  | 沖積砂質土   | 0.0027  |
| 26.0                 | 22.0                            | 1.0                      | 28.70      | 65.60        | 7.70        | 7.7   | 砂質土                     | 71            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 372                                  | 202.00  | 134.87                                  | 沖積砂質土   | 0.0027  |
| 27.0                 | 23.0                            | 1.0                      | 3.90       | 48.00        | 6.10        | 6.1   | 砂質土                     | 40            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 299                                  | 212.00  | 141.33                                  | 沖積砂質土   | 0.0034  |
| 28.0                 | 24.0                            | 1.0                      | 6.00       | 60.10        | 20.70       | 35.2  | 粘性土                     | 10            | 硬いL/O | 17.0                               | 18.0                                     | 175                                  | 221.00  | 147.33                                  | 沖積粘性土   | 0.0057  |
| 29.0                 | 25.0                            | 1.0                      | 32.20      | 45.30        | 22.50       | 67.8  | 粘性土                     | 15            | 硬いL/O | 18.0                               | 19.0                                     | 247                                  | 229.50  | 155.00                                  | 沖積粘性土   | 0.0041  |
| 30.0                 | 26.0                            | 1.0                      | 8.10       | 73.20        | 11.10       | 7.50  | 砂質土                     | 60            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 348                                  | 239.00  | 159.33                                  | 沖積砂質土   | 0.0029  |
| 31.0                 | 27.0                            | 1.0                      | 41.70      | 37.30        | 21.00       | 58.3  | 粘性土                     | 29            | 硬いL/O | 18.0                               | 20.0                                     | 307                                  | 245.50  | 165.67                                  | 沖積粘性土   | 0.0033  |
| 32.0                 | 28.0                            | 1.0                      | 5.10       | 77.20        | 17.60       | 17.6  | 砂質土                     | 36            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 286                                  | 258.00  | 172.00                                  | 沖積砂質土   | 0.0035  |
| 33.0                 | 29.0                            | 1.0                      | 1.30       | 69.10        | 18.90       | 29.6  | 砂質土                     | 63            | 硬いL/O | 19.0                               | 20.0                                     | 354                                  | 268.00  | 178.67                                  | 沖積砂質土   | 0.0026  |



地盤の基本固有周期 $T_b = 4 \times \Sigma(H/V_s)$   
 0.0709 赤枠参照

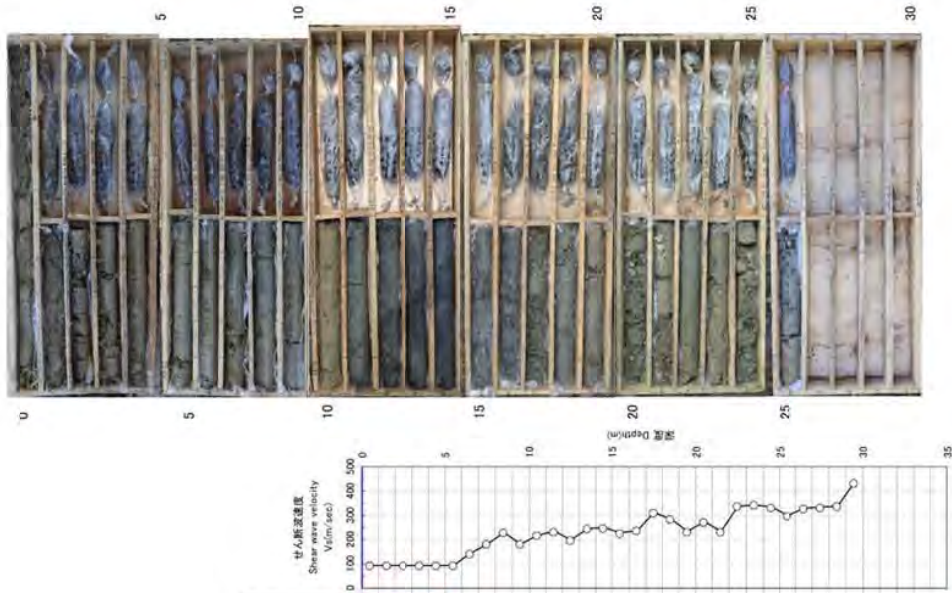


・ AB-2

ボーリングB-1は液状化により地表面標高が4m程度低下しているため、解析では表層地盤5mを付加してモデル化する。  
表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①：ボーリングコアにおける表層地盤(深度 1m まで)と概ね同じ土質であると仮定する。  
基礎条件：31層目、 $\gamma_s=20.0(\text{kN/m}^3)$ 、 $V_s=140(\text{m/sec})$ 、線形弾性

ボーリング AB-2 コア



| ボーリング名              |  | AB-2      |  |
|---------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深度 GL-          |  | 0.00 (m)  |  |
| 沖積状地盤面(コア)の境界深度 GL- |  | 22.80 (m) |  |

| 深度<br>(m) | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth | 層厚<br>Layer<br>thickness<br>(m) | 粒径<br>Grain size |              | 細砂分<br>シルト分<br>粘土分<br>Sand<br>Silt<br>Clay | 細砂分<br>含有率<br>fraction<br>constant<br>FC | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態   | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効上載圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure | 有効側載圧<br>(層中心)<br>effective<br>confining<br>pressure | ひずみ<br>依存式<br>$\sigma_1/\sigma_3 = T$ | 地盤の<br>基本固有周期<br>$T_b$ の算出<br>natural<br>period | $\sigma_1/\sigma_3$ |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|--------------|--|--|-------------------------|---------------|------|------------------------------------|--|--------------------------------------|---|--|---------------------------------------|---|---------------------|
|           |                                 |                                 | 層分<br>Level      | シルト分<br>Silt |  |  |                         |               |      |                                    |  |                                      |   |  |                                       |   |                     |
| 1.0       | 1.0                             | 1.0                             | 28.10            | 41.90        | 13.70                                      | 12.30                                    | 砂質土                     | 2             | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 84                                   | 4.00  | 2.67   | 0.0106                                | 0.0106  |                     |
| 2.0       | 1.0                             | 1.0                             | 17.40            | 75.90        | 7.00                                       | 10.3                                     | 砂質土                     | 6             | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 84                                   | 12.00   | 8.00   | 0.0106                                | 0.0106  |                     |
| 3.0       | 1.0                             | 1.0                             | 1.20             | 45.30        | 32.10                                      | 21.40                                    | 粘性土                     | 12            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 84                                   | 20.00   | 13.73  | 0.0106                                | 0.0106  |                     |
| 4.0       | 1.0                             | 1.0                             | 4.70             | 65.30        | 17.50                                      | 30.0                                     | 砂質土                     | 18            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 84                                   | 28.00   | 18.67  | 0.0106                                | 0.0106  |                     |
| 5.0       | 1.0                             | 1.0                             | 28.10            | 41.90        | 13.70                                      | 12.30                                    | 砂質土                     | 2             | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 84                                   | 44.00   | 29.33  | 0.0106                                | 0.0106  |                     |
| 6.0       | 1.0                             | 1.0                             | 17.40            | 75.90        | 7.00                                       | 10.3                                     | 砂質土                     | 6             | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 144                                  | 52.00   | 34.87  | 0.0106                                | 0.0106  |                     |
| 7.0       | 1.0                             | 1.0                             | 1.20             | 45.30        | 32.10                                      | 21.40                                    | 粘性土                     | 12            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 181                                  | 60.00   | 40.00  | 0.0070                                | 0.0070  |                     |
| 8.0       | 1.0                             | 1.0                             | 4.70             | 65.30        | 17.50                                      | 30.0                                     | 砂質土                     | 18            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 229                                  | 68.50   | 45.67  | 0.0044                                | 0.0044  |                     |
| 9.0       | 1.0                             | 1.0                             | 28.10            | 41.90        | 13.70                                      | 12.30                                    | 砂質土                     | 2             | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 181                                  | 77.00   | 51.33  | 0.0065                                | 0.0065  |                     |
| 10.0      | 1.0                             | 1.0                             | 17.40            | 75.90        | 7.00                                       | 10.3                                     | 砂質土                     | 12            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 219                                  | 85.00   | 56.67  | 0.0046                                | 0.0046  |                     |
| 11.0      | 1.0                             | 1.0                             | 1.20             | 45.30        | 32.10                                      | 21.40                                    | 粘性土                     | 18            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 232                                  | 94.00   | 62.67  | 0.0043                                | 0.0043  |                     |
| 12.0      | 1.0                             | 1.0                             | 4.70             | 65.30        | 17.50                                      | 30.0                                     | 砂質土                     | 21            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 199                                  | 103.00  | 68.67  | 0.0050                                | 0.0050  |                     |
| 13.0      | 1.0                             | 1.0                             | 28.10            | 41.90        | 13.70                                      | 12.30                                    | 砂質土                     | 14            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 245                                  | 112.00  | 74.67  | 0.0041                                | 0.0041  |                     |
| 14.0      | 1.0                             | 1.0                             | 17.40            | 75.90        | 7.00                                       | 10.3                                     | 砂質土                     | 24            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 249                                  | 122.00  | 81.33  | 0.0040                                | 0.0040  |                     |
| 15.0      | 1.0                             | 1.0                             | 1.20             | 45.30        | 32.10                                      | 21.40                                    | 粘性土                     | 25            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 228                                  | 131.00  | 87.33  | 0.0044                                | 0.0044  |                     |
| 16.0      | 1.0                             | 1.0                             | 4.70             | 65.30        | 17.50                                      | 30.0                                     | 砂質土                     | 20            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 327                                  | 140.00  | 93.33  | 0.0044                                | 0.0044  |                     |
| 17.0      | 1.0                             | 1.0                             | 28.10            | 41.90        | 13.70                                      | 12.30                                    | 砂質土                     | 22            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 312                                  | 150.00  | 100.00   | 0.0032                                | 0.0032  |                     |
| 18.0      | 1.0                             | 1.0                             | 17.40            | 75.90        | 7.00                                       | 10.3                                     | 砂質土                     | 45            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 284                                  | 159.50  | 106.33   | 0.0035                                | 0.0035  |                     |
| 19.0      | 1.0                             | 1.0                             | 1.20             | 45.30        | 32.10                                      | 21.40                                    | 粘性土                     | 23            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 233                                  | 169.00  | 112.67   | 0.0043                                | 0.0043  |                     |
| 20.0      | 1.0                             | 1.0                             | 4.70             | 65.30        | 17.50                                      | 30.0                                     | 砂質土                     | 21            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 373                                  | 178.00  | 119.33   | 0.0037                                | 0.0037  |                     |
| 21.0      | 1.0                             | 1.0                             | 28.10            | 41.90        | 13.70                                      | 12.30                                    | 砂質土                     | 32            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 332                                  | 189.00  | 126.00   | 0.0043                                | 0.0043  |                     |
| 22.0      | 1.0                             | 1.0                             | 17.40            | 75.90        | 7.00                                       | 10.3                                     | 砂質土                     | 21            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 332                                  | 199.00  | 132.67   | 0.0039                                | 0.0039  |                     |
| 23.0      | 1.0                             | 1.0                             | 1.20             | 45.30        | 32.10                                      | 21.40                                    | 粘性土                     | 56            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 341                                  | 209.00  | 139.33   | 0.0039                                | 0.0039  |                     |
| 24.0      | 1.0                             | 1.0                             | 4.70             | 65.30        | 17.50                                      | 30.0                                     | 砂質土                     | 58            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 343                                  | 219.00  | 146.00   | 0.0034                                | 0.0034  |                     |
| 25.0      | 1.0                             | 1.0                             | 28.10            | 41.90        | 13.70                                      | 12.30                                    | 砂質土                     | 54            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 329                                  | 230.00  | 153.00   | 0.0034                                | 0.0034  |                     |
| 26.0      | 1.0                             | 1.0                             | 17.40            | 75.90        | 7.00                                       | 10.3                                     | 砂質土                     | 40            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 329                                  | 240.00  | 160.00   | 0.0030                                | 0.0030  |                     |
| 27.0      | 1.0                             | 1.0                             | 1.20             | 45.30        | 32.10                                      | 21.40                                    | 粘性土                     | 52            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 333                                  | 250.50  | 167.00   | 0.0030                                | 0.0030  |                     |
| 28.0      | 1.0                             | 1.0                             | 4.70             | 65.30        | 17.50                                      | 30.0                                     | 砂質土                     | 64            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 338                                  | 261.00  | 174.00   | 0.0030                                | 0.0030  |                     |
| 29.0      | 1.0                             | 1.0                             | 28.10            | 41.90        | 13.70                                      | 12.30                                    | 砂質土                     | 56            | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 338                                  | 271.00  | 180.67   | 0.0023                                | 0.0023  |                     |
| 30.0      | 1.0                             | 1.0                             | 17.40            | 75.90        | 7.00                                       | 10.3                                     | 砂質土                     | 107           | 硬いもの | 17.0                               | 18.0                                     | 435                                  | 281.00  | 180.67   | 0.0023                                | 0.0023  |                     |

・ AB-3

ボーリング B-1 は液状化により地表面標高が 6m 程度低下しているため、解析では表層地盤 6m を付加してモデル化する。  
表の赤枠については以下のように設定する。

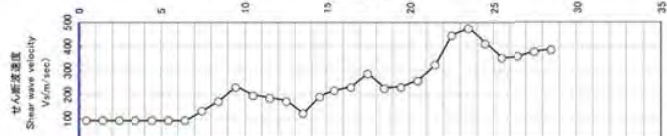
赤枠①：ボーリングコアにおける表層地盤(深度 1m まで)と概ね同じ土質であると仮定する。  
基礎条件：30 層目、 $\gamma = 20.0 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ 、 $V_s = 410 \text{ (m/sec)}$ 、線形弾性

ボーリング AB-3 コア



| ボーリング名            |  | AB-3      |  |
|-------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深度 (GL-)      |  | 0.00 (m)  |  |
| 吹抜試験標準試料コアの深さ(吹抜) |  | 17.00 (m) |  |

| 深度<br>(層下地)<br>Depth | ボーリング<br>コア深度<br>(層下地)<br>Depth | 層厚<br>Layer<br>thickness | 粒度<br>Grain size |            | 粘土分<br>Clay | 細粒分<br>含率率<br>Fine<br>fraction<br>content<br>FC | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態<br>State | 湿潤度<br>Wet unit<br>weight | 飽和度<br>Saturation<br>unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効土圧<br>(層中心)<br>effective<br>confining<br>pressure | 有効土圧<br>(層中心)<br>effective<br>confining<br>pressure | 土質式<br>$\sigma_v, \sigma'_v, \tau$      | 地盤の<br>基本固有周期<br>$T_n$ の算出<br>natural<br>period |              |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|------------|-------------|---|-------------------------|---------------|-------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|---|---|---|--------------|
|                      |                                 |                          | 層分<br>Gravel     | 砂分<br>Sand |             |   |                         |               |             |                           |                                     |                                      |   |   |   |   | シルト分<br>Silt |
| 1.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 30.50            | 63.50      | 5.00        | 6.0   | 砂質土                     | 2             | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 94                                   | 4.00  | 2.97  | 沖積砂質土                                   | 0.0106  |              |
| 2.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 4.10             | 51.90      | 22.30       | 15.70   | 砂質土                     | 2             | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 94                                   | 12.00   | 8.00  | 沖積砂質土                                   | 0.0106  |              |
| 3.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 40.20            | 48.70      | 11.10       | 11.1  | 砂質土                     | 5             | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 134                                  | 60.00   | 40.00   | 沖積砂質土                                   | 0.0075  |              |
| 10.0                 | 4.0                             | 1.0                      | 80.00            | 18.60      | 1.40        | 1.4   | 礫質土                     | 10            | 湿いEの        | 20.0                      | 21.0                                | 232                                  | 77.50   | 51.67   | 沖積砂質土                                   | 0.0043  |              |
| 11.0                 | 5.0                             | 1.0                      | 24.20            | 64.50      | 11.30       | 11.3  | 砂質土                     | 14            | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 199                                  | 87.00   | 58.00   | 沖積砂質土                                   | 0.0050  |              |
| 12.0                 | 6.0                             | 1.0                      | 29.10            | 59.00      | 14.90       | 14.9  | 砂質土                     | 12            | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 187                                  | 95.00   | 63.33   | 沖積砂質土                                   | 0.0053  |              |
| 13.0                 | 7.0                             | 1.0                      | 15.60            | 69.60      | 9.00        | 5.60  | 砂質土                     | 10            | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 175                                  | 103.00  | 68.87   | 沖積砂質土                                   | 0.0057  |              |
| 14.0                 | 8.0                             | 1.0                      | 1.90             | 74.60      | 23.20       | 23.2  | 砂質土                     | 4             | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 123                                  | 111.00  | 74.00   | 沖積砂質土                                   | 0.0081  |              |
| 15.0                 | 9.0                             | 1.0                      | 4.00             | 50.70      | 20.90       | 16.30   | 砂質土                     | 13            | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 193                                  | 119.00  | 79.33   | 沖積砂質土                                   | 0.0052  |              |
| 16.0                 | 10.0                            | 1.0                      | 16.10            | 53.10      | 14.80       | 16.00   | 砂質土                     | 18            | 湿いEの        | 17.0                      | 15.0                                | 219                                  | 127.00  | 84.87   | 沖積砂質土                                   | 0.0046  |              |
| 17.0                 | 11.0                            | 1.0                      | 18.80            | 55.30      | 17.20       | 8.70  | 砂質土                     | 21            | 湿いEの        | 19.0                      | 20.0                                | 232                                  | 130.00  | 90.67   | 沖積砂質土                                   | 0.0043  |              |
| 18.0                 | 12.0                            | 1.0                      | 52.30            | 39.50      | 8.90        | 8.2   | 礫質土                     | 37            | 湿いEの        | 20.0                      | 21.0                                | 289                                  | 145.00  | 97.67   | 沖積砂質土                                   | 0.0035  |              |
| 19.0                 | 13.0                            | 1.0                      | 23.30            | 45.40      | 18.60       | 13.70   | 砂質土                     | 20            | 湿いEの        | 17.0                      | 18.0                                | 238                                  | 156.00  | 104.00  | 沖積砂質土                                   | 0.0044  |              |
| 20.0                 | 14.0                            | 1.0                      | 74.00            | 57.00      | 23.30       | 12.10   | 砂質土                     | 31            | 湿いEの        | 19.0                      | 20.0                                | 232                                  | 165.00  | 110.00  | 沖積砂質土                                   | 0.0043  |              |
| 21.0                 | 15.0                            | 1.0                      | 24.30            | 55.30      | 11.20       | 8.90  | 砂質土                     | 28            | 湿いEの        | 19.0                      | 20.0                                | 260                                  | 175.00  | 116.67  | 沖積砂質土                                   | 0.0039  |              |
| 22.0                 | 16.0                            | 1.0                      | 20.00            | 50.00      | 19.00       | 11.00   | 砂質土                     | 30            | 湿いEの        | 19.0                      | 20.0                                | 325                                  | 185.00  | 123.33  | 沖積砂質土                                   | 0.0031  |              |
| 23.0                 | 17.0                            | 1.0                      | 24.70            | 67.80      | 7.50        | 7.5   | 砂質土                     | 115           | 湿いEの        | 20.0                      | 20.0                                | 448                                  | 195.00  | 130.00  | 沖積砂質土                                   | 0.0022  |              |
| 24.0                 | 18.0                            | 1.0                      | 53.30            | 39.70      | 6.00        | 6.0   | 礫質土                     | 30            | 湿いEの        | 20.0                      | 21.0                                | 478                                  | 205.00  | 137.00  | 沖積砂質土                                   | 0.0021  |              |
| 25.0                 | 19.0                            | 1.0                      | 28.20            | 56.50      | 15.30       | 15.3  | 砂質土                     | 94            | 湿いEの        | 19.0                      | 20.0                                | 414                                  | 216.00  | 144.00  | 沖積砂質土                                   | 0.0024  |              |
| 26.0                 | 20.0                            | 1.0                      | 37.30            | 57.80      | 4.90        | 4.9   | 砂質土                     | 63            | 湿いEの        | 19.0                      | 20.0                                | 354                                  | 226.00  | 150.67  | 沖積砂質土                                   | 0.0028  |              |
| 27.0                 | 21.0                            | 1.0                      | 26.50            | 65.60      | 7.90        | 7.9   | 砂質土                     | 95            | 湿いEの        | 19.0                      | 20.0                                | 380                                  | 236.00  | 157.33  | 沖積砂質土                                   | 0.0028  |              |
| 28.0                 | 22.0                            | 1.0                      | 47.70            | 36.20      | 16.10       | 16.1  | 礫質土                     | 75            | 湿いEの        | 20.0                      | 21.0                                | 380                                  | 246.00  | 164.33  | 沖積砂質土                                   | 0.0026  |              |
| 29.0                 | 23.0                            | 1.0                      | 22.50            | 58.70      | 10.60       | 8.20  | 砂質土                     | 79            | 湿いEの        | 19.0                      | 20.0                                | 387                                  | 257.00  | 171.33  | 沖積砂質土                                   | 0.0026  |              |
|                      |                                 |                          |                  |            |             |   |                         |               |             |                           |                                     |                                      |   |   | 地盤の基本固有周期 $T_n = 4 \times \sum (H/V_s)$ |   | 0.6675       |
|                      |                                 |                          |                  |            |             |   |                         |               |             |                           |                                     |                                      |   |   | 単位換算                                    |   |              |





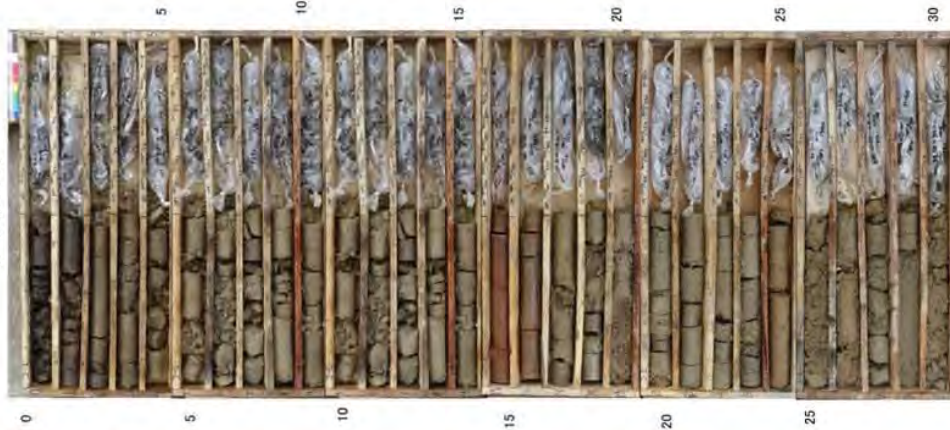
・J-1

表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①：試験値の無い土質については、コア写真を参考に概ね同じ土質の試験値を準用する。

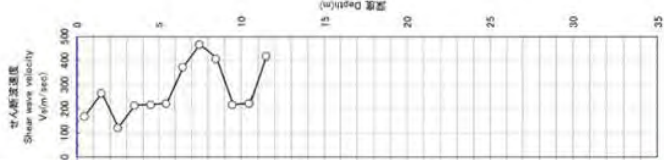
基礎条件：13層目、 $\gamma_c=19.0$ (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s=440$ (m/sec)、線形弾性

ボーリングトコフ



| ボーリング名              |  | J-1       |  |
|---------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深度 Q1-          |  | 0.00 (m)  |  |
| 沖積高橋新土13F7の境界深度 Q1- |  | 17.00 (m) |  |

| 深度<br>(層下層)<br>Depth | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth | 層厚<br>Layer<br>thickness | 粒度         |              |             | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態   | 湿潤単位<br>Wet unit<br>weight | 飽和単位<br>Saturated unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効側圧<br>(層中心)<br>effective<br>pressure | 有効側圧<br>(層中心)<br>effective<br>pressure | G <sub>max</sub><br>G <sub>max</sub> | 地震の<br>基本固有周期<br>T <sub>b</sub> の算出<br>natural<br>period |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|------------|--------------|-------------|---|-------------------------|---------------|------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|--------------------------------------|--|
|                      |                                 |                          | 砂分<br>Sand | シルト分<br>Silt | 粘土分<br>Clay |   |                         |               |      |                            |                                  |                                      |  |  |                                      |  |
| 1.0                  | 1.0                             | 1.0                      | 0.00       | 26.63        | 33.76       | 39.61                                     | 73.4                    | ① 粘性土         | 14.0 | 18.0                       | 171                              | 2.30                                 | 1.97                                   | 0.0038                                 | 0.0038                               |  |
| 2.0                  | 2.0                             | 1.0                      | 12.97      | 57.64        | 17.93       | 11.48                                     | 29.4                    | 粘性土           | 16.0 | 19.0                       | 207                              | 9.50                                 | 6.93                                   | 0.0037                                 | 0.0037                               |  |
| 3.0                  | 3.0                             | 1.0                      | 0.00       | 34.90        | 47.64       | 17.48                                     | 65.1                    | 粘性土           | 17.0 | 18.0                       | 123                              | 18.00                                | 12.00                                  | 0.0081                                 | 0.0081                               |  |
| 4.0                  | 4.0                             | 1.0                      | 0.00       | 47.93        | 34.58       | 14.75                                     | 49.3                    | 粘性土           | 18.0 | 19.0                       | 215                              | 26.50                                | 17.67                                  | 0.0048                                 | 0.0048                               |  |
| 5.0                  | 5.0                             | 1.0                      | 0.19       | 50.53        | 32.88       | 15.00                                     | 48.7                    | 粘性土           | 17.0 | 18.0                       | 219                              | 35.00                                | 23.33                                  | 0.0048                                 | 0.0048                               |  |
| 6.0                  | 6.0                             | 1.0                      | 0.19       | 69.51        | 16.62       | 1.87                                      | 12.5                    | 粘性土           | 17.0 | 18.0                       | 224                              | 43.00                                | 28.67                                  | 0.0045                                 | 0.0045                               |  |
| 7.0                  | 7.0                             | 1.0                      | 0.35       | 69.93        | 16.19       | 7.53                                      | 23.7                    | 粘性土           | 19.0 | 20.0                       | 376                              | 52.00                                | 34.67                                  | 0.0027                                 | 0.0027                               |  |
| 8.0                  | 8.0                             | 1.0                      | 1.77       | 76.80        | 15.81       | 5.51                                      | 21.4                    | 粘性土           | 19.0 | 20.0                       | 468                              | 62.00                                | 41.23                                  | 0.0021                                 | 0.0021                               |  |
| 9.0                  | 9.0                             | 1.0                      | 2.48       | 54.88        | 28.62       | 14.02                                     | 42.8                    | ① 粘性土         | 17.0 | 25.0                       | 411                              | 72.00                                | 48.00                                  | 0.0024                                 | 0.0024                               |  |
| 10.0                 | 10.0                            | 1.0                      | 2.48       | 54.88        | 28.62       | 14.02                                     | 42.8                    | ① 粘性土         | 17.0 | 25.0                       | 411                              | 81.00                                | 54.00                                  | 0.0046                                 | 0.0046                               |  |
| 11.0                 | 11.0                            | 1.0                      | 2.48       | 54.88        | 28.62       | 14.02                                     | 42.8                    | ① 粘性土         | 17.0 | 18.0                       | 224                              | 89.00                                | 59.23                                  | 0.0043                                 | 0.0043                               |  |
| 12.0                 | 12.0                            | 1.0                      | 1.22       | 25.41        | 32.63       | 40.75                                     | 73.4                    | ① 粘性土         | 18.0 | 18.0                       | 472                              | 97.50                                | 65.00                                  | 0.0024                                 | 0.0024                               |  |



地震の基礎固有周期 $T_b = 4 \times T_b(V_s)$  ② 粘性土

・J-2

ボーリングJ-2は液状化により地表面標高が2m程度低下しているため、解析では表層地盤2mを付加してモデル化する。  
 表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①：ボーリングコアにおける表層地盤(深度1mまで)と概ね同じ土質であると仮定する。

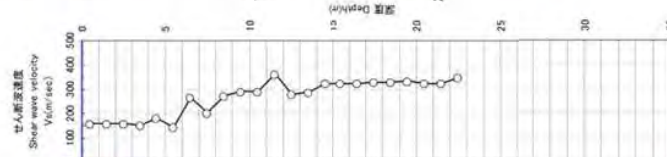
赤枠②：試験値の無い土質については、コア写真を参考に概ね同じ土質の試験値を借用する。

基礎条件：24層目、 $\gamma = 20.0 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ ,  $V_s = 440 \text{ (m/sec)}$ , 線形弾性

ボーリング J-2 コア



| 深度<br>(層下層)<br>Depth | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth | 層厚<br>Layer<br>thickness | 粒度<br>Grain size |              |             | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態   | 潤滑単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効上載圧<br>(固中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure | 有効側載圧<br>(固中心)<br>effective<br>confining<br>pressure | D値<br>G <sub>max</sub> - $\gamma$<br>h $\cdot$ $\gamma$ | 地盤の<br>基本固有周期<br>T <sub>v</sub> の算出<br>period<br>(H <sub>v</sub> /V <sub>s</sub> )<br>(sec) |        |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|--------------|-------------|---|-------------------------|---------------|------|------------------------------------|--|--------------------------------------|---|--|---|---|--------|
|                      |                                 |                          | 砂分<br>Gravel     | シルト分<br>Silt | 粘土分<br>Clay |   |                         |               |      |                                    |  |                                      |   |  |   |   |        |
| 10                   | 10                              | 1.0                      | 0.00             | 0.00         | 100.00      | 100                                       | 粘性土                     | 4             | 硬いもの | 140                                | 150                                      | 159                                  | 2.50  | 1.67   | 沖積粘性土   | 0.0063  |        |
| 20                   | 10                              | 1.0                      | 0.32             | 49.60        | 23.39       | 26.69                                     | 50.1                    | 粘性土           | 4    | 硬いもの                               | 140                                      | 150                                  | 159   | 2.50   | 1.67  | 沖積粘性土   | 0.0063 |
| 30                   | 10                              | 1.0                      | 0.81             | 59.77        | 23.08       | 16.35                                     | 39.4                    | 砂質土           | 7    | 硬いもの                               | 170                                      | 180                                  | 152   | 19.00  | 8.33  | 沖積砂質土   | 0.0066 |
| 40                   | 10                              | 1.0                      | 0.00             | 13.28        | 33.77       | 52.95                                     | 66.7                    | 粘性土           | 6    | 硬いもの                               | 140                                      | 150                                  | 182   | 25.50  | 17.00   | 沖積粘性土   | 0.0055 |
| 50                   | 30                              | 1.0                      | 0.00             | 32.53        | 31.97       | 35.49                                     | 67.5                    | 粘性土           | 3    | 硬いもの                               | 140                                      | 150                                  | 144   | 20.50  | 20.33   | 沖積粘性土   | 0.0089 |
| 60                   | 40                              | 1.0                      | 0.00             | 87.81        | 10.37       | 2.02                                      | 12.4                    | 砂質土           | 30   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 267   | 38.00  | 25.33   | 沖積砂質土   | 0.0037 |
| 70                   | 50                              | 1.0                      | 0.00             | 48.95        | 7.07        | 1.76                                      | 8.9                     | 砂質土           | 15   | 密なもの                               | 170                                      | 180                                  | 204   | 47.00  | 31.33   | 沖積砂質土   | 0.0046 |
| 80                   | 60                              | 1.0                      | 11.47            | 59.45        | 19.04       | 10.03                                     | 29.1                    | 砂質土           | 32   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 273   | 56.00  | 37.33   | 沖積砂質土   | 0.0037 |
| 90                   | 80                              | 1.0                      | 0.00             | 87.97        | 9.35        | 2.68                                      | 12.0                    | 砂質土           | 38   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 292   | 66.00  | 44.00   | 沖積砂質土   | 0.0034 |
| 100                  | 90                              | 1.0                      | 0.00             | 92.48        | 5.08        | 1.84                                      | 7.3                     | 砂質土           | 38   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 292   | 76.00  | 50.67   | 沖積砂質土   | 0.0034 |
| 110                  | 100                             | 1.0                      | 0.00             | 89.08        | 8.91        | 2.03                                      | 10.9                    | 砂質土           | 67   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 363   | 86.00  | 57.33   | 沖積砂質土   | 0.0028 |
| 120                  | 110                             | 1.0                      | 0.00             | 89.08        | 8.91        | 2.03                                      | 10.9                    | 砂質土           | 34   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 280   | 96.00  | 64.00   | 沖積砂質土   | 0.0028 |
| 130                  | 120                             | 1.0                      | 0.00             | 85.70        | 12.32       | 1.85                                      | 14.3                    | 砂質土           | 37   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 289   | 106.00   | 70.67   | 沖積砂質土   | 0.0028 |
| 140                  | 130                             | 1.0                      | 0.00             | 85.70        | 12.32       | 1.85                                      | 14.3                    | 砂質土           | 50   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 325   | 116.00   | 77.33   | 沖積砂質土   | 0.0031 |
| 150                  | 140                             | 1.0                      | 0.00             | 85.70        | 12.32       | 1.85                                      | 14.3                    | 砂質土           | 50   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 325   | 126.00   | 84.00   | 沖積砂質土   | 0.0031 |
| 160                  | 150                             | 1.0                      | 0.00             | 85.64        | 10.16       | 4.20                                      | 14.4                    | 砂質土           | 30   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 325   | 136.00   | 90.67   | 沖積砂質土   | 0.0031 |
| 170                  | 160                             | 1.0                      | 0.00             | 86.43        | 10.80       | 2.67                                      | 13.6                    | 砂質土           | 52   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 330   | 146.00   | 97.23   | 沖積砂質土   | 0.0030 |
| 180                  | 170                             | 1.0                      | 0.00             | 86.43        | 10.80       | 2.67                                      | 13.6                    | 砂質土           | 54   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 334   | 156.00   | 104.00  | 沖積砂質土   | 0.0030 |
| 190                  | 180                             | 1.0                      | 0.00             | 91.31        | 6.63        | 2.08                                      | 8.7                     | 砂質土           | 54   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 325   | 176.00   | 117.33  | 沖積砂質土   | 0.0031 |
| 200                  | 190                             | 1.0                      | 0.00             | 91.31        | 6.63        | 2.08                                      | 8.7                     | 砂質土           | 50   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 325   | 186.00   | 124.00  | 沖積砂質土   | 0.0031 |
| 210                  | 200                             | 1.0                      | 0.00             | 91.31        | 6.63        | 2.08                                      | 8.7                     | 砂質土           | 50   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 325   | 186.00   | 124.00  | 沖積砂質土   | 0.0031 |
| 220                  | 210                             | 1.0                      | 0.00             | 91.31        | 6.63        | 2.08                                      | 8.7                     | 砂質土           | 60   | 密なもの                               | 190                                      | 200                                  | 348   | 186.00   | 130.67  | 沖積砂質土   | 0.0029 |



地盤の基本固有周期 $T_v = 4 \times 1 / (N \cdot V_s)$   
 0.3787  
 0.3787



・AB-9

ボーリング AB-9 は液状化により地表面標高が 2m 程度低下しているため、解析では表層地盤 2m を付加してモデル化する。  
表の赤枠については以下のよう設定する。

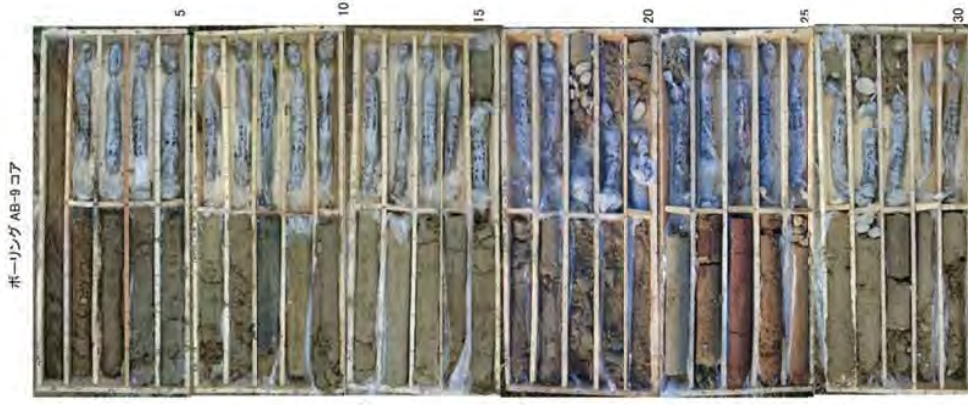
赤枠①：ボーリングコアにおける表層地盤(深度 1m まで)と概ね同じ土質であると仮定する。  
基礎条件：16 層目、 $\gamma = 20.0$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s = 440$  (m/sec)、線形弾性

| ボーリング名 |     | AB-9  |       |
|--------|-----|-------|-------|
| 高さ     | 層厚  | 砂分    | シルト分  |
| 2.0    | 1.0 | 7.60  | 23.70 |
| 4.0    | 1.0 | 91.90 | 9.00  |
| 5.0    | 1.0 | 88.20 | 3.50  |
| 6.0    | 1.0 | 57.50 | 27.30 |
| 7.0    | 1.0 | 79.80 | 11.90 |
| 8.0    | 1.0 | 6.80  | 12.40 |
| 9.0    | 1.0 | 50.00 | 21.20 |
| 10.0   | 1.0 | 63.90 | 24.00 |
| 11.0   | 1.0 | 85.50 | 14.50 |
| 12.0   | 1.0 | 22.50 | 34.70 |
| 13.0   | 1.0 | 62.90 | 13.50 |
| 14.0   | 1.0 | 1.60  | 73.80 |
| 15.0   | 1.0 | 3.90  | 90.80 |

| 高さ<br>(層下層)<br>Depth<br>(m) | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth<br>(m) | 層厚                |                     | 粒度                 |     | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content<br>FC<br>(%) | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態 | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight<br>$\gamma_w$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight<br>$\gamma_{sat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) | 有効土圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure<br>$\sigma_v'$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 有効土圧<br>(層中心)<br>effective<br>sounding<br>pressure<br>$\sigma_v'$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ひずみ<br>条件式<br>$G_c - \gamma$<br>$f - \gamma$ | 種類の<br>基本固有周期<br>$T_{0, natural}$<br>period<br>(sec) | 種類の<br>$T_{0, V_s}$<br>period<br>(sec) |
|-----------------------------|--|-------------------|---------------------|--------------------|-----|--|-------------------------|---------------|----|--|--|--|---|---|--|--|--|
|                             |  | 砂分<br>Sand<br>(%) | シルト分<br>Silt<br>(%) | 粘土分<br>Clay<br>(%) |     |  |                         |               |    |  |  |  |   |   |  |  |  |
| 1.0                         | 1.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 10            | 硬い | 17.0   | 18.0   | 175  | 4.00  | 2.67  | 沖積砂質土  | 0.0057   | 0.0057                                 |
| 2.0                         | 1.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 10            | 硬い | 17.0   | 18.0   | 175  | 12.00   | 8.00  | 沖積砂質土  | 0.0057   | 0.0057                                 |
| 3.0                         | 1.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 10            | 硬い | 17.0   | 18.0   | 175  | 20.00   | 13.33   | 沖積砂質土  | 0.0057   | 0.0057                                 |
| 4.0                         | 2.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 3             | 硬い | 17.0   | 18.0   | 110  | 28.00   | 18.67   | 沖積砂質土  | 0.0091   | 0.0091                                 |
| 5.0                         | 3.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 12            | 硬い | 17.0   | 18.0   | 187  | 38.00   | 24.00   | 沖積砂質土  | 0.0053   | 0.0053                                 |
| 6.0                         | 4.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 2             | 硬い | 17.0   | 18.0   | 94   | 44.00   | 29.33   | 沖積砂質土  | 0.0106   | 0.0106                                 |
| 7.0                         | 5.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 3             | 硬い | 17.0   | 18.0   | 110  | 52.00   | 34.67   | 沖積砂質土  | 0.0091   | 0.0091                                 |
| 8.0                         | 6.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 4             | 硬い | 17.0   | 18.0   | 123  | 60.00   | 40.00   | 沖積砂質土  | 0.0081   | 0.0081                                 |
| 9.0                         | 7.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 粘性土                     | 5             | 硬い | 14.0   | 15.0   | 171  | 66.50   | 44.33   | 沖積粘性土  | 0.0058   | 0.0058                                 |
| 10.0                        | 8.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 12            | 硬い | 17.0   | 18.0   | 187  | 73.00   | 48.67   | 沖積砂質土  | 0.0053   | 0.0053                                 |
| 11.0                        | 9.0                                    | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 16            | 硬い | 17.0   | 18.0   | 209  | 81.00   | 54.00   | 沖積砂質土  | 0.0046   | 0.0046                                 |
| 12.0                        | 10.0                                   | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 粘性土                     | 19            | 硬い | 18.0   | 19.0   | 267  | 89.50   | 59.67   | 沖積粘性土  | 0.0037   | 0.0037                                 |
| 13.0                        | 11.0                                   | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 15            | 硬い | 17.0   | 18.0   | 204  | 98.00   | 65.33   | 沖積砂質土  | 0.0049   | 0.0049                                 |
| 14.0                        | 12.0                                   | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 22            | 硬い | 19.0   | 20.0   | 237  | 107.00  | 71.33   | 沖積砂質土  | 0.0042   | 0.0042                                 |
| 15.0                        | 13.0                                   | 1.0               | 0.0                 | 0.0                | 0.0 | 0.0  | 砂質土                     | 30            | 硬い | 19.0   | 20.0   | 267  | 117.00  | 78.00   | 沖積砂質土  | 0.0037   | 0.0037                                 |

地盤の基本固有周期  $T_{0, V_s} = 4 \times \sqrt{H/V_s}$

0.1682  
1.1682



ボーリング AB-9 コア

・AB-10

ボーリングAB-10は液状化により地表面標高が2m程度低下しているため、解析では表層地盤2mを付加してモデル化する。  
表の赤枠については以下のように設定する。

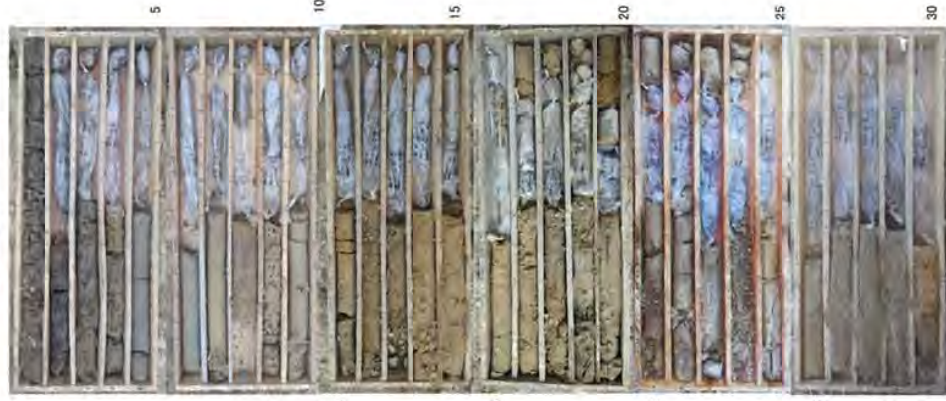
赤枠①：ボーリングコアにおける表層地盤(深さ1mまで)と概ね同じ土質であると仮定する。

赤枠②：試験値の無いため、上下の土質を参考に砂質土とする。

赤枠③：N値が極端に大きい層については、基礎のVsを適用する。

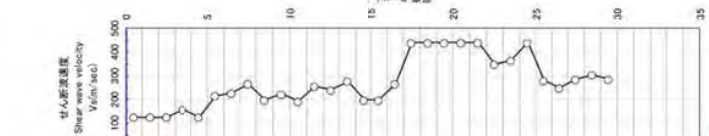
基礎条件：31層目、 $\gamma_s=20.0$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s=440$  (m/sec)、線形弾性

ボーリング AB-10 コア



| ボーリング名               |  | AB-10     |  |
|----------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深さ OL-           |  | 000 (m)   |  |
| 沖積層積層深さ(コア)の深さ深さ OL- |  | 25.00 (m) |  |

| 深さ<br>(層下層)<br>Depth<br>(m) | ボーリング<br>コア深さ<br>(層下層)<br>Depth<br>(m) | 層厚<br>Layer<br>thickness<br>(m) | 粒度                  |                   |                     |                    | 細粒分<br>含率率<br>Fine<br>fraction<br>content<br>FC<br>(%) | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N-Value | 状態   | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight<br>$\gamma_w$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight<br>$\gamma_{sat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | せん断速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>(m/sec) | 有効上載圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure<br>$\sigma'_v$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 有効拘束圧<br>(層中心)<br>effective<br>confining<br>pressure<br>$\sigma'_h$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ひずみ<br>依存式<br>O'-C'- $\gamma$<br>h'- $\gamma$ | 地盤の<br>基本固有周期<br>$T_n$ の算出<br>natural<br>period<br>(1/V <sub>s</sub> )<br>(sec) |
|-----------------------------|--|---------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------|--|-------------------------|---------|------|--|--|---|--|---|---|---|
|                             |  |                                 | 礫分<br>Gravel<br>(%) | 砂分<br>Sand<br>(%) | シルト分<br>Silt<br>(%) | 粘土分<br>Clay<br>(%) |  |                         |         |      |  |  |   |  |   |   |   |
| 1.0                         | 1.0                                    | 1.0                             | 0.0                 | 0.0               | 0.0                 | 0.0                | 粘土土  | 2                       | 硬い      | 14.0 | 15.0   | 126  | 2.50  | 1.87   | 0.0079  | 0.0079  |   |
| 2.0                         | 1.0                                    | 1.0                             | 0.50                | 40.40             | 27.50               | 31.60              | 粘土土  | 2                       | 硬い      | 14.0 | 15.0   | 126  | 7.50  | 5.00   | 0.0079  | 0.0079  |   |
| 3.0                         | 1.0                                    | 1.0                             | 0.50                | 40.40             | 27.50               | 31.60              | 粘土土  | 2                       | 硬い      | 14.0 | 15.0   | 126  | 12.50   | 8.33   | 0.0079  | 0.0079  |   |
| 4.0                         | 2.0                                    | 1.0                             | 0.50                | 38.90             | 40.10               | 21.40              | 粘土土  | 4                       | 硬い      | 14.0 | 15.0   | 159  | 17.50   | 11.67  | 0.0083  | 0.0083  |   |
| 5.0                         | 3.0                                    | 1.0                             | 1.30                | 27.70             | 34.60               | 38.40              | 粘土土  | 2                       | 硬い      | 14.0 | 15.0   | 126  | 22.50   | 15.00  | 0.0079  | 0.0079  |   |
| 6.0                         | 4.0                                    | 1.0                             | 1.90                | 19.80             | 23.30               | 58.90              | 粘土土  | 10                      | 密い      | 18.0 | 19.0   | 215  | 29.50   | 19.67  | 0.0046  | 0.0046  |   |
| 7.0                         | 5.0                                    | 1.0                             | 8.80                | 7.90              | 18.20               | 82.20              | 粘土土  | 20                      | 硬い      | 17.0 | 18.0   | 228  | 38.00   | 25.33  | 0.0044  | 0.0044  |   |
| 8.0                         | 6.0                                    | 1.0                             | 3.10                | 57.00             | 20.30               | 19.60              | 砂質土  | 20                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 267  | 47.00   | 31.33  | 0.0037  | 0.0037  |   |
| 9.0                         | 7.0                                    | 1.0                             | 0.20                | 54.00             | 26.80               | 19.20              | 砂質土  | 14                      | 密い      | 17.0 | 18.0   | 109  | 56.00   | 37.33  | 0.0050  | 0.0050  |   |
| 10.0                        | 8.0                                    | 1.0                             | 0.20                | 46.30             | 27.70               | 25.80              | 砂質土  | 11                      | 密い      | 18.0 | 19.0   | 222  | 64.50   | 43.00  | 0.0045  | 0.0045  |   |
| 11.0                        | 9.0                                    | 1.0                             | 0.20                | 53.90             | 21.00               | 24.90              | 砂質土  | 13                      | 密い      | 17.0 | 18.0   | 163  | 73.00   | 48.67  | 0.0052  | 0.0052  |   |
| 12.0                        | 10.0                                   | 1.0                             | 3.90                | 46.90             | 19.20               | 18.3               | 砂質土  | 27                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 258  | 82.00   | 54.67  | 0.0039  | 0.0039  |   |
| 13.0                        | 11.0                                   | 1.0                             | 5.10                | 41.10             | 13.80               | 13.8               | 砂質土  | 25                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 241  | 92.00   | 61.33  | 0.0042  | 0.0042  |   |
| 14.0                        | 12.0                                   | 1.0                             | 23.00               | 56.00             | 12.10               | 8.50               | 砂質土  | 33                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 277  | 103.00  | 68.00  | 0.0036  | 0.0036  |   |
| 15.0                        | 13.0                                   | 1.0                             | 33.80               | 71.10             | 12.30               | 12.70              | 砂質土  | 14                      | 硬い      | 17.0 | 18.0   | 169  | 111.00  | 74.00  | 0.0050  | 0.0050  |   |
| 16.0                        | 14.0                                   | 1.0                             | 6.30                | 46.00             | 7.70                | 7.7                | 砂質土  | 14                      | 硬い      | 17.0 | 18.0   | 108  | 119.00  | 79.33  | 0.0050  | 0.0050  |   |
| 17.0                        | 15.0                                   | 1.0                             | 0.20                | 34.10             | 40.10               | 25.30              | 粘土土  | 16                      | 密い      | 18.0 | 19.0   | 207  | 127.50  | 85.00  | 0.0037  | 0.0037  |   |
| 18.0                        | 16.0                                   | 1.0                             | 48.80               | 35.00             | 7.20                | 9.00               | 砂質土  | 300                     | 密い      | 20.0 | 21.0   | 1407   | 131.50  | 91.67  | 0.0033  | 0.0033  |   |
| 19.0                        | 17.0                                   | 1.0                             | 28.80               | 48.10             | 14.20               | 9.00               | 砂質土  | 167                     | 密い      | 19.0 | 20.0   | 440  | 148.00  | 98.67  | 0.0023  | 0.0023  |   |
| 20.0                        | 18.0                                   | 1.0                             | 28.60               | 56.30             | 13.10               | 13.1               | 砂質土  | 150                     | 密い      | 19.0 | 20.0   | 440  | 158.00  | 105.33   | 0.0023  | 0.0023  |   |
| 21.0                        | 19.0                                   | 1.0                             | 28.60               | 56.30             | 13.10               | 13.1               | 砂質土  | 375                     | 密い      | 19.0 | 20.0   | 440  | 168.00  | 112.00   | 0.0023  | 0.0023  |   |
| 22.0                        | 20.0                                   | 1.0                             | 25.50               | 59.20             | 15.30               | 15.3               | 砂質土  | 188                     | 密い      | 19.0 | 20.0   | 348  | 180.00  | 125.33   | 0.0023  | 0.0023  |   |
| 23.0                        | 21.0                                   | 1.0                             | 20.30               | 55.10             | 13.40               | 11.20              | 砂質土  | 60                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 266  | 198.00  | 132.00   | 0.0029  | 0.0029  |   |
| 24.0                        | 22.0                                   | 1.0                             | 44.90               | 47.20             | 7.90                | 7.9                | 砂質土  | 68                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 440  | 208.00  | 138.67   | 0.0023  | 0.0023  |   |
| 25.0                        | 23.0                                   | 1.0                             | 29.70               | 58.30             | 12.00               | 12.0               | 粘土土  | 167                     | 密い      | 19.0 | 20.0   | 260  | 217.50  | 145.00   | 0.0036  | 0.0036  |   |
| 26.0                        | 24.0                                   | 1.0                             | 0.40                | 40.00             | 34.90               | 16.50              | 粘土土  | 22                      | 密い      | 18.0 | 19.0   | 200  | 237.00  | 151.33   | 0.0040  | 0.0040  |   |
| 27.0                        | 25.0                                   | 1.0                             | 1.20                | 62.80             | 19.40               | 16.80              | 砂質土  | 25                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 249  | 257.00  | 158.00   | 0.0035  | 0.0035  |   |
| 28.0                        | 26.0                                   | 1.0                             | 0.20                | 85.70             | 14.30               | 14.3               | 砂質土  | 36                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 286  | 277.00  | 166.67   | 0.0035  | 0.0035  |   |
| 29.0                        | 27.0                                   | 1.0                             | 8.80                | 84.30             | 6.90                | 6.9                | 砂質土  | 42                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 304  | 247.00  | 164.67   | 0.0033  | 0.0033  |   |
| 30.0                        | 28.0                                   | 1.0                             | 7.70                | 70.90             | 21.40               | 21.4               | 砂質土  | 36                      | 密い      | 19.0 | 20.0   | 286  | 257.00  | 171.33   | 0.0035  | 0.0035  |   |





・ AB-11

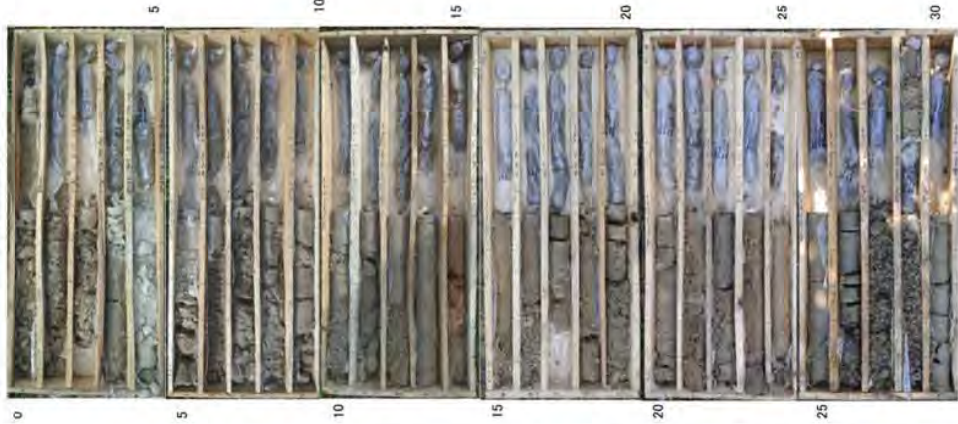
ボーリング AB-11 は液状化により地表面標高が 4m 程度低下しているため、解析では表層地盤 4m を付加してモデル化する。  
表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①：ボーリングコアにおける表層地盤(深度 1m まで)と概ね同じ土質であると仮定する。

赤枠②：コア写真を参考に、深度 23m の土質と概ね同じと判断し礫質土とする。

基礎条件：31 層目、 $\gamma = 21.0 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ ,  $V_s = 110 \text{ (m/sec)}$ , 線形弾性。

ボーリング AB-11 コア



| ボーリング名                  |  | AB-11     |  |
|-------------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深度 (DL)             |  | 0.00 (m)  |  |
| 平均土質係数(ボーリングの標準偏差) (DL) |  | 11.60 (m) |  |

| 深度<br>(層下層)<br>Depth<br>(m) | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth<br>(m) | 層厚                 |                     | 粒径                 |                   | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content<br>(%) | 土質区分<br>Type of<br>Soil | H-Value | 状態   | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight<br>$T_w$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight<br>$T_{sat}$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>$V_s$<br>( $\text{m/sec}$ ) | 有効上層圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure<br>$\sigma'_v$<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 有効拘束圧<br>(層中心)<br>effective<br>confining<br>pressure<br>$\sigma'_c$<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | ひずみ<br>依存式<br>$Q_c/L_c - T$<br>h-T | 地盤の<br>基本固有周期<br>$T_n$ の算出<br>natural<br>period<br>(H/V)<br>(sec) |
|-----------------------------|--|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--|-------------------------|---------|------|--|--|---|---|--|------------------------------------|---|
|                             |  | 緑分<br>Green<br>(%) | シルト分<br>Silt<br>(%) | 粘土分<br>Clay<br>(%) | 砂分<br>Sand<br>(%) |  |                         |         |      |  |  |   |   |  |                                    |   |
| 1.0                         | 1.0                                    | 1.0                | 0.0                 | 0.0                | 100.0             | 0.0  | 砂質土                     | 3       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 110   | 4.00  | 2.87   | 0.0091                             | 0.0091  |
| 2.0                         | 1.0                                    | 1.0                | 0.0                 | 0.0                | 100.0             | 0.0  | 砂質土                     | 3       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 110   | 12.00   | 8.00   | 0.0091                             | 0.0091  |
| 3.0                         | 1.0                                    | 1.0                | 0.0                 | 0.0                | 100.0             | 0.0  | 砂質土                     | 3       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 110   | 20.00   | 13.33  | 0.0091                             | 0.0091  |
| 4.0                         | 1.0                                    | 1.0                | 0.0                 | 0.0                | 100.0             | 0.0  | 砂質土                     | 3       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 110   | 28.00   | 18.67  | 0.0091                             | 0.0091  |
| 5.0                         | 1.0                                    | 1.0                | 2.00                | 60.90              | 20.90             | 37.1   | 砂質土                     | 3       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 110   | 36.00   | 24.00  | 0.0091                             | 0.0091  |
| 6.0                         | 3.0                                    | 1.0                | 21.60               | 51.30              | 10.90             | 10.9   | 砂質土                     | 2       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 94  | 44.00   | 33.33  | 0.0166                             | 0.0166  |
| 7.0                         | 3.0                                    | 1.0                | 2.60                | 68.80              | 13.50             | 22.0   | 砂質土                     | 11      | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 181   | 52.00   | 34.67  | 0.0355                             | 0.0355  |
| 8.0                         | 4.0                                    | 1.0                | 39.60               | 48.20              | 14.20             | 14.2   | 砂質土                     | 12      | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 197   | 60.00   | 40.00  | 0.0555                             | 0.0555  |
| 9.0                         | 5.0                                    | 1.0                | 32.90               | 50.50              | 16.60             | 16.6   | 砂質土                     | 9       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 188   | 66.00   | 45.33  | 0.0686                             | 0.0686  |
| 10.0                        | 6.0                                    | 1.0                | 2.60                | 68.80              | 16.20             | 16.60  | 砂質土                     | 7       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 152   | 76.00   | 50.67  | 0.0866                             | 0.0866  |
| 11.0                        | 7.0                                    | 1.0                | 6.90                | 76.10              | 17.00             | 17.0   | 砂質土                     | 9       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 188   | 84.00   | 56.00  | 0.0980                             | 0.0980  |
| 12.0                        | 8.0                                    | 1.0                | 5.70                | 60.50              | 13.80             | 13.8   | 砂質土                     | 9       | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 168   | 92.00   | 61.33  | 0.0980                             | 0.0980  |
| 13.0                        | 9.0                                    | 1.0                | 1.60                | 62.60              | 15.80             | 15.8   | 砂質土                     | 14      | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 199   | 100.00  | 66.67  | 0.0950                             | 0.0950  |
| 14.0                        | 10.0                                   | 1.0                | 21.70               | 44.00              | 34.30             | 78.3   | 粘性土                     | 7       | 密なLの | 18.0   | 19.0   | 191   | 108.50  | 72.33  | 0.0452                             | 0.0452  |
| 15.0                        | 11.0                                   | 1.0                | 2.50                | 72.30              | 25.30             | 25.3   | 砂質土                     | 23      | 密なLの | 18.0   | 20.0   | 241   | 118.00  | 78.67  | 0.0447                             | 0.0447  |
| 16.0                        | 12.0                                   | 1.0                | 2.00                | 64.80              | 18.20             | 15.00  | 砂質土                     | 28      | 密なLの | 19.0   | 20.0   | 260   | 128.00  | 85.33  | 0.0309                             | 0.0309  |
| 17.0                        | 13.0                                   | 1.0                | 0.40                | 75.50              | 12.50             | 11.90  | 砂質土                     | 14      | 硬いLの | 17.0   | 18.0   | 199   | 137.00  | 91.33  | 0.0550                             | 0.0550  |
| 18.0                        | 14.0                                   | 1.0                | 9.80                | 75.00              | 15.10             | 15.1   | 砂質土                     | 28      | 密なLの | 19.0   | 20.0   | 260   | 148.00  | 97.33  | 0.0309                             | 0.0309  |
| 19.0                        | 15.0                                   | 1.0                | 17.10               | 74.60              | 8.30              | 8.3  | 砂質土                     | 29      | 密なLの | 19.0   | 20.0   | 263   | 158.00  | 104.00   | 0.0308                             | 0.0308  |
| 20.0                        | 16.0                                   | 1.0                | 35.80               | 21.80              | 42.40             | 64.2   | 粘性土                     | 24      | 密なLの | 18.0   | 19.0   | 288   | 168.50  | 110.33   | 0.0335                             | 0.0335  |
| 21.0                        | 17.0                                   | 1.0                | 47.80               | 27.40              | 24.80             | 52.2   | 粘性土                     | 11      | 密なLの | 18.0   | 19.0   | 272   | 174.50  | 116.33   | 0.0445                             | 0.0445  |
| 22.0                        | 18.0                                   | 1.0                | 2.40                | 67.20              | 26.40             | 24.00  | 砂質土                     | 17      | 密なLの | 18.0   | 19.0   | 257   | 183.50  | 122.33   | 0.0308                             | 0.0308  |
| 23.0                        | 19.0                                   | 1.0                | 5.00                | 67.20              | 27.80             | 27.8   | 砂質土                     | 34      | 密なLの | 19.0   | 20.0   | 286   | 193.00  | 128.67   | 0.0308                             | 0.0308  |
| 24.0                        | 20.0                                   | 1.0                | 5.30                | 57.70              | 16.60             | 20.40  | 砂質土                     | 36      | 密なLの | 19.0   | 20.0   | 286   | 203.00  | 135.33   | 0.0305                             | 0.0305  |
| 25.0                        | 21.0                                   | 1.0                | 2.80                | 68.40              | 18.50             | 30.30  | 砂質土                     | 34      | 密なLの | 19.0   | 20.0   | 280   | 213.00  | 142.00   | 0.0308                             | 0.0308  |
| 26.0                        | 22.0                                   | 1.0                | 1.50                | 36.20              | 11.20             | 51.10  | 粘性土                     | 71      | 密なLの | 18.0   | 19.0   | 415   | 222.50  | 148.33   | 0.0024                             | 0.0024  |
| 27.0                        | 23.0                                   | 1.0                | 45.70               | 42.10              | 12.20             | 12.2   | 礫質土                     | 68      | 密なLの | 20.0   | 21.0   | 366   | 232.50  | 155.00   | 0.0027                             | 0.0027  |
| 28.0                        | 24.0                                   | 1.0                |                     |                    |                   |  | 礫質土                     | 75      | 密なLの | 20.0   | 21.0   | 380   | 243.50  | 162.33   | 0.0028                             | 0.0028  |
| 29.0                        | 25.0                                   | 1.0                |                     |                    |                   |  | 礫質土                     | 88      | 密なLの | 20.0   | 21.0   | 404   | 254.50  | 169.67   | 0.0025                             | 0.0025  |
| 30.0                        | 26.0                                   | 1.0                |                     |                    |                   |  | 礫質土                     | 88      | 密なLの | 20.0   | 21.0   | 404   | 265.50  | 177.00   | 0.0025                             | 0.0025  |

・ AB-5

U AD-3

基礎条件: 28層目,  $\gamma = 20.0 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ ,  $V_s = 140 \text{ (m/sec)}$ , 線形弾性

ボーリング AB-5 コア

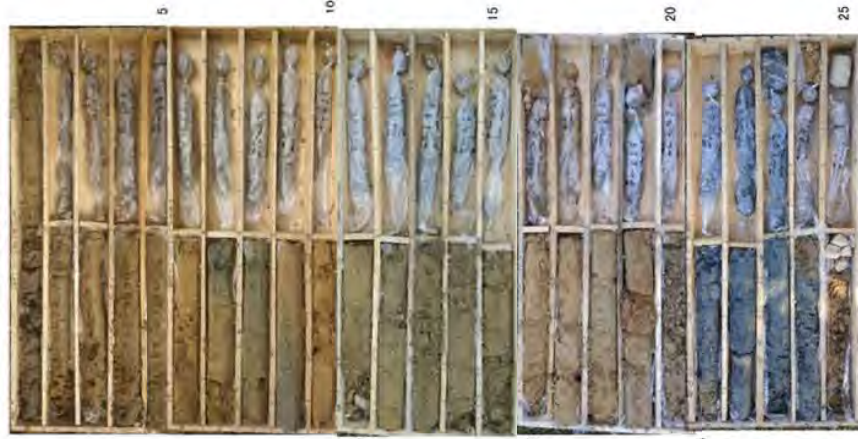
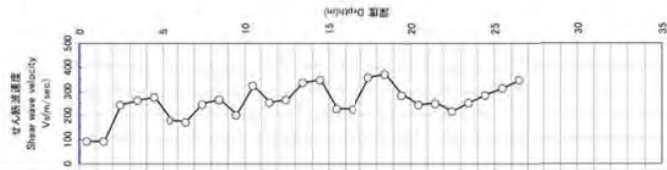


表 0.16 解析条件 AB-5

| ボーリング名                |                        | AB-5                     |                              |  |                         |               |         |                                    |  |                                      |  |  |  |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------|--|-------------------------|---------------|---------|------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--|--|
| 地下水位深さ Q.L.           |                        | 0.00 (m)                 |                              |  |                         |               |         |                                    |  |                                      |  |  |  |
| 沖積沉積層新統(セグ)の境界深さ Q.L. |                        | 28.40 (m)                |                              |  |                         |               |         |                                    |  |                                      |  |  |  |
| 深度 (層下層)              | ボーリング<br>→Z深さ<br>(層下層) | 層厚<br>Layer<br>thickness | 粗度<br>Grain size<br>Orn size | 細粒分<br>点有率<br>Fine<br>fraction<br>constant | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態      | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効土圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure | ひずみ<br>依存式<br>$\sigma_1/\sigma_2 - \gamma$ | 地盤の<br>基本振動周期<br>T <sub>0</sub> の算出<br>natural<br>period |
| (m)                   | (m)                    | (m)                      | (N) (N) (N) (N)              | (%)  |                         |               |         | (kN/m <sup>3</sup> )               | (kN/m <sup>3</sup> )                     | (m/sec)                              | (kN/m <sup>2</sup> )                                 |  | (N/V <sub>s</sub> )                                      |
| 1.0                   | 1.0                    | 1.0                      | 1.00                         | 10.40                                      | 26.60                   | 28.6          | 細いL.O.P | 17.0                               | 18.0                                     | 84                                   | 4.00   | 0.0106                                     | 0.0106   |
| 2.0                   | 2.0                    | 1.0                      | 0.50                         | 57.30                                      | 22.70                   | 18.50         | 細いL.O.P | 19.0                               | 18.0                                     | 84                                   | 12.00  | 0.0106                                     | 0.0106   |
| 3.0                   | 3.0                    | 1.0                      | 1.10                         | 55.90                                      | 13.00                   | 10.4          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 248                                  | 21.00  | 0.0041                                     | 0.0041   |
| 4.0                   | 4.0                    | 1.0                      | 1.30                         | 76.00                                      | 10.40                   | 10.4          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 263                                  | 14.00  | 0.0039                                     | 0.0039   |
| 5.0                   | 5.0                    | 1.0                      | 1.80                         | 60.00                                      | 24.40                   | 24.4          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 277                                  | 27.33  | 0.0039                                     | 0.0039   |
| 6.0                   | 6.0                    | 1.0                      | 44.66                        | 26.49                                      | 26.26                   | 55.6          | 細いL.O.P | 14.0                               | 16.0                                     | 182                                  | 48.50  | 0.0055                                     | 0.0055   |
| 7.0                   | 7.0                    | 1.0                      | 88.50                        | 13.50                                      | 8.20                    | 13.5          | 細いL.O.P | 19.0                               | 18.0                                     | 175                                  | 55.00  | 0.0057                                     | 0.0057   |
| 8.0                   | 8.0                    | 1.0                      | 25.90                        | 57.60                                      | 11.50                   | 19.7          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 249                                  | 54.00  | 0.0040                                     | 0.0040   |
| 9.0                   | 9.0                    | 1.0                      | 35.30                        | 54.30                                      | 6.40                    | 9.4           | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 287                                  | 74.00  | 0.0037                                     | 0.0037   |
| 10.0                  | 10.0                   | 1.0                      | 74.30                        | 25.70                                      | 25.7                    | 25.7          | 細いL.O.P | 17.0                               | 18.0                                     | 204                                  | 83.00  | 0.0049                                     | 0.0049   |
| 11.0                  | 11.0                   | 1.0                      | 30.90                        | 56.10                                      | 13.10                   | 13.1          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 325                                  | 92.00  | 0.0031                                     | 0.0031   |
| 12.0                  | 12.0                   | 1.0                      | 19.90                        | 69.00                                      | 16.50                   | 16.5          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 256                                  | 102.00   | 0.0039                                     | 0.0039   |
| 13.0                  | 13.0                   | 1.0                      | 28.40                        | 60.70                                      | 10.90                   | 10.9          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 297                                  | 112.00   | 0.0037                                     | 0.0037   |
| 14.0                  | 14.0                   | 1.0                      | 21.10                        | 62.70                                      | 16.20                   | 16.2          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 338                                  | 122.00   | 0.0030                                     | 0.0030   |
| 15.0                  | 15.0                   | 1.0                      | 16.40                        | 65.90                                      | 17.70                   | 17.7          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 348                                  | 132.00   | 0.0029                                     | 0.0029   |
| 16.0                  | 16.0                   | 1.0                      | 25.50                        | 53.00                                      | 21.50                   | 21.5          | 細いL.O.P | 18.0                               | 19.0                                     | 229                                  | 141.50   | 0.0044                                     | 0.0044   |
| 17.0                  | 17.0                   | 1.0                      | 72.00                        | 15.80                                      | 15.20                   | 26.0          | 細いL.O.P | 17.0                               | 18.0                                     | 258                                  | 160.00   | n.0044                                     | n.0044   |
| 18.0                  | 18.0                   | 1.0                      | 14.60                        | 63.00                                      | 13.40                   | 23.4          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 360                                  | 159.00   | 0.0028                                     | 0.0028   |
| 19.0                  | 19.0                   | 1.0                      | 13.60                        | 82.90                                      | 2.50                    | 2.5           | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 372                                  | 169.00   | 0.0027                                     | 0.0027   |
| 20.0                  | 20.0                   | 1.0                      | 9.50                         | 70.50                                      | 20.00                   | 20.0          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 286                                  | 179.00   | 0.0035                                     | 0.0035   |
| 21.0                  | 21.0                   | 1.0                      | 2.10                         | 50.10                                      | 19.60                   | 48.9          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 245                                  | 189.00   | 0.0041                                     | 0.0041   |
| 22.0                  | 22.0                   | 1.0                      | 48.10                        | 30.30                                      | 30.30                   | 51.8          | 密なL.O.P | 18.0                               | 19.0                                     | 252                                  | 199.50   | 0.0040                                     | 0.0040   |
| 23.0                  | 23.0                   | 1.0                      | 56.40                        | 31.30                                      | 12.50                   | 43.6          | 細いL.O.P | 17.0                               | 18.0                                     | 219                                  | 207.00   | 0.0046                                     | 0.0046   |
| 24.0                  | 24.0                   | 1.0                      | 10.60                        | 63.60                                      | 13.50                   | 26.0          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 539                                  | 216.00   | 0.0046                                     | 0.0046   |
| 25.0                  | 25.0                   | 1.0                      | 0.80                         | 63.30                                      | 24.10                   | 35.5          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 388                                  | 236.00   | 0.0035                                     | 0.0035   |
| 26.0                  | 26.0                   | 1.0                      | 15.00                        | 63.30                                      | 12.80                   | 8.70          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 314                                  | 236.00   | 0.0032                                     | 0.0032   |
| 27.0                  | 27.0                   | 1.0                      | 4.70                         | 63.70                                      | 25.80                   | 25.6          | 密なL.O.P | 19.0                               | 20.0                                     | 346                                  | 246.00   | 0.0029                                     | 0.0029   |





・AB-6

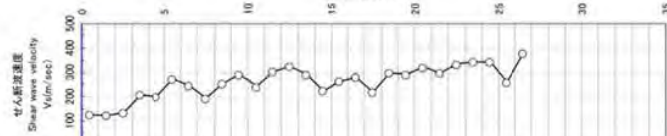
基礎条件：28層目， $\gamma_s=21.0$ (kN/m<sup>3</sup>)， $V_s=440$ (m/sec)，線形弾性

ボーリング AB-6 コア



| ボーリング名                  |  | AB-6      |  |
|-------------------------|--|-----------|--|
| 地下水位深度 (L=)             |  | 0.00 (m)  |  |
| 沖積洪積層境界(コアコアの境界深度) (L=) |  | 27.00 (m) |  |

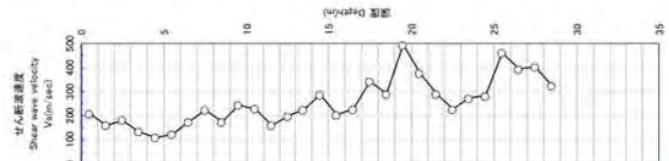
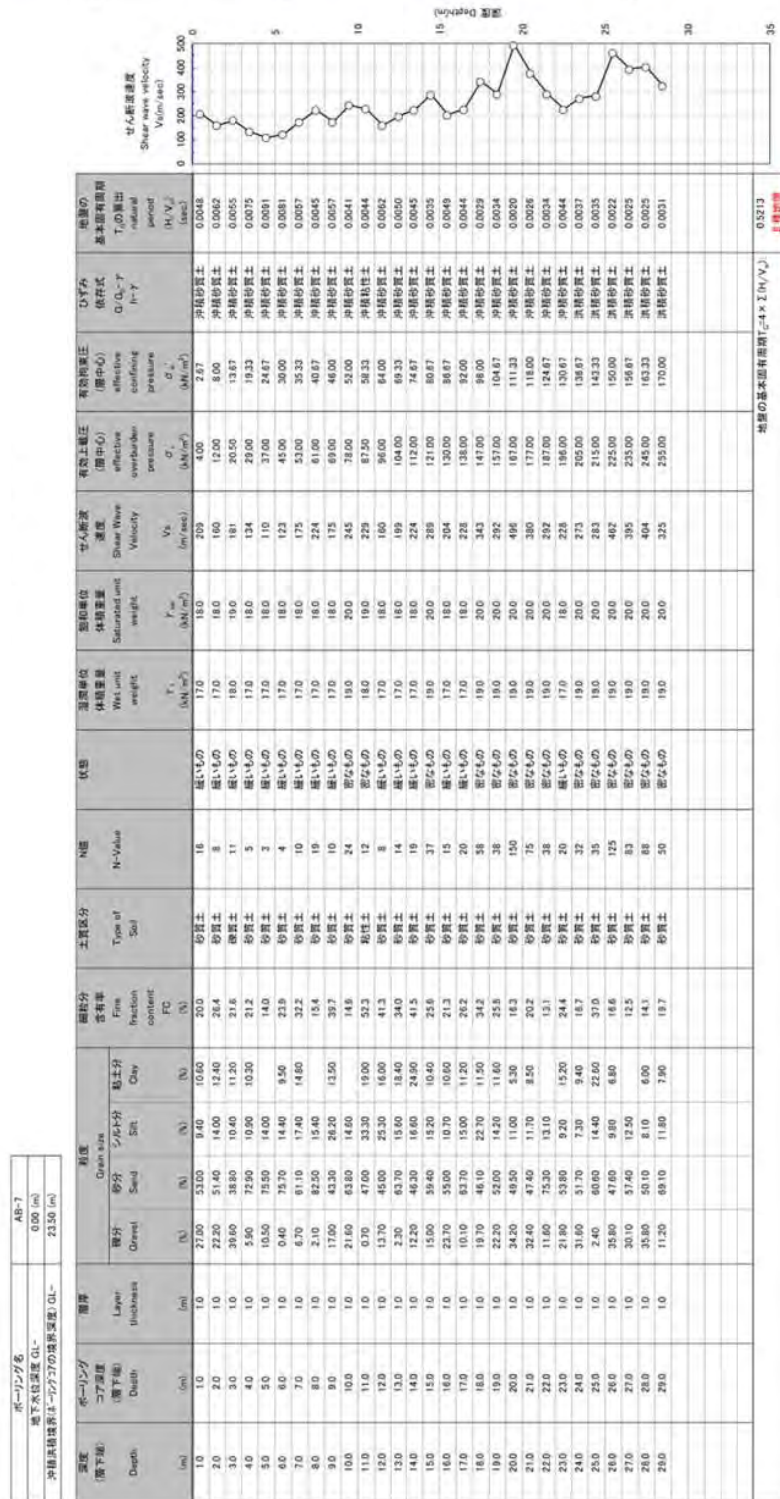
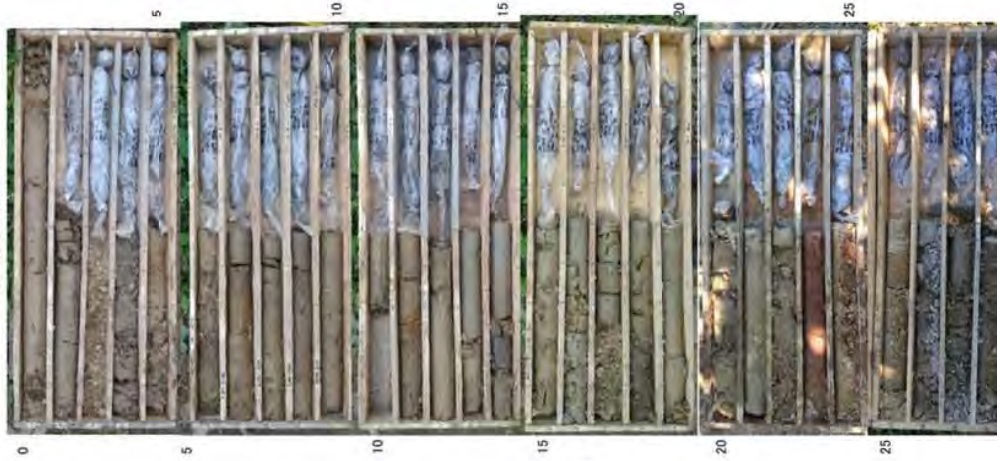
| 深度<br>(層下層)<br>Depth<br>(m) | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth<br>(m) | 層厚<br>Layer<br>thickness<br>(m) | 粒徑<br>Grain size |            |              |             | 細粒分<br>含有率<br>Fine<br>fraction<br>content<br>(%) | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態   | 湿潤率<br>体積重量<br>Weight<br>unit<br>weight<br>(%) | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | せん断速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>(m/sec) | 有効上層圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure<br>$\sigma'_v$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ひずみ<br>係数式<br>$\sigma'_v - \gamma$<br>h- $\gamma$ | 地層の<br>基本固有周期<br>$T_n$ の算出<br>natural<br>period<br>(1/V <sub>s</sub> )<br>(sec) |
|-----------------------------|--|---------------------------------|------------------|------------|--------------|-------------|--|-------------------------|---------------|------|--|--|--|--|---|---|
|                             |  |                                 | 粗分<br>Gravel     | 砂分<br>Sand | シルト分<br>Silt | 粘土分<br>Clay |  |                         |               |      |  |  |  |  |   |   |
| 1.0                         | 1.0                                    | 1.0                             | 1.20             | 46.70      | 32.50        | 20.10       | 52.6   | 粘性土                     | 2             | 硬いもの | 14.0   | 15.0   | 1.87                                       | 沖積粘性土  | 0.0079  |   |
| 2.0                         | 2.0                                    | 1.0                             | 6.40             | 81.50      | 16.30        | 15.80       | 32.1   | 砂質土                     | 4             | 硬いもの | 17.0   | 18.0   | 5.00                                       | 沖積砂質土  | 0.0081  |   |
| 3.0                         | 3.0                                    | 1.0                             | 0.50             | 75.60      | 15.10        | 8.80        | 23.9   | 砂質土                     | 5             | 硬いもの | 17.0   | 18.0   | 11.33                                      | 沖積砂質土  | 0.0075  |   |
| 4.0                         | 4.0                                    | 1.0                             | 0.40             | 37.00      | 43.80        | 18.80       | 62.8   | 粘性土                     | 9             | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 17.00                                      | 沖積粘性土  | 0.0048  |   |
| 5.0                         | 5.0                                    | 1.0                             | 28.70            | 28.60      | 21.70        | 50.3        | 62.8   | 粘性土                     | 8             | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 23.00                                      | 沖積粘性土  | 0.0030  |   |
| 6.0                         | 6.0                                    | 1.0                             | 25.30            | 70.30      | 4.40         | 4.4         | 10.2   | 砂質土                     | 32            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 29.33                                      | 沖積砂質土  | 0.0037  |   |
| 7.0                         | 7.0                                    | 1.0                             | 18.80            | 70.00      | 10.20        | 9.10        | 28.4   | 砂質土                     | 24            | 密なもの | 17.0   | 18.0   | 36.00                                      | 沖積砂質土  | 0.0041  |   |
| 8.0                         | 8.0                                    | 1.0                             | 16.70            | 76.00      | 7.30         | 9.7         | 28.4   | 砂質土                     | 13            | 硬いもの | 17.0   | 18.0   | 42.00                                      | 沖積砂質土  | 0.0052  |   |
| 9.0                         | 9.0                                    | 1.0                             | 40.00            | 50.30      | 9.70         | 8.7         | 38   | 砂質土                     | 28            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 48.00                                      | 沖積砂質土  | 0.0040  |   |
| 10.0                        | 10.0                                   | 1.0                             | 12.40            | 79.60      | 8.00         | 8.0         | 6.0  | 砂質土                     | 23            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 61.33                                      | 沖積砂質土  | 0.0042  |   |
| 11.0                        | 11.0                                   | 1.0                             | 16.60            | 70.40      | 6.00         | 6.0         | 12.6   | 砂質土                     | 42            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 66.00                                      | 沖積砂質土  | 0.0033  |   |
| 12.0                        | 12.0                                   | 1.0                             | 5.10             | 59.90      | 21.40        | 13.60       | 35.0   | 砂質土                     | 50            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 74.67                                      | 沖積砂質土  | 0.0031  |   |
| 13.0                        | 13.0                                   | 1.0                             | 44.80            | 47.80      | 7.40         | 7.4         | 7.4  | 砂質土                     | 38            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 81.33                                      | 沖積砂質土  | 0.0034  |   |
| 14.0                        | 14.0                                   | 1.0                             | 57.30            | 37.20      | 5.90         | 5.9         | 5.5  | 砂質土                     | 19            | 硬いもの | 18.0   | 19.0   | 131.50                                     | 沖積砂質土  | 0.0045  |   |
| 15.0                        | 15.0                                   | 1.0                             | 36.30            | 50.20      | 5.30         | 13.50       | 18.8   | 砂質土                     | 34            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 141.00                                     | 沖積砂質土  | 0.0038  |   |
| 16.0                        | 16.0                                   | 1.0                             | 3.80             | 82.90      | 3.30         | 3.3         | 3.3  | 砂質土                     | 34            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 151.00                                     | 沖積砂質土  | 0.0038  |   |
| 17.0                        | 17.0                                   | 1.0                             | 5.00             | 77.80      | 16.30        | 16.3        | 16.3   | 砂質土                     | 18            | 硬いもの | 17.0   | 18.0   | 106.67                                     | 沖積砂質土  | 0.0046  |   |
| 18.0                        | 18.0                                   | 1.0                             | 9.60             | 61.60      | 13.80        | 13.00       | 28.6   | 砂質土                     | 40            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 112.67                                     | 沖積砂質土  | 0.0034  |   |
| 20.0                        | 20.0                                   | 1.0                             | 48.10            | 29.60      | 22.30        | 22.30       | 51.9   | 粘性土                     | 38            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 119.33                                     | 沖積砂質土  | 0.0034  |   |
| 21.0                        | 21.0                                   | 1.0                             | 10.10            | 76.10      | 13.80        | 13.8        | 13.8   | 砂質土                     | 33            | 密なもの | 18.0   | 19.0   | 123.67                                     | 沖積砂質土  | 0.0031  |   |
| 22.0                        | 22.0                                   | 1.0                             | 35.20            | 53.90      | 10.90        | 10.9        | 10.9   | 砂質土                     | 40            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 132.00                                     | 沖積砂質土  | 0.0034  |   |
| 23.0                        | 23.0                                   | 1.0                             | 7.00             | 78.70      | 14.30        | 14.3        | 14.3   | 砂質土                     | 54            | 密なもの | 19.0   | 20.0   | 138.67                                     | 沖積砂質土  | 0.0030  |   |
| 24.0                        | 24.0                                   | 1.0                             | 1.90             | 50.30      | 31.70        | 16.20       | 47.9   | 砂質土                     | 58            | 密なもの | 18.0   | 20.0   | 145.33                                     | 沖積砂質土  | 0.0028  |   |
| 25.0                        | 25.0                                   | 1.0                             | 1.90             | 50.30      | 28.80        | 20.90       | 49.7   | 砂質土                     | 28            | 密なもの | 18.0   | 20.0   | 152.00                                     | 沖積砂質土  | 0.0029  |   |
| 26.0                        | 26.0                                   | 1.0                             | 44.20            | 42.20      | 13.60        | 13.6        | 13.6   | 粘性土                     | 15            | 密なもの | 20.0   | 21.0   | 165.67                                     | 沖積砂質土  | 0.0026  |   |



地層の基本固有周期  $T_n = 4 \times \Sigma (h/V_s)$  0.4504 単位: 秒

・AB-7  
 基礎条件：30層目， $\gamma_f=20.0$  (kN/m<sup>3</sup>)， $V_s=440$  (m/sec)，線形弾性

ボーリング AB-7 コア





• AB-14

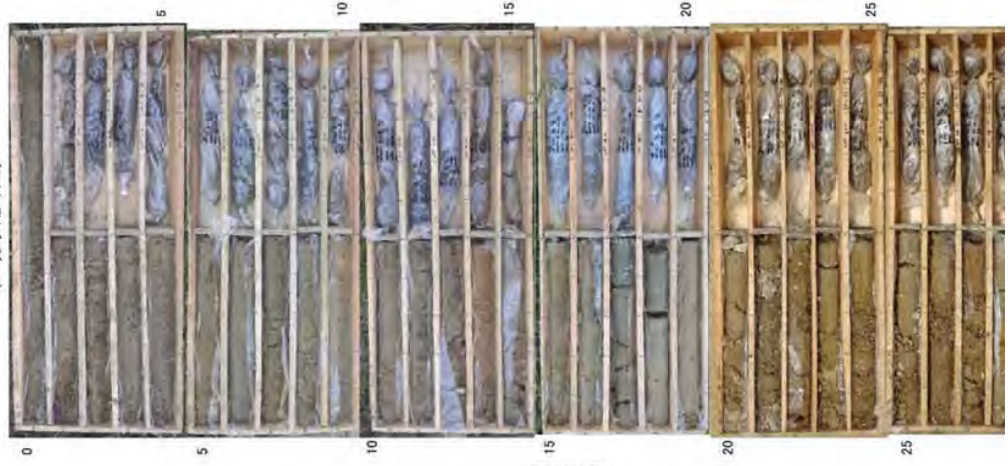
表の赤枠については以下のように設定する。

赤枠①：コア写真を参考に、砂質土とする。

赤枠②：N値が極端に大きい層については、基盤のVsを適用する。

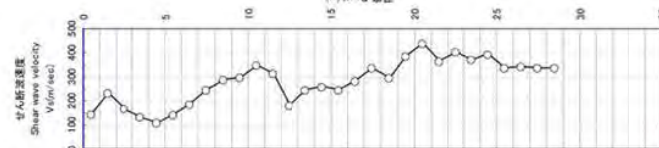
基盤条件：30層目、 $\gamma = 20.0$  (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s = 440$  (m/sec)、線形弾性

ボーリング AB-14 コア



| ボーリング名                |  | AB-14     |  |
|-----------------------|--|-----------|--|
| 地下水位高度 OL-            |  | 0.00 (m)  |  |
| 外径深部調査層はコア17の調査深部 OL- |  | 17.00 (m) |  |

| 深度<br>(層下層)<br>Depth | ボーリング<br>コア深度<br>(層下層)<br>Depth | 層厚<br>Layer<br>thickness | 粒度          |            |              | 細粒分<br>含率率<br>Fine<br>fraction<br>content | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態  | 体積重量<br>Wt Unit<br>weight | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity | 有効土圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure | 有効土圧<br>(層中心)<br>effective<br>coffine<br>pressure | ひずみ<br>$\Delta \sigma_v / \sigma_v$ | 地震の<br>基本固有周期<br>$T_b$ の算出<br>period |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------|------------|--------------|---|-------------------------|---------------|-----|---------------------------|--|--------------------------------------|--|---|-------------------------------------|--------------------------------------|
|                      |                                 |                          | 層分<br>Dwell | 砂分<br>Sand | シルト分<br>Silt |   |                         |               |     |                           |  |                                      |  |   |                                     |                                      |
| 15                   | 15                              | 1.0                      | 7.80        | 41.70      | 25.80        | 25.10                                     | 粘土土                     | 3             | 湿り気 | 14.0                      | 15.0                                     | 144                                  | 2.50   | 1.87  | 0.0099                              |                                      |
| 20                   | 20                              | 1.0                      | 26.90       | 65.90      | 9.20         | 9.2                                       | 砂質土                     | 21            | 湿り気 | 18.0                      | 20.0                                     | 232                                  | 10.00  | 6.67  | 0.0043                              |                                      |
| 30                   | 30                              | 1.0                      | 9.70        | 64.90      | 5.40         | 5.4                                       | 砂質土                     | 9             | 湿り気 | 17.0                      | 18.0                                     | 168                                  | 16.00  | 12.67   | 0.0060                              |                                      |
| 40                   | 40                              | 1.0                      | 15.60       | 75.20      | 9.20         | 9.2                                       | 砂質土                     | 5             | 湿り気 | 17.0                      | 18.0                                     | 134                                  | 27.00  | 18.00   | 0.0075                              |                                      |
| 50                   | 50                              | 1.0                      | 57.90       | 21.70      | 20.90        | 42.2                                      | 砂質土                     | 3             | 湿り気 | 17.0                      | 18.0                                     | 110                                  | 35.00  | 23.33   | 0.0091                              |                                      |
| 60                   | 60                              | 1.0                      | 22.20       | 55.50      | 13.30        | 11.00                                     | 砂質土                     | 6             | 湿り気 | 17.0                      | 18.0                                     | 144                                  | 43.00  | 28.67   | 0.0070                              |                                      |
| 70                   | 70                              | 1.0                      | 1.70        | 91.00      | 7.30         | 7.3                                       | 砂質土                     | 12            | 湿り気 | 17.0                      | 18.0                                     | 187                                  | 51.00  | 34.00   | 0.0053                              |                                      |
| 80                   | 80                              | 1.0                      | 41.70       | 34.40      | 23.90        | 58.3                                      | 粘性土                     | 15            | 湿り気 | 18.0                      | 19.0                                     | 247                                  | 59.50  | 39.67   | 0.0041                              |                                      |
| 90                   | 90                              | 1.0                      | 59.20       | 28.10      | 14.70        | 43.8                                      | 砂質土                     | 37            | 湿り気 | 18.0                      | 20.0                                     | 288                                  | 69.00  | 46.00   | 0.0035                              |                                      |
| 100                  | 100                             | 1.0                      | 58.00       | 29.00      | 13.00        | 42.0                                      | 砂質土                     | 40            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 288                                  | 79.00  | 52.67   | 0.0034                              |                                      |
| 110                  | 110                             | 1.0                      | 39.40       | 45.80      | 10.60        | 16.8                                      | 砂質土                     | 60            | 湿り気 | 20.0                      | 21.0                                     | 348                                  | 89.00  | 59.33   | 0.0029                              |                                      |
| 120                  | 120                             | 1.0                      | 65.50       | 30.00      | 4.50         | 4.5                                       | 粘性土                     | 48            | 湿り気 | 20.0                      | 21.0                                     | 314                                  | 99.50  | 66.33   | 0.0032                              |                                      |
| 130                  | 130                             | 1.0                      | 0.50        | 184.80     | 14.70        | 14.7                                      | 粘性土                     | 11            | 湿り気 | 17.0                      | 18.0                                     | 181                                  | 109.00   | 72.67   | 0.0055                              |                                      |
| 140                  | 140                             | 1.0                      | 37.40       | 35.00      | 27.60        | 62.8                                      | 粘性土                     | 15            | 湿り気 | 18.0                      | 19.0                                     | 247                                  | 117.50   | 78.33   | 0.0041                              |                                      |
| 150                  | 150                             | 1.0                      | 0.30        | 80.40      | 11.40        | 19.3                                      | 砂質土                     | 28            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 240                                  | 127.00   | 84.67   | 0.0039                              |                                      |
| 160                  | 160                             | 1.0                      | 1.20        | 37.10      | 41.20        | 61.7                                      | 粘性土                     | 15            | 湿り気 | 18.0                      | 19.0                                     | 247                                  | 136.50   | 91.00   | 0.0041                              |                                      |
| 170                  | 170                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 35            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 283                                  | 148.00   | 97.33   | 0.0035                              |                                      |
| 180                  | 180                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 56            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 338                                  | 156.00   | 104.00  | 0.0030                              |                                      |
| 190                  | 190                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 39            | 湿り気 | 18.0                      | 20.0                                     | 295                                  | 166.00   | 110.67  | 0.0034                              |                                      |
| 200                  | 200                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 78            | 湿り気 | 18.0                      | 20.0                                     | 387                                  | 176.00   | 117.33  | 0.0028                              |                                      |
| 210                  | 210                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 300           | 湿り気 | 18.0                      | 20.0                                     | 450                                  | 188.00   | 124.00  | 0.0027                              |                                      |
| 220                  | 220                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 68            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 386                                  | 196.00   | 130.67  | 0.0027                              |                                      |
| 230                  | 230                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 88            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 404                                  | 206.00   | 137.33  | 0.0025                              |                                      |
| 240                  | 240                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 71            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 372                                  | 216.00   | 144.00  | 0.0027                              |                                      |
| 250                  | 250                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 83            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 395                                  | 226.00   | 150.67  | 0.0025                              |                                      |
| 260                  | 260                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 58            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 338                                  | 236.00   | 157.33  | 0.0029                              |                                      |
| 270                  | 270                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 58            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 343                                  | 246.00   | 164.00  | 0.0029                              |                                      |
| 280                  | 280                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 56            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 328                                  | 256.00   | 170.67  | 0.0030                              |                                      |
| 290                  | 290                             | 1.0                      |             |            |              |   | 砂質土                     | 58            | 湿り気 | 19.0                      | 20.0                                     | 338                                  | 266.00   | 177.33  | 0.0030                              |                                      |



・ AB-15

表の赤枠については以下のように設定する。

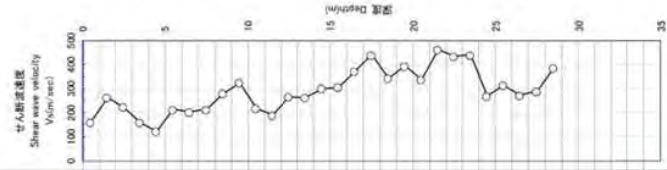
赤枠①：コア写真を参考に、砂質土とする。

基礎条件：30層目、 $\gamma_s=20.0$ (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s=440$ (m/sec)、線形弾性

ボーリング AB-15 コア



| 深度<br>(m) | ボーリング<br>コア深さ<br>(層下厚)<br>Depth<br>(m) | 層厚<br>Layer<br>thickness<br>(m) | 粒徑<br>Grain size     |                      |                     | 細粒分<br>Fine<br>fraction<br>constant<br>FC<br>(%) | 土質区分<br>Type of<br>Soil | N値<br>N-Value | 状態    | 湿潤単位<br>体積重量<br>Wet unit<br>weight<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 飽和単位<br>体積重量<br>Saturated unit<br>weight<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | せん断波<br>速度<br>Shear Wave<br>Velocity<br>(m/sec) | 有効上載圧<br>(層中心)<br>effective<br>overburden<br>pressure<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 有効側載圧<br>(層中心)<br>effective<br>combining<br>pressure<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ひずみ<br>係数式<br>O/C <sub>v</sub> - $\gamma$<br>natural<br>period<br>(H/V)<br>(sec) | 地盤の<br>基本振動周期<br>T <sub>b</sub> の算出<br>(sec) |
|-----------|--|---------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--|-------------------------|---------------|-------|--|--|---|---|--|--|--|
|           |  |                                 | 粒径<br>Gravel<br>(mm) | シルト分<br>Silt<br>(mm) | 粘土分<br>Clay<br>(mm) |  |                         |               |       |  |  |   |   |  |  |  |
| 1.0       | 1.0                                    | 1.0                             | 6.10                 | 76.70                | 17.20               | 17.2   | 砂質土                     | 8             | 緩いもの  | 17.0   | 18.0   | 169   | 4.00  | 2.67   | 沖積砂質土  | 0.0042                                       |
| 2.0       | 2.0                                    | 1.0                             | 28.50                | 60.70                | 10.80               | 10.8   | 砂質土                     | 29            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 263   | 12.00   | 8.67   | 沖積砂質土  | 0.0028                                       |
| 3.0       | 3.0                                    | 1.0                             | 24.30                | 58.10                | 17.60               | 17.6   | 砂質土                     | 19            | 緩いもの  | 17.0   | 18.0   | 224   | 22.00   | 14.67  | 沖積砂質土  | 0.0045                                       |
| 4.0       | 4.0                                    | 1.0                             |                      | 21.60                | 40.9                | 40.9   | 砂質土                     | 8             | 緩いもの  | 17.0   | 18.0   | 160   | 30.00   | 20.00  | 沖積砂質土  | 0.0062                                       |
| 5.0       | 5.0                                    | 1.0                             | 10.00                | 73.60                | 16.40               | 16.4   | 砂質土                     | 4             | 緩いもの  | 17.0   | 18.0   | 123   | 31.00   | 25.33  | 沖積砂質土  | 0.0081                                       |
| 6.0       | 6.0                                    | 1.0                             | 30.70                | 52.60                | 9.90                | 9.9  | 砂質土                     | 17            | 緩いもの  | 17.0   | 18.0   | 214   | 46.00   | 30.67  | 沖積砂質土  | 0.0047                                       |
| 7.0       | 7.0                                    | 1.0                             | 9.70                 | 53.40                | 25.40               | 11.50  | 砂質土                     | 15            | 緩いもの  | 17.0   | 18.0   | 204   | 54.00   | 36.00  | 沖積砂質土  | 0.0048                                       |
| 8.0       | 8.0                                    | 1.0                             | 0.30                 | 85.10                | 17.90               | 16.70  | 砂質土                     | 17            | 緩いもの  | 17.0   | 18.0   | 214   | 62.00   | 41.33  | 沖積砂質土  | 0.0047                                       |
| 9.0       | 9.0                                    | 1.0                             | 13.20                | 78.70                | 8.10                | 8.1  | 砂質土                     | 34            | 密なものの | 18.0   | 20.0   | 280   | 71.00   | 41.33  | 沖積砂質土  | 0.0036                                       |
| 10.0      | 10.0                                   | 1.0                             | 6.30                 | 87.90                | 5.40                | 5.4  | 砂質土                     | 56            | 密なものの | 18.0   | 20.0   | 325   | 81.00   | 54.00  | 沖積砂質土  | 0.0031                                       |
| 11.0      | 11.0                                   | 1.0                             | 19.10                | 69.30                | 19.60               | 19.6   | 砂質土                     | 7             | 緩いもの  | 17.0   | 18.0   | 219   | 80.00   | 54.00  | 沖積砂質土  | 0.0044                                       |
| 12.0      | 12.0                                   | 1.0                             | 32.90                | 48.40                | 22.90               | 22.9   | 粘性土                     | 7             | 密なものの | 18.0   | 19.0   | 93.90   | 93.90   | 69.67  | 沖積粘性土  | 0.0052                                       |
| 13.0      | 13.0                                   | 1.0                             | 18.90                | 73.10                | 8.00                | 14.6   | 砂質土                     | 30            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 267   | 108.00  | 72.00  | 沖積砂質土  | 0.0037                                       |
| 14.0      | 14.0                                   | 1.0                             | 13.70                | 72.70                | 13.60               | 13.6   | 砂質土                     | 29            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 263   | 118.00  | 75.67  | 沖積砂質土  | 0.0038                                       |
| 15.0      | 15.0                                   | 1.0                             | 35.30                | 48.30                | 12.00               | 12.0   | 砂質土                     | 41            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 301   | 128.00  | 85.33  | 沖積砂質土  | 0.0033                                       |
| 16.0      | 16.0                                   | 1.0                             | 23.70                | 63.30                | 13.00               | 13.0   | 砂質土                     | 43            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 308   | 138.00  | 92.00  | 沖積砂質土  | 0.0033                                       |
| 17.0      | 17.0                                   | 1.0                             | 96.70                | 2.90                 | 0.50                | 0.5  | 砂質土                     | 71            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 372   | 148.00  | 98.67  | 沖積砂質土  | 0.0027                                       |
| 18.0      | 18.0                                   | 1.0                             | 40.10                | 48.90                | 11.00               | 11.0   | 砂質土                     | 750           | 密なものの | 20.0   | 21.0   | 443   | 158.50  | 105.67   | 沖積砂質土  | 0.0023                                       |
| 19.0      | 19.0                                   | 1.0                             | 22.90                | 61.70                | 8.40                | 15.4   | 砂質土                     | 58            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 343   | 169.00  | 112.67   | 沖積砂質土  | 0.0029                                       |
| 20.0      | 20.0                                   | 1.0                             | 29.30                | 67.20                | 3.50                | 3.5  | 砂質土                     | 83            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 395   | 178.00  | 119.33   | 沖積砂質土  | 0.0023                                       |
| 21.0      | 21.0                                   | 1.0                             | 24.90                | 70.80                | 4.20                | 4.2  | 砂質土                     | 56            | 密なものの | 18.0   | 20.0   | 338   | 189.00  | 126.00   | 沖積砂質土  | 0.0030                                       |
| 22.0      | 22.0                                   | 1.0                             | 14.20                | 57.00                | 14.90               | 13.90  | 砂質土                     | 125           | 密なものの | 18.0   | 20.0   | 482   | 199.00  | 132.67   | 沖積砂質土  | 0.0022                                       |
| 23.0      | 23.0                                   | 1.0                             | 21.10                | 49.30                | 13.60               | 14.00  | 砂質土                     | 107           | 密なものの | 18.0   | 20.0   | 482   | 209.00  | 139.33   | 沖積砂質土  | 0.0022                                       |
| 24.0      | 24.0                                   | 1.0                             | 2.30                 | 52.30                | 21.30               | 24.10  | 砂質土                     | 21.4          | 密なものの | 18.0   | 20.0   | 435   | 219.00  | 146.00   | 沖積砂質土  | 0.0023                                       |
| 25.0      | 25.0                                   | 1.0                             | 1.90                 | 58.80                | 27.10               | 41.2   | 砂質土                     | 46            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 314   | 229.00  | 152.67   | 沖積砂質土  | 0.0031                                       |
| 26.0      | 26.0                                   | 1.0                             | 1.90                 | 73.30                | 24.80               | 24.8   | 砂質土                     | 32            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 273   | 238.00  | 166.00   | 沖積砂質土  | 0.0037                                       |
| 27.0      | 27.0                                   | 1.0                             | 17.70                | 87.40                | 12.60               | 12.6   | 砂質土                     | 37            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 289   | 259.00  | 172.67   | 沖積砂質土  | 0.0035                                       |
| 28.0      | 28.0                                   | 1.0                             | 17.70                | 55.90                | 12.80               | 13.60  | 砂質土                     | 78            | 密なものの | 19.0   | 20.0   | 387   | 289.00  | 179.33   | 沖積砂質土  | 0.0028                                       |



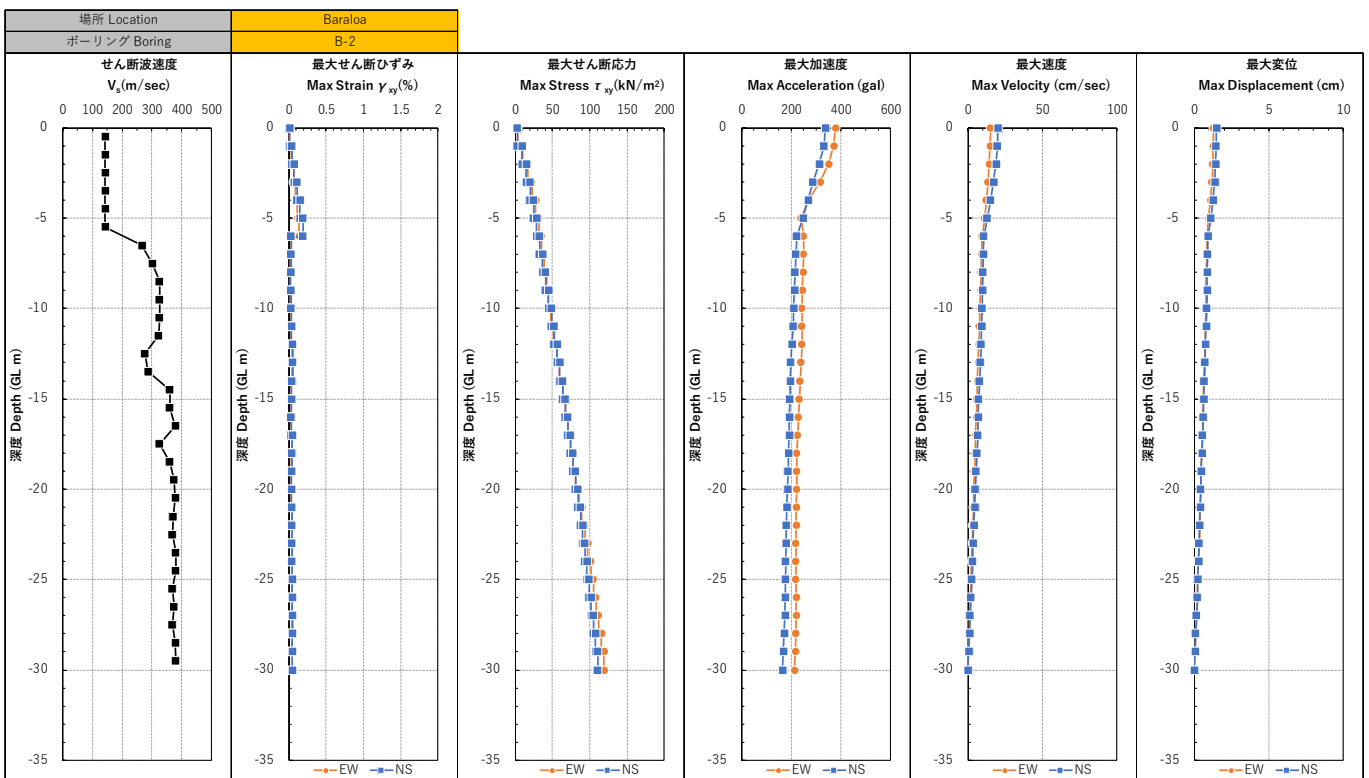
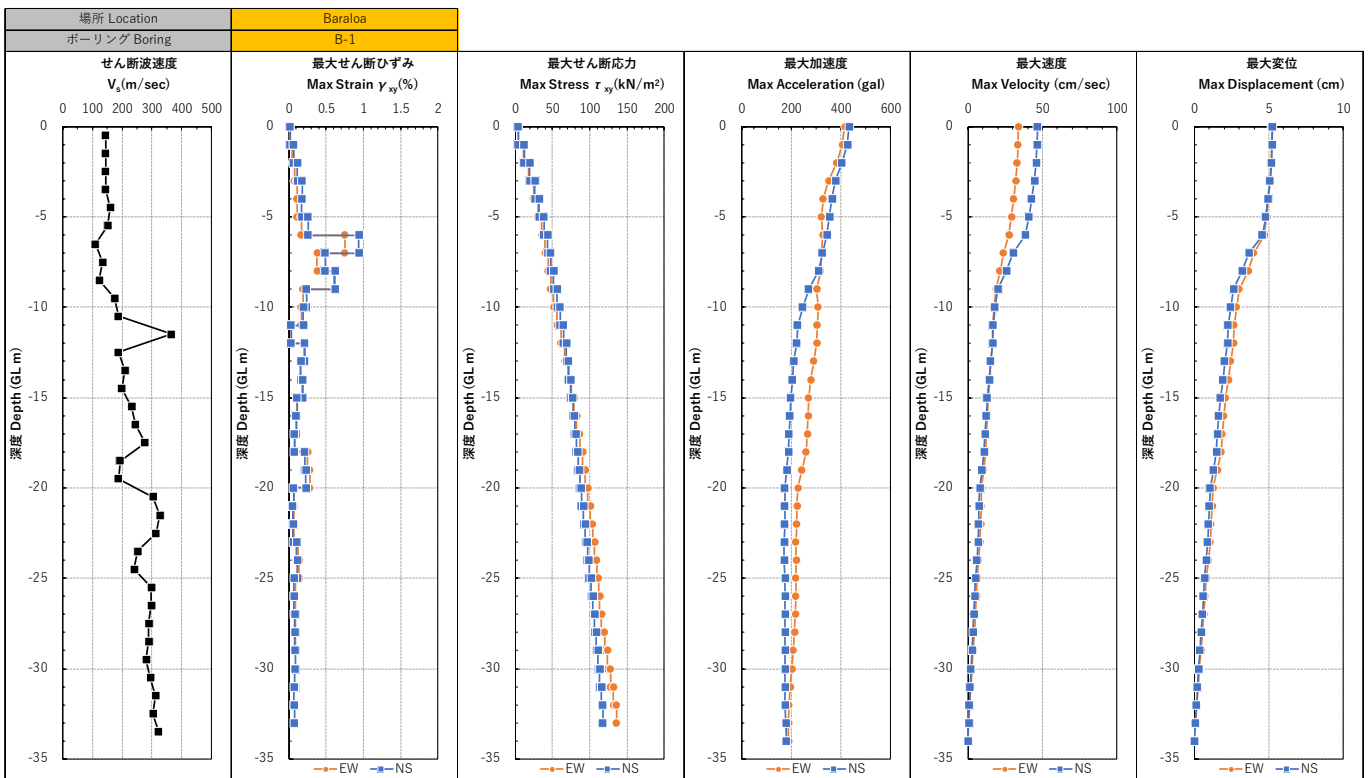
地盤の基本振動周期 $T_b=4 \times T(H/V)$  0.4415 単位:秒

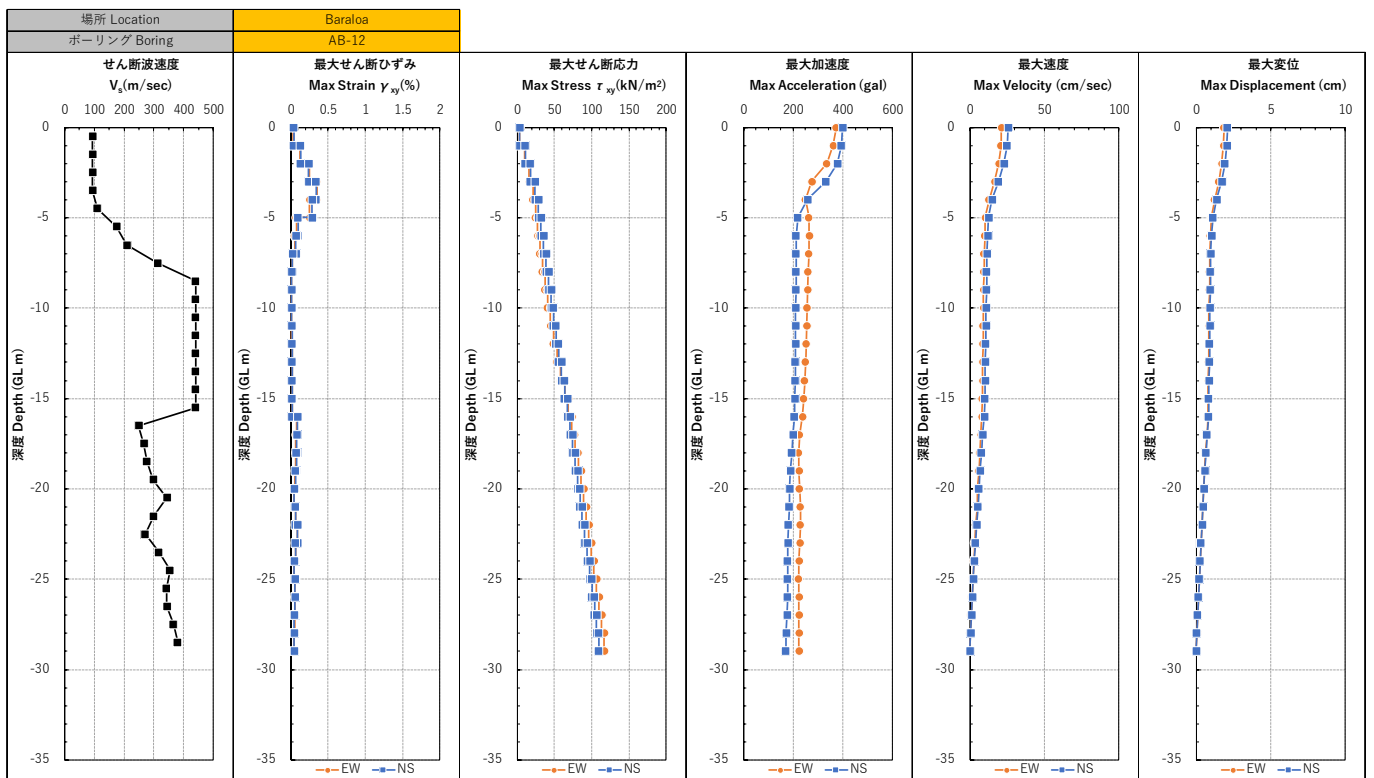
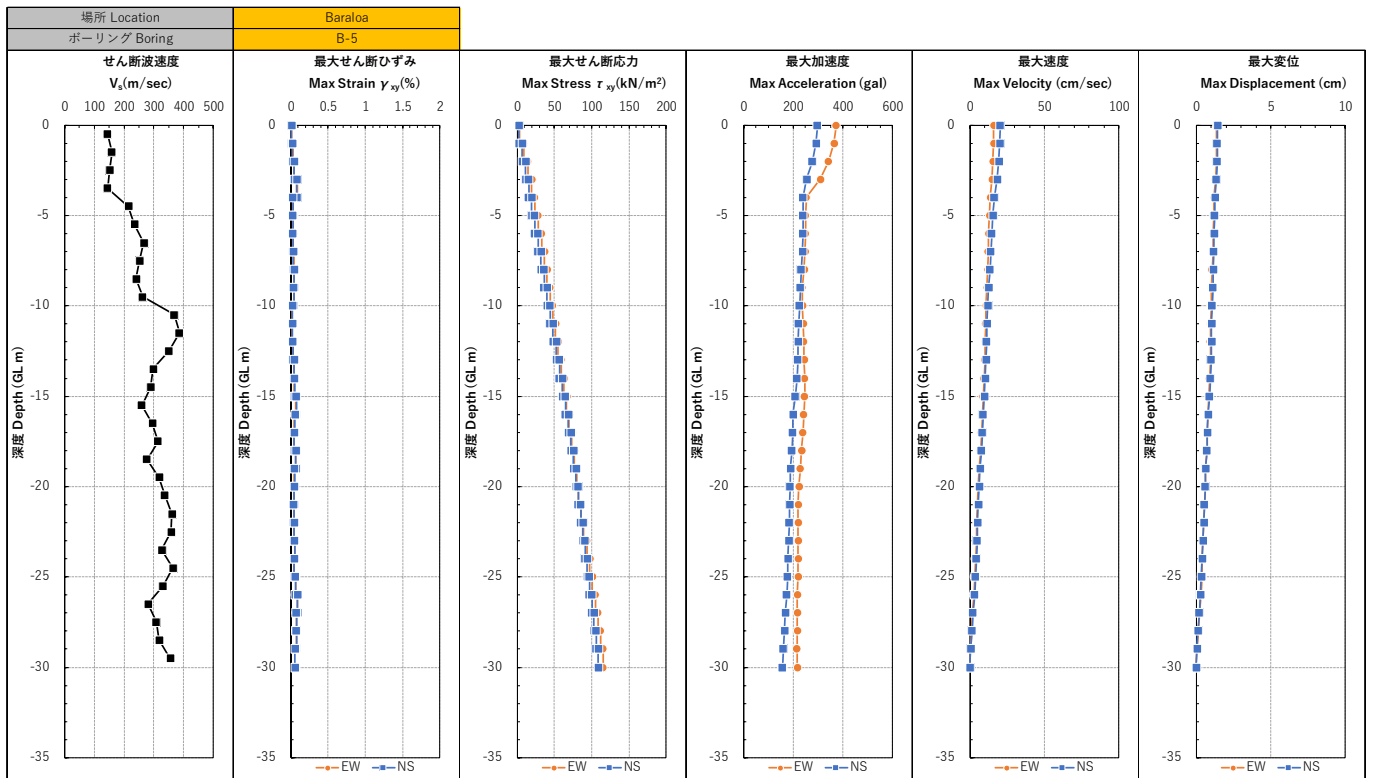




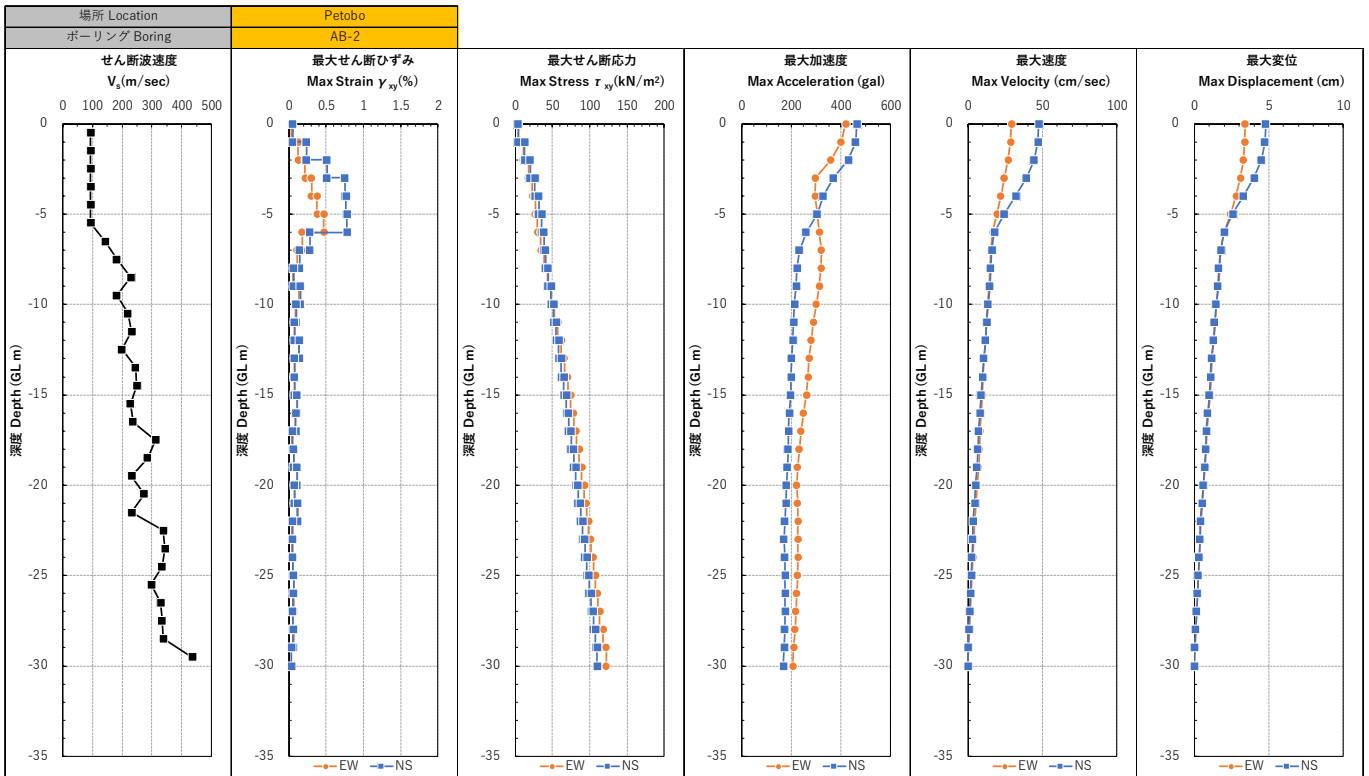
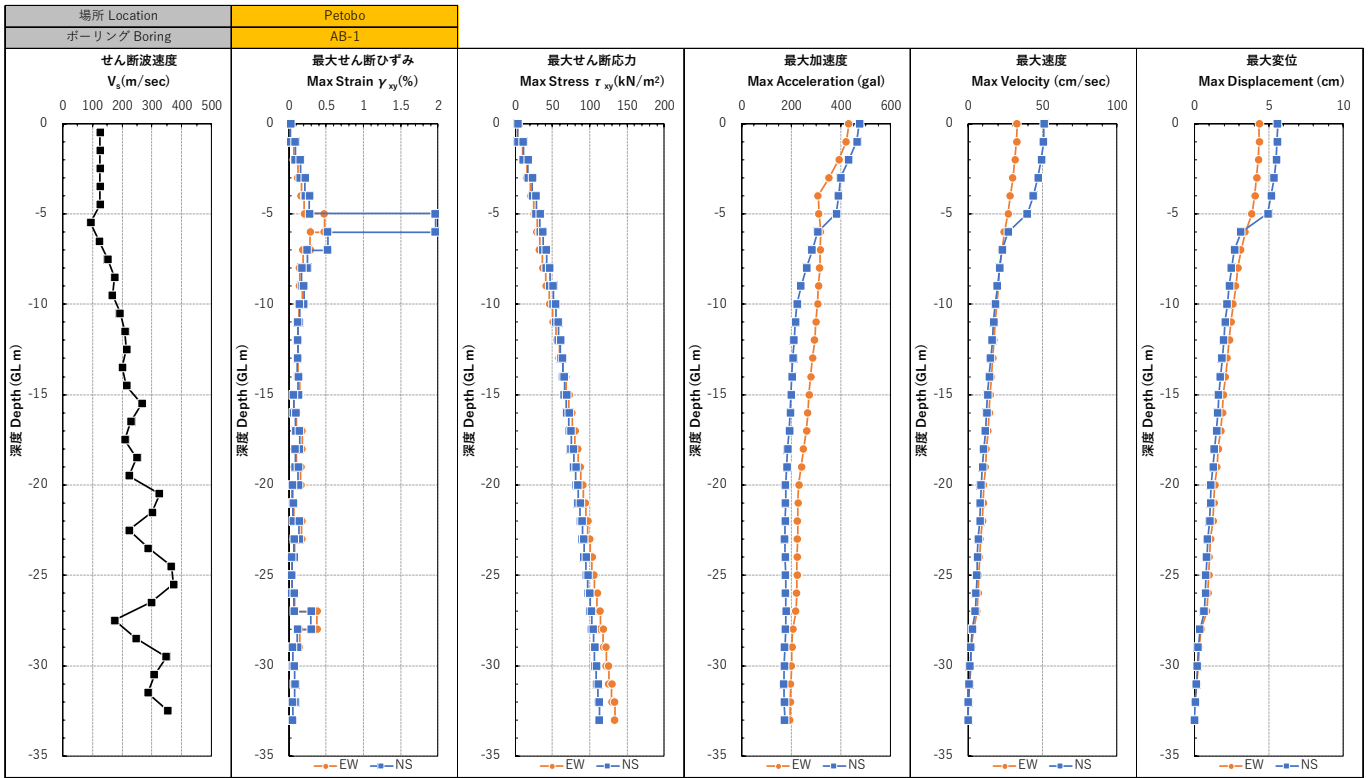
d) 一次元地盤応答解析結果

① Balaraoa

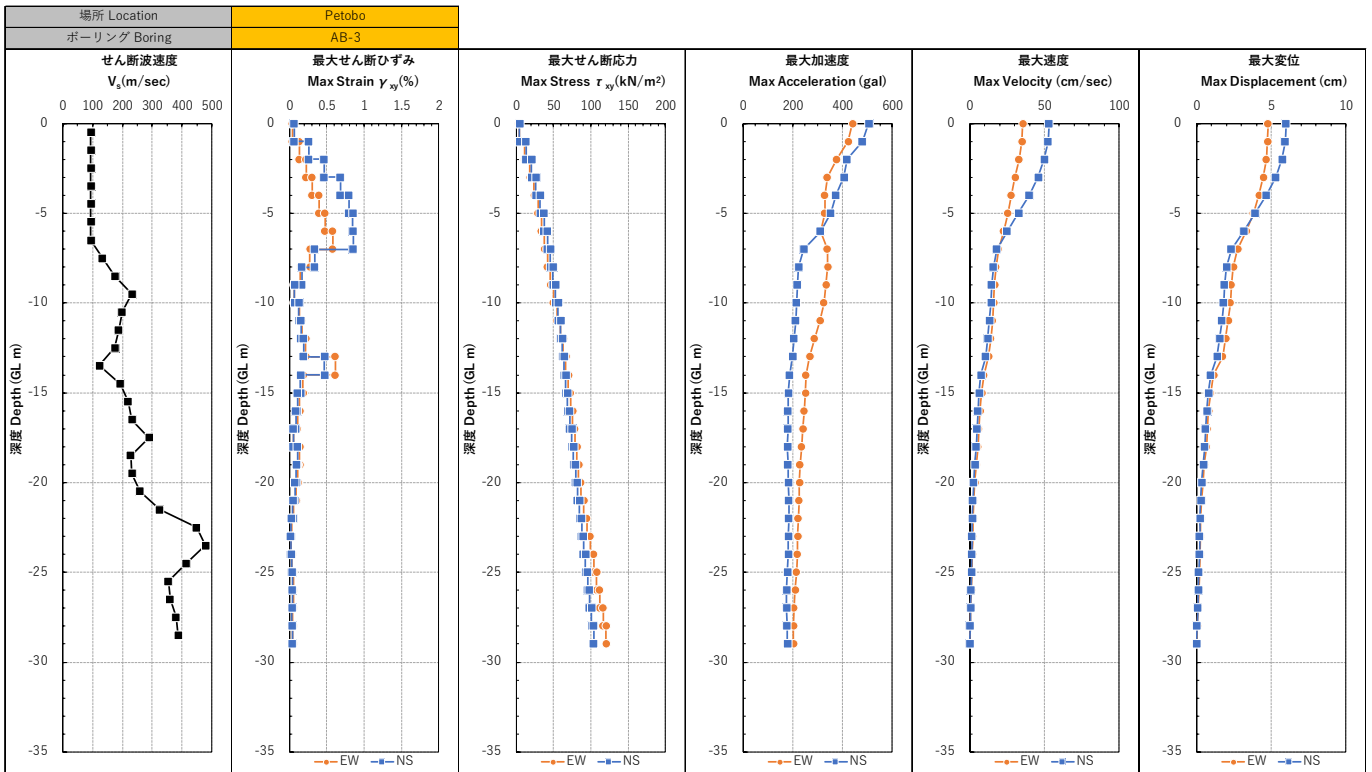
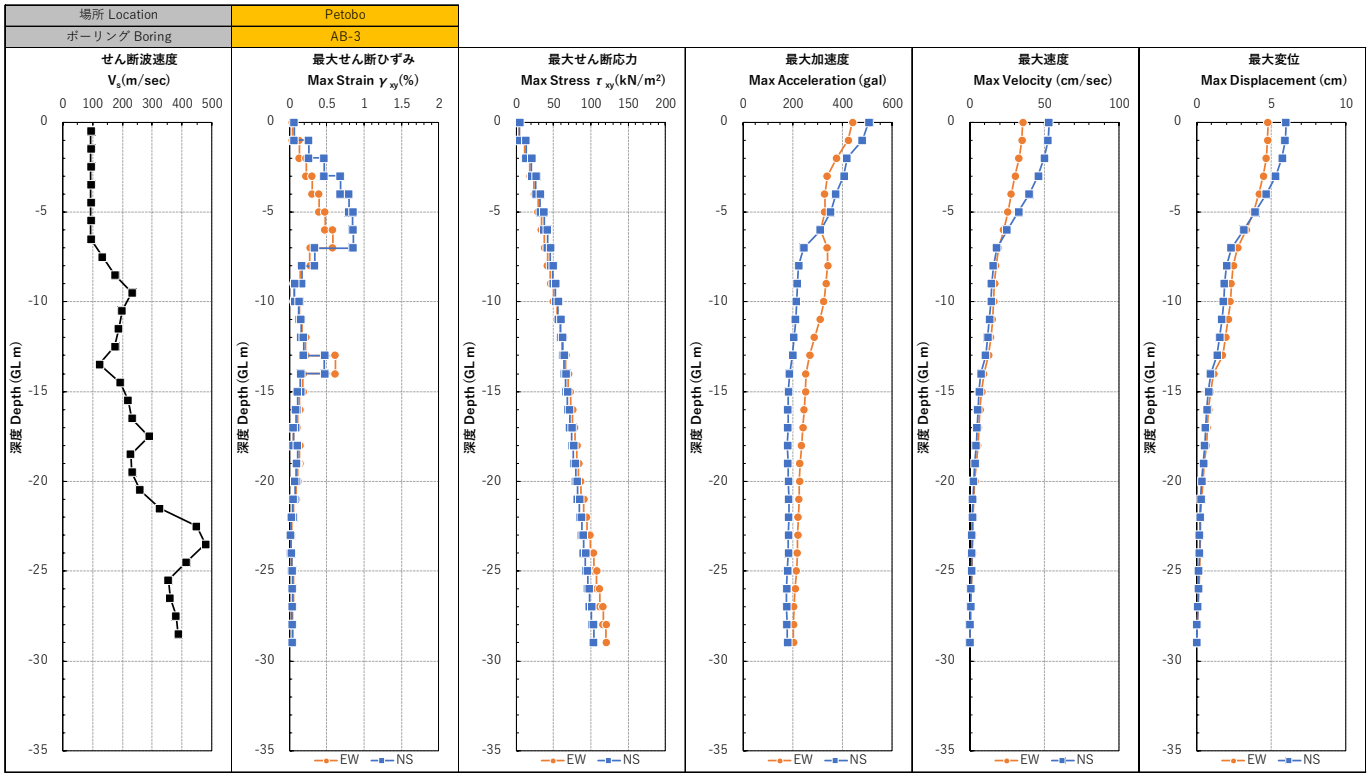




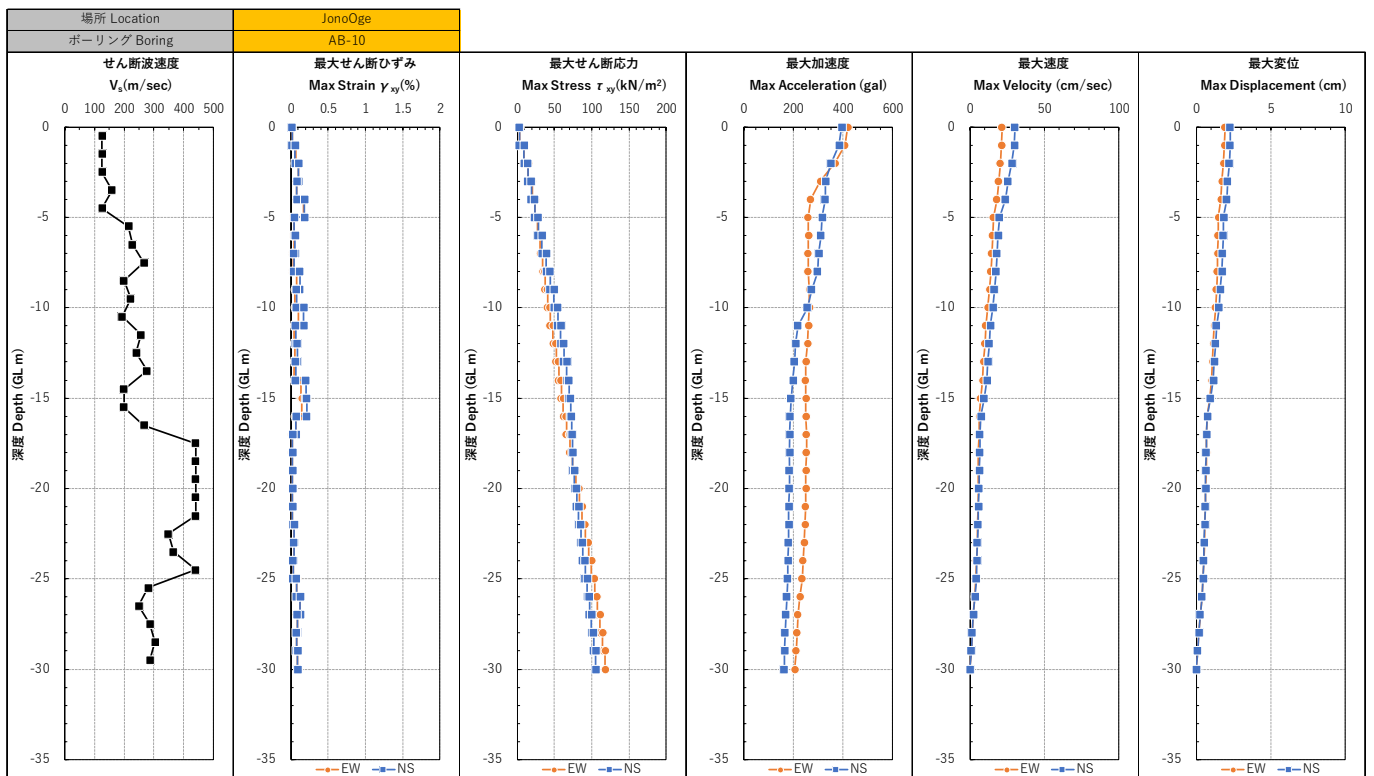
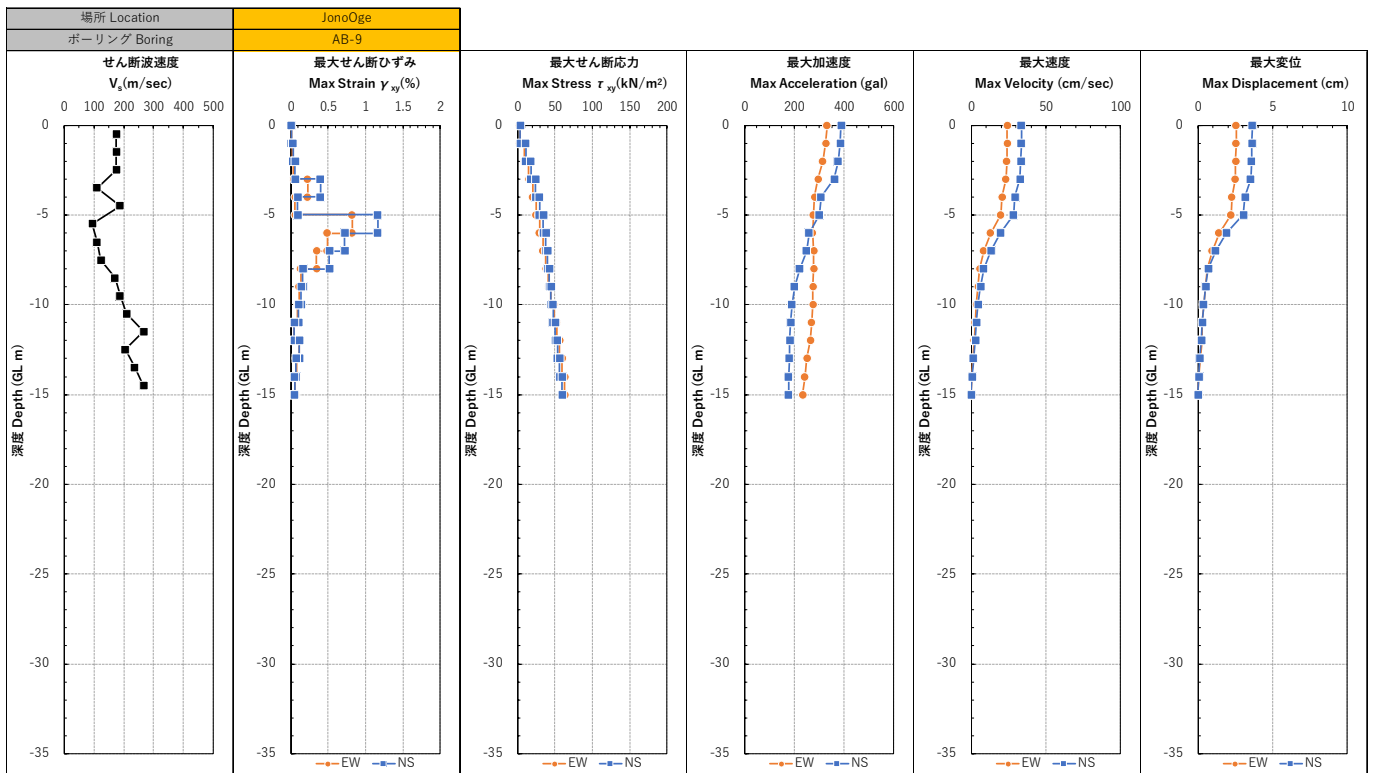
② Petobo

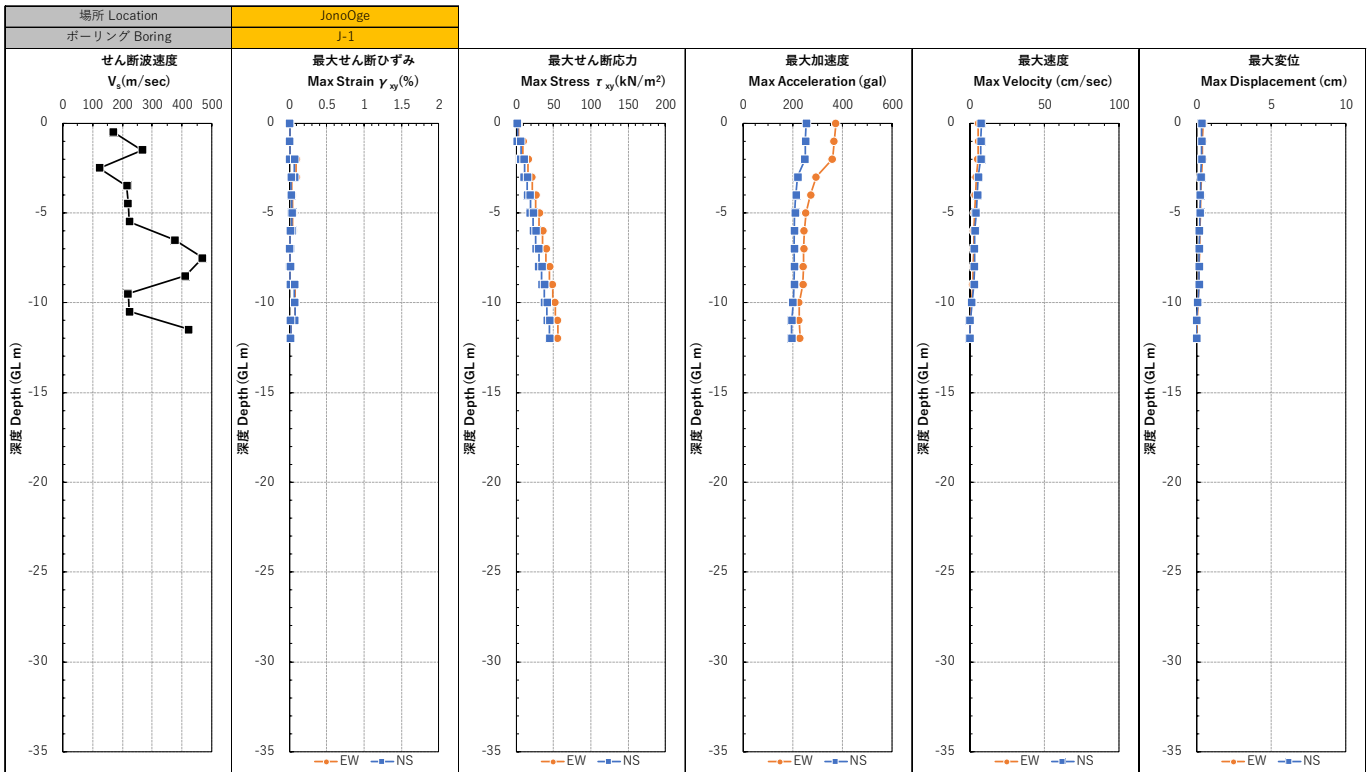
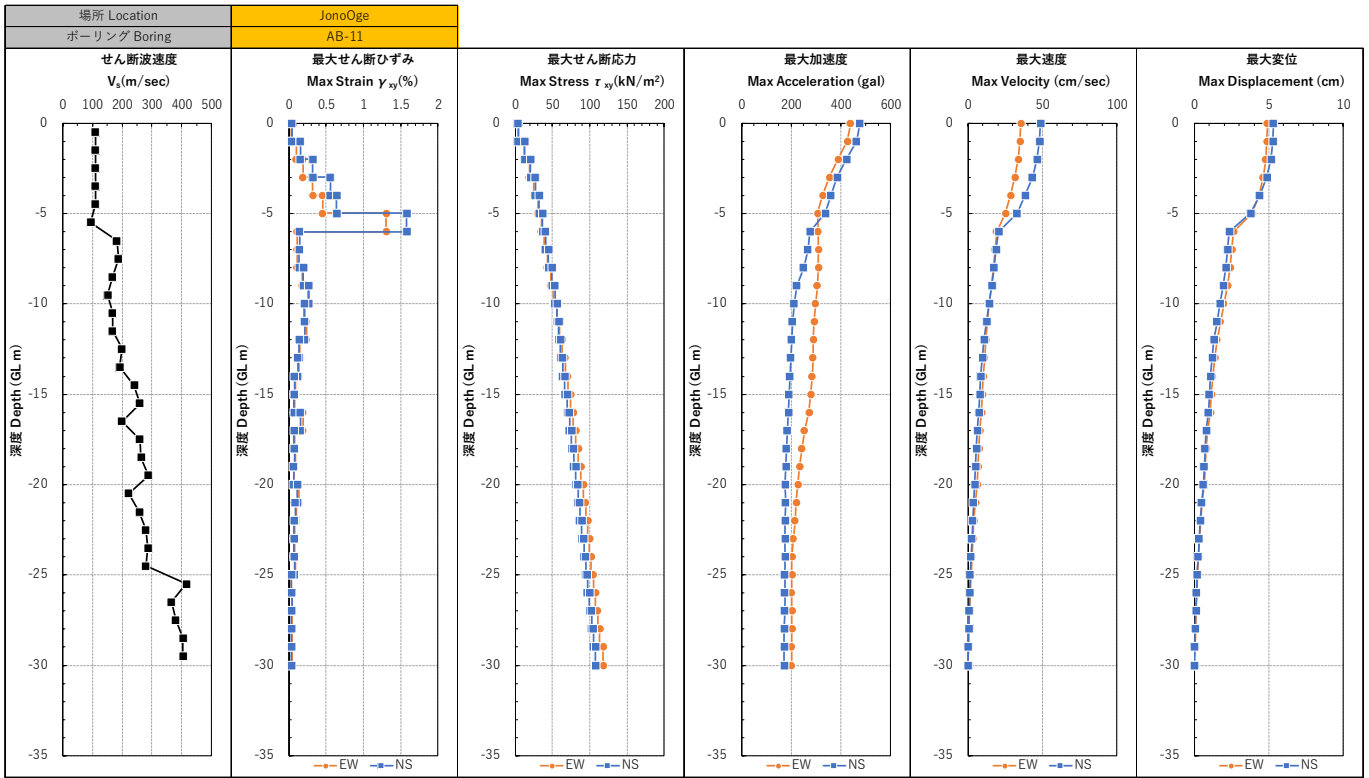


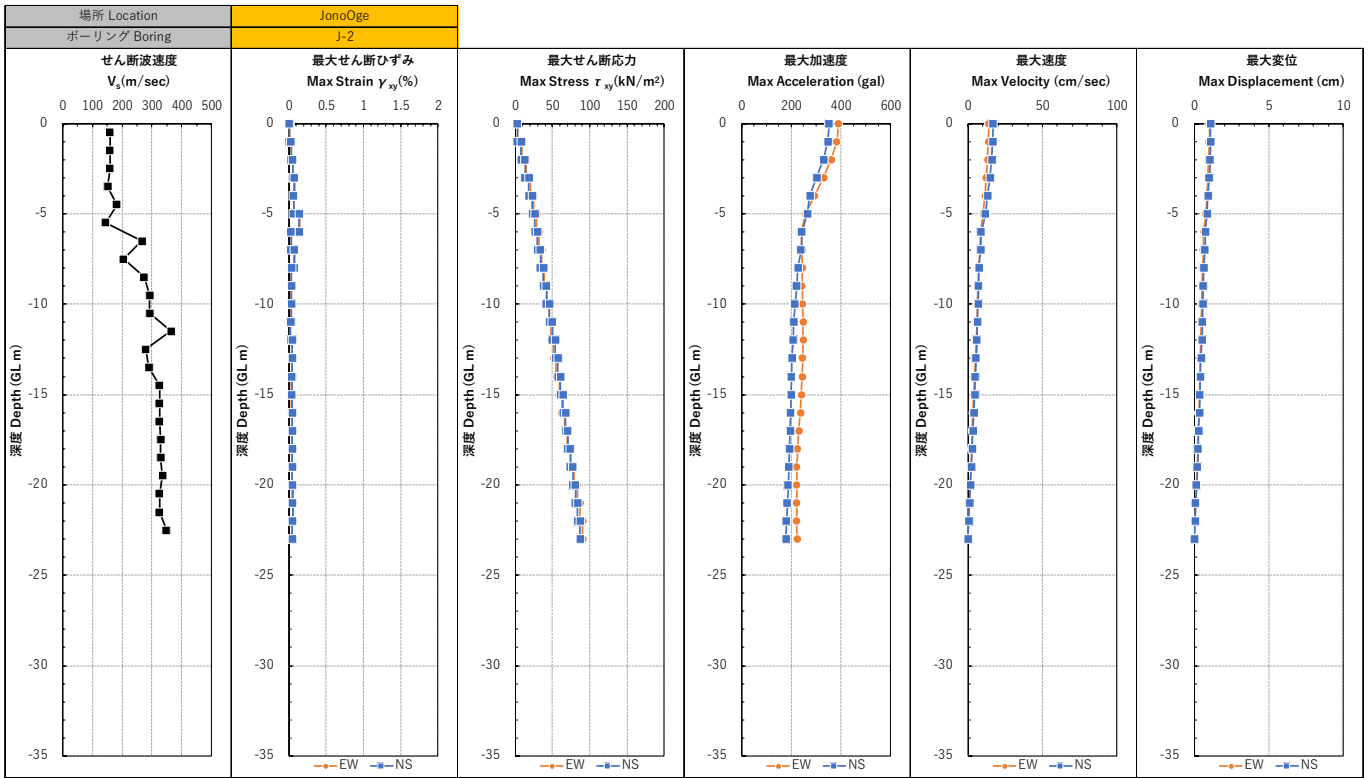




③ Jono Oge

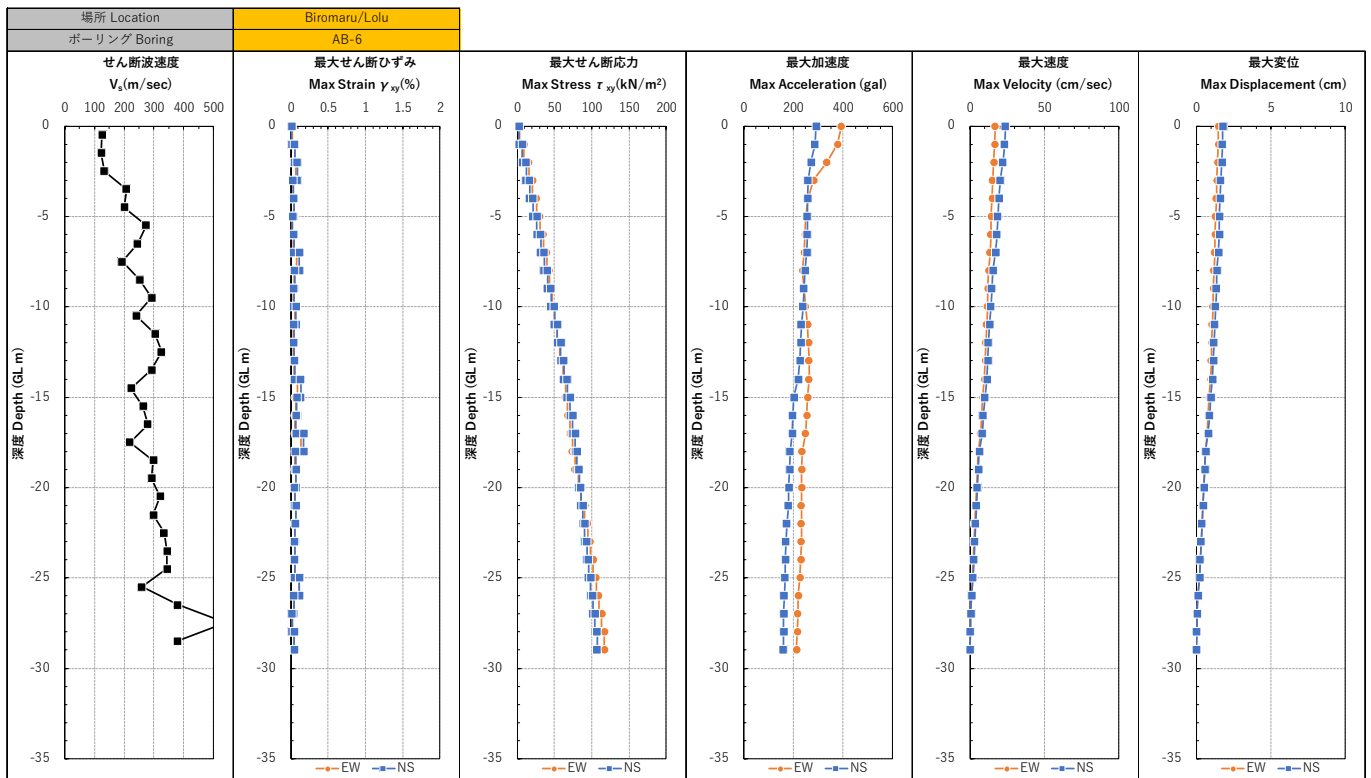
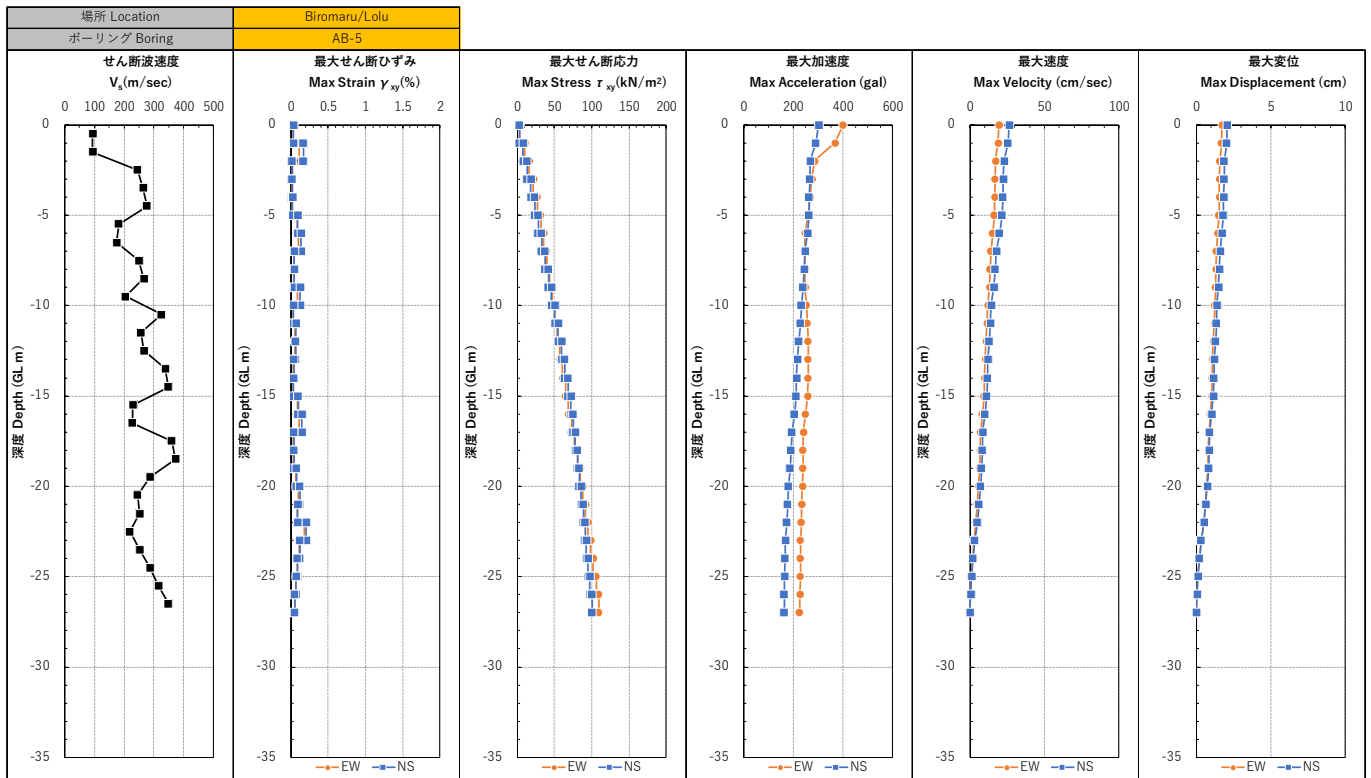


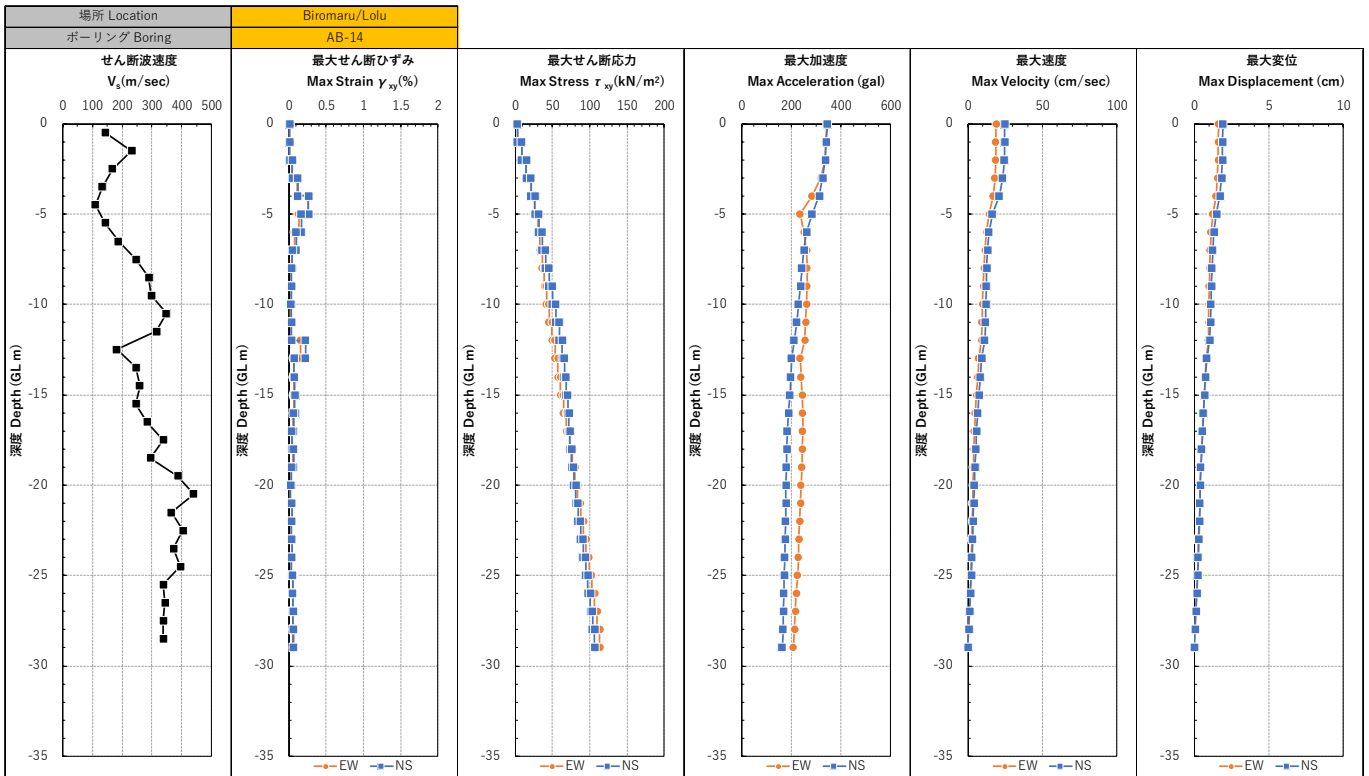
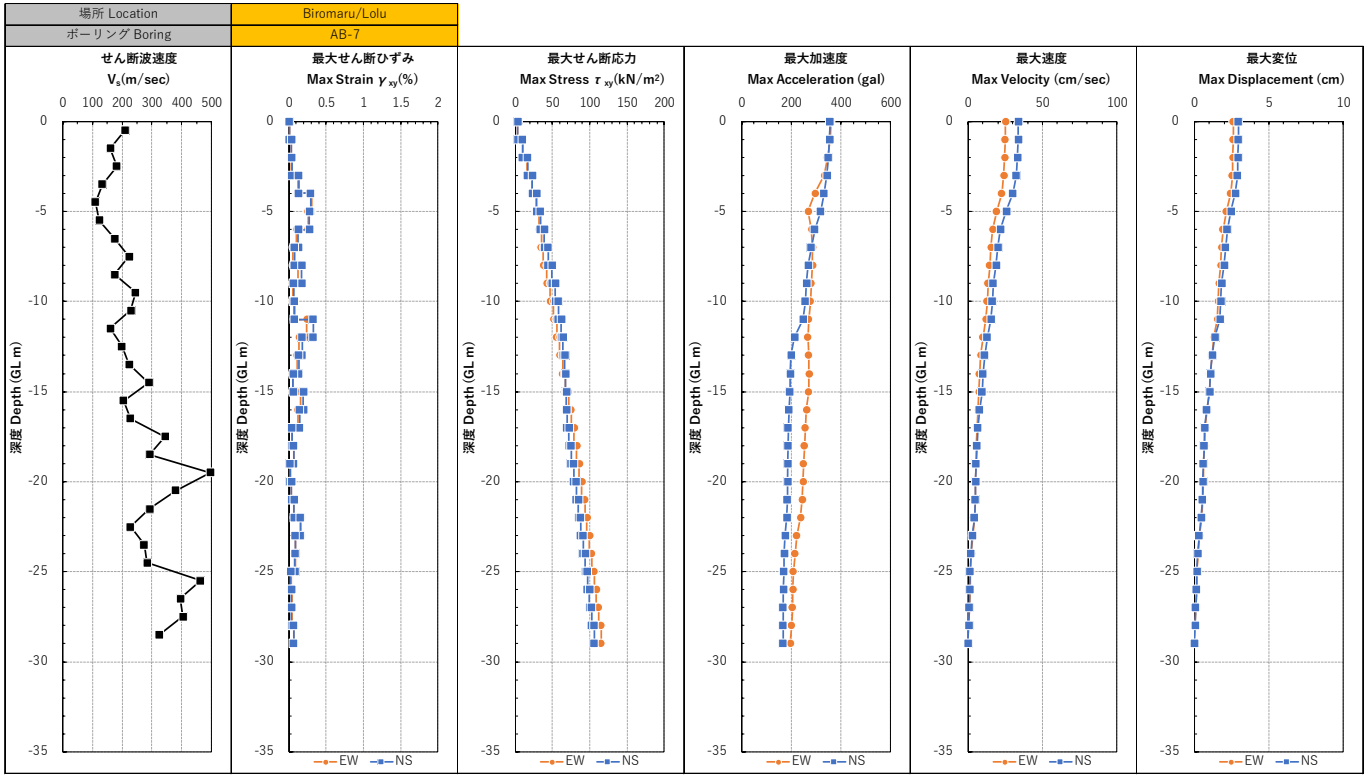


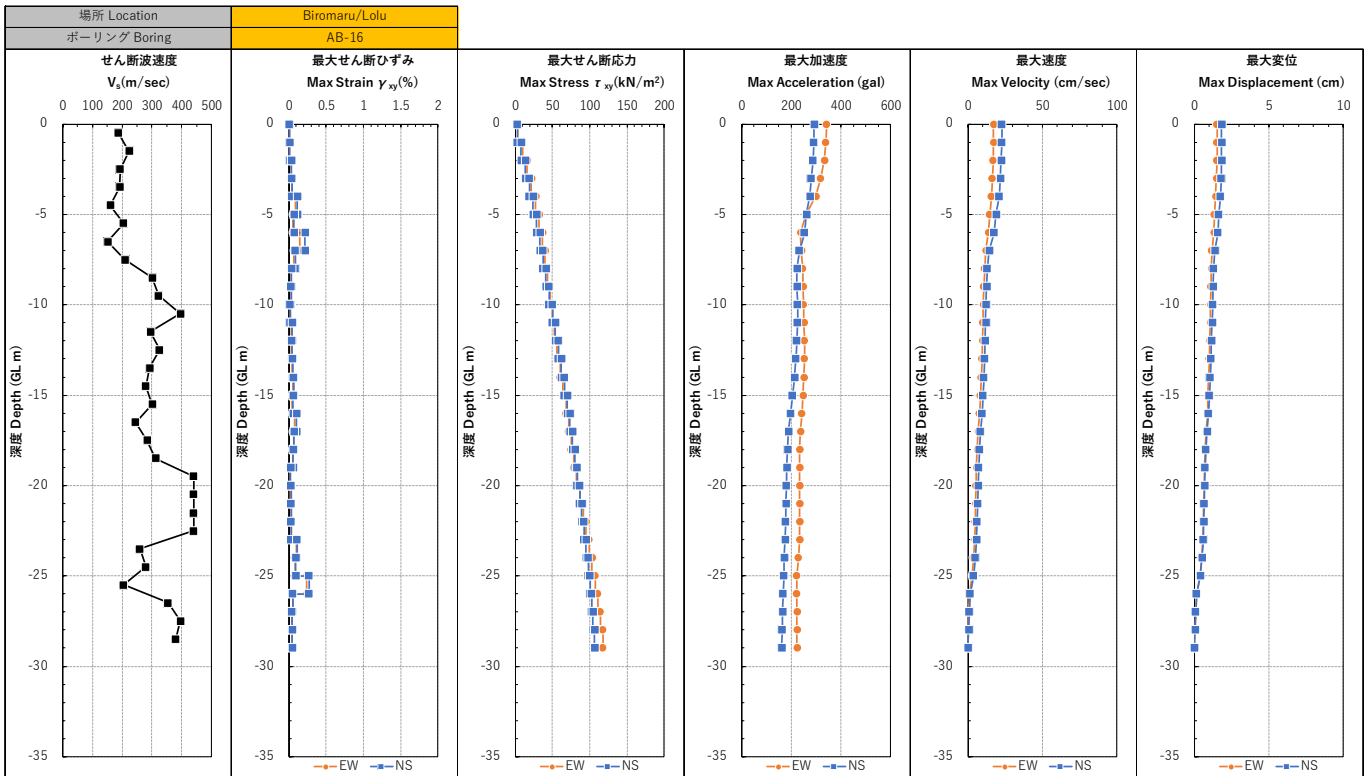
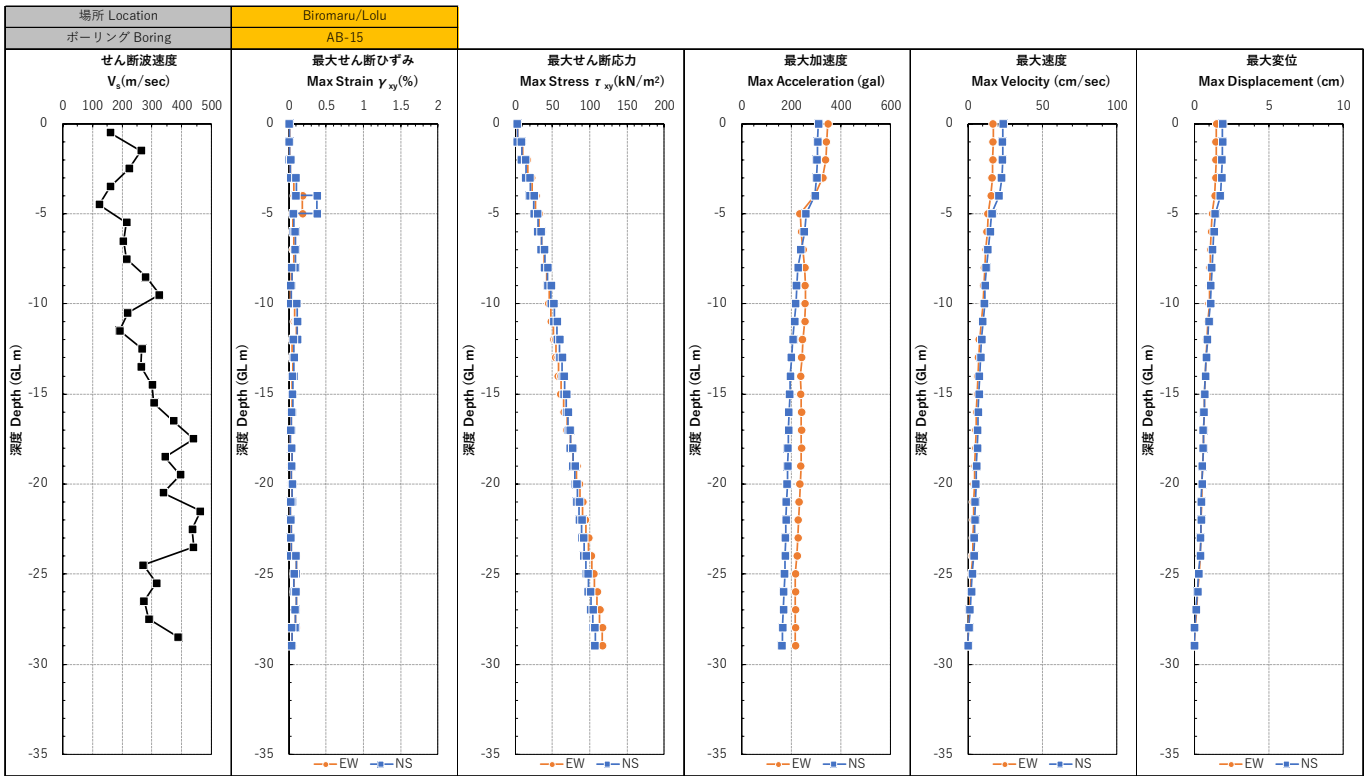




④ Biromaru/Lolu







#### (4) 優先 19 孔の液状化検討 ( $F_L$ ①法・ $F_L$ ②法・エネルギー法) 結果

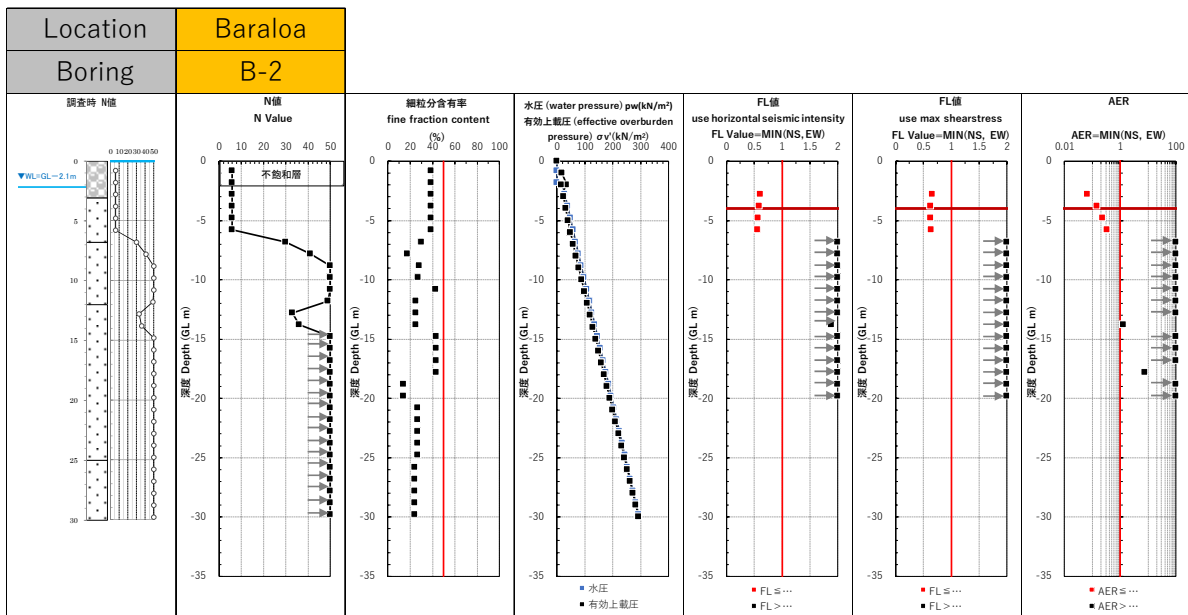
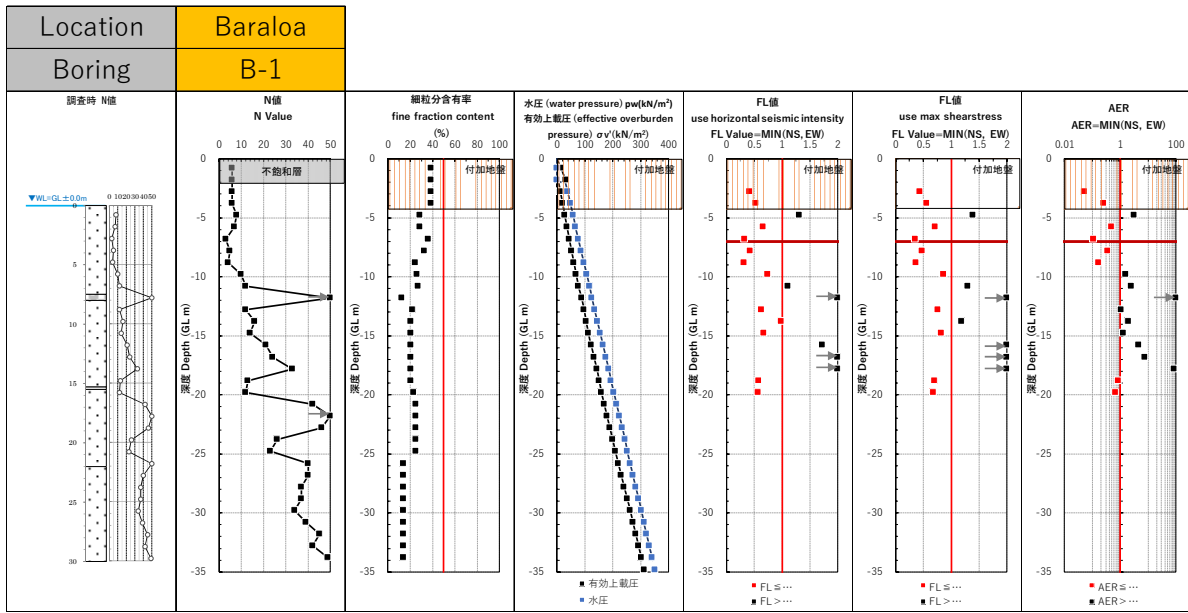
優先 19 孔の液状化評価結果を図 4-48～図 4-57 に示す。計算に用いた土質柱状図・ $N$  値深度分布図・細粒分含有率・間隙水圧分布図・有効上載圧を孔別・地域別に整理し、 $F_L$ ①法・ $F_L$ ②法・エネルギー法の液状化判定結果を示した。 $F_L$ ①法・ $F_L$ ②法・エネルギー法の計算過程は、付録の資料に添付している。

- 細粒分含有率はペネ試料の土質試験結果を表示している。大きな  $N$  値区間では土質試験を省略している場合があり、その場合には近傍の試験結果を使用している。
- 調査時の地下水位は柱状図に併記し、これとは異なる地震前段階の間隙水圧分布図・有効上載圧は後述の浸透流解析を考慮して設定した。地震前の間隙水圧は、人が生活していたことを考慮して表層 2m を不飽和としている（液状化判定から除外）。
- $F_L$ ①法・ $F_L$ ②法・エネルギー法の判定結果は、NS 成分・EW 成分毎に計算を行っているが、このうち小さい判定結果をグラフ表示している。

$F_L$  値 < 1 の場合、エネルギー法による  $AER < 1$  の場合に液状化すると判定される。液状化評価の深度分布図は、地震前の地盤高に復元するために付加した地盤の範囲及びボーリング調査結果から推定される流動化層と不動層の境界位置（すべり層）を併記した。長距離流動を発生させる条件として、流動化層下面に厚く激しい液状化が必要と考えられ、その観点から地震前の状態を復元した付加地盤より下の範囲あるいは想定する流動化層境界よりも下の地盤の液状化が重要と考えられる。

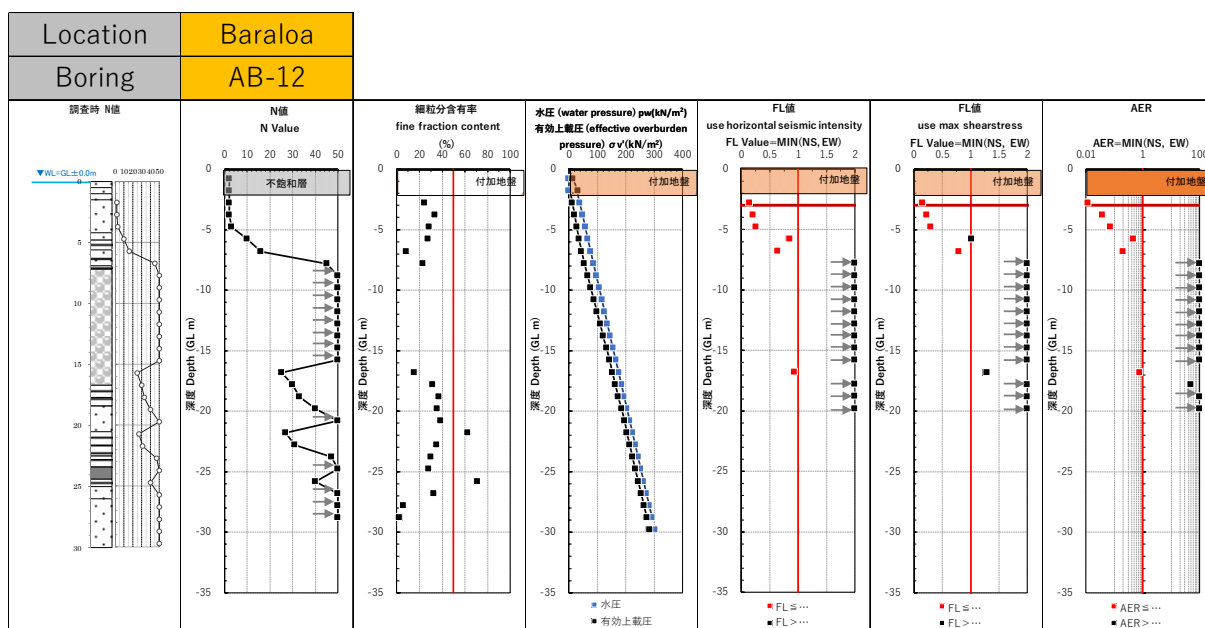
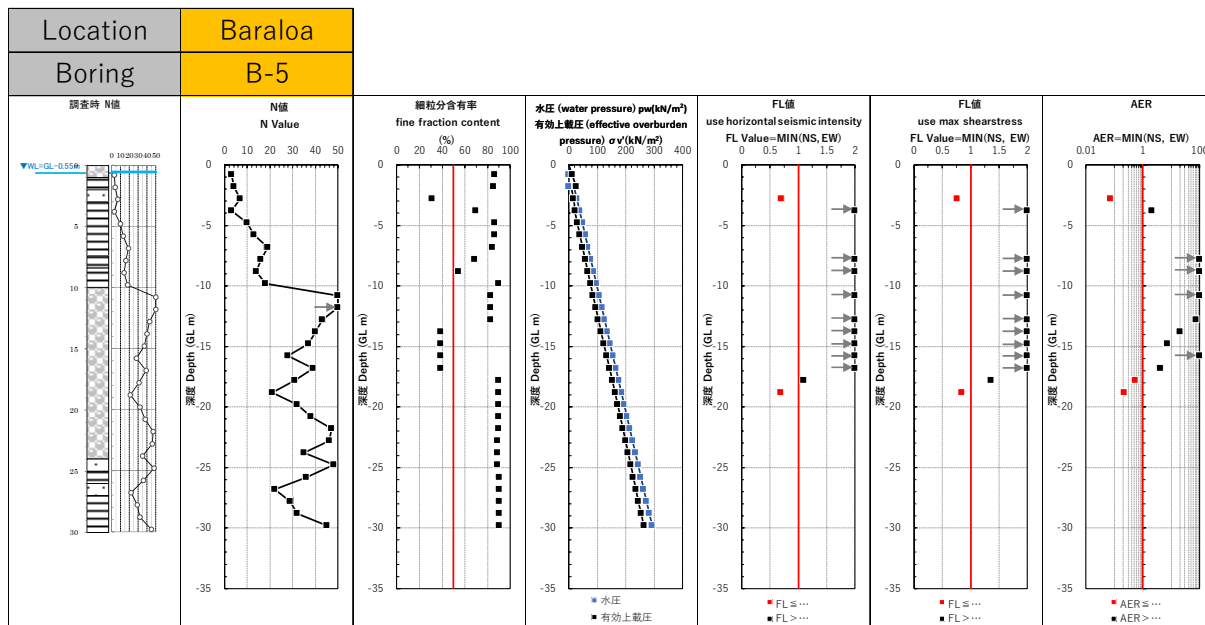


① Baraloo



出典：JICA 調査団作成

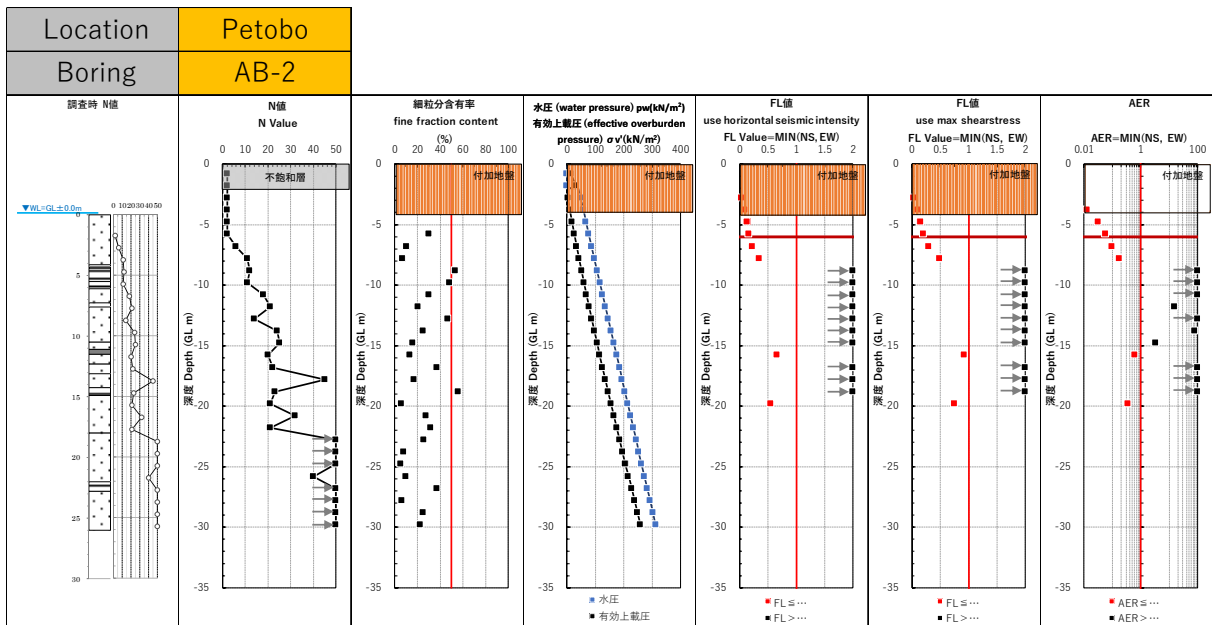
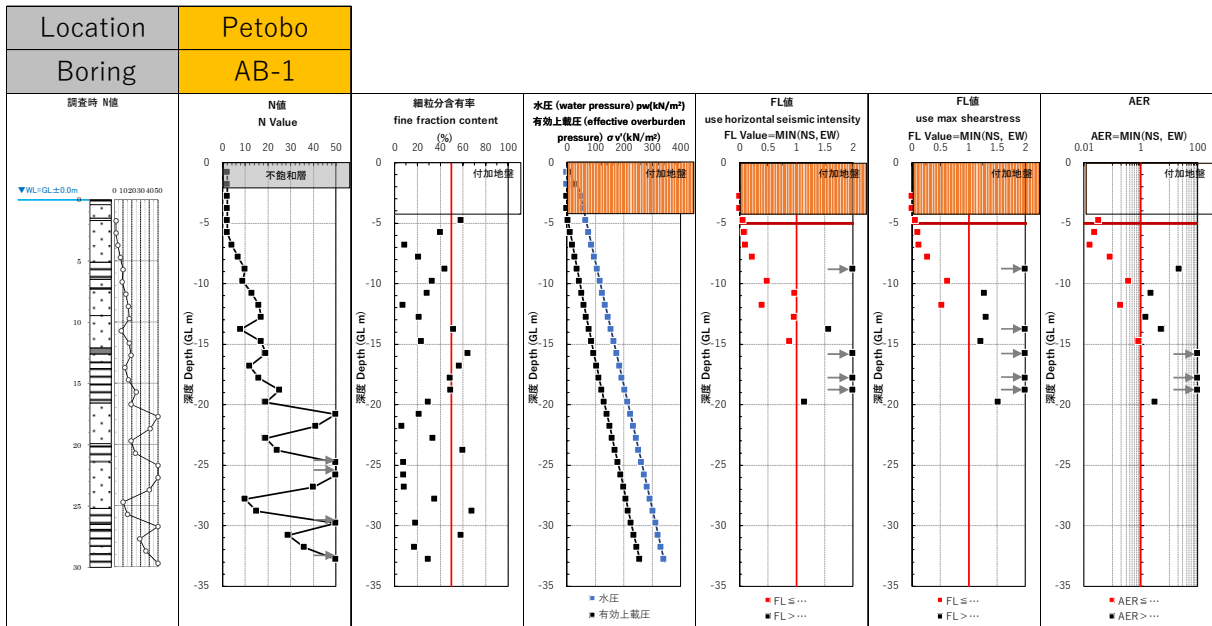
図 4-48 液状化判定結果 (1/10)  
(柱状図・N値・Fs・水圧・有効上載圧・ $f_1$ ①法結果・ $f_1$ ②法結果・エネルギー法結果)



出典：JICA 調査団作成

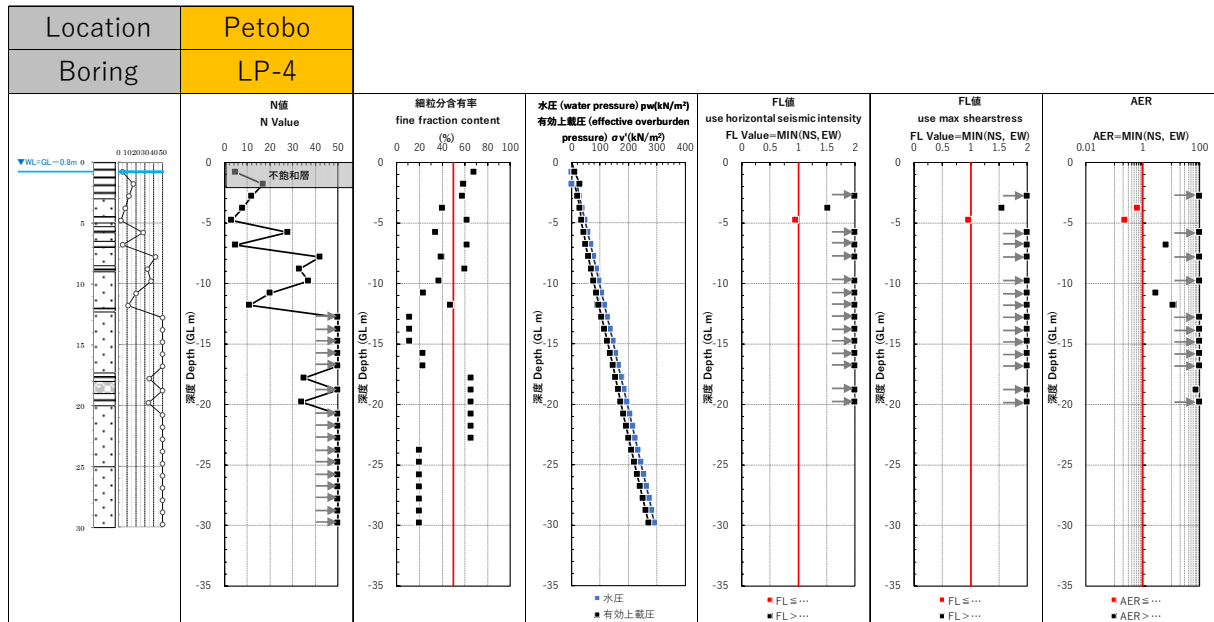
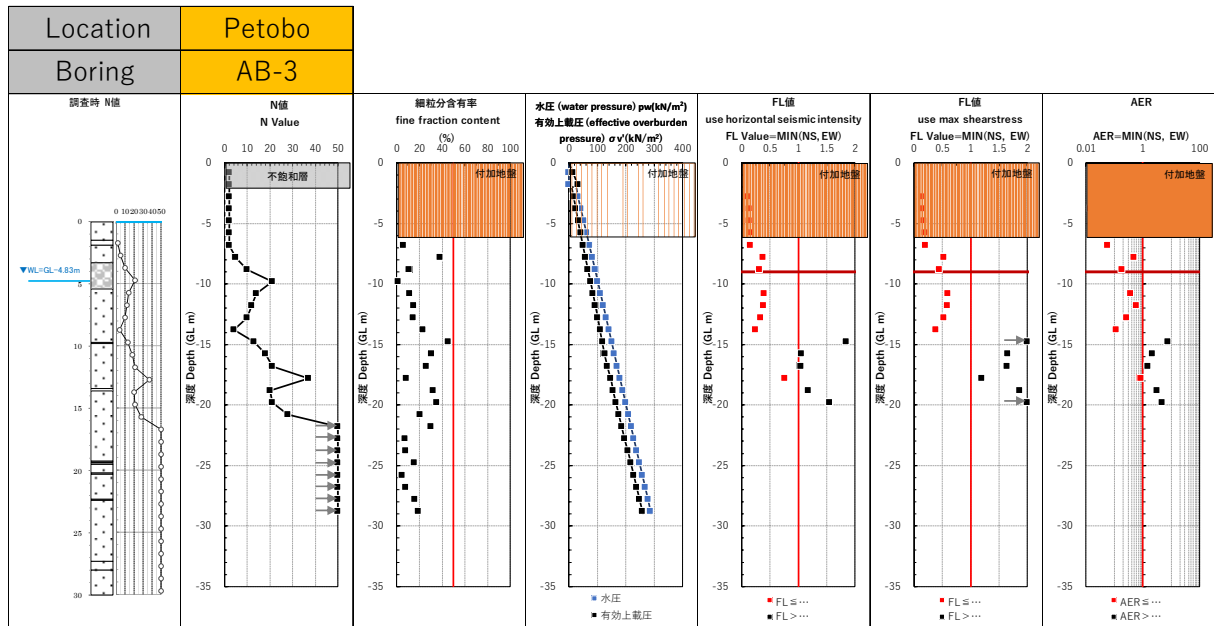
図 4-49 液状化判定結果 (2/10)  
 (柱状図・N値・Fs・水圧・有効上載圧・ $f_1$ ①法結果・ $f_1$ ②法結果・エネルギー法結果)

② Petobo



出典：JICA 調査団作成

図 4-50 液状化判定結果 (3/10)  
(柱状図・N値・ $F_s$ ・水圧・有効上載圧・ $f_1$ ①法結果・ $f_1$ ②法結果・エネルギー法結果)

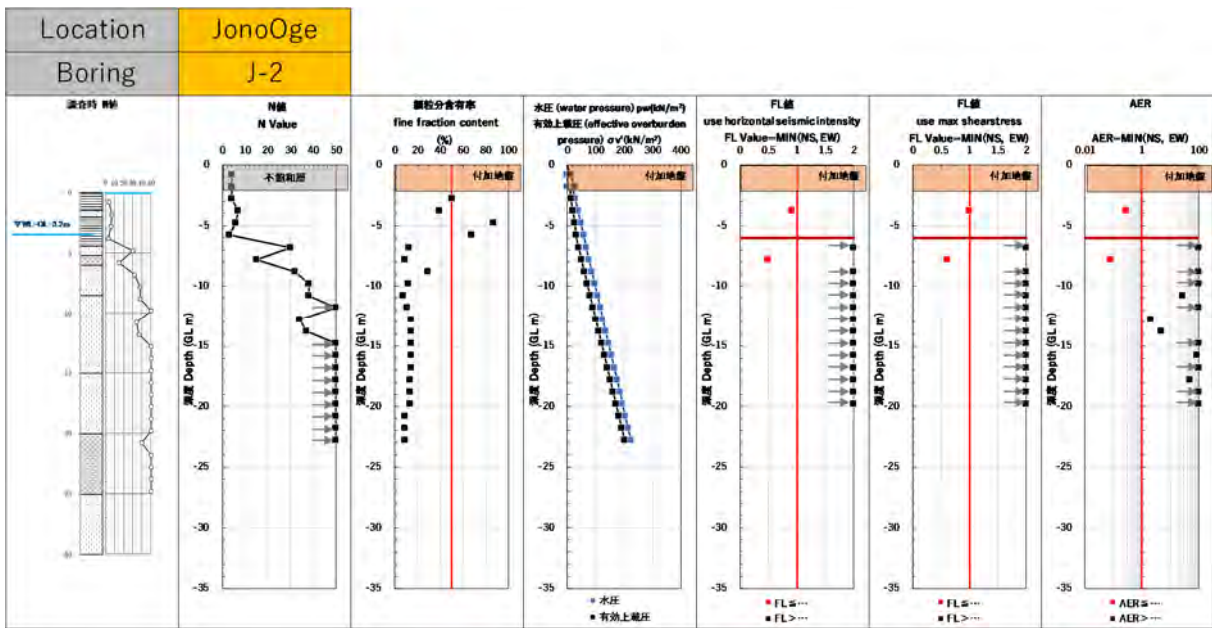
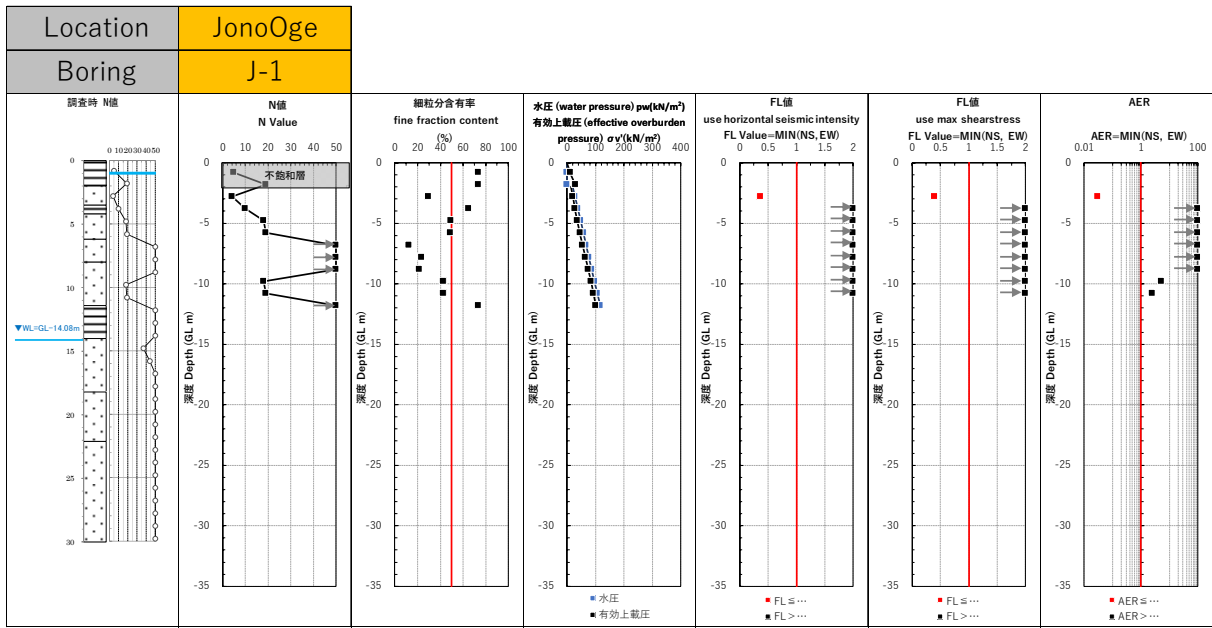


出典：JICA 調査団作成

図 4-51 液状化判定結果 (4/10)  
 (柱状図・N値・ $f_s$ ・水圧・有効上載圧・ $f_l$ ①法結果・ $f_l$ ②法結果・エネルギー法結果)

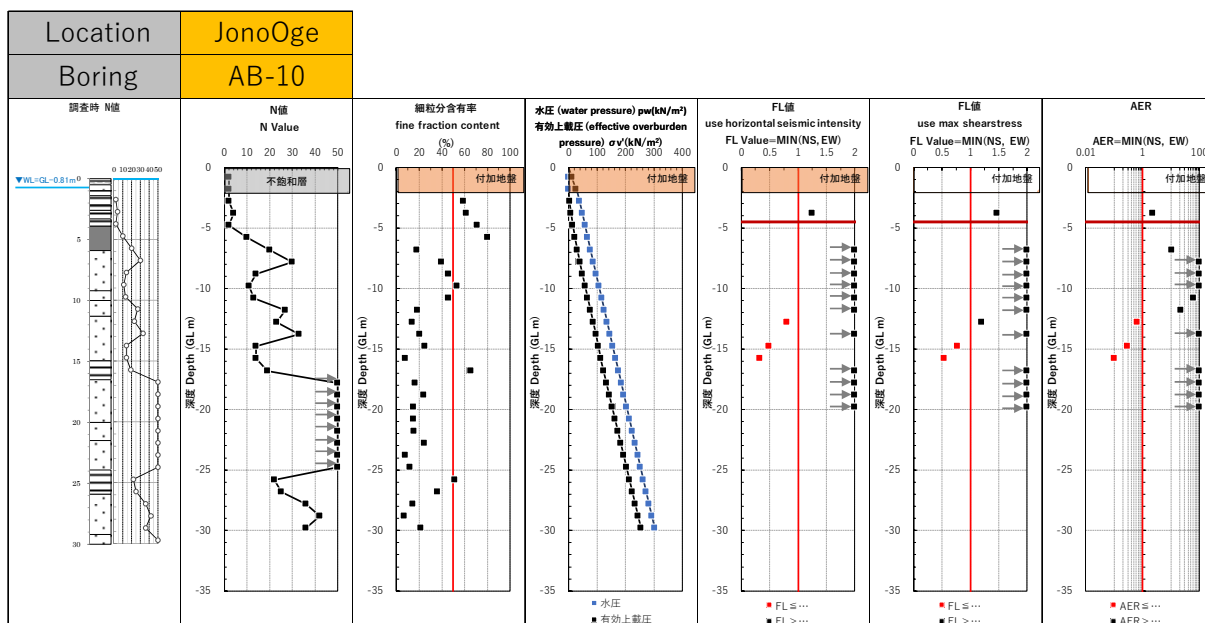
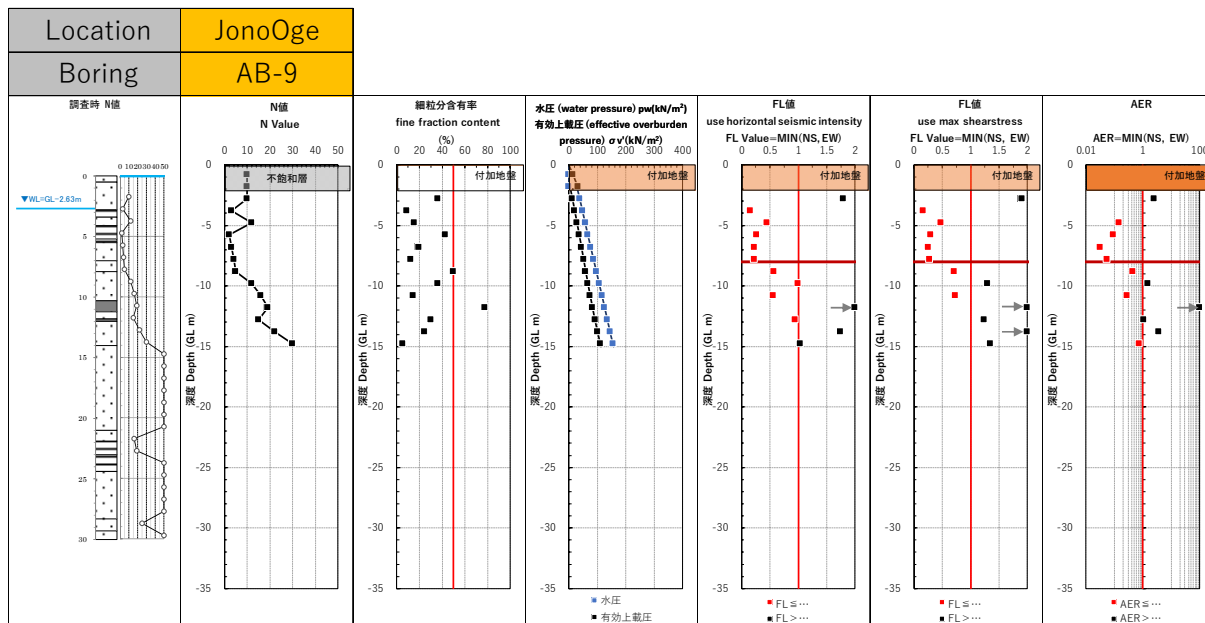


③ Jono Oge



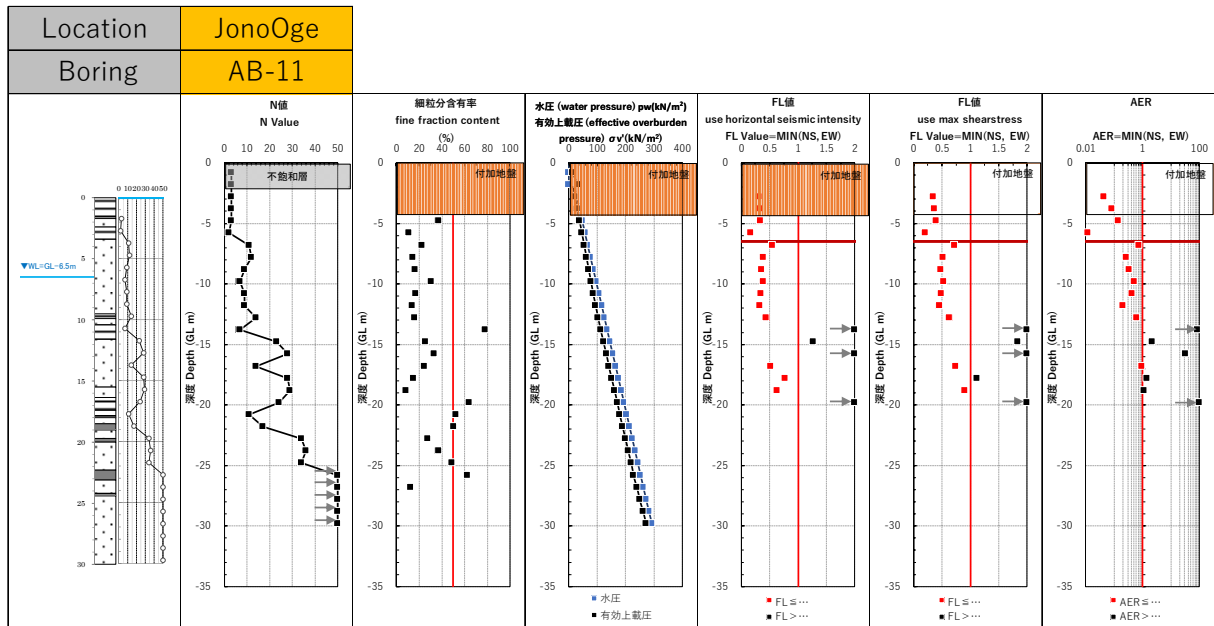
出典：JICA 調査団作成

図 4-52 液状化判定結果 (5/10)  
 (柱状図・N値・Fs・水圧・有効上載圧・FL①法結果・FL②法結果・エネルギー法結果)



出典：JICA 調査団作成

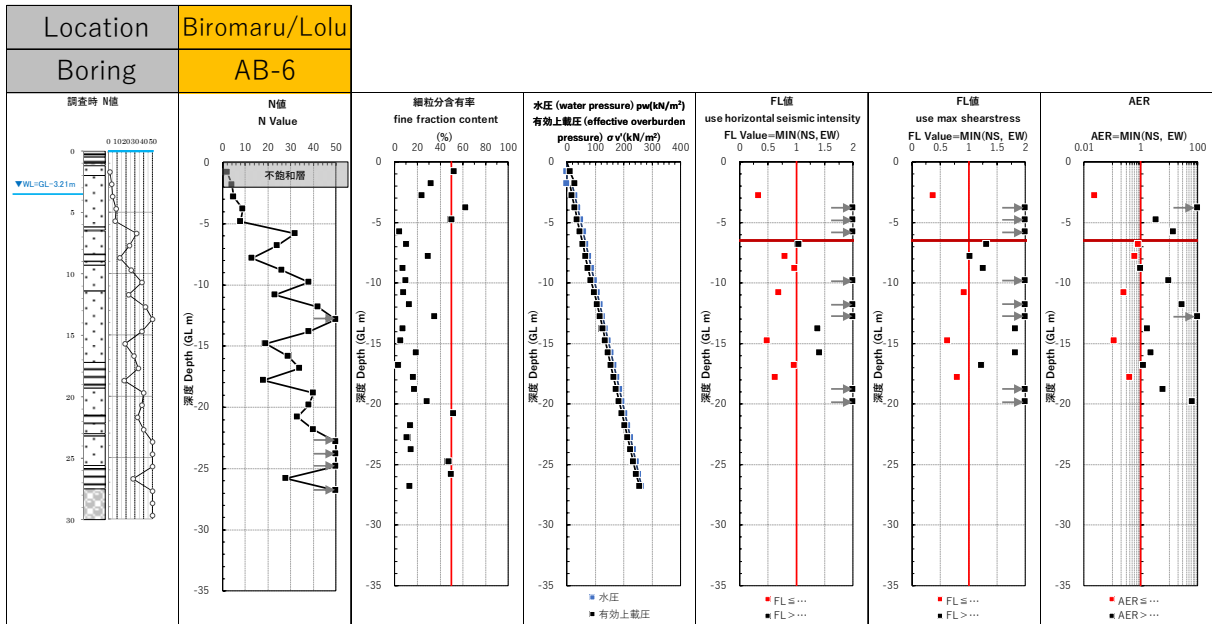
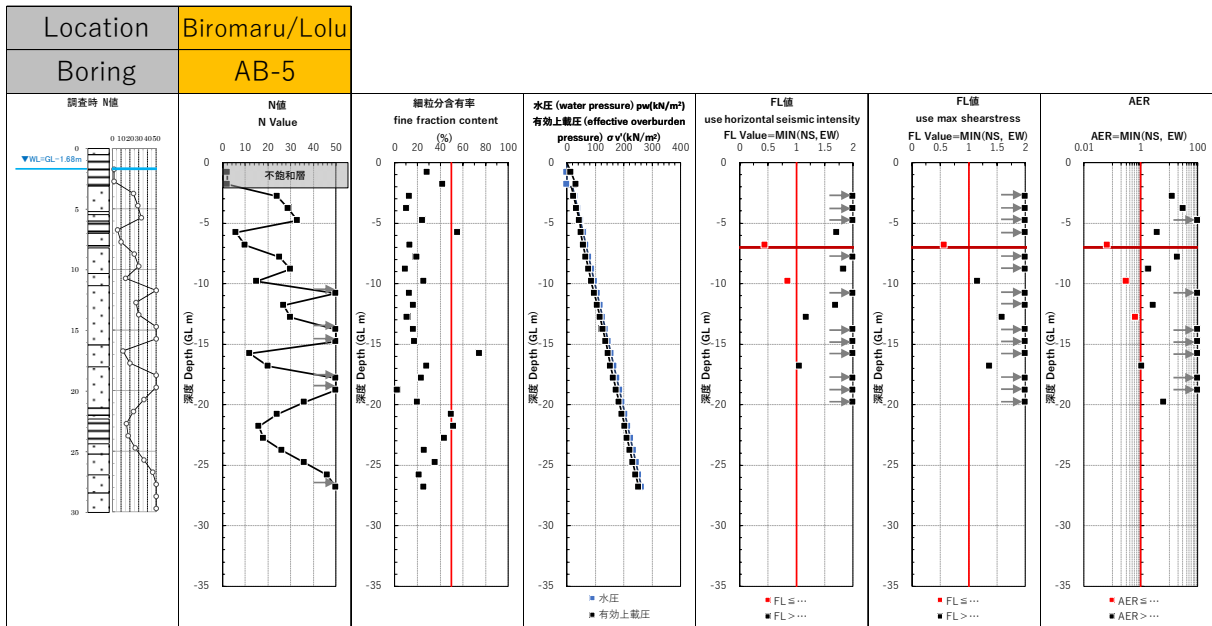
図 4-53 液状化判定結果 (6/10)  
(柱状図・N値・ $F_s$ ・水圧・有効上載圧・ $f_1$ ①法結果・ $f_2$ ②法結果・エネルギー法結果)



出典：JICA 調査団作成

図 4-54 液状化判定結果 (7/10)  
 (柱状図・ $N$ 値・ $F_s$ ・水圧・有効上載圧・ $f_l$ ①法結果・ $f_l$ ②法結果・エネルギー法結果)

④ Biromaru/Lolu

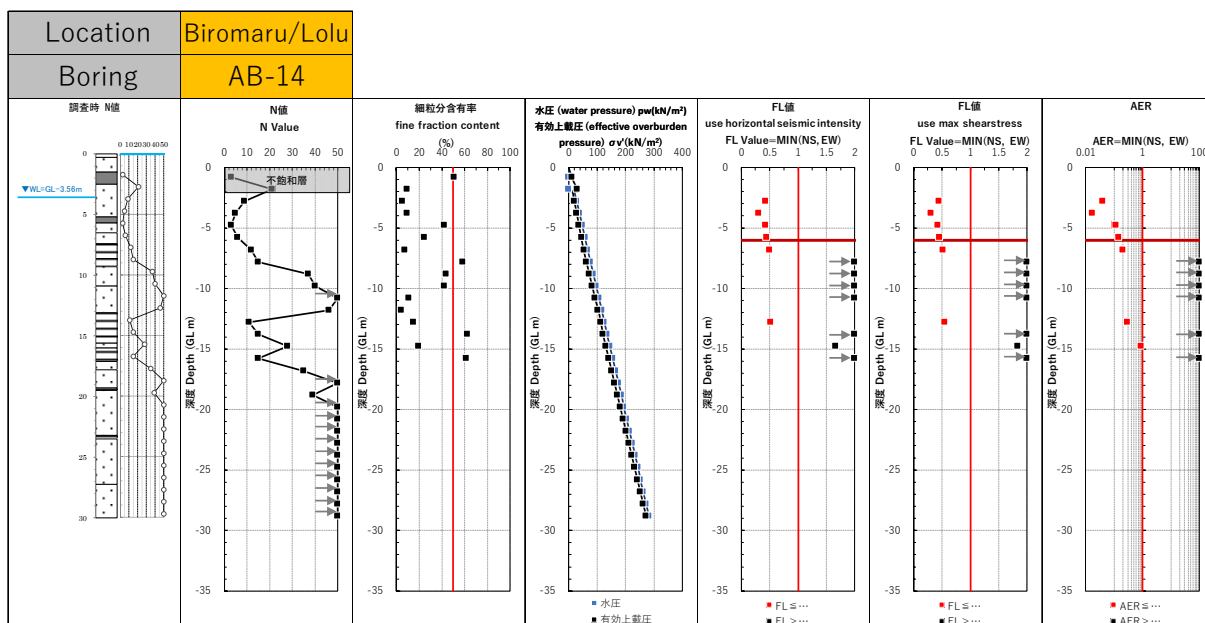
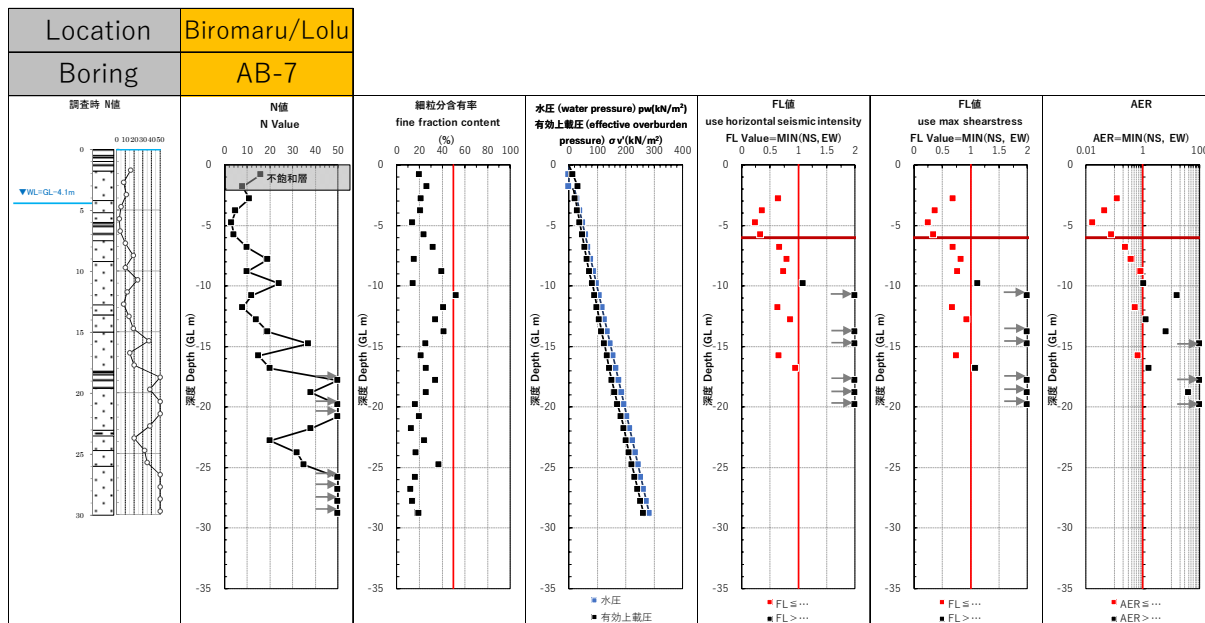


出典：JICA 調査団作成

図 4-55 液状化判定結果 (8/10)

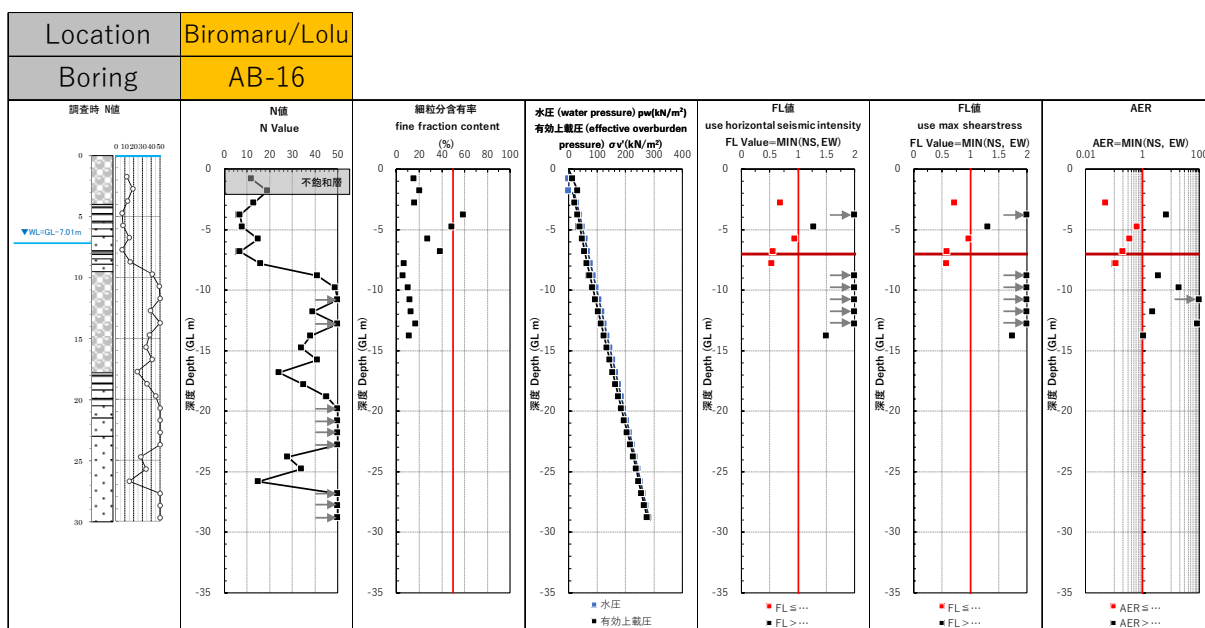
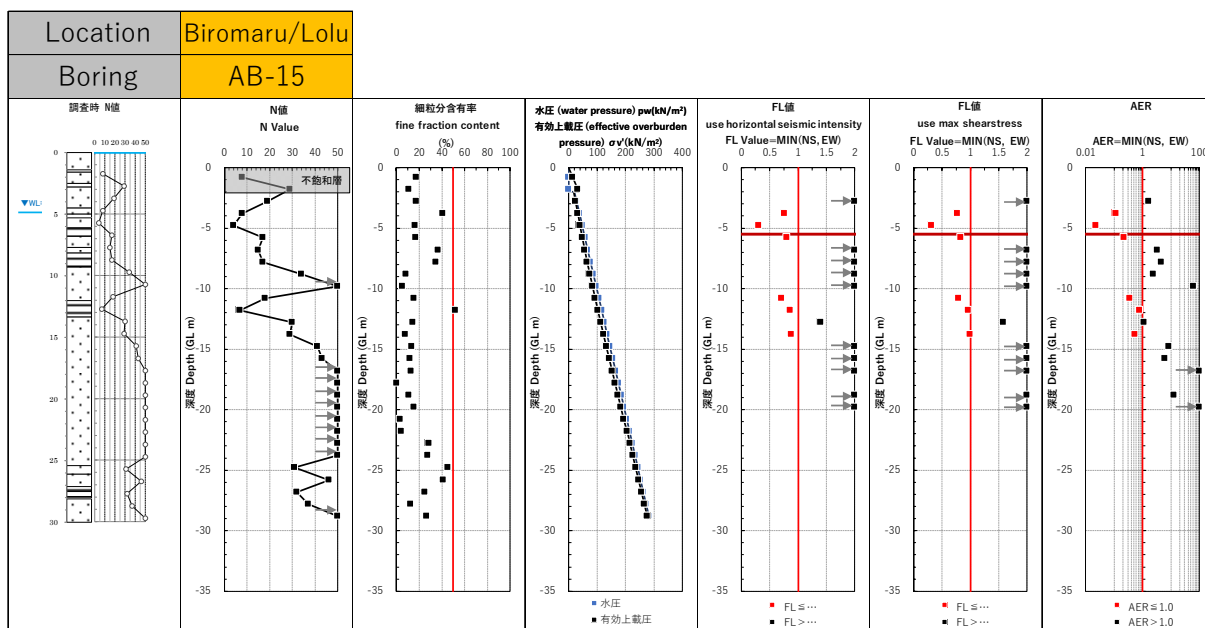
(柱状図・N値・Fs・水圧・有効上載圧・ $f_1$ ①法結果・ $f_2$ ②法結果・エネルギー法結果)





出典：JICA 調査団作成

図 4-56 液状化判定結果 (9/10)  
 (柱状図・N値・Fs・水圧・有効上載圧・ $f_1$ ①法結果・ $f_1$ ②法結果・エネルギー法結果)



出典：JICA 調査団作成

図 4-57 液状化判定結果(10/10)  
(柱状図・N値・Fs・水圧・有効上載圧・ $f_1$ 法結果・ $f_2$ 法結果・エネルギー法結果)

(5) 優先 19 孔の検討結果(PL 値)

表 4-11 に  $F_L$ ①法および  $F_L$ ②法による液状化検討結果から算出した  $P_L$  値を示す。 $P_L$  値は、付加地盤の評価を除外して評価しており、最大水平加速度を観測波形 (EW および NS) の 2 ケース与えているため、延べ 4 ケースの計算を行った。 $P_L$  値は 4 ケースでわずかな違いはあるが、比較的まとまった値を示す。

表 4-11 優先 19 孔の液状化指数  $P_L$  値の評価結果

| 位置       | ボーリング名 | 付加する層厚   |          | 地震時の地下水位 (GL-m) | 地盤応答解析        |                |                |        | 地盤流動規模     |         | PL値 (FL①法) ×1 |      | PL値 (FL②法) ×2 |      |
|----------|--------|----------|----------|-----------------|---------------|----------------|----------------|--------|------------|---------|---------------|------|---------------|------|
|          |        | 地表面標高の変化 |          |                 | 通常の被圧状態 (L評価) | 水平震度 (EW)SHAKE | 水平震度 (NS)SHAKE | 地盤種別   | 地盤の固有周期 TG | 大規模流動の中 | 水平移動 (m)      | EW   | NS            | EW   |
| Balarooa | B-1    | 4.00m    | N=6 砂質土  | -1.00m          | 0.42          | 0.44           | Ⅲ種地盤           | 0.6587 | 内 (頸部)     | > 200   | 17.1          | 18.1 | 13.9          | 15.3 |
|          | B-2    | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.39          | 0.34           | Ⅱ種地盤           | 0.4473 | 外          | 2m以下    | 14.2          | 11.6 | 12.4          | 10.2 |
|          | B-5    | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.38          | 0.30           | Ⅱ種地盤           | 0.4546 | 外          | 2m以下    | 4.5           | 3.2  | 4.0           | 2.8  |
|          | AB-12  | 2.00m    | N=2 砂質土  | -1.00m          | 0.38          | 0.41           | Ⅱ種地盤           | 0.5017 | 内          | > 200   | 19.5          | 20.3 | 17.9          | 18.6 |
| Petobo   | LP-4   | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.36          | 0.31           | Ⅱ種地盤           | 0.4282 | 外          | 20m     | 0.3           | 0.0  | 0.3           | 0.0  |
|          | AB-1   | 4.00m    | N=2 砂質土  | -2.00m          | 0.44          | 0.48           | Ⅲ種地盤           | 0.6709 | 内 (頸部)     | > 200   | 28.8          | 29.9 | 26.5          | 27.5 |
|          | AB-2   | 5.00m    | N=2 砂質土  | -2.00m          | 0.43          | 0.47           | Ⅲ種地盤           | 0.6372 | 内          | > 200   | 15.2          | 15.8 | 13.0          | 13.5 |
|          | AB-3   | 6.00m    | N=2 砂質土  | -0.50m          | 0.45          | 0.52           | Ⅲ種地盤           | 0.6675 | 内          | 50m     | 30.2          | 23.5 | 27.6          | 18.3 |
| JonoOge  | J-1    | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.38          | 0.26           | Ⅱ種地盤           | 0.2002 | 外          | 2m以下    | 5.4           | 3.9  | 5.2           | 3.7  |
|          | J-2    | 2.00m    | N=4 粘性土  | 0.00m           | 0.40          | 0.36           | Ⅱ種地盤           | 0.3767 | 内          | > 200   | 3.8           | 2.8  | 2.4           | 2.2  |
|          | AB-9   | 2.00m    | N=10 砂質土 | -1.00m          | 0.34          | 0.40           | Ⅱ種地盤           | 0.3682 | 内          | > 200   | 27.8          | 30.7 | 26.1          | 27.8 |
|          | AB-10  | 2.00m    | N=2 粘性土  | -1.00m          | 0.43          | 0.40           | Ⅱ種地盤           | 0.5125 | 内          | > 200   | 3.5           | 3.1  | 1.0           | 1.5  |
|          | AB-11  | 4.00m    | N=3 砂質土  | 0.00m           | 0.45          | 0.49           | Ⅲ種地盤           | 0.6304 | 内 (頸部)     | 30m     | 31.7          | 33.5 | 26.0          | 26.5 |
| Biomaru  | AB-5   | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.41          | 0.31           | Ⅱ種地盤           | 0.4683 | 外          | 30m     | 4.1           | 2.5  | 2.6           | 2.3  |
|          | AB-6   | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.40          | 0.30           | Ⅱ種地盤           | 0.4504 | 外          | 20m     | 9.2           | 5.6  | 6.1           | 5.3  |
| Lolu     | AB-7   | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.37          | 0.36           | Ⅱ種地盤           | 0.5213 | 内          | 125m    | 24.0          | 23.2 | 20.0          | 22.5 |
|          | AB-14  | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.35          | 0.35           | Ⅱ種地盤           | 0.4697 | 内          | 130m    | 22.3          | 22.3 | 21.0          | 21.7 |
|          | AB-15  | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.35          | 0.31           | Ⅱ種地盤           | 0.4415 | 内          | 30m     | 10.0          | 7.2  | 8.3           | 7.5  |
|          | AB-16  | 0.00m    | —        | 0.00m           | 0.35          | 0.30           | Ⅱ種地盤           | 0.4346 | 内          | 10m     | 8.2           | 5.8  | 7.3           | 5.6  |

出典：JICA 調査団作成

$P_L$  値による液状化危険度判定区分 (岩崎ほか(1980)に加筆)

|                | PL=0                         | 0<PL≤5                            | 5<PL≤15  | PL>15                            |
|----------------|------------------------------|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| PL値による液状化危険度判定 | 液状化危険度は極めて低い。液状化に関する詳細な調査は不要 | 液状化危険度は低い。特に重要な構造物に対して、より詳細な調査が必要 | 液状化危険度がやや高い。重要な構造物に対してはより詳細な調査が必要。液状化対策が一般には必要 | 液状化危険度が高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避 |

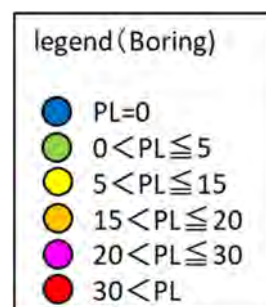
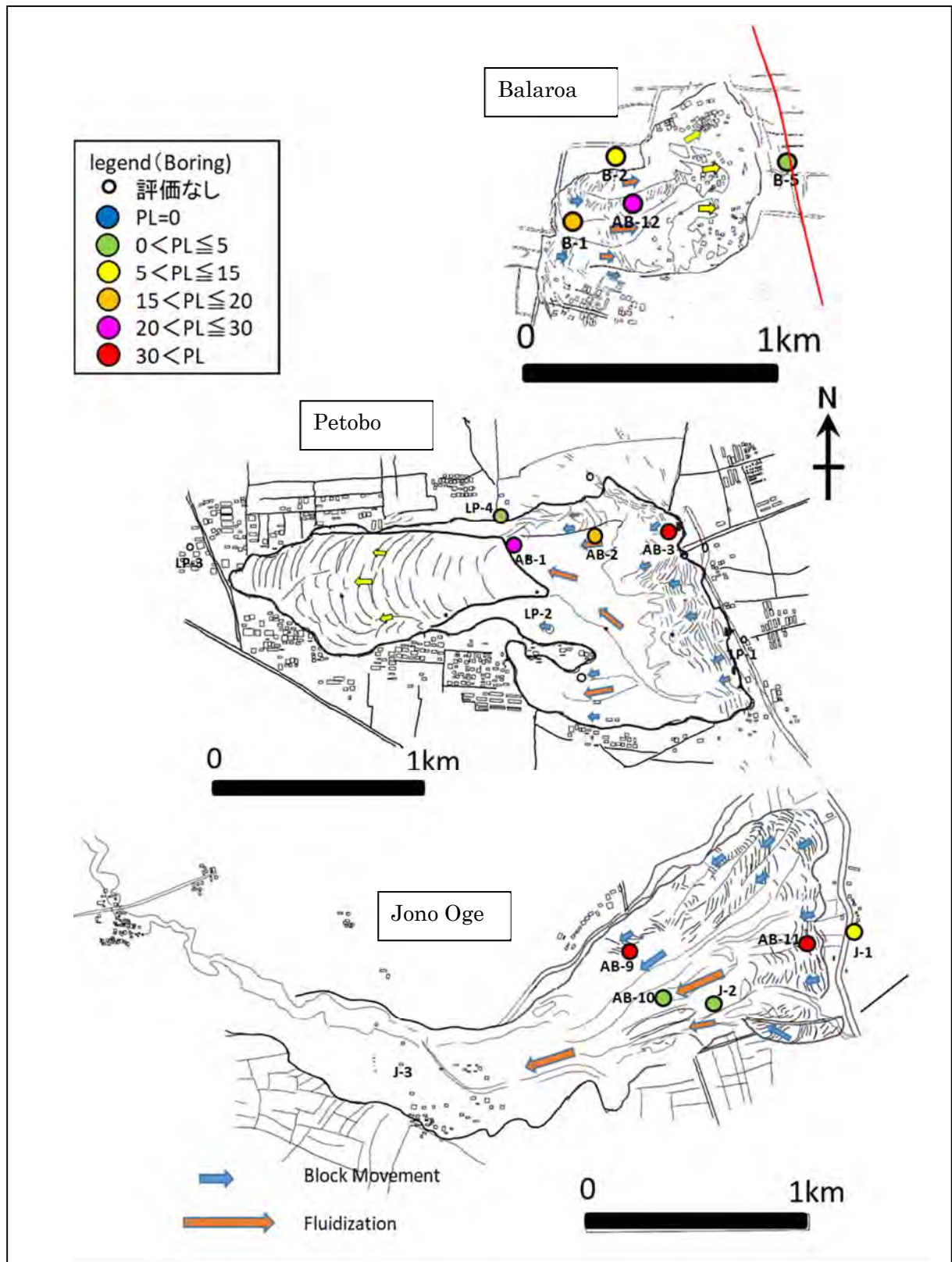


図 4-58 および図 4-59 に  $P_L$  値の判定結果を平面図で示す。平面図に表示した  $P_L$  値は  $F_L$ ①法・ $F_L$ ②法 (NS 成分・EW 成分) の中で最大値を採用。図を見ると全般に Nalodo 内部であれば  $P_L$  値が大きく、外側では小さい傾向が確認出来る。Balarooa 内部の B-1 および B-12 は  $P_L > 15$ 、外部の B-2・B-5 は  $P_L < 15$ 。Petobo 内部の AB-1・AB-2・AB-3 は  $P_L > 15$ 、内部であるが南端で地表面標高にほとんど変化の無かった LP-4 は  $P_L < 15$  である。Jono Oge 内部の AB-9 および AB-11 は  $P_L > 15$ 、内部であるが浅層地盤が細粒土と判定された J-2 および AB-10 は  $P_L = 2 \sim 4$  である。Biomaru および Lolu では、流動距離の大きな場所で  $P_L$  値が大きく、流動距離の小さい場所では  $P_L$  値は小さい。Nalodo 内部では J-2・AB-10 を除くと全て大きい  $P_L$  値で流動距離が大きい。Nalodo 内部にも関わらず  $P_L$  値が小さい J-2・AB-10 は、浅層地盤が細粒土から構成されること、流動層の厚さが薄い (地盤高にほとんど変化がない) 地域であることに特徴がある。

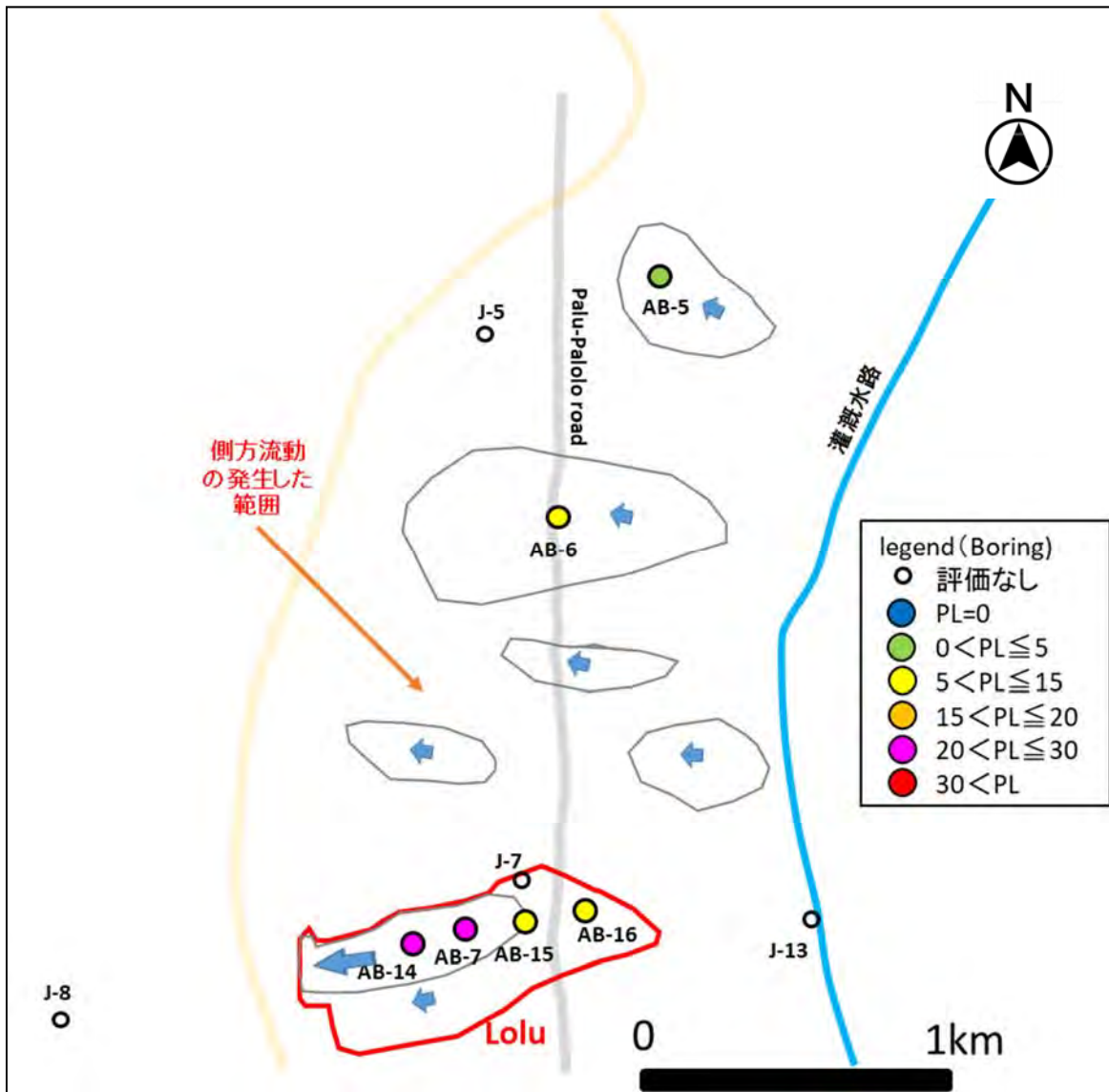
なお、この液状化判定を行うにあたっては、下記の点に留意しておくことが必要である。

- ① 地盤調査は地震後に行われたものであり、長距離流動の発生や地下水の噴き上げにより表層付近が乱されるなど地震前と違っている可能性があること、
- ② 流動して無くなった層は付加地盤として  $N$  値や  $F_c$  を想定して設定しているが、付加地盤区間は  $P_L$  値計算の加算から除外していること、
- ③ 地下水位も仮定して設定していること。



出典：JICA 調査団作成

図 4-58 優先 19 孔の凡判定結果 (Balaroa・Petobo・Jono Oge)



出典：JICA 調査団作成

図 4-59 優先 19 孔の  $R$  判定結果 (Biromaru・Lolu)

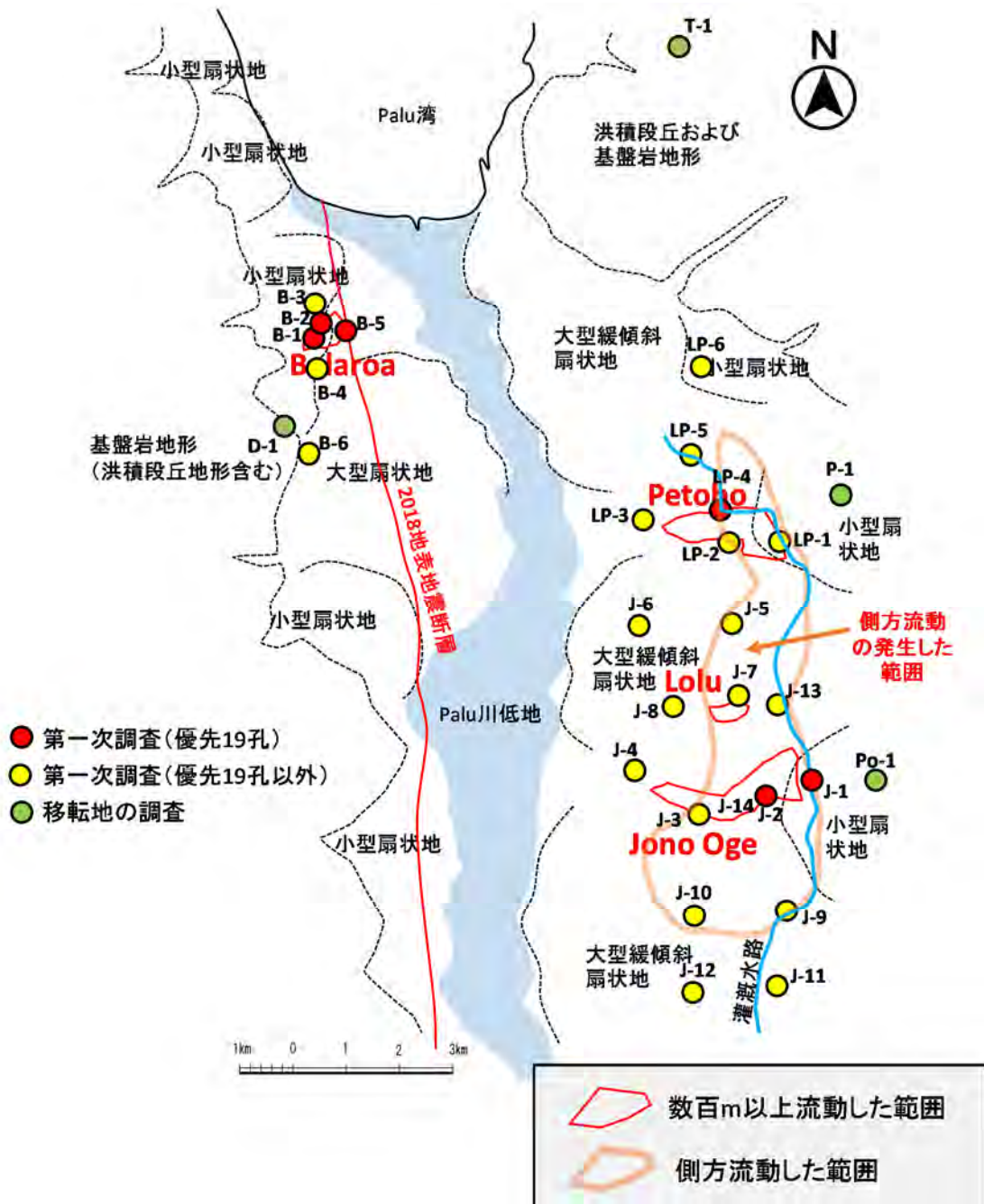


### 4-2-3 被災の少ない平地主体エリア（残り 21 孔）の液状化評価結果

#### (1) 検討位置

図 4-60 に一次調査の中で優先 19 孔に含まれなかった残り 21 孔の位置図を示す。二次調査で行ったボーリング調査は地震計設置箇所の AB-13 を除いて、全て優先 19 孔の検討対象である事から、残り 21 孔は、全て一次調査のボーリングである。

この残り 21 孔の液状化検討は、*N* 値が全般に大きな結果が得られており、前記したように地盤応答解析は行わずに水平震度を 0.4（優先 19 孔の平均値程度）として検討している。



出典：JICA 調査団作成

図 4-60 第一次調査（残り 21 孔の検討対象孔）位置図

## (2) 検討条件

液状化検討 ( $F_L$ ③法) は、前述したとおり道路橋示方書に示される簡易式を採用することを基本とし、地表面における最大水平震度 0.4 とした。地下水位は地震前の想定水位を与え、地盤高の変化は考慮していない (流動範囲に含まれないため流出地盤はない)。

## (3) 検討結果の整理

$F_L$  値および  $P_L$  値の算出事例を図 4-61 (LP-2 孔) および図 4-62 (J-3 孔) に示す。LP-2 孔および J-3 孔は Nalodo 内部であるにも関わらず、優先 19 孔に選ばなかった調査孔である。LP-2 孔は深さ 10m まで 1 区間を除いて細粒分が 35% を超え (ただし塑性指数  $I_p$  は 15 以下)、 $F_L$  計算の対象ではあるが、細粒分含有率による  $N$  値の補正係数の影響で  $F_L$  値  $>1$  と算出される。J-3 は、砂質土が主体に分布するが  $N$  値が大きく  $F_L >1$  と計算される。LP-2 は Petobo の南端境界付近に位置し、中央の流動範囲から外れている。流動距離は数 10m 以下とみられる。J-3 は Jono Oge の南西端付近の堆積域に該当する場所で周辺の家屋は土砂流に覆われたが移動は認められない地域である。

表 4-12 および図 4-63 に、優先 19 孔と残り 21 孔の  $P_L$  値計算結果を示す。 $F_L$ ③法では、優先 19 孔についても簡易に計算しているが、 $P_L$  値は優先 19 孔の結果を採用し、残り 21 孔について  $F_L$ ③法の結果を採用した。Nalodo の発生範囲は地盤変状の認められなかった大型の緩傾斜扇状地の調査孔に比べて、高い液状化指数 ( $P_L$ ) を示す。なお、LP-2 孔・J-3 孔以外に Nalodo 内部の調査であるにも関わらず液状化の程度が弱い ( $P_L$  値  $<5$ ) 場所は J-2 孔・AB-10 が該当している。この 2 孔は LP-2 と同様に浅層地盤は細粒土が主体となること、地盤高の変化がほとんど発生していないことに共通点がある。

| No.                  | 1      | Name           | LP-2             | Location           | Petobo            | LN <sub>G</sub> | 0824472 m E | LAT <sub>r</sub>                         | 9895841 m S     | Standard Depth for "sv" |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
|----------------------|--------|----------------|------------------|--------------------|-------------------|-----------------|-------------|--|-----------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------|-----------------------|----------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-----------------|
| Height of Hole Mouth | 57.10m | Total Advance  | 32.00m           | Ground Water Level | 0.50m             | Ground Height   | 57.10m      | Lateral Seismic Factor of Ground Surface | 0.400           | Type of Seismic Motion  | Type2                       | Standard Depth for "sv"          | 0.00m          |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| Depth                | 0      | Drilling Log   | 0 10 20 30 40 50 | Unit Weight        | kN/m <sup>3</sup> | N Value         |             | Type of Soil                             |                 | Physical Test           |                             | Failure Calculate N <sub>v</sub> |                | Liquefaction Judgment |                | Value for Calculate I <sub>s</sub> |                             | P <sub>L</sub>              | 3.54           |       |                |       |                |                 |
| 0                    | 1.10   | Landslide Dep. | 15.5             | 3                  | N                 | Type            | FC          | I <sub>p</sub>                           | D <sub>50</sub> | σ <sub>v</sub>          | σ <sub>v</sub> <sup>1</sup> | N <sub>1</sub>                   | N <sub>a</sub> | R <sub>L</sub>        | c <sub>w</sub> | R                                  | σ <sub>v</sub> <sup>1</sup> | σ <sub>v</sub> <sup>1</sup> | r <sub>d</sub> | L     | F <sub>L</sub> | W     | F <sub>L</sub> | ΔP <sub>L</sub> |
| 5                    | 3.60   | Sandy Silt     | 17.5             | 5                  | Sandy Soil        | 53.8            | 8.7         | 0.058                                    | 29.3            | 16.3                    | 5.9                         | 23.9                             | 0.380          | 1.923                 | 0.730          | 29.3                               | 16.3                        | 0.973                       | 0.700          | 1.043 | 9.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 4.50   | Silty Sand     | 19.5             | 4                  | Sandy Soil        | 43.9            | 7.0         | 0.088                                    | 64.7            | 31.7                    | 6.7                         | 18.8                             | 0.295          | 1.644                 | 0.485          | 64.7                               | 31.7                        | 0.943                       | 0.770          | 0.630 | 8.10           | 0.630 | 2.998          |                 |
| 10                   | 6.00   | Sandy Silt     | 17.5             | 5                  | Sandy Soil        | 58.2            | 11.7        | 0.055                                    | 101.1           | 48.1                    | 7.2                         | 31.5                             | 1.007          | 2.000                 | 2.014          | 101.1                              | 48.1                        | 0.913                       | 0.768          | 2.624 | 7.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 10                   | 7.20   | Sandy Silt     | 17.5             | 3                  | Sandy Soil        | 70.6            | 10.2        | 0.042                                    | 118.6           | 55.6                    | 4.1                         | 27.3                             | 0.533          | 2.000                 | 1.065          | 118.6                              | 55.6                        | 0.898                       | 0.766          | 1.390 | 6.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 4                  | Sandy Soil        | 79.5            | 9.1         | 0.037                                    | 136.1           | 63.1                    | 5.1                         | 37.6                             | 2.844          | 2.000                 | 5.689          | 136.1                              | 63.1                        | 0.883                       | 0.762          | 7.467 | 6.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 5                  | Sandy Soil        | 81.5            | 7.9         | 0.031                                    | 153.6           | 70.6                    | 6.0                         | 44.0                             | 7.588          | 2.000                 | 15.18          | 153.6                              | 70.6                        | 0.868                       | 0.755          | 20.09 | 5.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 7                  | Sandy Soil        | 76.3            | 13.4        | 0.017                                    | 171.1           | 78.1                    | 8.0                         | 50.3                             | 17.22          | 2.000                 | 34.44          | 171.1                              | 78.1                        | 0.853                       | 0.747          | 46.07 | 5.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 50                 | Sandy Soil        | 27.9            | NP          | 0.215                                    | 189.4           | 86.4                    | 54.3                        | 88.3                             | 421.90         | 2.000                 | 843.8          | 189.4                              | 86.4                        | 0.838                       | 0.735          | 11.48 | 4.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 48                 | Sandy Soil        | 33.6            | NP          | 0.155                                    | 208.9           | 95.9                    | 49.2                        | 89.8                             | 460.40         | 2.000                 | 920.9          | 208.9                              | 95.9                        | 0.823                       | 0.717          | 12.84 | 4.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 50                 | Sandy Soil        | 228.4           | 105.4       | 48.5                                     | 48.5            | 13.72                   | 2.000                       | 27.43                            | 228.4          | 105.4                 | 0.808          | 0.700                              | 39.17                       | 3.60                        | 1.000          | 0.000 |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 35                 | Sandy Soil        | 247.9           | 114.9       | 32.2                                     | 32.2            | 1.129                   | 2.000                       | 2.258                            | 247.9          | 114.9                 | 0.793          | 0.684                              | 3.299                       | 3.10                        | 1.000          | 0.000 |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 43                 | Sandy Soil        | 267.4           | 124.4       | 37.6                                     | 37.6            | 2.827                   | 2.000                       | 5.655                            | 267.4          | 124.4                 | 0.778          | 0.669                              | 8.453                       | 2.60                        | 1.000          | 0.000 |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 42                 | Sandy Soil        | 286.9           | 133.9       | 35.0                                     | 60.7            | 52.71                   | 2.000                       | 105.4                            | 286.9          | 133.9                 | 0.763          | 0.654                              | 161.2                       | 2.10                        | 1.000          | 0.000 |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 20                 | Sandy Soil        | 306.4           | 143.4       | 15.9                                     | 15.9            | 0.270                   | 1.561                       | 4.22                             | 306.4          | 143.4                 | 0.748          | 0.639                              | 0.659                       | 1.60                        | 0.659          | 0.545 | 1.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 34                 | Sandy Soil        | 325.9           | 152.9       | 25.9                                     | 25.9            | 0.456                   | 2.000                       | 0.913                            | 325.9          | 152.9                 | 0.733          | 0.625                              | 1.461                       | 1.10                        | 1.000          | 0.000 |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 44                 | Sandy Soil        | 345.4           | 162.4       | 32.2                                     | 32.2            | 1.130                   | 2.000                       | 2.260                            | 345.4          | 162.4                 | 0.718          | 0.611                              | 3.700                       | 0.60                        | 1.000          | 0.000 |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 34                 | Sandy Soil        | 364.9           | 171.9       | 23.9                                     | 23.9            | 0.379                   | 1.920                       | 0.728                            | 364.9          | 171.9                 | 0.703          | 0.597                              | 1.219                       | 0.10                        | 1.000          | 0.000 |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 45                 | Sandy Soil        |                 |             |  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 47                 | Sandy Soil        |                 |             |  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 22.50              | Sand and Gravel   | 21.0            | 42          | Sandy Soil                               |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 50                 | Sandy Soil        |                 |             |  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 25.00              | Sand              | 19.5            | 50          | Sandy Soil                               |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 26.30              | Silt              | 17.5            | 25          | -  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 27.30              | Sand              | 19.5            | 50          | Sandy Soil                               |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 29.10              | Silt              | 17.5            | 42          | -  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 81                 | Sandy Soil        |                 |             |  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 90                 |                   |                 |             |  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 32                 | Sand              | 19.5            | 98          |  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |
| 15                   | 10.40  | Sandy Silt     | 17.5             | 50                 |                   |                 |             |  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |       |                |       |                |                 |

出典：JICA 調査団作成

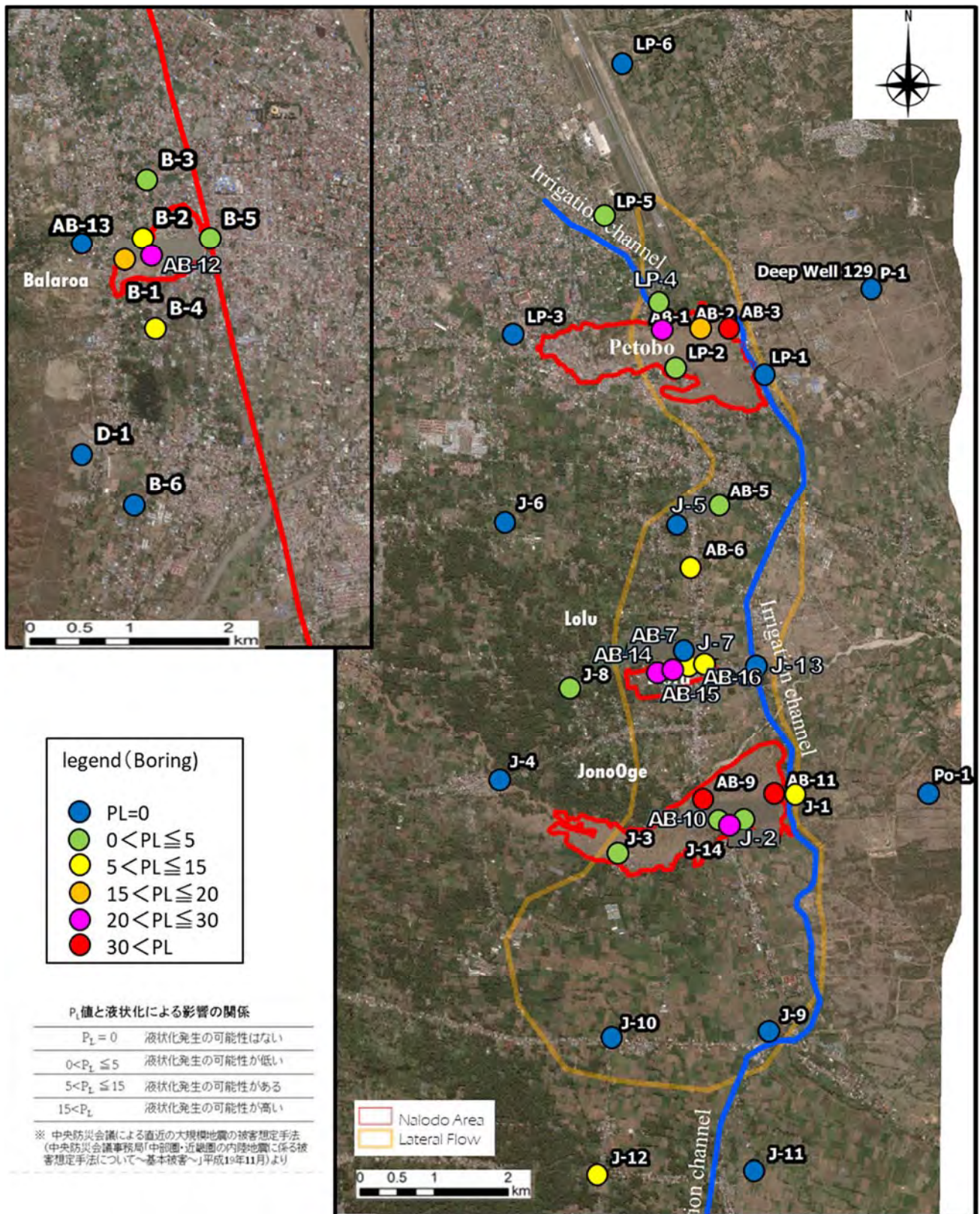
図 4-61 凡③法検討例 (LP-2 孔)

| No.                  | 1      | Name          | J-3              | Location           | Jono Oge          | LN <sub>G</sub> | 823812.00 m E | LAT <sub>r</sub>                         | 080057.00 m S   | Standard Depth for "sv" |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |        |                |       |                |                 |
|----------------------|--------|---------------|------------------|--------------------|-------------------|-----------------|---------------|--|-----------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------|-----------------------|----------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|--------|----------------|-------|----------------|-----------------|
| Height of Hole Mouth | 53.30m | Total Advance | 30.00m           | Ground Water Level | 0.70m             | Ground Height   | 53.30m        | Lateral Seismic Factor of Ground Surface | 0.400           | Type of Seismic Motion  | Type2                       | Standard Depth for "sv"          | 0.00m          |                       |                |                                    |                             |                             |                |        |                |       |                |                 |
| Depth                | 0      | Drilling Log  | 0 10 20 30 40 50 | Unit Weight        | kN/m <sup>3</sup> | N Value         |               | Type of Soil                             |                 | Physical Test           |                             | Failure Calculate N <sub>v</sub> |                | Liquefaction Judgment |                | Value for Calculate I <sub>s</sub> |                             | P <sub>L</sub>              | 1.03           |        |                |       |                |                 |
| 0                    | 1.40   | Silt          | 15.5             | 8                  | N                 | Type            | FC            | I <sub>p</sub>                           | D <sub>50</sub> | σ <sub>v</sub>          | σ <sub>v</sub> <sup>1</sup> | N <sub>1</sub>                   | N <sub>a</sub> | R <sub>L</sub>        | c <sub>w</sub> | R                                  | σ <sub>v</sub> <sup>1</sup> | σ <sub>v</sub> <sup>1</sup> | r <sub>d</sub> | L      | F <sub>L</sub> | W     | F <sub>L</sub> | ΔP <sub>L</sub> |
| 5                    | 2.20   | Coarse Sand   | 19.5             | 13                 | Sandy Soil        | 21.2            | NP            | 0.151                                    | 29.5            | 18.5                    | 25.0                        | 35.2                             | 1.886          | 2.000                 | 3.772          | 29.5                               | 18.5                        | 0.973                       | 0.621          | 6.077  | 9.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 3.00   | Gavelly Sand  | 19.5             | 16                 | Sandy Soil        | 13.4            | NP            | 0.410                                    | 49.0            | 28.0                    | 27.8                        | 31.2                             | 0.955          | 2.000                 | 1.910          | 49.0                               | 28.0                        | 0.958                       | 0.671          | 2.849  | 8.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 3.50   | Silty Sand    | 19.5             | 18                 | Sandy Soil        | 17.0            | NP            | 0.187                                    | 68.5            | 37.5                    | 28.5                        | 35.6                             | 2.039          | 2.000                 | 4.077          | 68.5                               | 37.5                        | 0.943                       | 0.689          | 5.917  | 8.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 3.50   | Silty Sand    | 19.5             | 20                 | Sandy Soil        | 14.3            | NP            | 0.198                                    | 88.0            | 47.0                    | 29.1                        | 33.6                             | 1.444          | 2.000                 | 2.888          | 88.0                               | 47.0                        | 0.928                       | 0.695          | 4.155  | 7.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 22                 | Sandy Soil        | 10.7            | NP            | 0.266                                    | 107.5           | 56.5                    | 29.6                        | 30.3                             | 0.825          | 2.000                 | 1.649          | 107.5                              | 56.5                        | 0.913                       | 0.695          | 2.374  | 7.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 135                | Sandy Soil        | 14.1            | NP            | 1.724                                    | 127.0           | 66.0                    | 168.8                       | 192.0                            | 21450.70       | 2.000                 | 42901.5        | 127.0                              | 66.0                        | 0.898                       | 0.691          | 62069  | 6.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 222                | Sandy Soil        | 15.4            | NP            | 1.746                                    | 146.5           | 75.5                    | 259.4                       | 306.6                            | 30661.01       | 2.000                 | 60922.0        | 146.5                              | 75.5                        | 0.883                       | 0.685          | 584990 | 6.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 175                | Sandy Soil        | 14.2            | NP            | 0.609                                    | 166.0           | 85.0                    | 191.9                       | 218.9                            | 40062.43       | 2.000                 | 80812.4        | 166.0                              | 85.0                        | 0.868                       | 0.678          | 119182 | 5.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 163                | Sandy Soil        | 17.1            | NP            | 0.414                                    | 185.5           | 94.5                    | 168.4                       | 208.7                            | 32972.12       | 2.000                 | 64144.2        | 185.5                              | 94.5                        | 0.853                       | 0.670          | 95772  | 5.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 93                 | Sandy Soil        | 7.1             | NP            | 0.937                                    | 205.0           | 104.0                   | 90.9                        | 90.9                             | 490.23         | 2.000                 | 980.5          | 205.0                              | 104.0                       | 0.838                       | 0.661          | 1484   | 4.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 102                | Sandy Soil        |                 |               |  | 224.5           | 113.5                   | 94.5                        | 94.5                             | 603.36         | 2.000                 | 1200.7         | 224.5                              | 113.5                       | 0.823                       | 0.651          | 1853   | 4.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 96                 | Sandy Soil        |                 |               |  | 244.0           | 123.0                   | 84.6                        | 84.6                             | 333.76         | 2.000                 | 667.5          | 244.0                              | 123.0                       | 0.808                       | 0.641          | 1041   | 3.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 111                | Sandy Soil        |                 |               |  | 263.5           | 132.5                   | 93.2                        | 93.2                             | 560.43         | 2.000                 | 1120.9         | 263.5                              | 132.5                       | 0.793                       | 0.631          | 1777   | 3.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 17                 | Sandy Soil        | 8.5             | NP            | 0.270                                    | 283.0           | 142.0                   | 13.6                        | 13.6                             | 0.250          | 1.496                 | 0.374          | 283.0                              | 142.0                       | 0.778                       | 0.620          | 0.604  | 2.60           | 0.604 | 1.031          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 30                 | Sandy Soil        | 8.5             | NP            | 0.270                                    | 302.5           | 151.5                   | 23.0                        | 23.0                             | 0.356          | 1.846                 | 0.658          | 302.5                              | 151.5                       | 0.763                       | 0.609          | 1.080  | 2.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 31                 | Sandy Soil        | 8.5             | NP            | 0.270                                    | 322.0           | 161.0                   | 22.8                        | 22.8                             | 0.352          | 1.831                 | 0.644          | 322.0                              | 161.0                       | 0.748                       | 0.598          | 1.076  | 1.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 31                 | Sandy Soil        | 8.5             | NP            | 0.270                                    | 341.5           | 170.5                   | 21.9                        | 21.9                             | 0.334          | 1.773                 | 0.593          | 341.5                              | 170.5                       | 0.733                       | 0.587          | 1.009  | 1.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 32                 | Sandy Soil        | 8.5             | NP            | 0.270                                    | 361.0           | 180.0                   | 21.8                        | 21.8                             | 0.332          | 1.765                 | 0.585          | 361.0                              | 180.0                       | 0.718                       | 0.576          | 1.016  | 0.60           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 35                 | Sandy Soil        | 8.5             | NP            | 0.270                                    | 380.5           | 189.5                   | 22.9                        | 22.9                             | 0.354          | 1.839                 | 0.652          | 380.5                              | 189.5                       | 0.703                       | 0.565          | 1.154  | 0.10           | 1.000 | 0.000          |                 |
| 5                    | 6.40   | Coarse Sand   | 19.5             | 33                 | Sandy Soil        |                 |               |  |                 |                         |                             |                                  |                |                       |                |                                    |                             |                             |                |        |                |       |                |                 |

表 4-12 残り 21 孔の液状化判定結果 (R 値) と優先 19 孔の R 値

| Region            | Borehole Name | 検討震度 | 地盤流動規模 |              | P <sub>L</sub> 値 ( F <sub>L</sub> ◎法 ) | P <sub>L</sub> 値 ( F <sub>L</sub> ◎法の最大値 ) |
|-------------------|---------------|------|--------|--------------|--|--|
|                   |               |      |        |              |  |  |
| 第一次調査<br>Balaroa  | B-1           | 0.4  | ● 頭部   | > 200        | 14.19                                  | 18.10                                      |
|                   | B-2           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 13.79                                  | 14.16                                      |
|                   | B-3           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 2.97                                   | 検討なし                                       |
|                   | B-4           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 5.21                                   | 検討なし                                       |
|                   | B-5           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 1.01                                   | 4.53                                       |
|                   | B-6           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.02                                   | 検討なし                                       |
| 第一次調査<br>Petobo   | LP-1          | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | LP-2          | 0.4  | ●内部    | covered area | 3.54                                   | 検討なし                                       |
|                   | LP-3          | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | LP-4          | 0.4  | 外      | 20m          | 0.00                                   | 0.32                                       |
|                   | LP-5          | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.20                                   | 検討なし                                       |
|                   | LP-6          | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
| 第一次調査<br>Jono Oge | J-1           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 3.61                                   | 5.40                                       |
|                   | J-2           | 0.4  | ●内部    | > 200        | 2.52                                   | 3.80                                       |
|                   | J-3           | 0.4  | ●内部    | covered area | 1.03                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-4           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-5           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-6           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-7           | 0.4  | 外      | 10m          | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-8           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.36                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-9           | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-10          | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-11          | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-12          | 0.4  | 外      | 2m以下         | 6.64                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-13          | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | J-14          | 0.4  | ●内部    | > 200        | 28.36                                  | 検討なし                                       |
| 第二次調査             | AB-1          | 0.4  | ● 頭部   | > 200        | 17.61                                  | 29.88                                      |
|                   | AB-2          | 0.4  | ●内部    | > 200        | 9.37                                   | 15.81                                      |
|                   | AB-3          | 0.4  | ●内部    | 50m          | 26.81                                  | 23.48                                      |
|                   | AB-5          | 0.4  | 外      | 30m          | 9.20                                   | 4.06                                       |
|                   | AB-6          | 0.4  | 外      | 20m          | 14.94                                  | 9.24                                       |
|                   | AB-7          | 0.4  | ●内部    | 125m         | 17.03                                  | 24.04                                      |
|                   | AB-9          | 0.4  | ●内部    | > 200        | 24.16                                  | 30.70                                      |
|                   | AB-10         | 0.4  | ●内部    | > 200        | 2.02                                   | 3.45                                       |
|                   | AB-11         | 0.4  | ● 頭部   | 30m          | 29.86                                  | 33.53                                      |
|                   | AB-12         | 0.4  | ●内部    | > 200        | 18.19                                  | 20.34                                      |
|                   | AB-13         | 0.4  | 外      | 2m以下         | 0.00                                   | 検討なし                                       |
|                   | AB-14         | 0.4  | ●内部    | 130m         | 23.73                                  | 22.31                                      |
|                   | AB-15         | 0.4  | ●内部    | 30m          | 8.79                                   | 10.01                                      |
|                   | AB-16         | 0.4  | ●内部    | 10m          | 6.94                                   | 8.21                                       |





出典：JICA 調査団作成

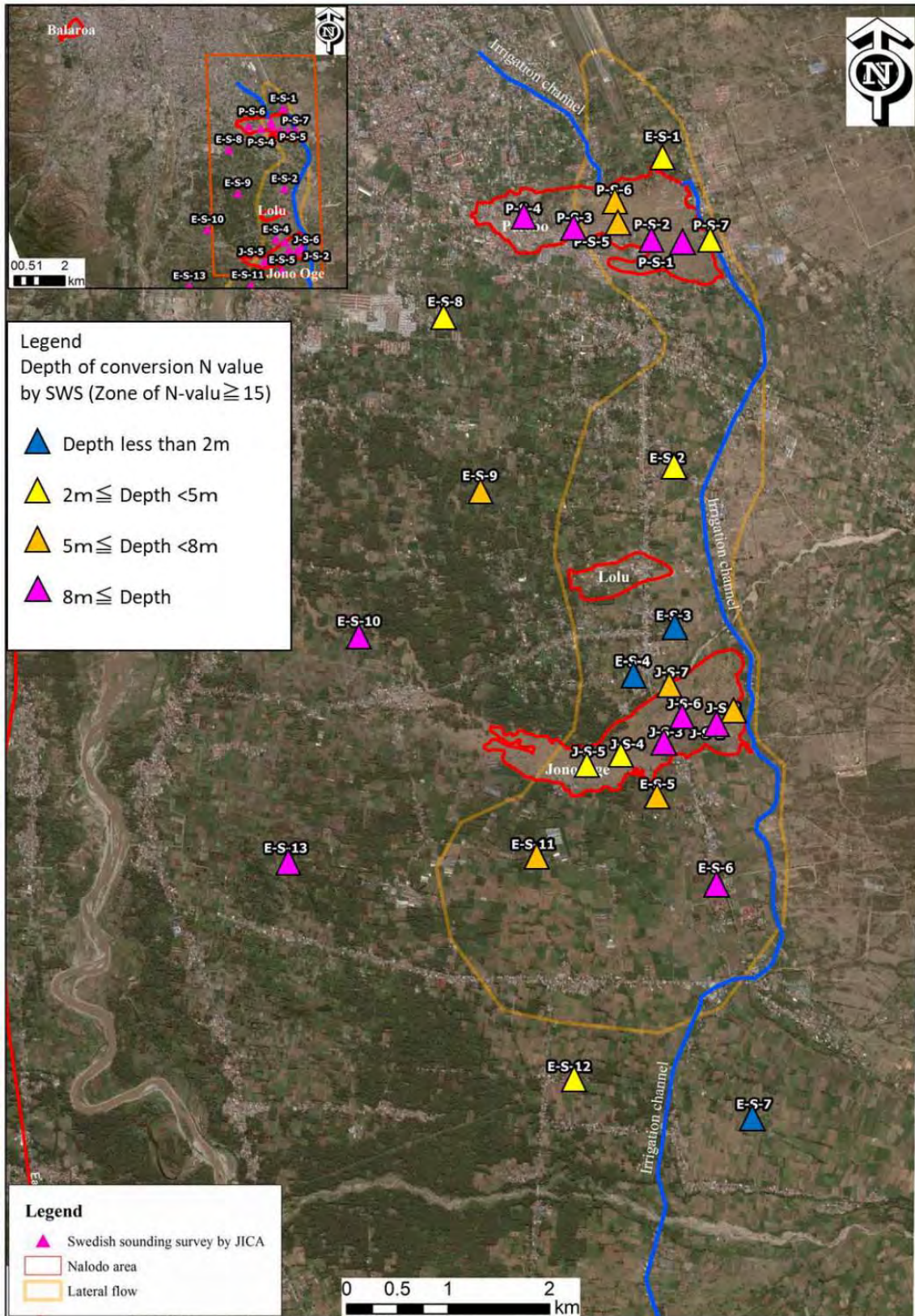
図 4-63 R値分布平面図（優先 19 孔+残り 21 孔）



#### 4-2-4 Nalodo 内部エリア（SWS のみ）の液状化評価結果

第一次調査で行った SWS の換算  $N$  値の深度分布について、 $N$  値 15 以上の出現深度分布を図 4-64 に示す。

- Nalodo の内部では  $N < 15$  のゾーンが、層厚 5～8m あるいは 8m 以上分布する傾向がある。
- Nalodo の頭部滑落崖の際や、堆積域で行った結果では、 $N < 15$  のゾーンは層厚 2～5m 程度と Nalodo 内部に比べて薄い傾向がある。
- Nalodo の範囲外でも、3 箇所（E-S-10・E-S-13・E-S-6）で  $N < 15$  のゾーンが 8m 以上を示す。大きく動いた範囲ではないため、Nalodo 内部に比べると地表付近の 2m 以浅で換算  $N$  値が高くなる場合がある。



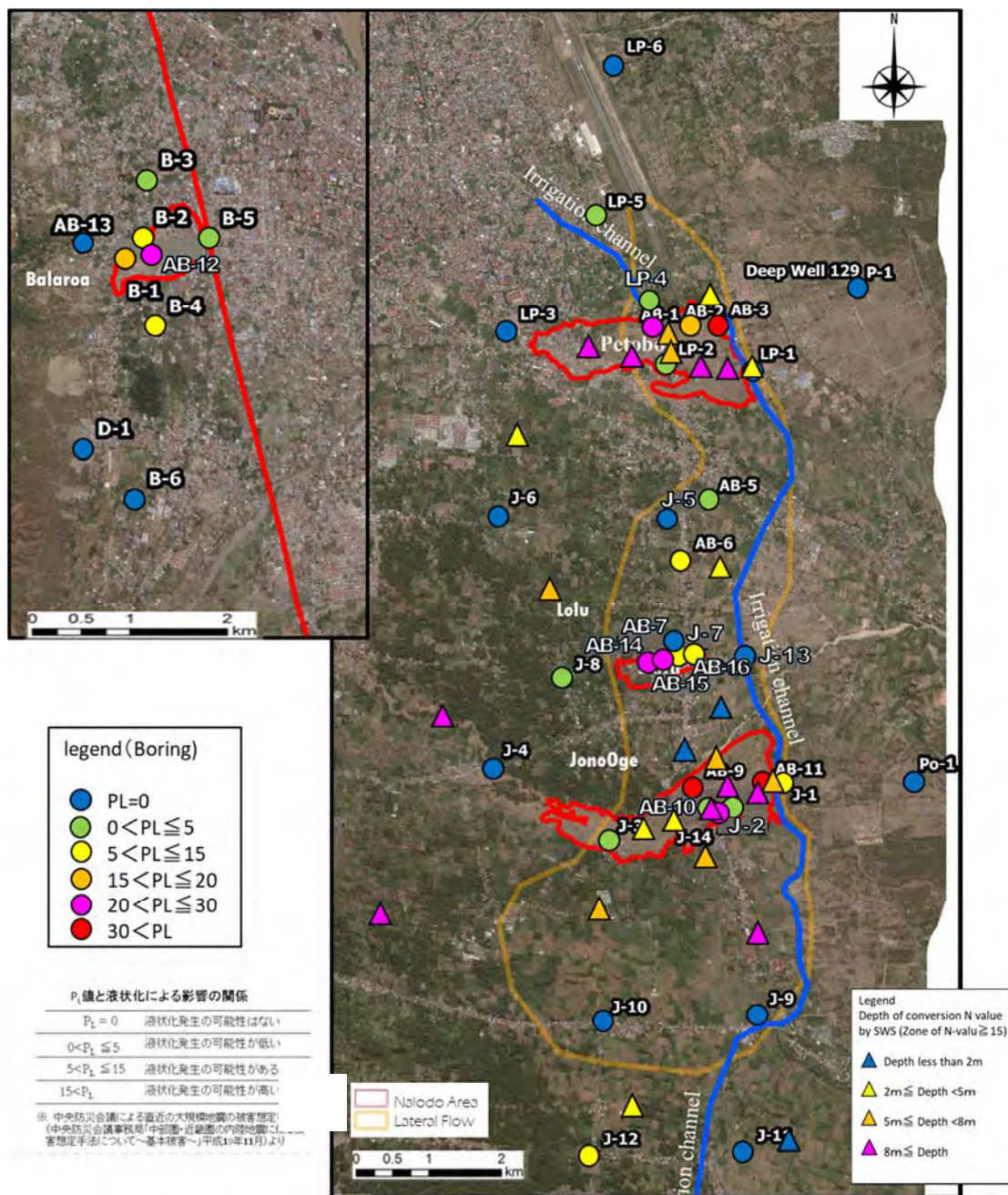
出典：JICA 調査団作成

図 4-64 SWS の換算 N 値深度分布



#### 4-2-5 液状化判定結果の評価

図 4-65 に図 4-63 および図 4-64 で検討した液状化評価の集成図を示す。ボーリング調査の液状化指数 ( $P_L$  値) 分布および SWS の換算  $N$  値深度分布傾向を重ね合わせである。



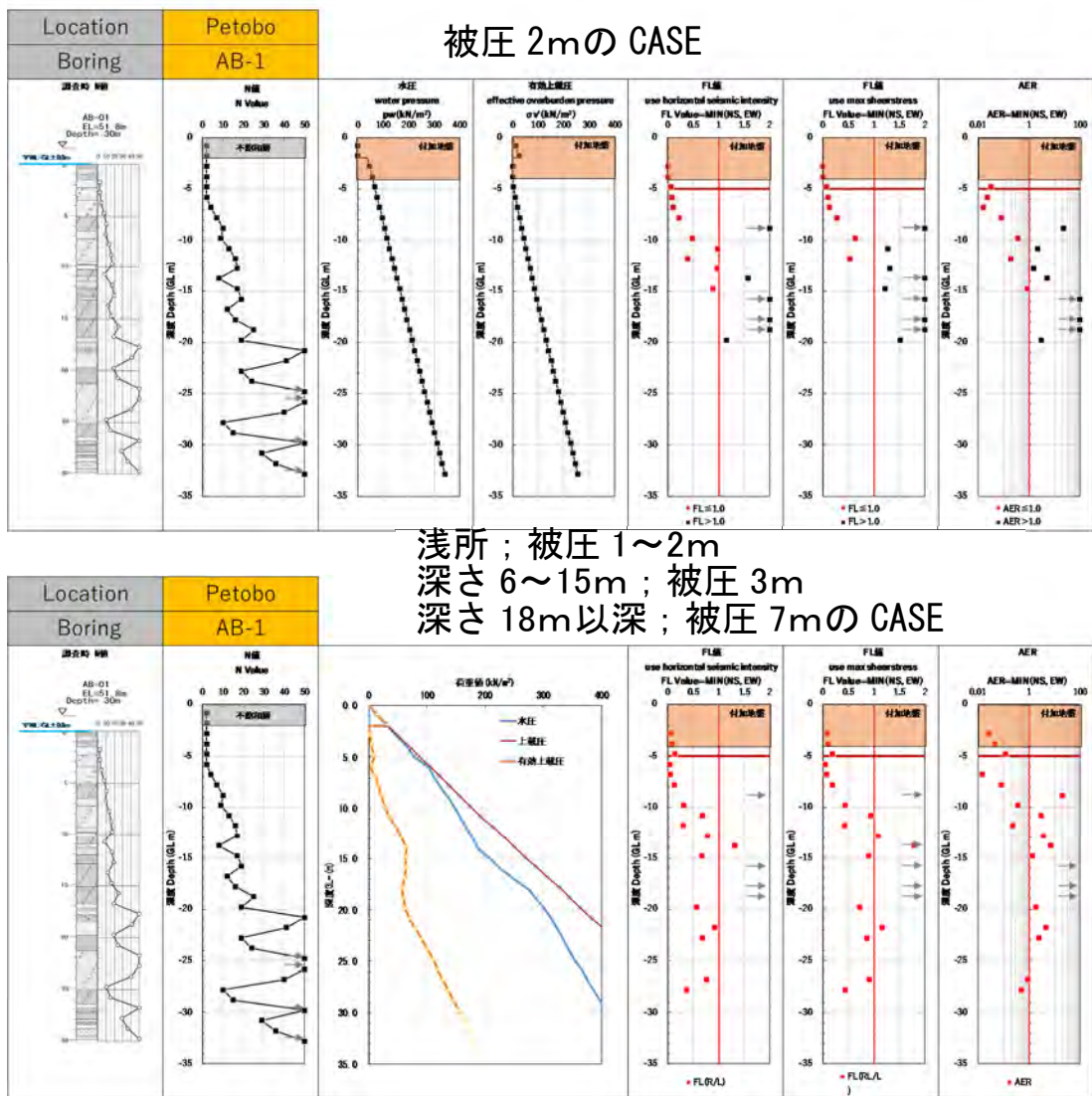
出典：JICA 調査団作成

図 4-65 液状化検討結果の集成図 ( $F_L$ 法・ $F_L$ 法及び SWS からの推定)

#### 4-2-6 想定以上の被圧が発生した場合の液状化評価

4-3 で行った液状化の検討は、扇状地起源の被圧として最大 GL+2mとして検討したものである。この設定は、地震前の状態で人が生活し、自然湧水や浅井戸を使用していたことから、これよりも著しく大きな被圧は発生していないと考えたことによる。ただし、地震発生時のごく短時間に異常な被圧が発生した条件は考えられることから、この試算を行って見た。地震発生時のヒアリング結果では、地盤流動が発生する直前において大規模な噴水現象や水圧による地盤破壊現象の確証は得られていないため、地盤破壊が発生しない最大程度の被圧を設定した。液状化の計算は、最大深さ 20mが一般的であるが、ここでは深さ 30mまでを計算した。地震発生時の被圧条件以外の計算条件は同じとした。

図 4-66 に、Petobo(AB-1)の通常の被圧条件と著しく大きな被圧条件の液状化判定試算結果を示す。地震時せん断の応力比 ( $L$ ) は有効上載圧との関係で決まり、同一地点で被圧に伴う有効上載圧の低減が発生すると  $FL$  値は小さくなり、液状化の傾向が増大することが確認出来た。



出典：JICA 調査団作成

図 4-66 地震発生時に異常な被圧が発生した場合の液状化試算  
(上；通常の被圧条件 下；地盤破壊が発生しない最大程度の被圧)



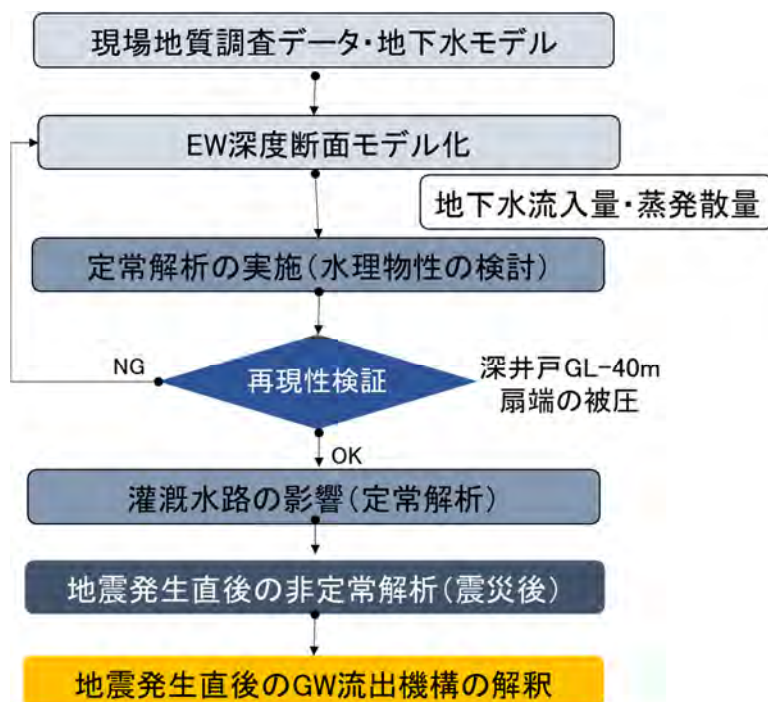
### 4-3 二次元浸透流解析

#### 4-3-1 解析の目的

Nalodo の発生箇所は、上位の斜面に小型の扇状地を伴い、遷緩線より下位の大型の扇状地斜面に該当する (Petobo と Jono Oge は大型扇状地に挟まれた境界微低地)。一般的には基盤岩集水域から流入する地表水は高位の扇状地で伏流し、扇状地扇端の遷緩点付近で地表に湧出する地下水構造を形成する。扇状地を構成する洪積及び沖積の扇状地堆積物は、Palu 盆地の沈降に伴い層厚を増し、Nalodo 発生場では層厚 100m を超えると考えられる。Nalodo 高位の小型扇状地に流入した地下水は Nalodo の発生場付近で地表に流出し、最終的に Palu 川に流れる。南北方向の断面で見ると、Petobo 及び Jono Oge は、大型扇状地の境界微低地に当たり湧水の発生場であるとともに、現世の堆積物が堆積する場でもある。集水域の基盤岩地域の河川は時に土石流を発生させるが、地形勾配が 3% 程度の緩斜面には土石流は到達せず、洪水時に砂・シルトを主体とする氾濫原堆積物が堆積し、細粒土の薄層も頻繁に堆積する環境にある。

以上の条件は、液状化の条件 (厚いゆる詰め砂質土、浅い地下水位) を満足するとともに、斜面と平行なキャップ層を形成し、被圧帯水層を形成している。

二次元浸透流解析は、最も典型的な条件である Petobo を代表断面として、基盤岩地域から浅層地下水として流入する地下水の流れと地盤中の地下水面高さを、地盤の物性 (透水性) をトライアルに与えることにより再現させるものである。再現できたモデルを用いて、液状化及び地すべり発生、灌漑水路の有無条件を定常解析により再現し、更に地震発生時の地盤の流動と液状化を発生させることにより、地すべり時および後に発生した大量湧水の起源を評価することを目的とした。(図 4-67 参照)



出典：JICA 調査団作成

図 4-67 二次元浸透流解析フロー

#### 4-3-2 シミュレーションモデルの設定

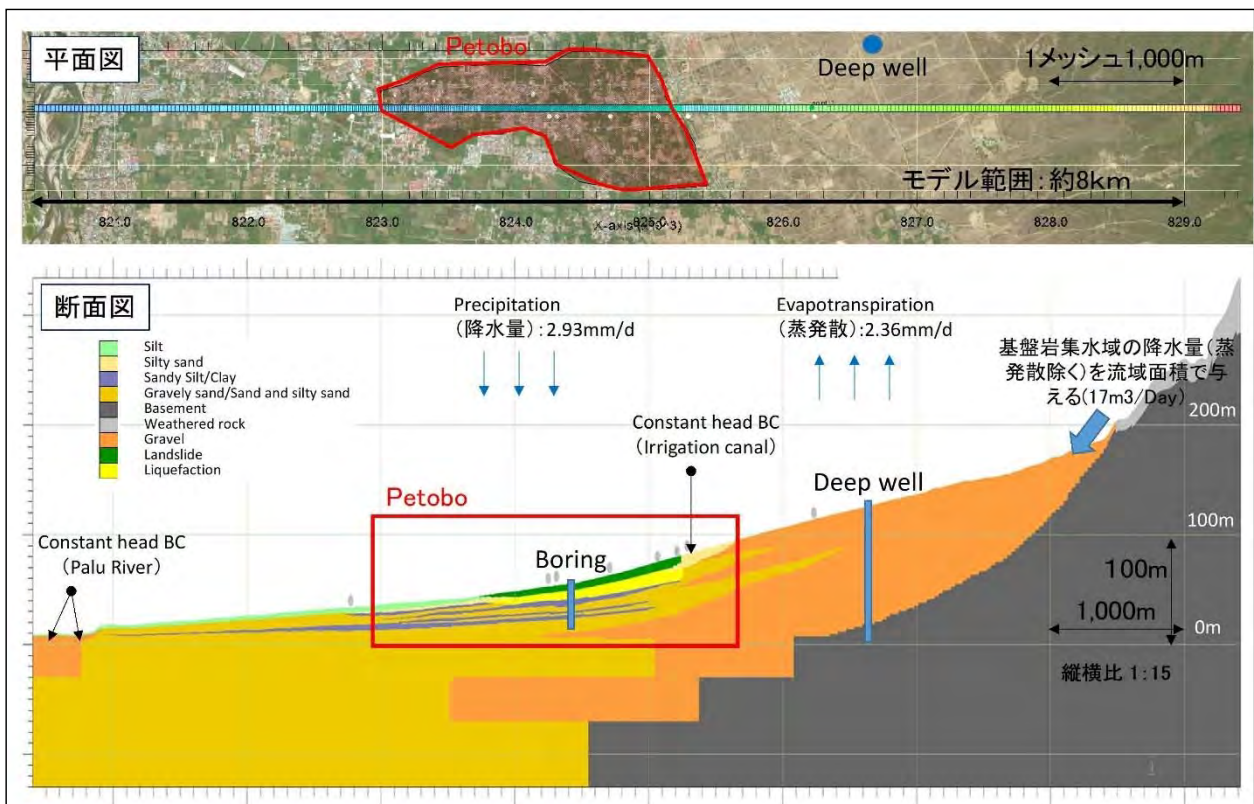
二次元浸透流解析は、MODFLOW を使用した。シミュレーションの基本条件として以下を設定した。

##### MODFLOW の理論式

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + W = Ss \frac{\partial h}{\partial t}$$

ここで、 $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ ;  $x, y, z$  方向の透水係数、 $h$ : ピエゾ水頭、 $W$ : 涵養量、 $Ss$ : 比産出率、 $t$ : 時間である。この微分方程式を有限差分法で数値的に解き、地下水のピエゾ水頭を計算している。このため、液状化に伴う地盤変形・圧密などの現象は考慮されていない。

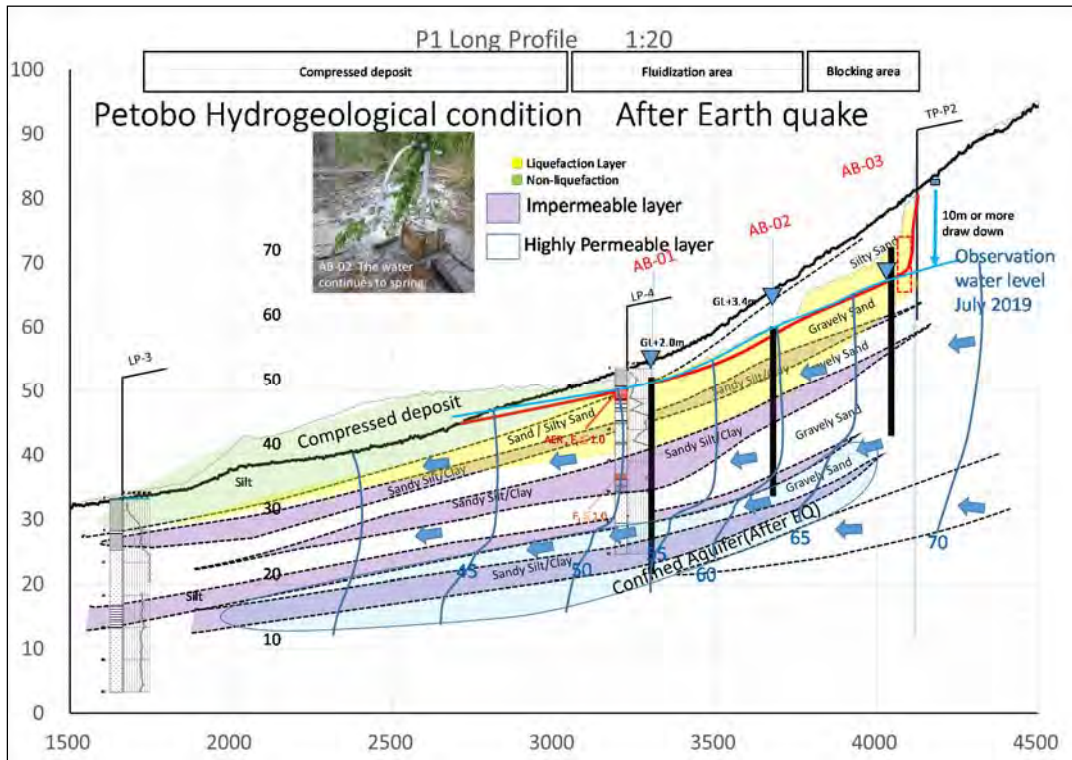
- モデルの範囲；基盤岩集水域の末端（上部扇状地扇頂部）から Palu 川までの約 8km を震災前の地形を用いてモデル化する（図 4-68 参照）。
- 地盤モデルは、ボーリング調査及び現地調査を基に設定し、地すべり発生後は、移動土塊とその下位に位置する液状化層を与える（図 4-69、図 4-70 参照）。
- 降水量；Palu 盆地で得られる年間降水量の平均値を全体に与える。
- 蒸発散量；Palu の平均気温から導かれる蒸発散量を与える。
- 基盤岩集水域からの表流水流入量；基盤岩集水面積比の蒸発散後の降水量を与える。
- 下流側水位；下流端は年間を通して表流水のある Palu 川に固定水位を与える。
- キャリブレーションデータ 1；上位扇状地の深井戸水位（GL-40m）
- キャリブレーションデータ 2；Nalodo 内の被圧状態



出典：JICA 調査団作成

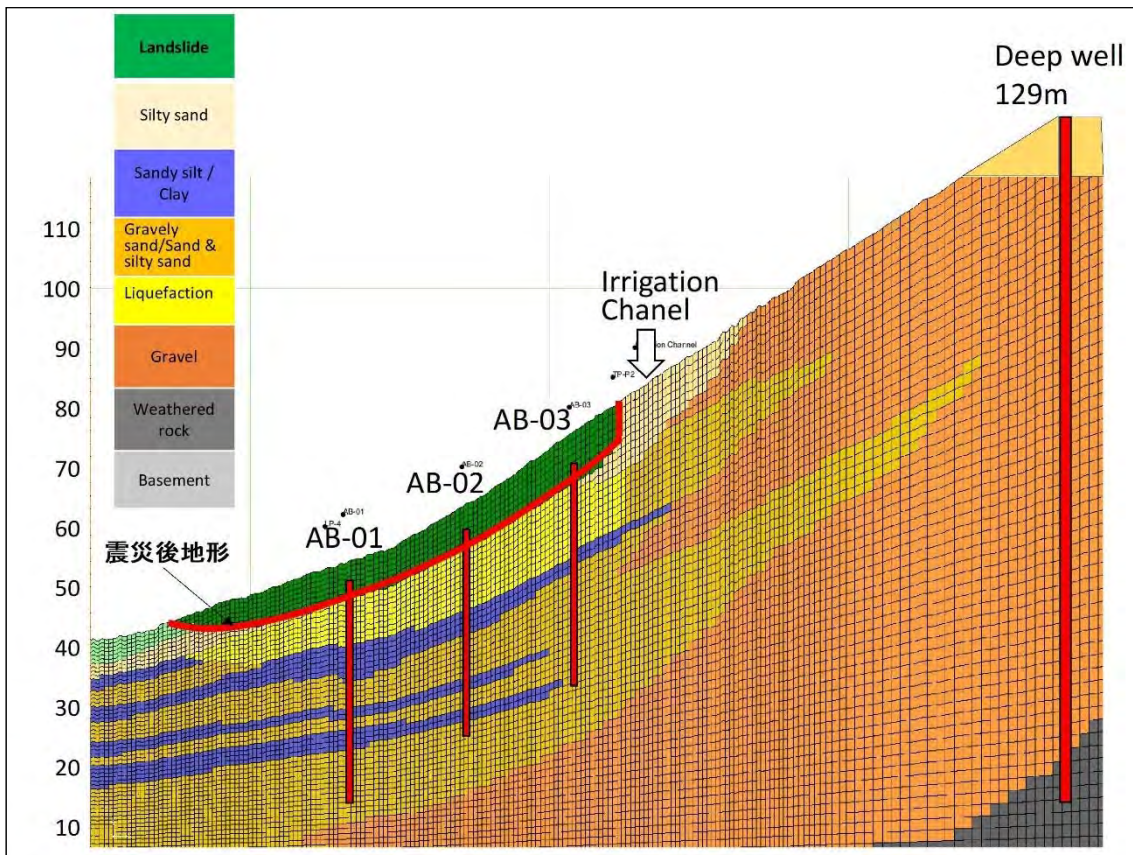
図 4-68 二次元浸透流解析 (Petobo 検討モデル) (縦横比 1:15)





出典：JICA 調査団作成

図 4-69 Petobo の地質縦断モデル地震後（縦横比 1:20）



出典：JICA 調査団作成

図 4-70 Petobo 二次元浸透流解析モデル（メッシュ図、縦横比 1:30）

地形モデルは、地震前の地形を採用し、移動した土塊部分は高い透水性を与えて地盤移動を表現している。なお、想定する移動境界（すべり面）より下に10mの厚さで液状化した層を設定している。前項で検討した液状化層厚はPetoboのボーリング孔の液状化判定結果の深さを表4-13に示すように3～10mの強い液状化が発生したことが解析されている。

表 4-13 Petobo 断面の液状化範囲の深さ（液状化検討結果）

| ボーリング調査           | AB-1 | AB-2      | AB-3   |
|-------------------|------|-----------|--------|
| 旧地表からの深さ (m)      | 15m  | 8m (～20m) | 15～18m |
| 想定するすべり面からの深さ (m) | 10m  | 3m        | 6～9m   |

出典：JICA 調査団作成

### 4-3-3 物性値の設定

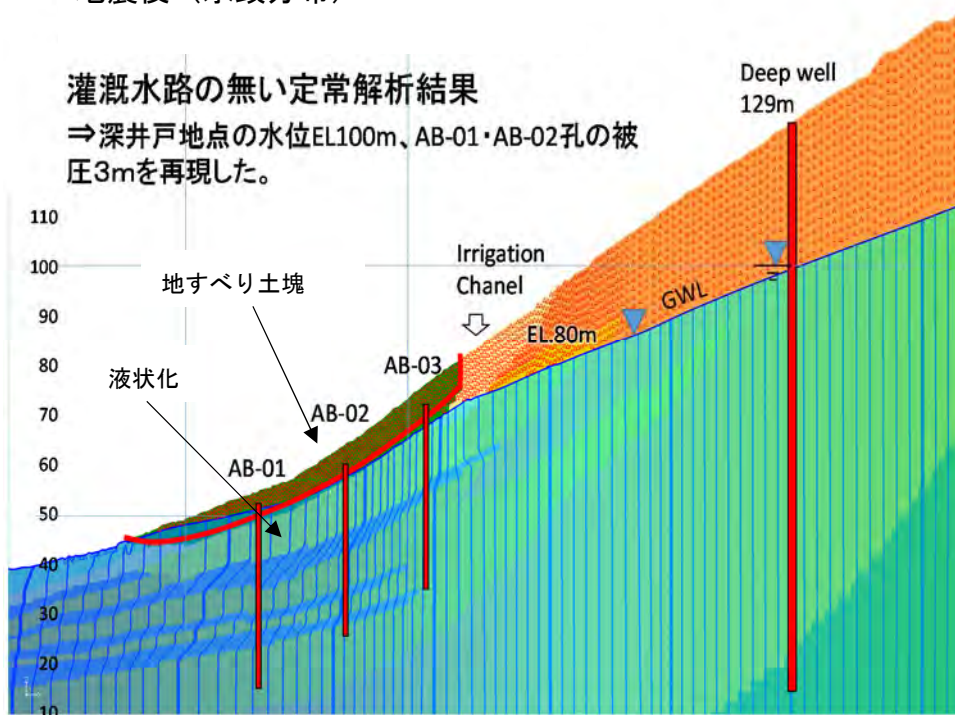
設定したモデルを用いて、地震発生後の定常解析を行い、震災後の地下水状態である深井戸水位（GL-40m）とNalodo発生域内の水位・被圧を再現させる物性値をトライアルで計算した。有効間隙率及び貯留係数は一般的な値を設定し、透水係数をトライアル計算した（図4-71および表4-14）。透水係数の設定は、ボーリング調査で行った現場透水試験及び室内透水試験結果を参考とした（図4-72、図4-73参照）。

地震後の深井戸水位（GL-40m）を満足する扇状地を構成する礫層の透水性は水平方向で $9.8 \times 10^{-3}$  (cm/sec)、Nalodoの被圧を再現する礫質砂層の水平方向の透水係数は $8.7 \times 10^{-3}$  (cm/sec)、挟在する砂質シルト層は $3.5 \times 10^{-5}$  (cm/sec)として設定した（表4-14参照）。なお、礫層及び礫質砂層の透水性を大きくすると、深井戸の水位がGL-40mよりも低下し、地震後の観測水位に設定することが困難となる。地震後に発生後した移動土塊および液状化層の物性値についても、地震後の水位・被圧条件と地震前の水位条件を復元する値を設定している。ただし、移動層と液状化層については、透水性に対する水位変動量の感度が低いため、下記を参考として設定した。

- 地震後の移動土塊（表層の5～8mのシルト・砂/シルト互層）；亀裂が入り、引張り領域では正断層が多く出現した。地震前は人が生活。
- 液状化層；AB-1・AB-2・AB-3の液状化深さをモデル化し、地震直後の状態ではボーリングの発生に伴う地盤状態（高透水性に改変）を考慮した。
- 室内液状化実験による透水係数測定例を参考とする（例えば表4-12）。
- 移動土塊および液状化層の透水係数は、決まった根拠を与えることは難しいが、実験やシミュレーションによって2倍程度に増加することが言われている。ここでは、これに加えて移動層に亀裂多く形成されたこと（一部は流出したため無くなった）・液状化層はボーリングなどの影響がある事を考慮して、室内試験などにおいて粗粒砂層では $K=1 \times 10^{-1}$  (cm/sec)が確認されている事例を参考に、縦方向 $1 \times 10^{-1}$ ～横方向 $1.7 \times 10^{-1}$  (cm/sec)を与えた。
- これ以外の物性値は一般値を採用した。



地震後（水頭分布）



出典：JICA 調査団作成

図 4-71 震災後の定常解析（キャリブレーションモデル）  
 （水頭コンター表示、飽和帯中の色は地層モデル）

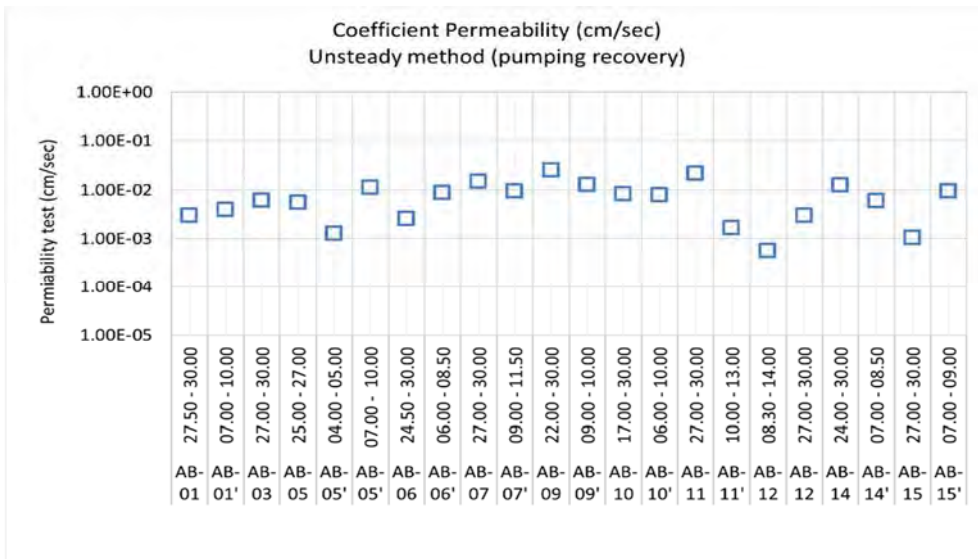
表 4-14 震災後定常解析により設定した物性

| 地質区分                              | Before the Landslide                                       |  |                            |                              | After the Landslide  |                      |                            |                              |
|-----------------------------------|--|--|----------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------|
|                                   | 透水係数<br>(鉛直) m/s   | 透水係数<br>(水平) m/s   | 有効間隙率<br>(%) <sup>*2</sup> | 比貯留係数<br>(1/m) <sup>*2</sup> | 透水係数<br>(鉛直) m/s     | 透水係数<br>(水平) m/s     | 有効間隙率<br>(%) <sup>*2</sup> | 比貯留係数<br>(1/m) <sup>*2</sup> |
| Silt                              | $9.3 \times 10^{-8}$                                       | $6.9 \times 10^{-7}$                                       | 0.3                        | $1 \times 10^{-1}$           | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.7 \times 10^{-3}$ | 0.35                       | $1 \times 10^{-1}$           |
| Silty sand                        | $1.2 \times 10^{-7}$                                       | $9.3 \times 10^{-6}$                                       | 0.3                        | $1 \times 10^{-1}$           |                      |                      |                            |                              |
| Sandy silt / Clay                 | $5.8 \times 10^{-8}$                                       | $3.5 \times 10^{-7}$                                       | 0.35                       | $1 \times 10^{-1}$           | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.7 \times 10^{-3}$ | 0.35                       | $1 \times 10^{-1}$           |
| Gravelly sand / Sand & silty sand | 下流側<br>$1.2 \times 10^{-6}$<br>上流側<br>$8.7 \times 10^{-6}$ | 下流側<br>$5.8 \times 10^{-6}$<br>上流側<br>$8.7 \times 10^{-5}$ | 0.35                       | $1 \times 10^{-1}$           |                      |                      |                            |                              |
| Gravel                            | $9.8 \times 10^{-6}$                                       | $9.8 \times 10^{-5}$                                       | 0.35                       | $1 \times 10^{-1}$           | No change            |                      |                            |                              |
| Weathered rock                    | $1 \times 10^{-5}$   | $1 \times 10^{-5}$   | 0.1                        | $1 \times 10^{-1}$           | No change            |                      |                            |                              |
| Basement                          | $1 \times 10^{-8}$   | $1 \times 10^{-8}$   | 0.1                        | $1 \times 10^{-5}$           | No change            |                      |                            |                              |

\*1 For only after the earthquake,

\*2 Assumptions

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 4-72 礫質砂層・砂層の現場透水試験結果（単孔回復法）



出典：JICA 調査団作成

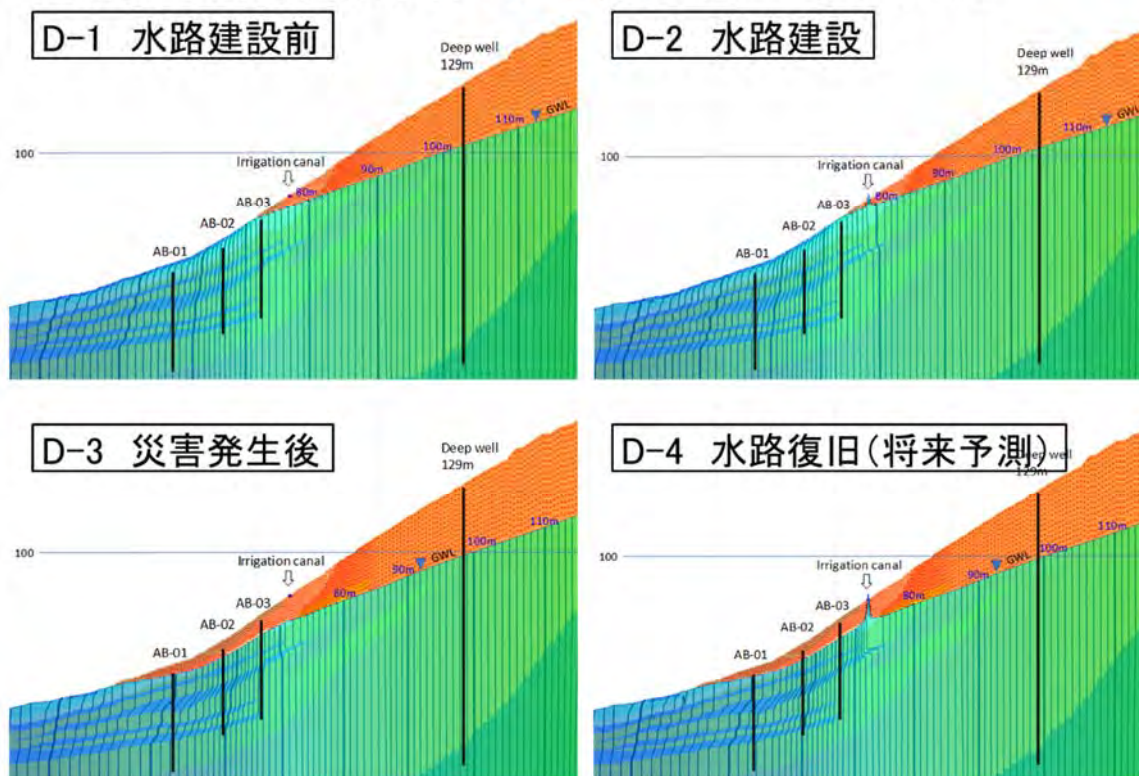
図 4-73 シルト層・砂質シルト層の室内透水試験結果

#### 4-3-4 定常浸透流解析

設定した物性値を用いて、地震前（灌漑水路なし・灌漑水路あり）及び地震後（灌漑水路なし・灌漑水路復旧）の条件で、定常解析を行った（図 4-74 参照）。解析の結果から以下の状況が認められる。

- 灌漑水路建設の影響によって、灌漑水路高位斜面及び低位斜面全体に 1~3m 程度の水位上昇が想定される（D1⇒D2）。
- 地すべり発生時・液状化層の透水性急増に伴って、地すべり内の地下水位は低下するとともに、高位扇状地内の地下水位も低下する。灌漑水路付近の水位は 5~10m 低下（D2⇒D3）。
- 灌漑水路の復旧（将来）に伴って、灌漑水路を含む上位の斜面は 1m 程度水位が上昇する。地すべり地内の透水性が高い状態を維持すると、排水が促進し、地表付近には不飽和帯が残る。全体の水位上昇は 1m 以内に抑えられている（D3⇒D4）。

### 灌漑水路建設前後及び地震前後の水位変化



出典：JICA 調査団作成

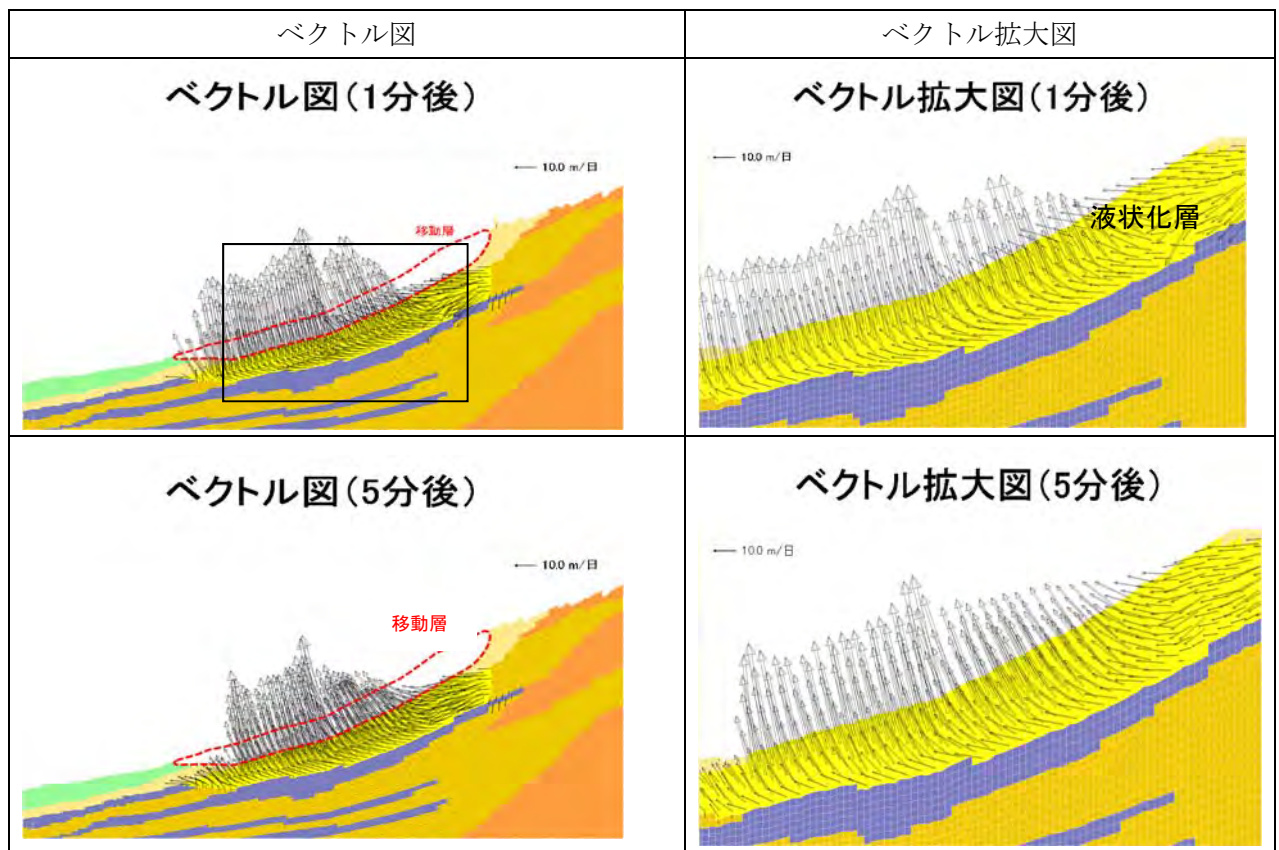
図 4-74 4 ケースの定常解析結果（飽和帯/不飽和帯、水頭コンター表示、縦横比 1:30）  
（水頭コンター表示、飽和帯中の色は地層モデル）

#### 4-3-5 非定常浸透流解析

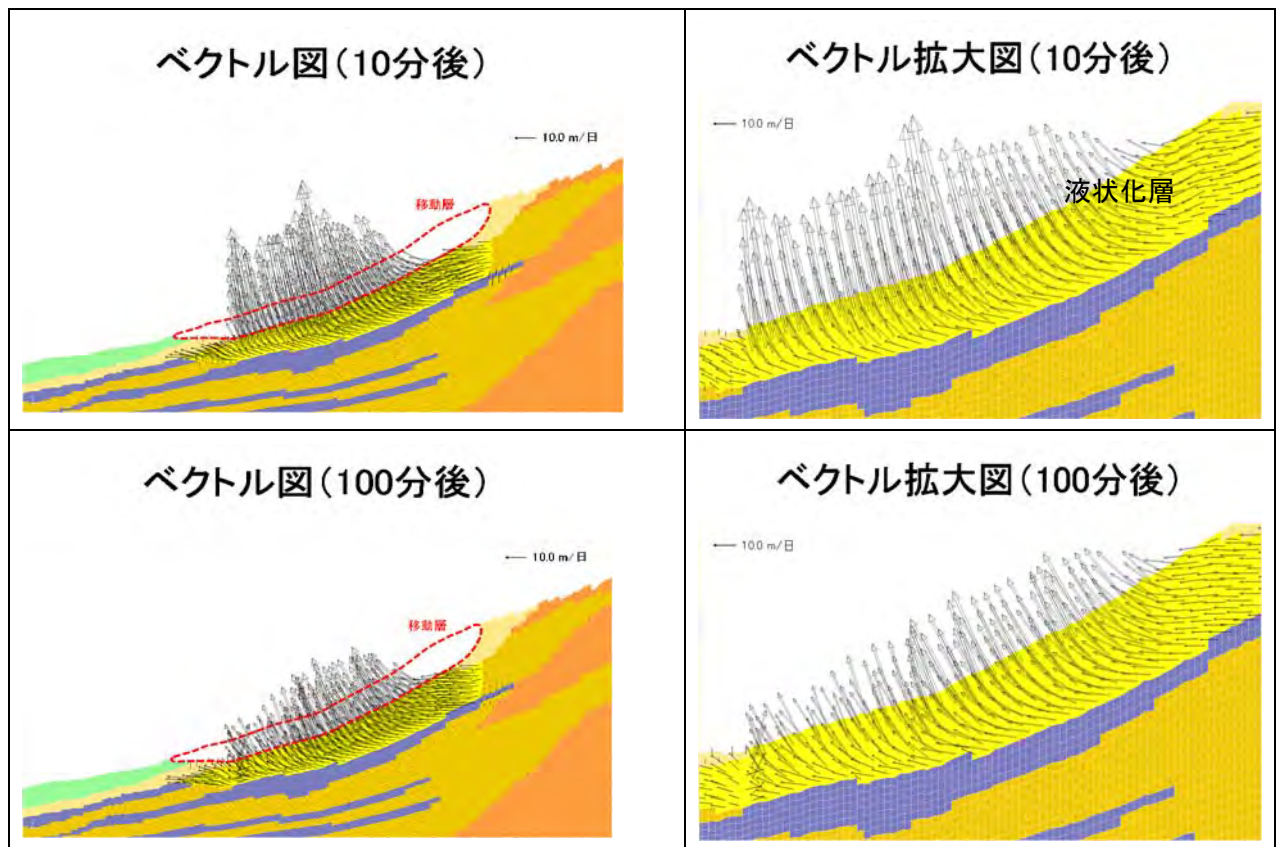
##### (1) 解析結果のまとめ

定常解析で設定したモデルを用いて地震発生後の非定常解析を行った。地震発生直後に液状化層（層厚約 10m）と地すべり流動層（すべり面上位）の透水性を  $1.7 \times 10^{-1}$  (cm/sec) に増大することによって、地盤中に封圧されていた地下水が地表流出する現象の再現を試みた。 $1.7 \times 10^{-1}$  (cm/sec) の透水係数は液状化時の透水係数として室内試験で計測された透水係数としてはやや大きめの設定である。地下水湧出量の変化を流速ベクトル図として、1 分後、5 分後、10 分後、100 分後に分けて図 4-75 に表示した。

- 地下水の湧出は、地すべり（液状化）発生に伴う透水性の変化を与えると、急激に増加し 1 時間程度の間は単位面積あたり 5~10mm/min（全体としては  $50\text{m}^3/\text{sec}/\text{km}^2$  以上）が発生する。
- 湧出量は時間経過とともに減少し、300~500min（5~8hour）で扇状地を通る水と地表湧出量がほぼ同じ量となる。これらの状態は概ねヒアリング結果と整合する。
- 流速の最も大きな範囲は、すべり面直下に層厚 10m として設定した液状化層の領域である。液状化に伴って透水係数を非液状化層の約 20 倍を与えたために、液状化層を主体とした地下水の排水が発生している。ただし、排水総量は液状化単独での排水量と浸透流解析では浸透流解析が 5 倍程度大きな排水量を示している。
- 水の供給は、地震直後は液状化層起源のものが大半を占めるが、5~10 分以降には周辺地盤を通過した水も加わる必要がある。







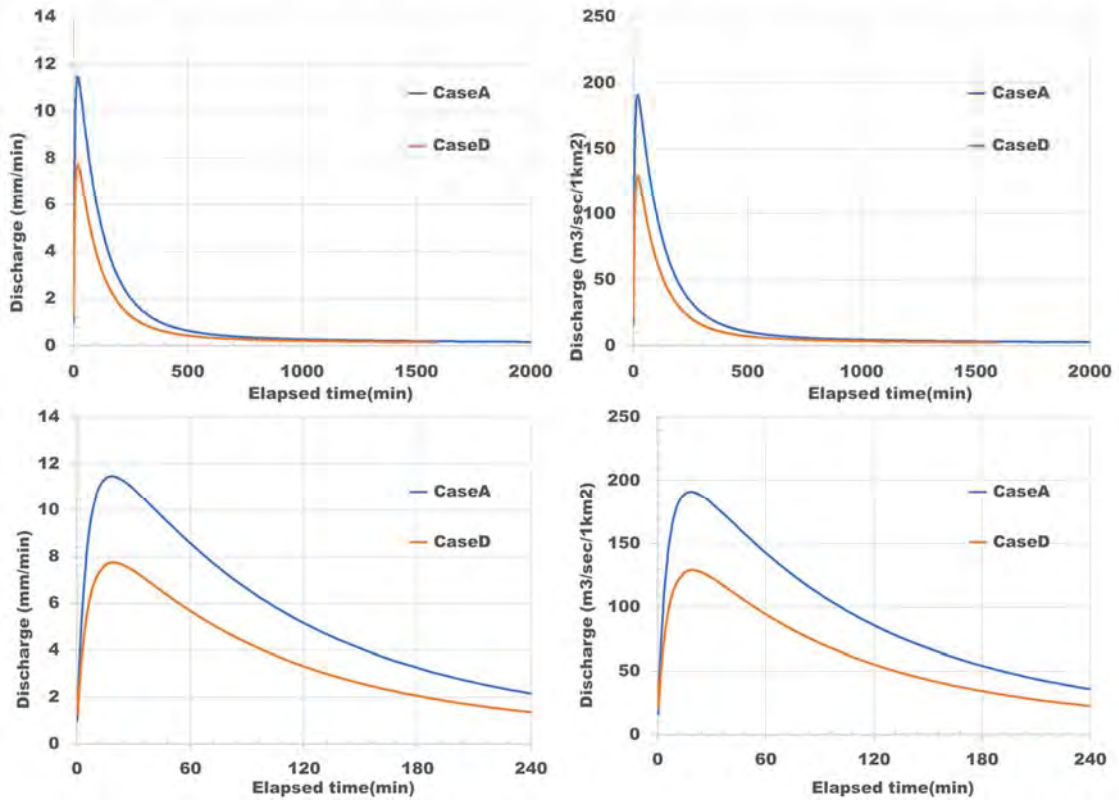
出典：JICA 調査団作成

図 4-75 Petobo 非定常浸透流解析流速のベクトル図

今回の解析結果は、流速ベクトルの連続条件を満足していないように見られる。非定常浸透流解析でこのような結果となる理由としては、液状化層の圧密沈下起源による排水量の増大が考えられるが、ここで用いた解析プログラムでは圧密を考慮する機能は含まれていないとのことである。したがって、この非定常浸透流解析結果については、その信頼性について今後さらなる検討が必要である。

すべり面を通過する排水量を図 4-76 に示す。湧出量の急激な増加分は、液状化現象としての排水量と同じものを表現しているとは限らないが、湧水初期では動水勾配の大きな範囲から短時間（5～10 分で）に大量の地下水が湧出している。300 分以降は、すべり面を通過する流量低減する。図 4-77 にはすべり面を通過する水量と高位の扇状地から移流する水量を評価した。300 分以降は累積流量の傾きがほぼ同じとなることから、高位扇状地から移流する流量とすべり面から流出する水量はほぼ等しくなる。湧水の集中する 300 分程度までの間ですべり面全体の平均で 1500mm 程度の総排水量が計算されている。10m 層厚の液状化だけではこの量の排水は出来ないため、周辺地盤からの流入も考慮されている。この透水モデルは、扇状地をモデルとして、地震発生時の経時変化をシミュレートしたものであるが、すべり始めの時間が地震発生後 1～2 分以内に開始されたことがヒアリング結果などにあり、この計算結果による地震後 1～2 分程度の急激な湧水が滑り開始と関係していることが考えられる。そして、地震後の早期（5 分程度以内）の急激な湧水が滑り開始と関係していることが考えられる。また、5 時間程度の長い時間で大量の水が湧き続けた状況は、Nalodo の発生地域で共通してあるようである。

地すべり面を通過する地下水湧出量の時間変化(単位水量と1km<sup>2</sup>あたり水量)



出典：JICA 調査団作成

図 4-76 地すべり面を通過する地下水排水量（非定常解析結果）

左；単位面積あたりの排水量 右；1km<sup>2</sup>あたりの流出量

(CaseA・CaseD；地すべり～palu 川にかけて分布する礫質砂層の透水性の不確実性を考慮。下流側の透水性を大きくすることで湧水量が低減する。(CaseA；初期値 CaseD 透水性を大きくした設定)

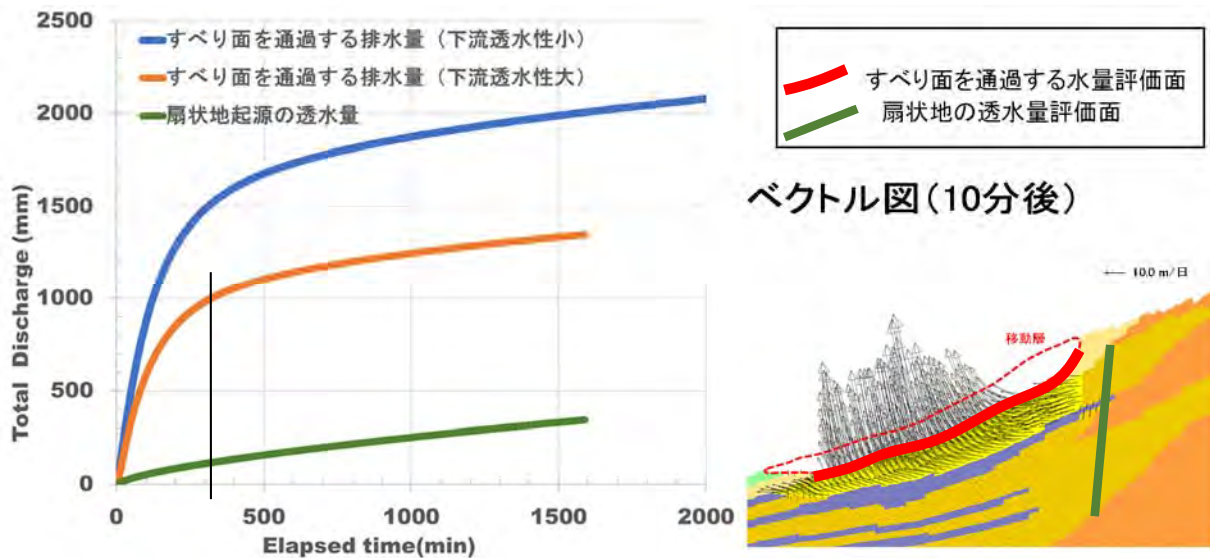


図 4-77 地すべり面を通過する累積地下水排水量と扇状地起源の水量（非定常解析結果）

出典：JICA 調査団作成

## (2) 今後への申し送り

二次元断面の扇状地地下水流動モデルを用いた地下水シミュレーションを行うことにより、震災前・震災後の地下水位（被圧状態）及び地下水湧出の状況を再現し、地震発生後の大量湧水の発生原因についての評価を試行した。実現象としての液状化地すべりでは、液状化の程度及び表層キャップ層の破壊の程度が経時変化することを考慮する必要があるが、このモデルは、地形を地震前のモデルとして、透水係数だけを変化させている。また、地盤変形を同時に取り扱っていないため、地すべり面を通過する湧水発生量の経時的な評価は、正確な時間との関係を再現していない可能性が高い。また、地すべり流動現象及び液状化によって増大する透水性をキャリブレーションするための地すべり発生後の実測湧水量が無いことから、量的な評価は仮定を含んでいる。

地すべり発生時の状況を記録したビデオや被災者からのヒアリング結果では、更に早い時間（地震後1分程度以内）から地すべりの初動が開始されていることから、扇状地をモデルとした地下水流出モデルだけでは、水膜現象を成立するだけの水量が湧出し得ない結果となった。地震発生時に、検討モデルの設定条件にない強い被圧が発生している可能性がある。

#### 4-3-6 液状化起源の地下水排出量の検討

##### (1) 目的

二次元浸透流解析によって、被災前・後の地下水位・被圧状態は、地震前の条件と比べて極長時間（数ヶ月）に渡って高位の扇状地の地下水位を 10m 程度低下させ、長時間にわたって大量の湧水を出現させることは再現出来たものと考えられる。また、地震発生直後の湧水は、高位扇状地起源ではなく、地すべり直下に位置する液状化層周辺で大きな流速が発生することが再現されている。しかし、液状化による余剰水の評価は、この浸透流解析では扱えていないことから、液状化による余剰水の簡易的な試算を行うことを目的とした。

##### (2) 方法と結果

液状化層から排出された水がキャップレイヤーとの間に水膜を形成し成長する考えは、Kokusho (1999)<sup>1)</sup> 他によって提唱され、室内実験により水膜の成長速度が確認されている。液状化中の土粒子沈降速度は、透水係数  $k$  に液状化時の限界動水勾配  $i_{cr}$  をかけた  $v=k \cdot i_{cr}$  とほぼ同じと考えられている（表 4-15 参照）。水膜の成長速度を室内実験により確認した報告は、層厚にかかわらず一定速度を示すことが知られている。

表 4-15 室内実験による液状化層の透水係数・限界動水勾配・沈下量速度

| Grain size   | $k$ (cm/sec)                | $i_{cr} = \gamma' / \gamma_w$ | Seepage velocity(cm/sec) |                           |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Fine sand    | $1.5 \sim 3 \times 10^{-2}$ | 1.0                           | 0.025-0.05(Dr30-60%)     | kokusho2003 <sup>2)</sup> |
| Coarse sand  | $3 \sim 5.6 \times 10^{-1}$ | 1.0                           | 0.5-0.9 (Dr30-60%)       | kokusho2003 <sup>2)</sup> |
|              | $5 \times 10^{-2}$          | 0.8                           | 2.4/60=0.04              | kokusho2003 <sup>2)</sup> |
| Toyoura sand | $3 \sim 4 \times 10^{-2}$   | 1.0                           | 2.4/60=0.04              | Kokusho2000               |

出典：JICA 調査団作成

上記のパラメータを参考に、沈下速度=水膜の成長速度（液状化層からの排水量）を試算する（

表 4-16）。すべり面より下位に分布する液状化層から液状化時に排水される水量と供給継続時間について、Petobo 中央部で行った AB-1 孔・AB-2 孔をモデル化する。液状化検討による AB-1 は、深さ 12m までが液状化するため、すべり面を深さ 2m とすると液状化層厚は約 10m になる。また、AB-2 では同様に 5m 程度が液状化層厚として与えられる。透水係数は Kokusho (2003) による細砂粒子の沈降速度と浸透速度は、細かい砂ではほぼ同じとされることから、細砂とした場合には試験で計測された  $5 \times 10^{-2}$  (cm/sec) を採用し、現地で確認された礫混じり砂では、粒子が大きいほど排水量が大きくなることから細砂の倍 ( $1 \times 10^{-1}$  cm/sec) を仮定した。

動水勾配は水の単位体積重量と試料密度の関係 (0.8~1.0 程度) から、本検討では 0.8 と仮

<sup>1)</sup> Kokusho, T.: Formation of water film in liquefied sand and its effect on lateral spread, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol.125, No.10, pp.817-826, October 1999.

<sup>2)</sup> Kokusho, T.. Current state of research on flow failure considering void redistribution in liquefied deposits, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Vol.23, 585-603, 2003.



定した。これに、地震前の被圧条件を加算した動水勾配を設定した。総排水量は、液状化層体積の3%と仮定(液状化試験の体積ひずみと同程度)すると、液状化層厚10mに対して0.3mの排水が発生する。地すべり地域の面積を $10^6\text{m}^2$  ( $1\text{km}^2$ ) とすると $3\times 10^5\text{m}^3$ の水量が発生することになる。この排水に継続時間4~12分を考慮すると、毎秒 $400\sim 1000\text{m}^3$ の洪水相当の流量が液状化層から排出されることが試算された(表4-16)。この試算による流量と継続時間は、Nalodo発生時間と発生後に下流の洪水流量に相当しているものと推察される。

表 4-16 液状化層の沈下量 (=地下水排水量) の試算

| 検討ケース      | 液状化層        | 液状化層厚 | 地震前の被圧状態 | 液状化後の透水係数 k (cm/sec) | 液状化に伴う動水勾配 i | 流速 v (cm/sec) | Seepage velocity (m/min) | 総排水量 Total drainage (m) | 総排水量 (1km <sup>2</sup> あたり) (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 継続時間 (min) | 総排水量 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /sec |
|------------|-------------|-------|----------|----------------------|--------------|---------------|--------------------------|-------------------------|--|------------|---|
| 細砂被圧なし 5m  | 細砂          | 5m    | なし       | $5\times 10^{-2}$    | 0.8          | 0.04          | 0.024                    | 5m*3%=0.15m             | 150,000  | 6.25       | 400                                       |
| 細砂被圧あり 5m  |             | 5m    | 2m       |                      | 1.2          | 0.06          | 0.036                    |                         |  | 4.17       | 600                                       |
| 細砂被圧なし 10m | 細砂          | 10m   | なし       | $5\times 10^{-2}$    | 0.8          | 0.04          | 0.024                    | 10m*3%=0.3m             | 300,000  | 12.50      | 400                                       |
| 細砂被圧あり 10m |             | 10m   | 2m       |                      | 1            | 0.05          | 0.030                    |                         |  | 10.00      | 500                                       |
| 粗砂被圧なし 10m | 細粒分混じり礫混じり砂 | 10m   | なし       | $1\times 10^{-1}$    | 0.8          | 0.08          | 0.048                    | 10m*3%=0.3m             | 300,000  | 6.25       | 800                                       |
| 粗砂被圧あり 10m |             | 10m   | 2m       |                      | 1            | 0.1           | 0.060                    |                         |  | 5.00       | 1,000                                     |

出典：JICA 調査団作成

表 4-17 室内液状化試験の繰返し後体積ひずみ(%)

| 試料番号     | 供試体番号 | 繰返し後体積ひずみ $\epsilon$ V% | 平均体積ひずみ $\epsilon$ V% |
|----------|-------|-------------------------|-----------------------|
| Petobo   | 1-1   | 2.386                   | 3.6                   |
|          | 1-2   | 3.267                   |                       |
|          | 1-3   | 3.681                   |                       |
|          | 1-4   | 3.798                   |                       |
| Petobo-2 | 2-1   | 3.944                   | 3.5                   |
|          | 2-2   | 3.092                   |                       |
|          | 2-3   | 3.702                   |                       |
|          | 2-4   | 3.763                   |                       |
| Lolu     | 1-1   | 3.363                   | 3.3                   |
|          | 1-2   | 2.871                   |                       |
|          | 1-3   | 2.693                   |                       |
|          | 1-4   | 4.410                   |                       |
| Lolu-2   | 2-1   | 3.741                   | 3.8                   |
|          | 2-2   | 3.833                   |                       |
|          | 2-3   | 3.876                   |                       |
|          | 2-4   | 3.814                   |                       |
| Jono Oge | 1-1   | 3.082                   | 3.8                   |
|          | 1-2   | 3.815                   |                       |
|          | 1-3   | 3.423                   |                       |
|          | 1-4   | 4.875                   |                       |

出典：JICA 調査団作成

実際には、液状化層は均質な砂層ではなく、シルト層と互層をなし複雑と思われるが、試算された流量と流出継続時間は、地盤流動が何らかのきっかけで発生した場合に、その流動層の強度を発現しないために必要な水の添加に寄与するかもしれない。地すべり流動が持続し長距離流動となるための条件として、下面から添加する地下水の影響を評価することが出来れば、より説得

性のある長距離地盤流動の説明が出来ると考える。

ただし、この場合でも地震後 1 分程度の時間では液状化層厚を 10m としても、2.4～5cm に相当する余剰水が排水される程度であるため、極薄い水膜で広範囲の地盤流動が発生しうる条件が必要である。

## 第 5 章 長距離流動の発生要因の評価及び分析

本技術協力において、Nalodo の長距離流動の発生要因を解明するために、第 3 章現地調査及び第 4 章地質解析で述べた様々な調査、試験及び解析を行った。国内支援委員会において、これらの内容に対して指導をいただきつつ、発生要因やメカニズムについて議論いただいた。その結果、この Nalodo という現象が極めて複雑な故、その発生要因やメカニズムに関する理論を一つに絞り切るとは困難であるとの結論に至った。しかしながら、Nalodo が発生した地形地質の特徴、地震動特性、地盤流動のトリガー、流動層の残留強度低下要因、灌漑水路の影響等については、一定の共通の見解を導き出すことができ、その見解を基にして、ハザードマップの精緻化や、防災・減災策の概略計画について提言することができた。今後は、これらの提言を踏まえ、設計・施工がすすめられるが、継続的な調査・モニタリング及び研究がなされるべきことが期待される。

本章では、この国内支援委員会で議論いただいた Nalodo の長距離流動の発生要因の評価及び分析について述べることとし、各委員の個別見解が集約された貴重な学術論文は、各委員に了承いただいた上で、第 8 章に掲載させていただくこととした。

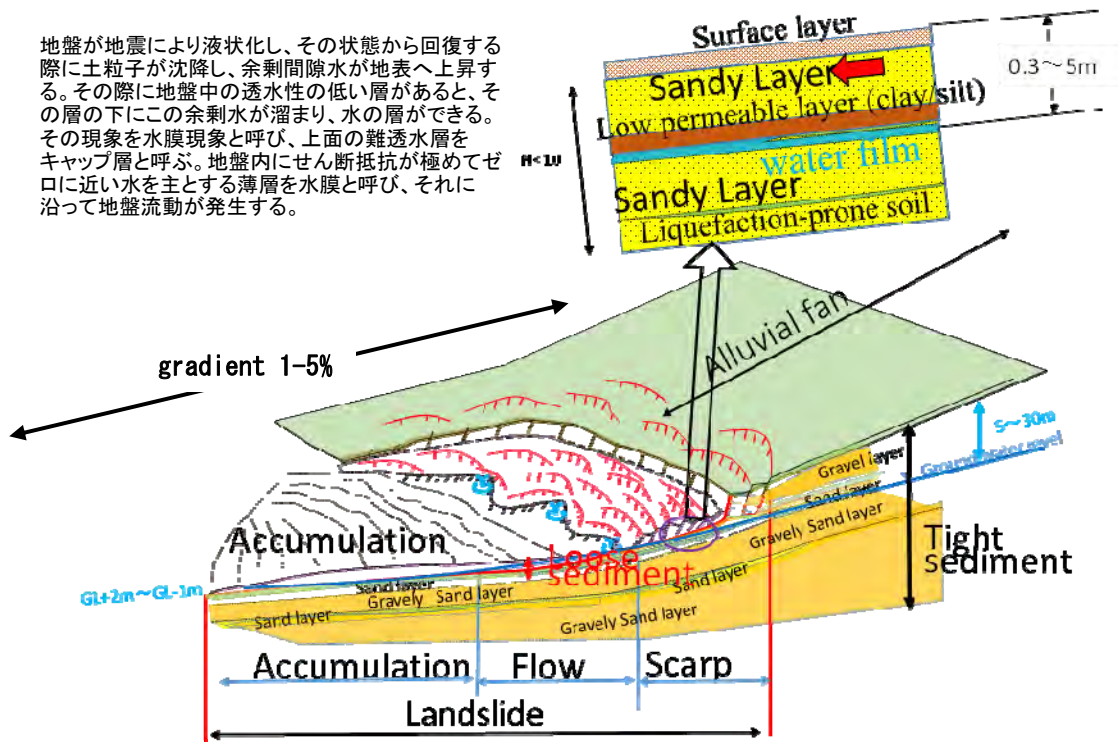
### 5-1 地形地質の特徴

Palu 低地は、活動性の著しく大きいプレート境界型の横ずれ活断層によって形成され、低地の西縁は Palu-Koro 断層、東縁は正断層系によって陥没している。このため両岸山地からの碎屑物供給により広大な扇状地が形成されている。完新世（約 1 万年前より新しい）堆積物の厚さは、Palu 川河口付近で 60m 程度、被災地域の扇状地で 10～15m 程度であり、土石流の到達していない緩斜面（勾配 1～4%）では、未固結の砂層・シルト層が地表面とほぼ平行に互層として堆積している。また、基盤岩山地の集水域から流下する季節河川は、被災地のの上流で扇状地に伏流し、被災地域で湧水帯（被圧）を形成している。Nalodo の発生場所は小型扇状地の扇端でそれより下位に分布する大型緩傾斜扇状地の境界微低地に当たり、これらの素因となる条件は、液状化環境（緩い砂質土・浅い地下水位）及び地表面とほぼ平行なキャップレイヤー（細粒難透水層）<sup>※1</sup>を挟在させ、必要な滑動力の起源となる斜面勾配を作っている。（図 5-1 参照）

---

<sup>※1</sup> ; 地盤が地震により液状化し、その状態から回復する際に土粒子が沈降し、余剰間隙水が地表へ上昇する。その際に地盤中の透水性の低い層があると、その層の下にこの余剰水が溜まり水の層ができる。この現象を水膜現象と呼び、上面の難透水層をキャップレイヤーと呼ぶ。地盤内にせん断抵抗が極めてゼロに近い水を主とする薄層を水膜と呼び、それに沿って地盤流動が発生する。

地盤が地震により液状化し、その状態から回復する際に土粒子が沈降し、余剰間隙水が地表へ上昇する。その際に地盤中の透水性の低い層があると、その層の下にこの余剰水が溜まり、水の層ができる。その現象を水膜現象と呼び、上面の難透水層をキャップ層と呼ぶ。地盤内にせん断抵抗が極めてゼロに近い水を主とする薄層を水膜と呼び、それに沿って地盤流動が発生する。



出典：JICA 調査団作成

図 5-1 Nalodo の発生場所（イメージ）と水膜に伴う地盤流動現象

沖積地盤の緩斜面において、地震に伴う地盤の液状化により、地盤の側方流動（移動距離が数m～数10m程度）が発生することは一般に知られた現象であるが、発生場所が内陸部の扇状地であること、流動距離が500mを超える大規模なもので複数箇所が同時に発生した類似事例は知られていない。液状化のリスクとしては、同じ沖積地盤であっても河川や海浜でリスクが高く、扇状地では液状化自体の発生頻度は高くない。一般に扇状地は、土石流堆積物など粗粒な堆積物から構成され、地下水位も地表近くまで飽和していることが希であることによる。ただし、Paluにおける扇状地は、高位にある小型の扇状地は土石流堆積物などの粗粒堆積物から構成され地下水位も深い、その下位（Palu川側）に広がる緩傾斜の大型扇状地は地形勾配が5%より緩く、構成される堆積物も砂層やシルト層の氾濫原堆積物が表層付近を覆っている。堆積物の起源となる集水域の基盤岩は、東側では花崗岩質の変成岩類、西側のBalaroaでは花崗岩の貫入岩帯で結晶の砂粒子を主体とする。Nalodoの発生していない西側のBalaroaより南側の地域では白亜紀の堆積岩類より構成される。



## 5-2 長距離流動の発生機構の分析とリスク評価

### 5-2-1 素因及び誘因の概要

Nalodo の発生した場所は、地震発生前から地下水が浅く、ゆる詰め砂質土が厚く分布し、キャップレイヤーとなる細粒土層が挟まれる地域であった。また、扇状地内の被圧地下水が発生する場所であった。これらの素因の場所において、強い地震動が発生したため、液状化が発生した。しかし、誘因となる地震規模は、Balaroa で観測された地震波形記録において卓越周期は大きいものの加速度は著しく強くはないため、流動距離が数 10m 程度の側方流動は起こりえても、数百 m を超える規模の地盤流動が液状化単独で起こりうるのか疑問を呈する考えと、扇状地地域に特有の被圧地下水の影響によって強い液状化が発生した場合には長距離流動も発生しうるとする考えの 2 つの考えが出された。それによって、液状化単独ではない誘因の検討が行われた。

### 5-2-2 長距離流動の発生メカニズムの分析

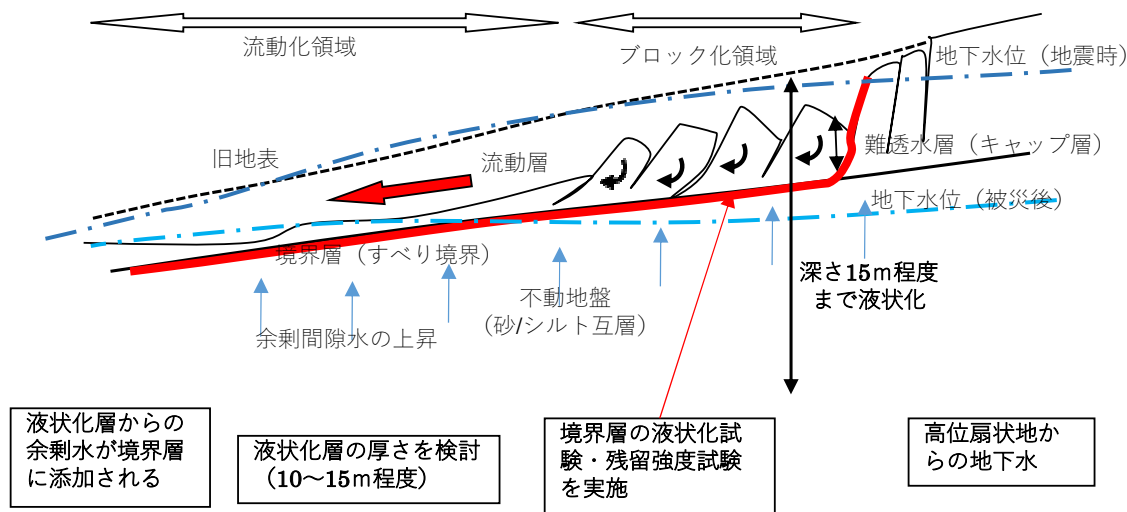
#### (1) 総評

P-S 検層、標準貫入試験及び土質試験に基づく液状化解析では、地すべり内部で流動層の下位に層厚 5~10m 程度の地層が一様に液状化し、地すべりの外では液状化自体が難しい良く締まった地盤を主体とすることが確認された。また、集積した地すべり堆積土は非塑性から塑性のある細粒土層（表土など）であることや、移動した土砂は表層土など細粒土を主体とした土塊であったことも大規模な流動化につながった要因であると推定された。また、扇状地起源の地下水は被災地域中央部付近で被圧帯水層を形成するが、すべり移動時の 1~10 分程度に流動化層（移動層と不動地盤の境界層）に供給される水は、短時間で湧出する量は相対的に少なく、扇状地や灌漑用水起源の水平方向の浸透水だけでなく、流動範囲内の下部から鉛直方向に流動化層の直下（近傍）にある液状化層から供給されたものが主体をなすことが地下水シミュレーションの結果から導かれた。一方、ビデオに残された発生時の状況分析及び被災者からのヒアリング結果からは、①地震発生時に局所的な地盤破壊が既にあったこと、②地盤流動の始まる時間が通常の液状化で考えられるよりも早く、数十秒後~1 分程度以内であること、③地盤流動継続時の湧水量が多いことが指摘された<sup>※2</sup>。「特に地盤流動の開始時期が早期である点は、通常の液状化による水膜の成長速度からすると早すぎる可能性がある。また、通常考えられる液状化起源の地下水湧出量は、扇状地起源の被圧地下水と灌漑水路からの漏水による地下水位の上昇を加味しても、実際に Jono Oge でのビデオ画像などで確認できる水量は、高さ 1m の波を発生させるに相当する大量の水が地表を覆うため、層厚 10m 程度の液状化では不足する可能性が高いと推定された。」<sup>※2</sup> なお、一般に液状化に伴う排水量は、地盤の相対密度によっても異なるが、最大体積比 5% 程度以下で 10% になることはないとされている。以上のような見解を踏まえ、本震災では液状化単独で考えられる以外に、想定される以上の強い被圧や大量の湧水が、地震発生直後に必要であるとの見解に至った。

<sup>※2</sup> ;地震直後の状況について定量的に評価出来るデータに乏しいことから、委員会で評価が分かれた。図 3-99 Jono Oge ビデオの 120sec（高さ 1m 程度の波が押し寄せた状況）

なお、日本国内で実施した乱れの少ない試料に対する液状化試験及び残留強度試験では、長距離流動に結びつく試験結果は得られなかった。また、現地材料である細粒分質砂・礫質砂を用いた水膜の成長速度は実験では確認されていない。

水膜モデルによる地盤流動の模式図を図 5-2 に示す。



出典：JICA 調査団作成

図 5-2 水膜形成による地盤流動の模式図

以下に、(2)に長距離流動の各要因に係る評価として、1) 地震動の特性、2) 地盤流動のトリガー、3) 流動層の残留強度低下の要因、4) 灌漑水路の影響等に関する評価を整理するとともに、その要約を表 5-1 に整理した。加えて、(3)に長距離流動の時系列に係る評価を、また(4)に長距離流動に係るリスク評価を述べた。

## (2) 長距離流動の各要因に係る評価

### 1) 地震動の特性

Balaroa の上部の良く締まった扇状地礫層 (地震基盤) に設置されていた強震計により合成成分での最大水平加速度 333gal の地震動の記録が取得された。これ以外の地震動記録は、震災後の停電などによって消失したとされている。地震動については、地盤条件を考慮した次元の地盤応答解析によって、液状化評価のための加速度やエネルギーを検討している。しかし、Palu で発生した地震破壊は Supershear と呼ばれ、S 波の伝播速度よりも、地盤破壊速度が大きく、地震動のエネルギーが表面波として短時間に凝縮される特徴があるとのことである (8 章 東畑委員からの提供資料参照)。しかし本報告で採用した液状化検討では、実体波と仮定した従来の考え方を踏襲して、Palu 平野内の他地点の地震動を次元の動的解析 (SHAKE) に基づき算出し、それを用いて液状化解析を行っている。表層の地盤条件がルーズな砂質土系の地盤から構成される Nalodo 発生地域は、BMKG の実測地震よりも 1.5~2 倍程度大きな加速度が発生したと解析されている。一方、1~2 階建ての軽量屋根住宅には地震動による被災がほとん

ど発生していない事象もあり、地震動は解析されたよりも小さかった可能性を指摘する意見もある。今後より詳細な検討を行う場合には、表面波の影響評価や多次元の動的解析に合わせて地震動による被害実態との関係を検討することにより、実現象に合致した地震動を評価することが望ましい。

## 2) 地盤流動のトリガーについて

地盤流動の原因としては、まず常時における扇状地起源の被圧地下水の存在が挙げられる。更に液状化砂層の上部に堆積した難透水の薄層に存在によって、液状化に伴う水膜の発生が挙げられる。地盤流動の発生は、水膜の成長を待って地盤流動が発生したものであるのか、あるいはその前の地震動直後から流動が始まったのかについて確証は得られていない。ただし、西側の Balaroa では地震直後から地盤破壊が発生したことが公開動画によって確認され、その他の Nalodo 発生地域でも、地震直後に地盤上下動・地盤破壊の爆発音が確認されている。粒子沈降に伴う水膜を形成するためには一定の時間が必要とされているので、地震直後から地盤破壊が発生している状況は、主断層とは別の副次的な断層が形成された可能性や伏在する断層沿い等からの瞬時異常間隙水圧の発生、深層地下水の噴出等の被圧地下水が寄与したと推定される(8章安田委員資料及び東畑委員資料参照)。しかし、どの可能性も地盤ヒズミなどの測地学的データや湧水の水質分析・撮影動画の分析などからの確証に乏しく、科学的な証明までできていない。ただし、安田委員の指摘されるように、Lolu 付近は南北方向の断面で見ると小高い丘になっている地域で南北延長約 10km におよぶ広範囲の側方流動が発生し、地震後に大量の水が湧き続けたことは、扇状地起源や浅い範囲の液状化だけでは発生できない現象と考えられるため、別に水の供給源が必要となる。既往の地震(1968年の Tambu 地震,  $M_w7.2$  及び 2005年 Bora の地震,  $M_w6.2$ )において、地震後に温泉が湧き出した記録が Palu 博物館に残されていることから、Palu では、地下深層からの水噴出は考えられる現象である。

## 3) 流動層の残留強度低下の要因

長距離流動を発生させた主たる要因として挙げられるのは、①土質及びその堆積特性、②地下水の被圧状態の2つである。

① 土質特性については、まず被災地域に堆積する砂質土が 20~50%の低塑性細粒分を含んでいて液状化発生後に流動しやすい土質であったか否かである。地震後に実施したピットからの不攪乱試料の実験結果によると、流動性は低いと判断された。しかし、液状化以前の自然堆積状態を想定すると、流動性が高かったことは否定できない。次に堆積特性であるが、この地域では地表面付近に有機物含んだ細粒土の薄層が一般に存在し、表層付近の 3~7m程度までは細粒土と砂質土の細互層が分布する。その下部には液状化する砂質土層が堆積している。この層が液状化すると砂粒子が浮遊状態から沈降して、余剰水が上部にある細粒土層(キャップレイヤー)で地表に移動できず、細粒土層の下面に水膜または間隙比の大きい超弱層が形成される。この弱層に沿って、土塊が流動化したものと考えられる。

②地下水の被圧状態の影響であるが、これには上述のごとく3つの原因（液状化起源・扇状地起源及び灌漑水路起源）に加えて、主断層とは別の副次的な断層が形成された可能性や伏在する断層沿い等からの瞬時異常間隙水圧の発生、深層地下水の噴出等の被圧地下水の寄与が想定される。Balaroo では1分程度、Lolu では1分半程度、Petobo と Jono Oge では5分以上の主要な地盤流動が継続している。この程度の時間、地盤流動が継続し、キャップレイヤーの部分的な破壊が進行する中でも、残留強度がほとんど復元しない条件を検討する必要がある。液状化層からの地下水供給でも、洪水を発生する規模の水が5～10分間程度湧き出ており、すべり境界層（弱層）に地下水が供給され続けることにより残留強度が低いまま維持した可能性がある。

#### 4) 灌漑水路の影響について

Palu 低地の東側では、西側に比べて多くの Nalodo が発生している（Petobo・Jono Oge・Lolu・Sibalaya）。これらは、Lolu を除いて流動化の頭部が灌漑水路に一致しているので、灌漑水路からの漏水によって地下水位が上昇したために被災面積が拡大したと考えられる。震災後に実施したボーリング調査の水位は GL-8.3～14m である（図 5-3 参照）。ボーリング調査地点は灌漑水路との距離が 10m 程度であること、近傍民家の掘抜井戸（震災前の水位が GL-2m 程度）が震災後に井戸涸を発生していることから、震災後に灌漑水路からの地下浸透がなくなったことによって水路周辺の地下水位が 5～10m 低下したことが判る。また、Lolu においても、震災直後は地表面を地下から湧き出した水が覆い、灌漑水路からの地下水供給がなくなった震災1月後の水位は GL-5m 程度まで低下している。これらのことから、灌漑水路（幹線と枝線）が地表面近くまで地下水位を上昇させ、広範囲の液状化環境を成立させたものと考えられる。しかし、灌漑水路のない西側の Balaroo でも同じ Nalodo が発生しており、扇状地扇端の湧水帯（浅い地下水位）を保持している。灌漑水路があることが Nalodo 発生の主体となる要因ではなく、液状化の必要条件である浅い地下水の分布地域を拡大させたことで、被災規模が大きくなった要因として考えられる。

ボーリング調査（LP-1・J-13・J-1 及び J-9）は、灌漑水路幹線の直近で行っており、何れも灌漑水路底面よりも震災後の地下水位が低いことが確認されている。



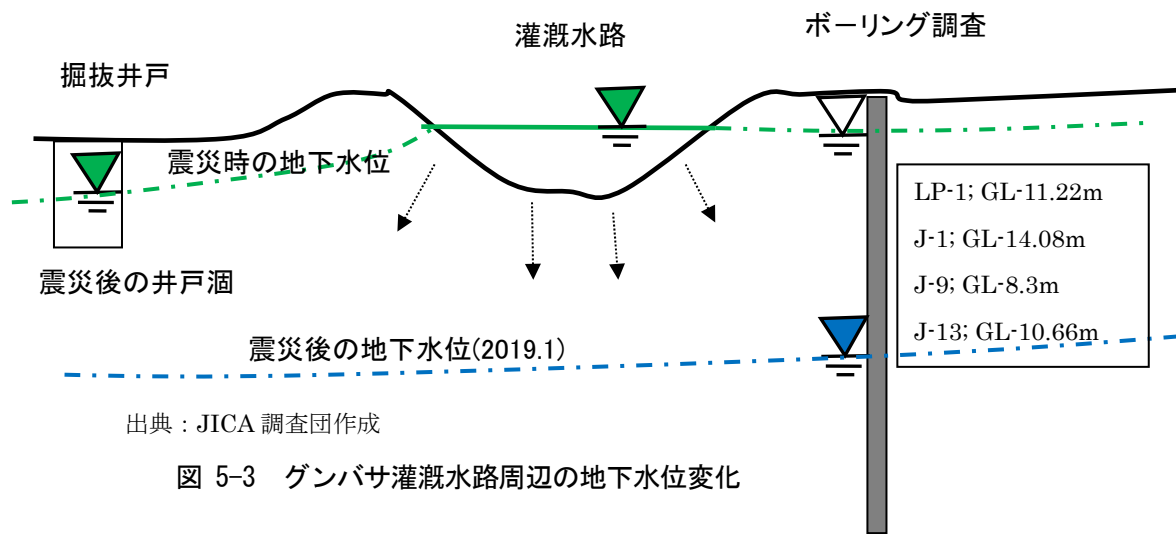


図 5-3 グンバサ灌漑水路周辺の地下水位変化

表 5-1 長距離流動の発生機構の評価分析概要

| 分類項目                     | 仮説  | 一定の共通意見  |
|--------------------------|---|--|
| 1 地震動の特性                 | 地震破壊形態と発生地震動の特徴（表面波・Supershear）   | 表層地盤では表面波（ラブ波）がより増強されるため、液状化がより強く発生する。また Supershear が発生したとすれば、強い Directivity によるエネルギー集中も発生する（研究段階であるため、可能性のみ指摘）。   |
|                          | 地盤構造による地震動の増強（基盤面からの反射増幅）（阪神淡路の事例）  | （基本的には SH 波重複反射により考慮済み）  |
| 2 地盤流動のトリガー              | 滑動力（重力性）  | ヒアリングの結果から、地震による水平振動に起因した地盤流動の開始は認められない。地盤の上下動を感じ、その一定時間後に地盤の流動を感じていることから、滑動力は重力と考えられる。  |
|                          | 被圧地下水の影響<br>（何らかの地下深所からの水噴出を前提としないと、この現象は起こりえない）  | 西側の Balaroa と東側の Lolu では主要動の約 20 秒後に地盤流動が開始し、約 1 分で主要な動きが完了する。東側の Petobo と Jono Oge では、場所によって異なるが、動き始める時間は主要動からすぐか、1 分以内である。規模が大きく移動距離も長いので、完了までには 5 分以上かかっている。初動の時間が早いことは、ダルシー則による浸透や砂粒子の沈降速度に一致する水膜の形成では説明が難しく、 <b>地下深所からの水噴出などの強い被圧が必要</b> と考えられる。強震と同時にもしくはすぐに、地盤破壊や異常な上下動を伴うこともこれを示唆する。 |
|                          | 深層水の高い圧力が地震で割目が繋がって浅部に伝わり地下水が噴出   | Palu 付近は 3 つのプレートの三重重合点にあたり、また活発な横ずれ断層によるプリアパート堆積盆に位置する。したがって、スラブ起源とか、ジオプレッシャーなどの深部からの圧力水に浅部の地下水が加わって、岩盤の割れ目などを通して湧水帯で常時湧き出していることが考えられる。そして、地震時に断層変位が発生したことによって割目が繋がり、深部からの加圧によって浅部の地下水が押し上げられて噴き出したことが考えられる。実際に Petobo では地震時に温水が噴き出したのとの証言がある。また、既往の地震でも地震後に温泉が湧き出した事例がある。                  |
| 断層の急速な動きにより浅部の地下水が沸騰して噴出 | 地震時の急速な断層変位により浅層の砂礫層内でせん断に伴う正のダイラタンシーが生じたとか、局所的にプリアパートが生じて急激な体積膨張が生じたとかで、地下水の圧力が急減して沸点が下がり、沸騰して蒸気が発生して浅部の地下水を押し上げて地下水の爆発的な噴出が生じたことが考えられる。 |  |
| 3 流動層の残留強度低下要因           | 細粒層・粗粒層の Mixing（体積収縮に伴う余剰水の発生）  | 残留強度を低下させる要因ではあるが、長時間流動化する主要因としては難しい。  |
|                          | 土粒子形状（偏平鉱物の濃集など）  | 現地土質試料の分析からは特殊な土粒子形状にはないことを確認したため、可能性は低い。  |
|                          | 非排水せん断強度（相対密度・細粒分の影響）   | 国内の試験では再現できていない。ただし、被災後の状態を確認しているため、被災前にどの程度の相対密度であったのかを評価する必要があるが、現状では難しい。  |
|                          | 液状化層起源の地下水供給  | 液状化層からの排水量を計算すると、地すべりの流動時間（5～10 分）程度に現地で発生した洪水規模の水が流動化層あるいは地表に水を供給し続けた。移動地盤に多くの難透水性を挟み、適度な層厚（3～5m 程度）があったことも流動化層の排水が完了せずに流動化状態を継続させたと思われる。地震直後の早い段階で短時間の高い被圧によって、水膜が形成され、流動が開始された条件では、液状化層からの排水が流動層に加わり続けることで、流動化状態が持続できる可能性がある。明瞭な堆積  |

|           |              |  |
|-----------|--------------|--|
|           |              | 域を形成した <b>Balaroa</b> と <b>Petobo</b> では、流動化域と堆積域は地盤の液状化の程度で区別されているように見える。               |
|           | 扇状地起源の被圧水の添加 | 一定量が湧出する条件にあり、影響はあるものと推定される。ただし、発生地域の透水性を相当程度大きくしない限り、量的には寄与度が低い。                        |
| 4 灌漑水路の影響 |              | 東側の被災地域の地下水位を上昇させ被災規模を拡大させた。ただし、灌漑水路のない西側の <b>Balaroa</b> でも発生していることを考慮すると主要な要因とすることは困難。 |

出典：委員会の議論を基に JICA 調査団作成

### (3) 長距離流動の時系列に係る評価

ここでは、長距離流動の時系列で5段階に分けて整理し、各段階の状況について考察した(図5-4参照)。

- ① **Nalodo** の発生した場所は、大型の扇状地に挟まれた微低地で、高位にある小型扇状地の先端湧水帯(遷緩線付近)に位置するため、地震発生前から地下水が浅く、被圧条件にある。また、堆積物は小型の扇状地より低位に位置するため、氾濫原堆積物を主体とする沖積の砂層・シルト層が厚く堆積している。表層付近は湿地に堆積する表土なども分布し、難透水性で液状化地盤から排水する余剰水を溜める細粒土層が挟まれていた。地形勾配の変換点となるこの位置には、断層が伏在する可能性が高く、深所からの水噴出の可能性の高い地域である。これらの素因の場所において、強い地震動が発生した。
- ② 地震動の発生直後に、局所的な地盤の上下動<sup>※3</sup>が認められている(ヒアリング結果)。また、地震直後に地盤が爆裂音とともに裂けた(**Balaroa** ビデオや **Jono Oge** の圧縮リッジ)ことで、地盤の局所的な隆起(圧縮)により異常な水圧が発生した可能性がある。東側の局所的な地盤変形は、伏在する正断層と同じ向きである北西-南東方向に複数あり、**Petobo** 及び **Jono Oge** の流動中心部に連続する可能性が高い。沖積・洪積からなる空隙率の高い地盤で発生した被圧あるいはそれよりも深い基盤岩などから発生した強い被圧によって、水膜の形成が助長されるとともに、地震動に加えてより強い被圧によって5~10mを超える厚い液状化が発生し、地盤が動き始めたと考えると地震後の早期に地盤流動が始まった現象との説明が可能となる。地下深所からの水噴出に加えて、強い液状化によって間隙水が排水され、水膜が形成されることで地すべりが動き始める。強い被圧の発生場所は、伏在する空隙率の高い地盤であるとする、扇状地内の地盤勾配変換点に一致するため、扇端の被圧地下水の発生場所にほぼ一致する。
- ③ 地すべりが動き始めると、覆っていた土塊が高透水に変わることにより、更に大量の液状化層起源・扇状地起源・深層水起源の地下水が湧出し続ける。このため、超弱層(流動化層)が持続して、長距離流動となる。移動土塊が停止した堆積域では、地盤の液状化がほとんど発生していない場所にほぼ一致し、流動継続時間は地形勾配の大きな **Balaroa** では

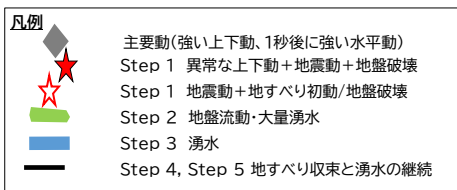
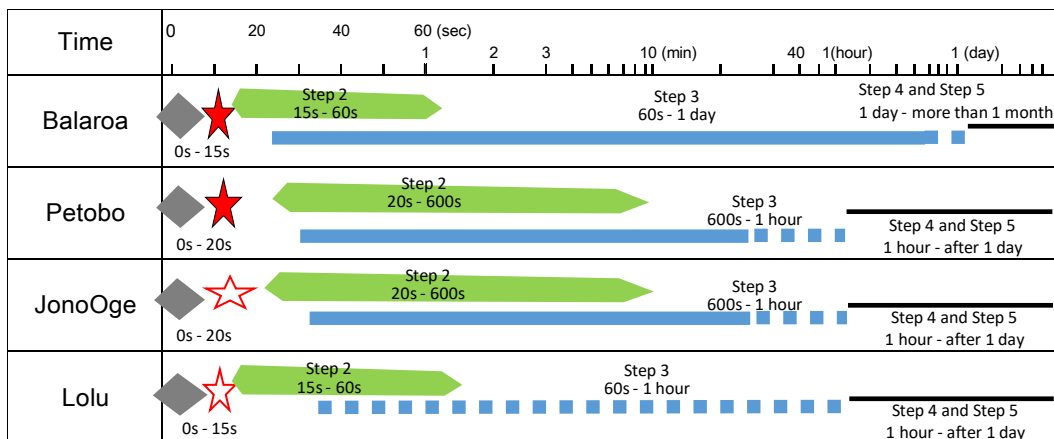
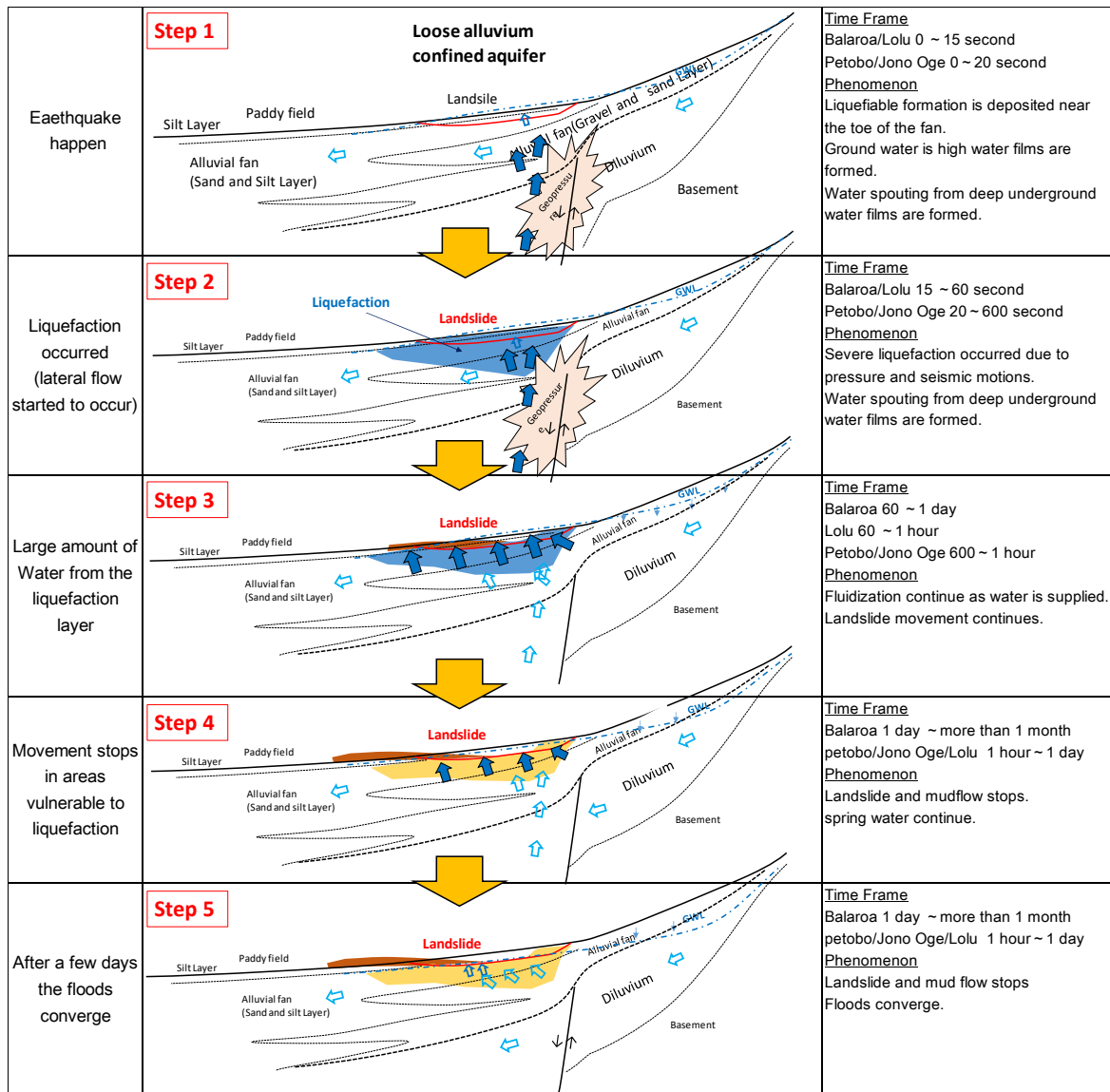
<sup>※3</sup> 地盤の異常な上下動・上下震動は、パニック状態での被災者の記憶が、地盤流動の直前で発生した事象であるのか、地盤が側方へ動き始めたことによって発生した事象であるかの判断が難しく、委員会の中で意見が分かれた。

短く、勾配が緩く移動距離の大きな Petobo と Jono Oge では長かった。リスクの高い場所は、液状化環境（浅い地下水位・ルーズな液状化対象層の分布域）に一致する。

- ④ 液状化の発生していない場所では、地面から湧き上がる水の供給が途絶え、超弱層が消滅して行くことになる。停止した移動土塊は、後続する移動土塊に押され、集積し、Balaraa 及び Petobo では高さ 5m 程度の丘を作った。移動土塊に大量の水が加わった Jono Oge は、砂泥流となったために圧縮堆積域をほとんど作っていない。
- ⑤ 地すべり停止後も液状化層からの水が排出され続けることに加えて、上位の小型扇状地からの湧水が長時間継続する。扇状地起源の地下水は半日程度で低減するが、1 週間あるいは 1 月以上の長い時間をかけて及び定常に達するまで湧出し続けるため、Nalodo の下流域では一定期間洪水が発生した。

伏在する断層が、強い被圧や深層からの湧水の経路とすると、地形条件から抽出される小型扇状地の扇端付近に一致し、地下水条件・ルーズな液状化対象層の分布域を加えることによって、Nalodo の発生場所のリスク評価が可能と考えられる。





出典：委員会議論を基に JICA 調査団作成

図 5-4 長距離流動の発生メカニズムと時系列

#### (4) 長距離流動に係るリスク評価

地震の発生リスクは、今次災害規模の地震発生頻度が約 100～数 100 年サイクルとすると、今後数 10 年では同規模の災害の発生確率は低く、周期に近づくに従って地震発生確率・災害発生確率が高くなる。地震の規模は異なるが、1907 年以降 10～30 年間隔に Mw6.0～Mw7.6 クラスの地震被害が Palu 周辺で発生している。液状化に限定したリスクであれば、同一箇所でも再発する可能性が高いことが知られているため、表層のキャップレイヤーが 100 年程度の期間で復元（水田の復旧）すると、地下水位条件・液状化土層・斜面勾配・被圧地下水などの素因のすべてが満足する場合に再発する可能性が高いと評価できる。地下深所からの水噴出を古い断層破碎帯などに求めると、同じ場所で異常水圧や水の噴出が発生すると考えられる。また、その規模は同一規模である可能性が高い。これ以外の要因である地震破壊特性（Supershear など）は、予測が難しいため同一規模・同一地域に発生することを前提とする。

前項で議論した長距離流動のメカニズムでは、地盤流動の初動時間が早かったことから、異常な被圧が発生したことを議論した。ただし、異常被圧の発生機構については、8 章に各委員の見解が述べられているが、20～100m 程度の沖積・洪積地盤であるのか、それよりも深部の基盤岩で発生したのかは詰められていない。ただし、伏在する断層などに異常水圧が発生したとすると、発生位置はある程度固定することが出来る。地下深所からの水噴出などの強い被圧（伏在する正断層沿いの圧縮などによる）、深層水（温泉）噴出（伏在する断層等を経路とする）あるいは扇状地起源の想定よりも高い被圧などが長距離流動には必要とした。

その前提条件として調査初期段階から考えられた浅い地下水位条件、長大な緩斜面、ルーズな液状化対象層、扇状地起源の被圧、表層付近のキャップレイヤーの 5 項目を満足する場所でリスクが高いことには変わりはないと考えられる。なお、東側地域の側方流動の発生範囲が南北方向に 10km と広大であることと、地すべりの初動時期が早かった可能性が高いことは、何らかの突発的な被圧が広範囲に発生し、水膜の急成長により流動化が発生したと考えられる。

## 第 6 章 ハザードマップの精緻化及び参照マニュアルの作成

### 6-1 概要

本技術協力では、複合災害という視点から Nalodo、津波、地震、洪水、土砂災害の各種リスクを評価した上で、情報を統合的に整理し、リスク評価の精緻化と併せ、ハザードマップ作成の支援を行うことが主たる活動内容であり、6-2 項以降では、Nalodo に関する内容を抜粋し述べるものとする。

収集資料や JICA 調査団が実施した各種現地調査結果をもとに、各災害発生要因を分析し、更に、将来的に津波、Nalodo、地震、洪水、土砂災害が発生する可能性の高い地域を設定した。ハザード評価やハザードマップ作成にあたっては、科学的な歴史地震の記録が乏しいことから想定地震及び津波の規模は、今次災害と同規模と想定した。

特に今次災害で発生要因が特殊であった津波と Nalodo における発生メカニズムやハザードレベルの設定方法、対策工の概略計画の検討に際しては、複数の学識経験者からなる国内支援委員会の助言を得ながら検討を進めた。

なお、このハザードマップとは、日本では一般的に、自然災害による被害の軽減や防災対策に使用する目的で、被災想定区域や避難場所・避難経路などの防災関係施設の位置などを表示した地図を指す。しかしながら、本技術協力では、インドネシア国の方針に基づき、「空間計画、土地利用計画案を作成する際の基礎資料となるよう、各種災害（津波、Nalodo、地震、洪水、土砂災害）のハザードを 4 段階に評価したもの」を示している。

また、ハザードマップの作成の基本条件は以下の通りである。対象エリアはインドネシア国側が 2018 年 12 月に公表した ZRB マップと同じ範囲とし、ハザードのクライテリアは、インドネシア国側が作成した ZRB マップと同様に 4 段階に区分している。（表 6-1 参照）

- スケール：1 / 25,000
- 対象エリア：2018 年 12 月に公表された ZRB マップと同じ範囲
- ハザードクライテリア：上記の ZRB マップと同様に 4 段階に区分
- ハザードマップの利用方法；地方政府（州、県、市）の空間計画に反映
- ハザードマップは、対策整備なしと対策整備ありの 2 種類を作成
- リスク評価方法の技術移転を推進

表 6-1 ハザードレベルの区分

| ZRB マップによる区分 |   | ハザードの区分 |           |
|--------------|---|---------|-----------|
| ZRB-1        | <b>Developed Zone</b><br>No Additional Regulation   | ⇒       | ハザードレベル-1 |
| ZRB-2        | <b>Controlled Zone</b><br>Middle Density Development  | ⇒       | ハザードレベル-2 |
| ZRB-3        | <b>Limited Zone</b><br>Low Density Development<br>To Prohibit New Construction<br>To Allow Reconstruction with<br>“Additional Requirement of Buildings Structure” | ⇒       | ハザードレベル-3 |
| ZRB-4        | <b>Prohibited Zone</b><br>To Prohibit New Construction and Reconstruction<br>Relocation of Existing Buildings   | ⇒       | ハザードレベル-4 |

出典：JICA 専門家作成

上記の精緻化したハザードマップ（5種の災害）について、ハザードマップ作成方法を記載したリファレンスマニュアル（津波、Nalodo、地震、洪水、土砂災害、統合）を作成した。

各災害種のハザード評価方法の概要は、表 6-2 に示すとおりである。

表 6-2 災害種ごとのハザード評価方法（案）

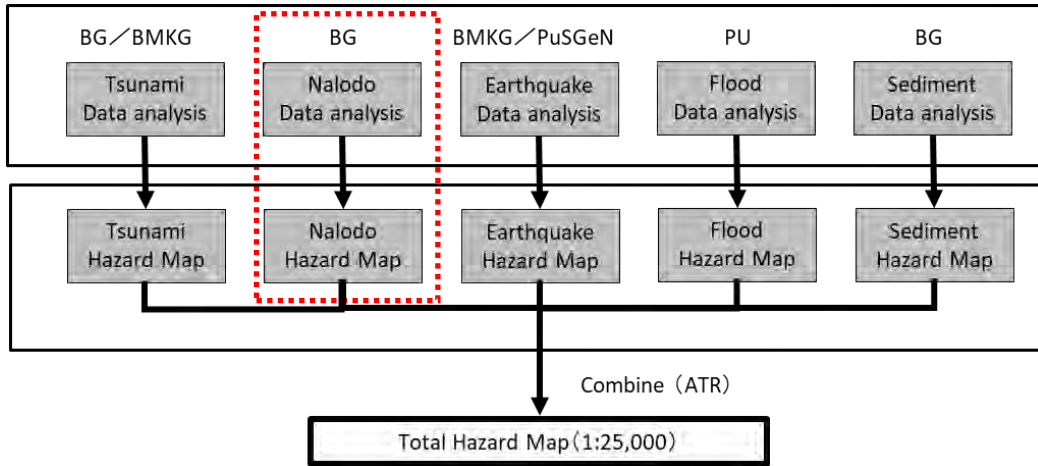
| 災害種          | ハザード評価方法   |
|--------------|--|
| 津波           | 今次津波の主な発生要因と考えられる沿岸地すべりを想定して、再現解析（シミュレーション）及び対策計算を実施したが、既存データの不足や発生メカニズムが複雑なために短期間で解析を完了することは困難と判断された。そのため、今次災害の被害状況（浸水状況及び浸水深等）の現地調査を実施し、その結果をもとにハザード評価を実施した。 |
| Nalodo       | 地すべりを伴う液状化=Nalodoの発生要因について、浅い地下水位、地形傾斜、液状化しやすい層の存在、被圧地下水、キャップ層の5要素が主に関係していると想定し、この中から比較的多くのデータが得られ短期間で評価可能な浅い地下水位と液状化しやすい層の存在を取り上げて、将来的なハザード評価を行った。            |
| 地震<br>(断層ずれ) | 今次地震で出現した地表地震活断層が再滑動した際のハザード評価を行った。  |
| 洪水           | Palu川流域及びPalu湾に流入する中小河川を対象として、RRIモデル <sup>1</sup> （降雨流出氾濫解析モデル）を構築し、ハザード評価を行った。氾濫特性・浸水深に大きく影響する氾濫原における地形条件は、本調査で整備した被災後のデジタル地形図を用いた。                           |
| 土砂災害         | 急傾斜地崩壊と土石流について、地形勾配と流域の荒廃状況から評価した。災害が発生した地域は現地調査を実施し、衛星画像では判読できない災害発生危険度を判定した。   |

出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

また、JICA 調査団が上記のハザード評価方法に基づきハザードマップを作成した上で、インドネシア国側の災害種ごとに異なる各関係機関とハザードのクライテリア等について調整した上で、ハザードマップ作成の手順をまとめた参照マニュアルを作成した。なお、各種ハザードマップ作成のフロー（各関係機関を記載）は図 6-1 に示すとおりである。

<sup>1</sup> 流域に降った雨が河川に集まる現象、洪水が河川を流下する現象、河川を流れる水が氾濫原に溢れる現象を流域一体で予測するモデル





出典：JICA 専門家作成

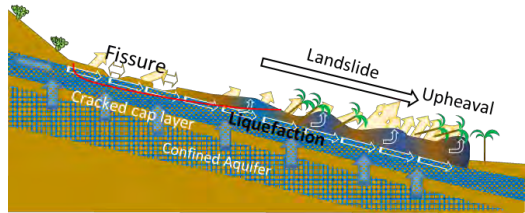
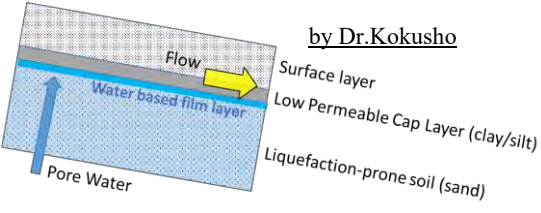
図 6-1 ハザードマップ作成フロー（津波、Nalodo、地震、洪水、土砂）

## 6-2 ハザードマップの作成方針

### (1) Nalodo の発生メカニズム

Nalodo は既往稀な自然災害であり、その発生メカニズムの解明には、今後の継続的な学術的研究が必要と考えられる。国内支援委員会でこれまで分析いただいた発生メカニズムの仮説は、複数あるが、大別すると以下に示す Water film Theory と Water ejection from earth crust Theory との 2 つが考えられる (表 6-3 参照)。前者は、國生名誉教授 (中央大学) 提唱の水膜理論であり、液状化によって排水された水がそれよりも浅い難透水層の下面に集積し、水膜として強度が著しく小さい薄層が形成されることにより地盤流動を発生させる仮説である。後者は、内陸部において液状化単独で数百 m 以上の流動を発生させた事例が見られないことから、地下深部から大量の水が放出され強い被圧と大量の上昇水が発生し、水膜の形成を促進させ地盤の長距離流動を発生させた (後者) という仮説である。この後者における地下水の強い被圧と大量の上昇水に関しては、①浅層地盤が強く液状化して地下水が噴き出した、②東と西の背後の山や灌漑用水から流れてくる浅層の被圧した地下水が噴き出した、③伏在する断層に地震動や地盤変位が発生することで、強い被圧が発生し地下水が湧き出した、といったメカニズムが考えられる。ただし、種々の地盤調査や解析などを実施したが、現象が複雑であるため、結論には至っていない。

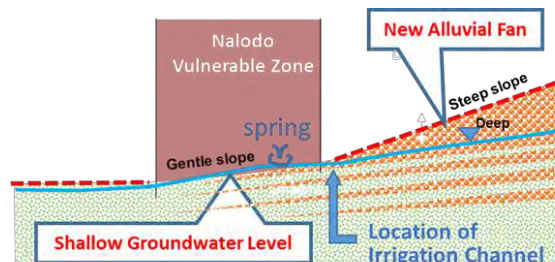
表 6-3 Nalodo の発生メカニズムの仮説

| Water ejection from earth crust Theory   | Water film Theory   |
|--|---|
|   |  <p style="text-align: right;">by Dr.Kokusho</p>  |
| <p>1. Liquefaction near the surface occurred by seismic move and it reduced friction of lateral movement drastically, then major landslide along the slope occurred by gravity.</p> <p>2. A prospective factor for sustaining the fluidized layer after the occurrence of ground flow. Simple calculations show that flood scale water generated on site during the landslide flow time (5-10 minutes) drained from the liquefied layer and continued to supply water to the fluidized layer or surface.</p> | <p>1. There was a low water permeable cap layer, consisting of clay and silt materials, under the surface layer</p> <p>2. In liquefaction, pore water could not go up across clay/silt, and the water would remain just below this low permeable cap layer and forms "water film".</p> <p>3. As friction was reduced drastically beneath the "water film", the surface layer could move downward along slope freely by gravity.</p> |

出典：國生先生の水膜理論を引用して JICA 専門家作成

なお、上記の両説では、共通して次の 5 要因が Nalodo の発生要因と想定されている。

- ①地下水位 (自然地下水位) が浅いこと
- ②地形が傾斜していること
- ③緩い砂質層が堆積していること
- ④被圧地下水が存在していること (浅層、断層の割目や破碎帯の被圧地下水)



出典：JICA 専門家作成

図 6-2 Nalodo の発生条件

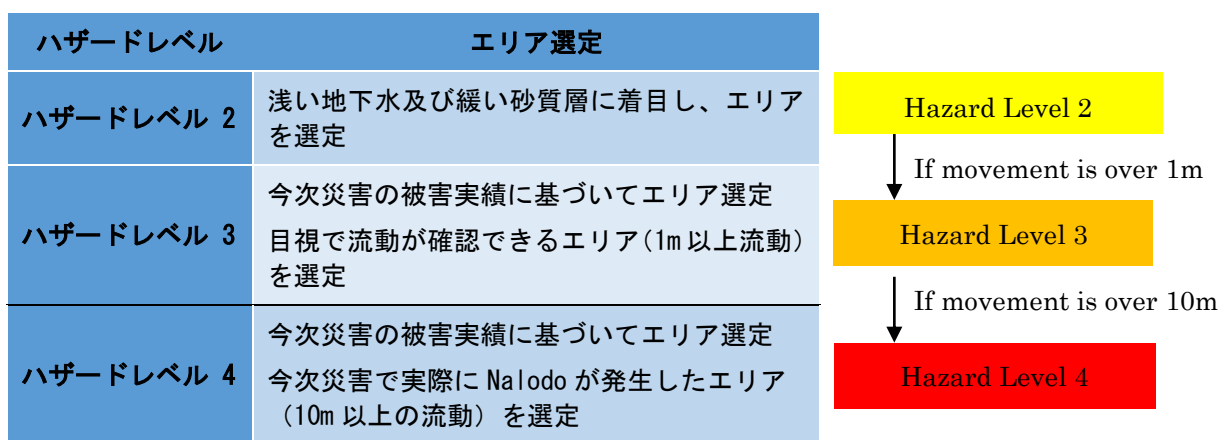
⑤難透水層が存在していること

注) ①と③は、液状化が発生する条件  
①と④、③と②,⑤は、関連性が高い

## (2) ハザードレベル設定の考え方

### 1) ハザードレベルの設定手順

復興対象エリアのハザードレベルの評価は、まず初めに、(1)で述べた発生メカニズムの仮説を基に、ハザードレベル2の地域を広域に推定し、その上で、今次災害の被災実績を基に、より危険度の高いハザードレベル3、4のエリアを絞り込む手順を採用した(図6-3参照)。



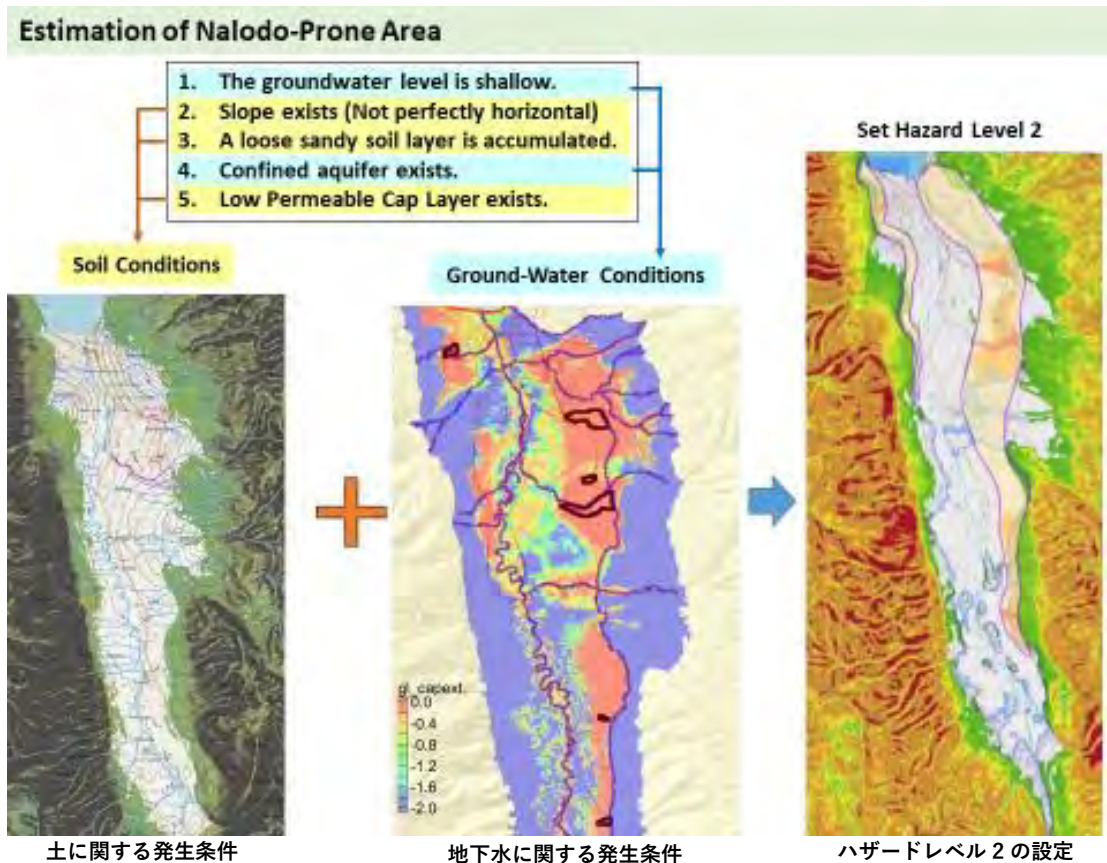
出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 6-3 ハザードレベル 3、4 の設定方法

### 2) ハザードレベル2の設定方法

ハザードレベル2の地域については、1)で整理したNalodoの発生メカニズムの仮説に基づき広域に設定した。いずれの仮説であっても、前述したNalodo発生要因の①～⑤の項目は共通となる。

以上のことから、図6-4に示すように地下水に関する発生条件(①浅い地下水位)、土に関する発生条件(③緩い砂質層)の2項目に着目し、ハザードレベル2のエリアを設定した。



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 6-4 ハザードレベル 2 の設定方法

### 3) ハザードレベル 3, 4 の設定方法

2018 年に ATR が策定した ZRB マップにおいては、1) density of liquefaction occurrences, 2) width of soil crack, 3) land subsidence, 4) horizontal displacement and 5) distribution of undulating (wavy) land の項目に着目して、クライテリアが設定されている。

一方、JICA 調査団は、地質や地下水の現地調査や既存データを用いた解析を実施し、当委員会において Nalodo 発生メカニズムに関する仮説について議論いただいたが、その科学的立証には学術的研究の継続が必要というのが現状である。こうした状況を踏まえ、Nalodo の発生地域には多くの犠牲者が出ており、また、未だに行方不明者も多いこと、Nalodo 発生エリアの安全性を確認できていないことからハザードレベル 4 については移転、ハザードレベル 3 は開発を抑制する危険地域というコンセプトを念頭に、今次災害で実際に Nalodo が発生したエリア (10m 以上の大きな流動が生じた地域) をハザードレベル 4 とし、目視で流動が確認できる地域をハザードレベル 3 に設定した (表 6-4 参照)。

表 6-4 Nalodo のハザードレベルのクライテリア (JICA)

| Hazard Level   | Phenomena   | Outline of the zone  |
|----------------|---|--|
| Hazard Level 4 | If it meets all conditions<br>High-speed fluid landslide<br>Mudflow<br>Lateral movement over 10m or vertical movement over 1m<br>The area where human disaster occurred.<br>In addition, sliding prone area | Lateral movement occurrence area this time<br>Sliding prone area |
| Hazard Level 3 | If it meets all conditions in the actual disaster<br>Lateral movement 1~10m<br>The area which did not reach human damage, but great damage occurred to farmland.  | Creep deformation occurrence area this time                      |
| Hazard Level 2 | If it meets both conditions below;<br>Easy-liquefied soil layer<br>Shallow & pressured groundwater  | --   |
| Hazard Level 1 | Except for hazard level 4, 3, 2   | --   |

出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

また、Nalodo の上流部は下流が地すべりを起こしたことで支えがなくなり崩壊しており、その上流端については現地を踏査してクラック等の状況を確認し、今後の地震や豪雨によって崩壊する恐れがある地域を特定し、ハザードレベル4に追加した。

なお、Nalodo の下流部については、上流部からの土砂の流下により被災しているため、Nalodo だけではなく土砂災害も加味したハザードレベルとした。本来であれば、ハザードレベルのクライテリアを設定する際には、上流域、下流域で、その災害特性を把握した上で評価することが望ましいが、現段階における Nalodo 発生メカニズムの分析では、それを加味することが困難であるため、反映していない。

一方で、2018 年の Nalodo ハザードマップを作成した BG の担当者と協議を重ねた結果、BG 作成のハザードマップのハザードレベルの評価基準を、JICA 作成の Nalodo ハザードマップのクライテリア（表 6-4 参照）と合わせるために以下のようにレベルを調整して重ね合わせることにした。

BG のハザードレベル4は、目視で流動化現象を確認できる範囲であることから、JICA のハザードレベル3と同等と評価し、また、BG のハザードレベル3は、小規模な液状化が発生した範囲を設定していることから、JICA のハザードレベル2と同等と評価した。更に、BG のハザードレベル2は、小規模な液状化も発生していない範囲を設定していることから、JICA のハザードレベル1と同等と評価した（表 6-5 参照）。



表 6-5 マップ統合のための BG と JICA のハザードレベルのクライテリアの調整

| BG クライテリア                |  | JICA クライテリア                 |
|--------------------------|--|-----------------------------|
| BG Original Colour       | Criteria   | JICA Adjusted colour        |
| Hazard level 4<br>RED    | High density of liquefaction occurrences (more than 25% per liquefaction location)<br>Soil crack > 5 cm<br>Land subsidence > 10 cm<br>Horizontal displacement > 5 cm<br>Widespread of undulating (wavy) land | Hazard level 3<br>Orange    |
| Hazard level 3<br>Orange | Localized liquefaction (spot per spot)<br>Soil crack < 5 cm<br>Land subsidence < 10 cm<br>Horizontal displacement < 5 cm<br>Undulating (wavy) land could be occurred   | Hazard level 2<br>Yellow    |
| Hazard level 2<br>Yellow | No liquefaction<br>Soil crack < 1 cm<br>No Land subsidence<br>No Horizontal displacement<br>No Undulating (wavy) land  | Hazard level 1<br>No colour |

目視で流動化が確認できる範囲

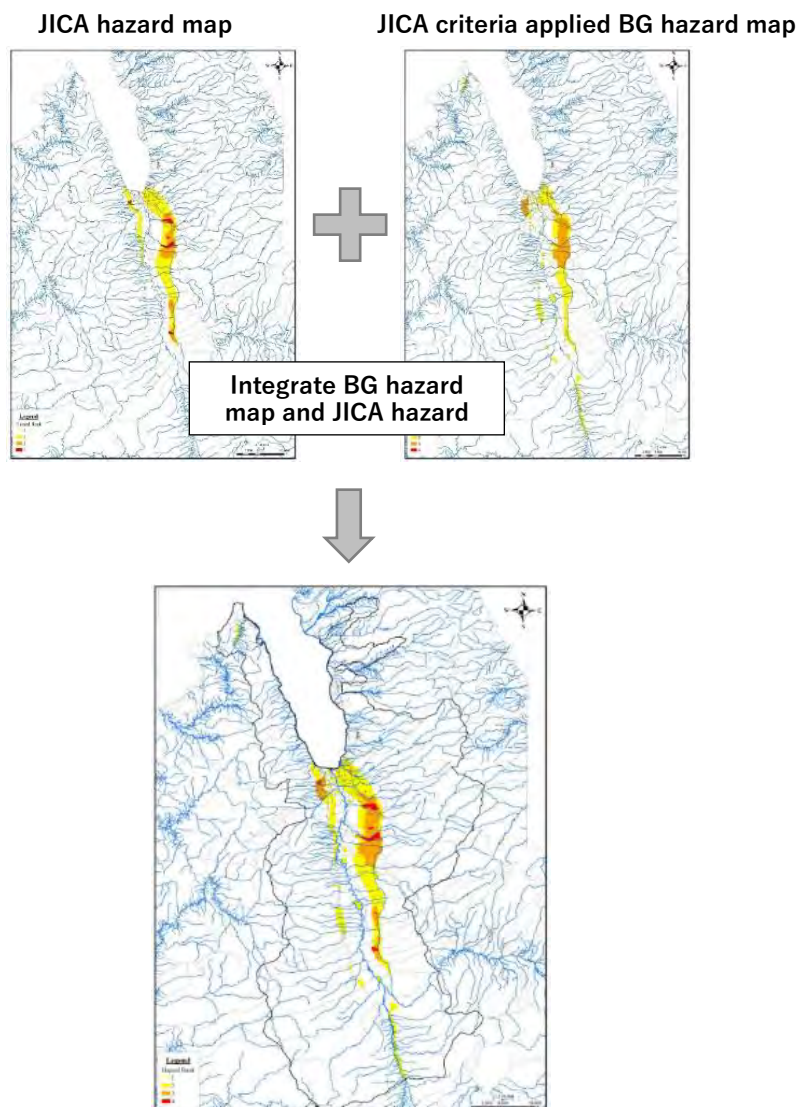
小規模な液状化発生が確認できる範囲

出典：BG 提供データに基づき JICA 専門家作成

なお、最終的なハザードレベルを重ね合わせる際（ハザードレベル調整後の BG のマップと JICA マップ）には、ハザードレベルの高い方を採用している。

### 6-3 精緻化後の Nalodo ハザードマップ

JICA 調査団が作成した Nalodo ハザードマップと、ハザードレベルを調整した後の BG の Nalodo ハザードマップを重ね合せたものを図 6-5 に示す。



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 6-5 Nalodo ハザードマップ

なお、復興支援プロジェクトとしての時間的制約下における Nalodo ハザードマップ精緻化作業は完了し、インドネシア国関係機関に提出した。しかしながら、Nalodo の発生メカニズムや各発生要因には一部未解明な部分も残されている。今後、より精度の高いハザードエリアの設定には、液状化層の分布・過剰間隙水圧の発生場所の特定など、さらなる学術的な検討が望まれる

## 第 7 章 Nalodo に対する防災・減災策案

### 7-1 対策工の基本方針

ハザードマップは、Nalodo に対する防災・減災策の実施「前」と「後」の条件で作成されることが必要となる。防災・減災策の実施前のハザードマップの作成は第 6 章で述べたが、ここでは防災・減災策を反映したハザードマップの作成のための対策工の方向性について述べた。

Nalodo の長距離流動の発生メカニズムについては、一部未解明な部分があるものの、復興支援という時間制約を有する本技術協力においては、限られた調査結果、評価分析結果を基に、防災・減災策の方向性だけは確定させ、防災・減災策実施「後」のハザードマップを作成し、空間計画やインフラ復旧事業計画に反映させる必要がある。

したがって、この Nalodo に対する防災・減災策は、今後の地下水モニタリングや試験施工、また土地利用計画などを踏まえて対策工を詳細に見直していく必要があることを前提とする。

### 7-2 対策工の方向性

Nalodo の発生条件は、①地下水位が浅いこと、②地形が傾斜していること、③緩い砂質層が堆積していること、④被圧地下水が存在していること、⑤難透水層が存在していることであり、伏在する断層沿いに強い被圧が発生したこと等が考えられる。このうち、①浅い地下水位と③緩い砂質層は、液状化が発生する条件でもある。なお、Nalodo 災害は、厚い液状化層の堆積地域で液状化層起源の多量の地下水と深部の被圧地下水が地下から供給されたために長距離流動が発生したものと考えられる。地表付近までの液状化が発生しなければ、緩傾斜の斜面で大規模な側方流動は発生し得ないため、地表面付近まで液状化しない対策を考案することが効果的であると考えられる。また、地震発生時に異常な被圧が発生する場合には、それを早期に消散させることが必要である。

従って、ここでは、Nalodo の防災・減災策として、液状化及び地すべり対策（地形条件・地盤条件・地下水条件の改善）を提案する。

一般的に、液状化及び地すべり対策には、①完全に液状化の発生を防止する「抑止工」と②液状化発生のリスクを軽減する「抑制工」に大別できる。①の「抑止工」には、砂杭（サンドコンパクションパイル）により緩い砂層の強度増加を図る工法、現地盤とセメントの攪拌杭を格子状に配列して過剰間隙水圧を封じ込める工法などがある。②の「抑制工」は地下水位を低下させる工法、地震時の過剰間隙水圧を消散させる工法等が挙げられる。①の「抑止工」により液状化が完全に発生しない程度まで改善するためには、パルにおける対象範囲が広大であることを踏まえると、膨大な事業費が必要となり、現実的な対策とは言えない。ただし、①の「抑止工」は費用対効果の観点から重要な保全対象にピンポイントで実施することには適しているといえる。

一方、②の「抑制工」は、面的に分布する地下水に着目した工法であり、①「抑止工」に比して、面的に広大なエリアの災害の発生リスクを効率的に低減できる工法といえる。したがっ

て、本技術協力では、②の地下水に着目した「抑制工」が防災・減災策に適していると判断した。

なお、地下水については、不確定要素が多く、その対策工についても実際に施工しないなどの程度効果があるのか、数値的検証が困難といえる。したがって、構造物対策に加えてモニタリング等の非構造物対策も併用して採用することが適していると判断した。さらに、BBBの観点から、空間計画における土地利用規制（建築規制）も併用して検討する方針とした。

### 7-3 対策工の概略計画

Nalodo 災害を軽減するためには、構造物対策とそれに連携した非構造物対策の実施が効果的といえる。ここでは、構造物対策（案）と非構造物対策（案）に分けて整理した。なお、先にも述べたが、この対策工（案）は、今後の地下水モニタリングや試験施工、また土地利用計画などを踏まえて、適宜見直していく必要がある。

#### 7-3-1 構造物対策（案）

##### （1）概要

Nalodo 災害のリスクを軽減するために必要となる構造物対策の概要を整理した。Nalodo（液状化地すべり）の被災箇所を導入すべき対策工としては、地下水低下工法及び過剰間隙水圧消散工を採用した。被災したエリアの地下水位は、地形変化や、灌漑水路の損傷などの影響から、本震災前後で大きく変化している。本震災前は自噴するような高い水頭を有した地下水面が、本震災後は地表面から平均して-3 m程度の深さとなっている。今後、灌漑水路の復旧や土地造成により、現況地下水位を再上昇させないような計画を行うことが重要といえる。

なお、その適用箇所については、空間計画で実施する土地利用計画（特に、被災箇所及びその周辺）に留意して、対策工を集中的に実施すべき箇所の検討を行った。

一方、構造物対策の地下水低下効果を確認するため、地下水モニタリングシステム（非構造物対策）についても併せて提案した。表 7-1 に、採用するリスク軽減対策工（構造物対策）を示した。①から⑤のリスク軽減対策工（構造物対策）については、費用対効果の観点から、①～④の優先度が高く、⑤については、パイロット施工などの段階的導入が望ましい。

表 7-1 リスク軽減対策工（構造物対策）の概要

| 対策工                             | 概要   | 備考            |
|---------------------------------|--|---------------|
| ①Gumbasa 灌漑水路のコンクリートシーリング及び排水施設 | Nalodo が発生した要因の1つである灌漑水路から漏水による地下水の供給をなくす対策。灌漑水路をライニングし、漏水防止を図る。また、灌漑水路の排水路を活用し、地下水を低下させる。 | 灌漑事業と連携して実施   |
| ②Paneki 川の河川改修                  | Jono Oge 地区を流下する Paneki 川の改修により河川周辺の地下水を低下させる対策。   | 河川改修事業と連携して実施 |

|                      |   |                    |
|----------------------|---|--------------------|
| ③自噴井、井戸及びグラベルドレーンの設置 | 地震時に発生する過剰間隙水圧を消散させる対策。現在も地下水が湧水している箇所（地下水位が高い箇所）をターゲットとして、自噴井、井戸を多数建設し、地下水の過剰間隙水圧の消散及び地下水低下に活用する。<br>Balaroa の北斜面の自噴井戸分布地域では災害が発生していないこと、Jono Oge 頭部の掘抜井戸設置家屋は流動を免れたこと等でも効果が検証されている。 | 土地利用計画と連携して実施      |
| ④砂防施設及び被災地上流側河床シーリング | Petobo 及び Jono Oge 地区の地下水供給原である上流域の表流水を管理し、別途有効活用する対策。被災地の上流域にある砂防施設、取水堰堤兼用施設からの止水に配慮した施設整備   | 砂防事業と連携して実施        |
| ⑤暗渠排水路の設置            | 上記の①～④の対策実施により、地下水低下効果が不足する場合に、周辺地域の土地利用計画に配慮して、暗渠排水路を設置し、地下水低下を図る対策。   | 土地利用計画、道路事業と連携して実施 |

出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

## (2) ①Gumbasa 灌漑水路のコンクリートシーリング及び排水施設

灌漑水路のコンクリートシーリング及び排水施設の整備は、Nalodo が発生した要因の1つである灌漑水路からの漏水による地下水供給を低減させる対策であり、灌漑事業と連携して実施する。表 7-2 及び図 7-1 に灌漑事業の全体概要を記載する。灌漑水路及び関連施設は、ADB 事業と JICA 事業で進められる予定である。なお、表 7-2 に示したように灌漑事業の M/P 及び F/S については ADB 側が実施し、その計画に基づいて灌漑水路下流部 (Petobo 地区; BGKn54-BGKn58 約 2.65km) を JICA 側が実施設計及び施工するものである。JICA 側が実施するプロジェクトの概要を表 7-3 及び図 7-2 に示す。

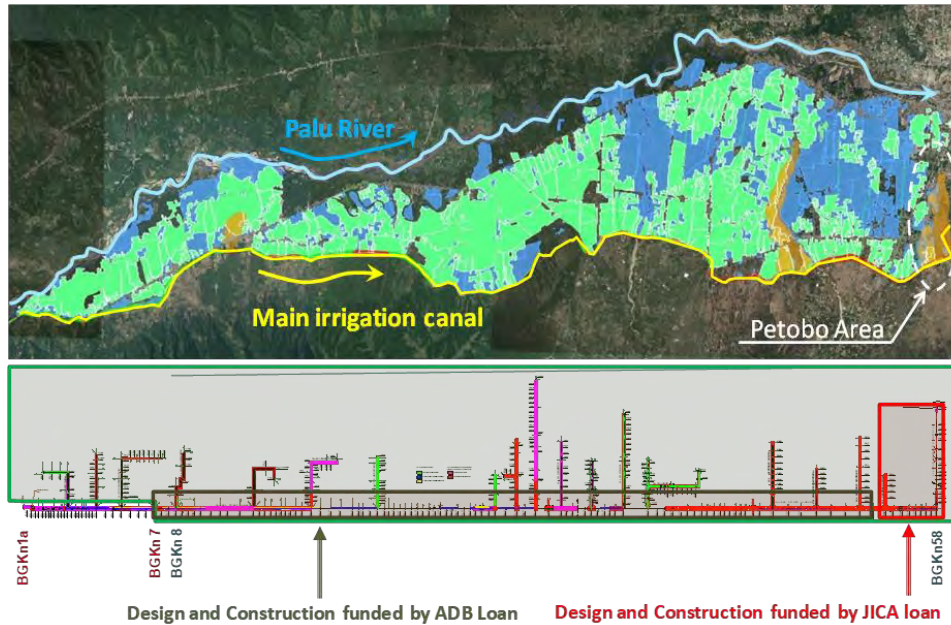
現在、ADB による M/P と F/S が検討中であるため、JICA 側で実施する表 7-2 に示した2つのプロジェクトの内容は、最終化されていない。しかし、プロジェクトのアウトラインは検討済であり、下記の JICA プロジェクト概要に記載したとおりである。M/P と F/S は、2019年9月末までには完了する予定であったが、現在実施中とのことであるため、M/P と F/S の完成後に2つのプロジェクトの設計と施工が実施される予定である。

表 7-2 灌漑水路事業の概要

| 分野 | No | サブプロジェクト   | ドナー  | 備考   |
|----|----|--|------|--|
| 灌漑 | 1  | 地震後の灌漑水路の改修 (6,790 ha ; BGKn7-BGKn54 )             | ADB  | 灌漑事業の復興・復旧に関する Master Plan と Feasibility Study が含まれている。BGKn7-BGKn54 の区間の詳細設計及び施工が含まれている。 |
|    | 2  | 地震後の灌漑水路の改修 (310ha ; BGKn54-BGKn58、灌漑排水路 4.0km 含む) | JICA | 詳細設計と施工は、上記の M/P, F/S に基づいて実施される。  |
|    | 3  | Nalodo 対策を踏まえた灌漑システムの推進 (150ha)                    | JICA | Petobo 地区周辺の灌漑施設及び灌漑地の詳細設計と施工である。  |

出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成





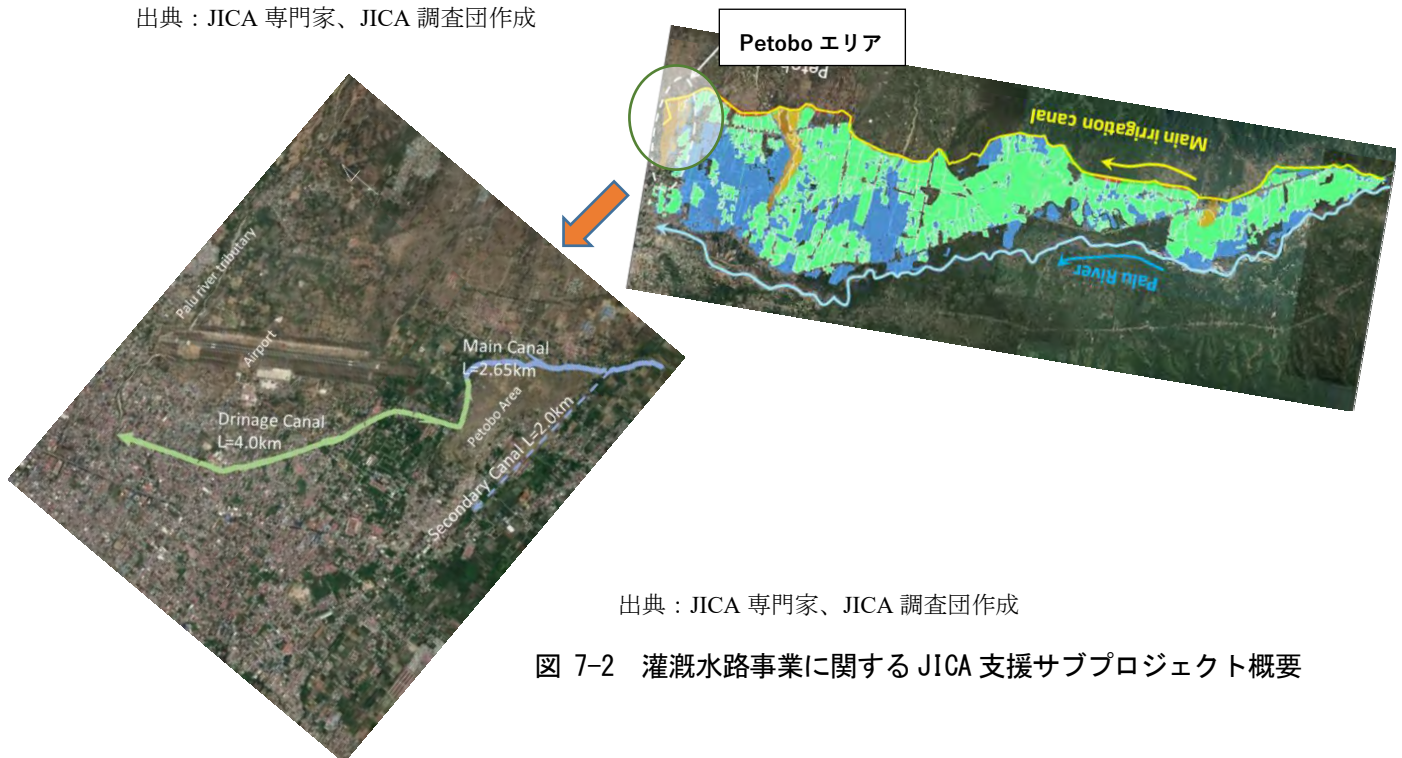
出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-1 灌漑水路事業の概要（ADB 支援事業及び JICA 支援事業）

表 7-3 JICA 支援サブプロジェクトの概要（灌漑水路事業）

| JICA プロジェクトの概要（Petobo 付近） |   |
|---------------------------|---|
| (1) Sub-project の目的       | 灌漑計画の BGKn54 ~ BGKn58 の灌漑用主要水路及び他の必要な施設の復旧・復興により農業生産を回復すること   |
| (2) 対象位置                  | Sub-project の対象地区は、灌漑水路の下流（Petobo 地区）に位置し、主要水路延長約 2.65km (BGKn54 to BGKn58)、灌漑排水路 4 km（パル市に流下）である   |
| (3) 設計・施工範囲（下図参照）         | Main canal (BGKn54 to BGKn58)の復旧 : 2.65 km<br>Secondary canal の復旧 : 2.00 km<br>Drainage canal firm BGKn58 の復旧 : 4.00 km<br>Other necessary facilities の復旧 |

出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

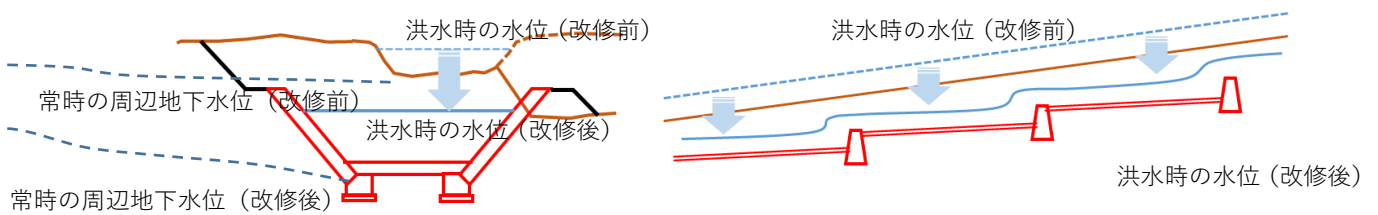
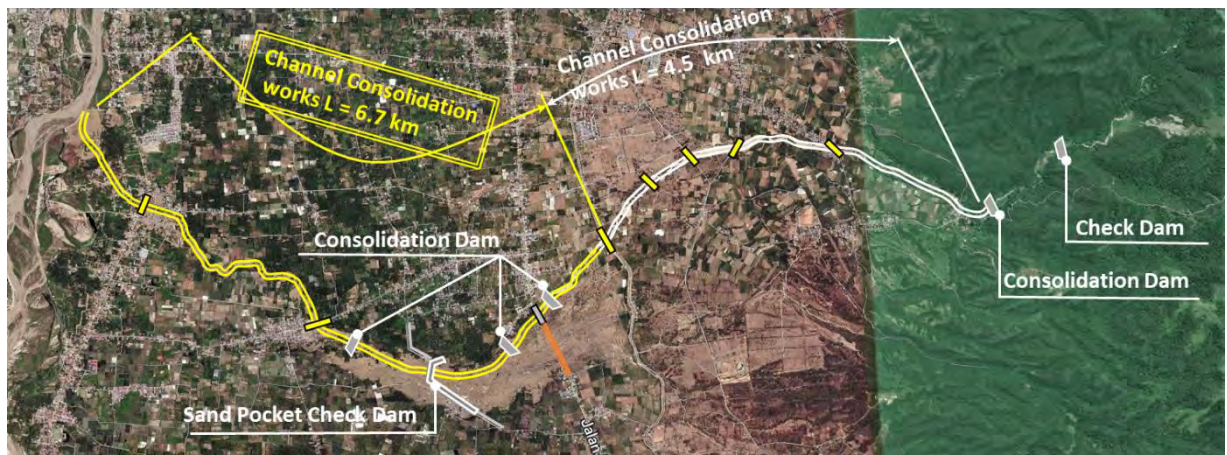
図 7-2 灌漑水路事業に関する JICA 支援サブプロジェクト概要

### (3) ②Paneki 川の河川改修

Jono Oge 地区を流下する Paneki 川は、今回の Nalodo 災害（液状化地すべり）により多量の土砂が流下し河道が埋まってしまったため、河川改修が必要となった。

Paneki 川の改修の目的は、洪水を安全に流下させるために流下能力を向上（河道拡幅、河道掘削）させることにある。河道掘削を実施することにより河床高が現地盤から-4m 程度となるため、平常時は河川周辺の地下水位を集水し流下させることが可能となる。これにより、地下水を低下させる機能も併せ持つことになり、Nalodo 対策（地下水位低下工法）としても有効になる。ただし、灌漑水路より山側の河川改修においては、表流水を地下に供給することとなるため河床をシーリングするものとする。

なお、対策工を実施するに際しては、河川改修事業と連携して実施することが望ましい。Paneki 川の河川改修サブプロジェクト概要を図 7-3 に示す。



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-3 Paneki 川の河川改修サブプロジェクト概要



#### (4) ③自噴井、井戸群及びグラベルドレーンの設置

自噴井、井戸群及びグラベルドレーンは、地震時に発生する過剰間隙水圧を消散させ、地下水位を低下させる対策であり、土地利用計画（住宅地の配置状況等を考慮）と連携して実施する。なお、Balaroo の北斜面の自噴井戸分布地域では災害が発生していない点、Jono Oge 頭部の掘抜井戸設置家屋は流動を免れた点も参考としている。

##### 1) 自噴井

Nalodo リスクの発生要因は、下記の5項目であるが、この中から地下水に関する①及び②に対応可能な対策（地下水位を低下させると過剰間隙水圧を消散させることが可能な対策）として、自噴井（図 7-4 参照）を積極的に設置する。

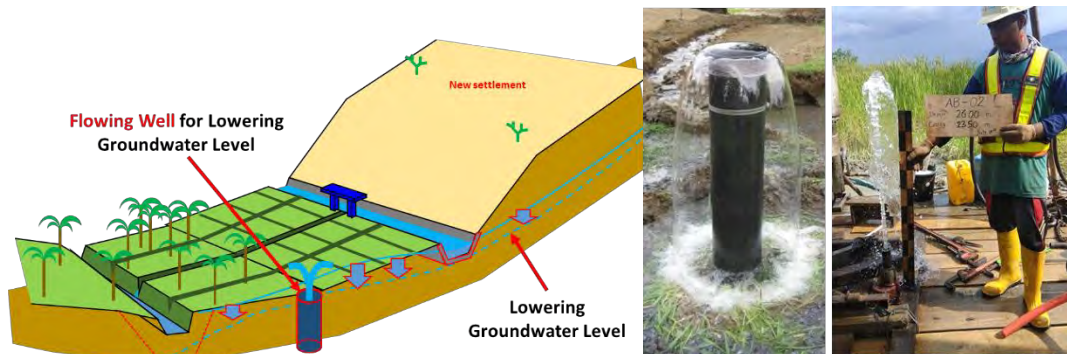
① The groundwater level is shallow.  
② Confined aquifer exists.

③ Slope exists (Not perfectly horizontal)  
④ A loose sandy soil layer is deposited.  
⑤ Low Permeable Cap Layer exists.

} 地下水対策以外の対策は非常に高価である

被圧帯水層へのボーリング（井戸の設置等）は、Nalodo 災害に対する基本的な対策である

様々な対策の中でも Flowing well は、維持管理面（目詰まりしにくい点）やモニタリング機能からも推奨できる対策である



出典：JICA 専門家作成

図 7-4 自噴井の概要

##### 2) 井戸群

基本的にハザードレベル 3 地区（民家等が点在する地区）で 5～10m 程度の井戸を設置し、地震発生時の過剰間隙水圧を消散させ、液状化を防止する対策として設置する。

なお、通常は生活用水として活用する。

##### 3) グラベルドレーン

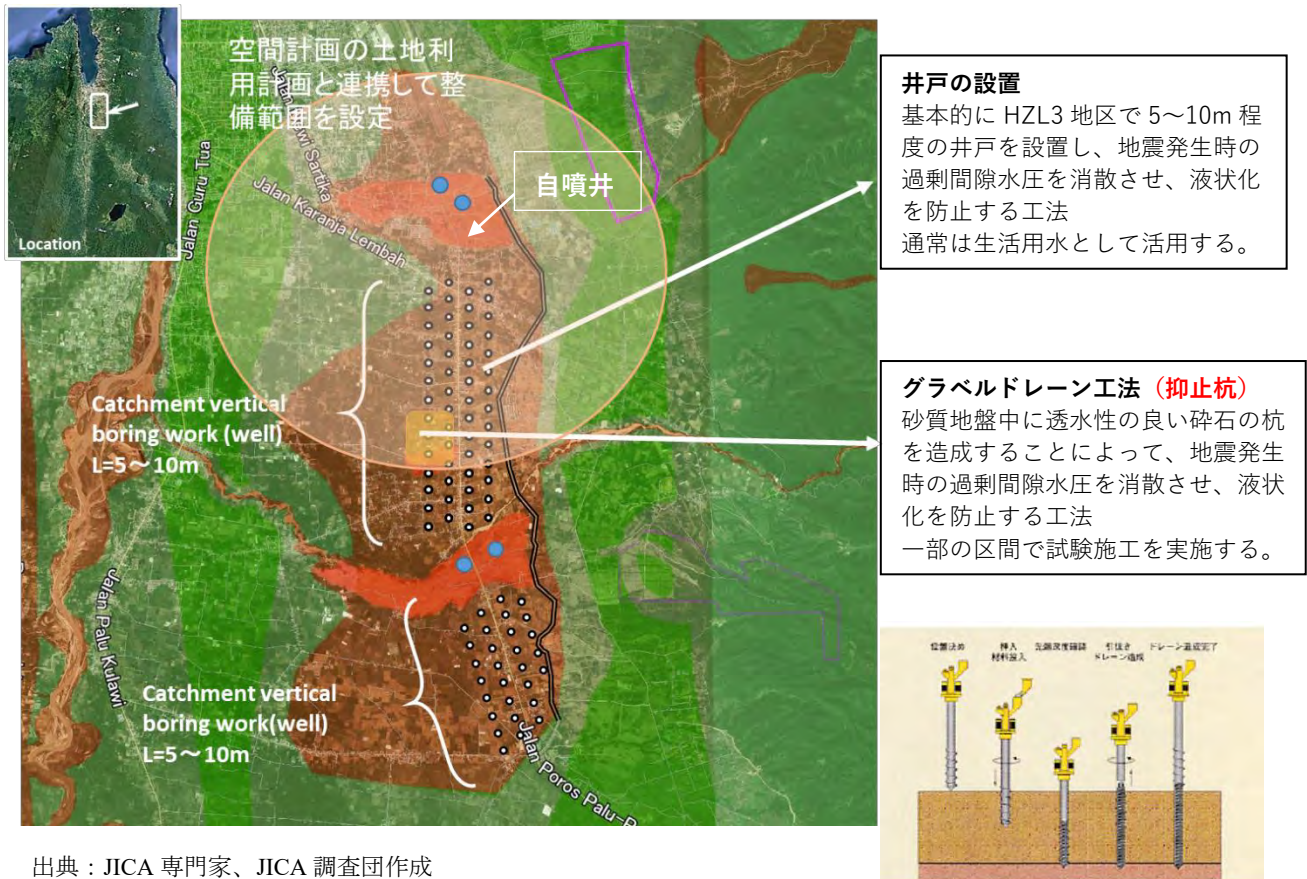
砂質地盤中に透水性の良い碎石の杭を造成することによって、地震発生時の過剰間隙水圧を消

散させ、液状化を防止する対策として設置する。

ただし、効果的な設置個所の選定が困難であるため、最初は一部の区間で試験施工を実施し、その効果等を検証した上で設置する。

#### 4) 各種対策工の概略配置計画

現段階として想定している自噴井、井戸群及びグラベルドレーンの設置位置を図 7-5 に示した。なお、グラベルドレーンの設置位置については、将来のメカニズム検討結果を踏まえて変更される可能性がある。

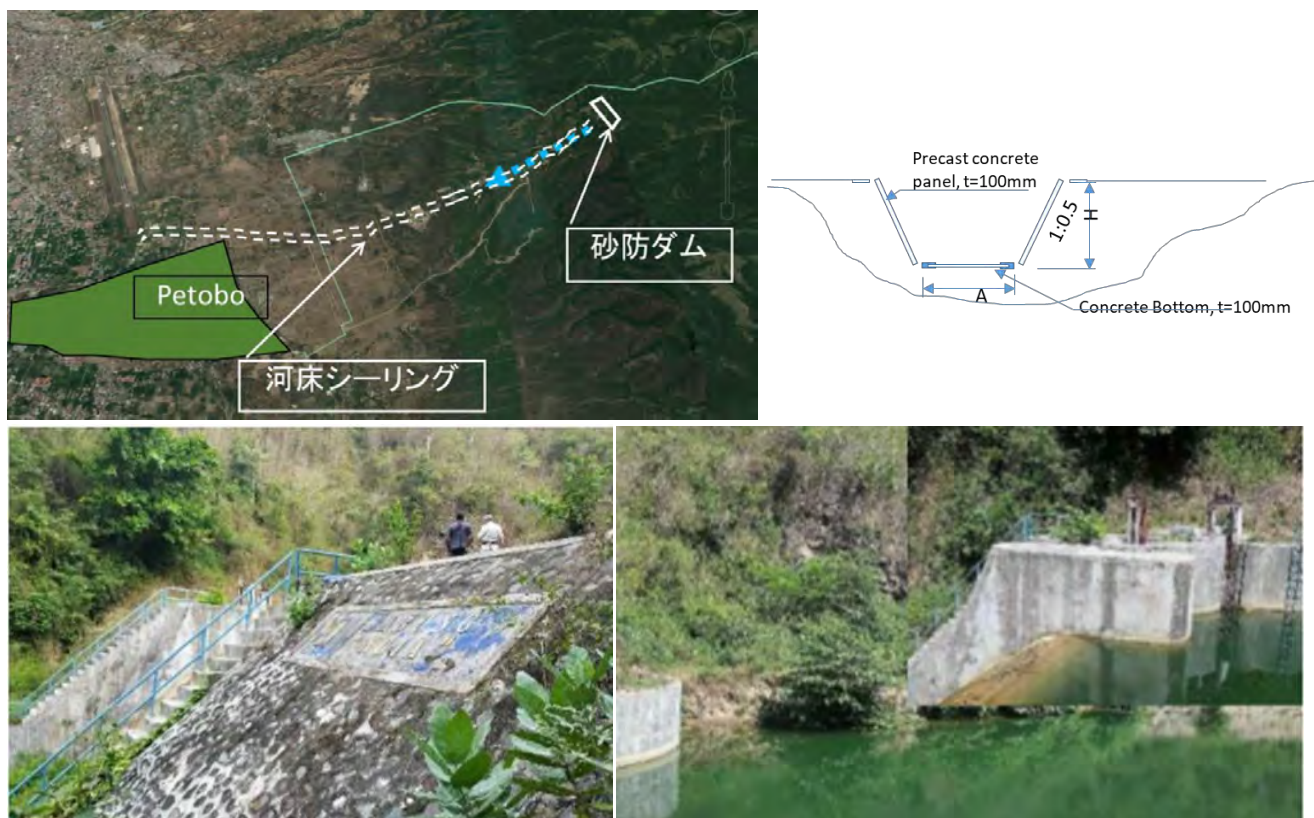


出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-5 各種対策工の概略配置計画

#### (5) ④砂防施設及び被災地上流側河床シーリング

Nalodo 災害発生地区 (Petobo 及び Jono Oge 地区等) の上流域からの地下水供給が災害地区の地下水位の上昇に寄与していたと考えられる。従って、災害地区への地下水供給をできるだけ低減するために、上流域の砂防施設及び上流側の河床をシーリングすることにより、表流水を地下に浸透させないようにする対策であり、砂防事業と連携して実施する。また、集水した表流水を有効活用する方策についても別途考慮する必要がある。現段階として提案している対策工は、図 7-6 に示す通りに、既存の砂防ダムに貯水し、その水をできるだけ地下に浸透させないように有効活用することにより、下流 (Petobo 地区) への地下水の涵養 (供給) を抑制する対策である。



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-6 河床シーリングと Petobo 地区上流の既存砂防ダム



## (6) ⑤暗渠排水路の設置

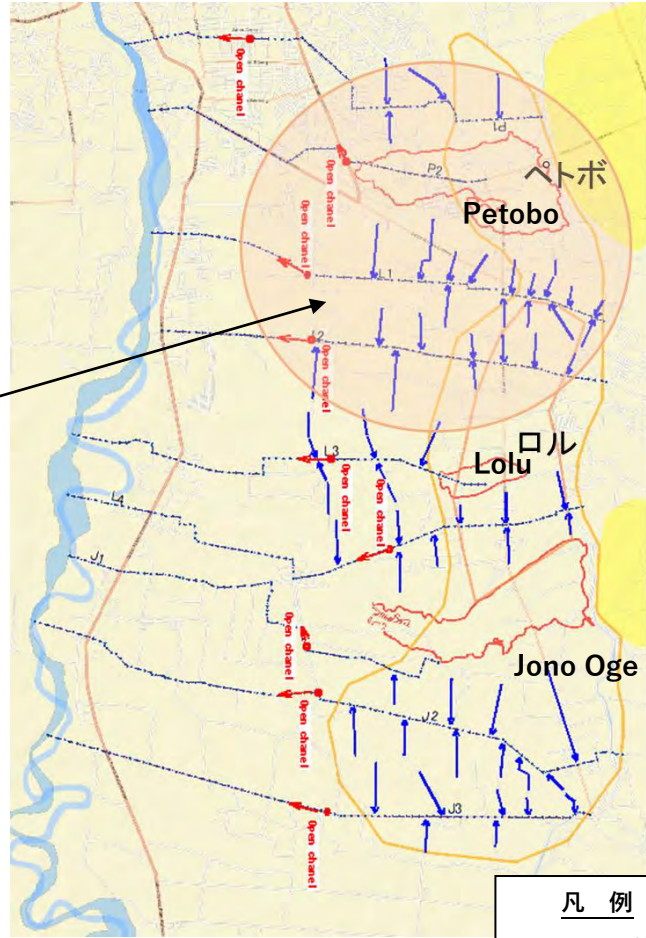
上記に示した①～④の対策実施により地下水低下効果が不足する場合には、周辺地域の土地利用計画（住宅の密集度、道路の整備状況等）に配慮して、暗渠排水路の適切な設置による地下水低下対策を実施する。

先にも述べたが、被災したエリアの地下水位は、地形改変や、灌漑水路の損傷などの影響から、本震災前後で大きく変化している。本震災前は自噴するような高い水頭を有した地下水面が、本震災後は図 7-10 に示すように、地表面から平均して-3m程度（：被災地上流側と下流側で-10mから地表面程度でばらつきあり）の深さとなっている。今後、灌漑水路の復旧や土地造成により、現況地下水位を再上昇させないような計画を行うことが重要といえる。

暗渠排水管は、対象地区の道路整備（地盤改良による舗装基盤の強化）と併せて地下水低下対策を実施することが重要である。現段階としては、都市化が進んでいる Petobo 地区及び Balaroo 地区を優先的に実施することを提案している。なお、当対策は暗渠構造であるため、維持管理面において目視確認が困難であるが、基本的に傾斜地盤に設置されるため流水の流速が期待できること、異物の混入の可能性も少ないこと等を踏まえて、山岳トンネルの暗渠センタードレーン等と同様、ほぼメンテナンスフリーと考えている。

なお、ここで計画する暗渠排水路は、地下水位を低下させるというよりむしろ、本震災後の現況地下水位を維持するという位置付けである。しかしながら、今後の土地利用の変更や灌漑水路の復旧により地下水面上昇が生じる場合、地下水面上昇を抑えるべきエリアを特定し、地下水流を遮断するための矢板工打設等の大規模な対策工が必要といえる。

図 7-7 と図 7-8 に、エリア全体の配置計画、集水管（本管、枝管）の配置計画、諸元を示す。本管は主要道路の道路敷の中央に、枝管は接続道路の道路敷に設置することを想定している。

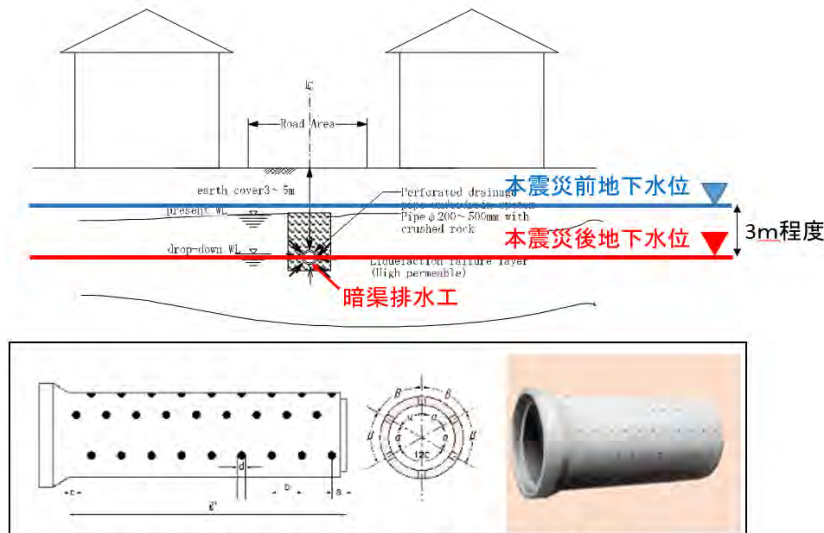


空間計画の土地利用計画と連携して整備範囲を設定  
 現在都市化が進行している Balaroa と Petobo 地区を優先的に実施  
 暗渠排水管は、対象地区の道路整備(地盤改良による舗装基盤の強化)と併せて地下水低下対策を実施  
 \*基本的に傾斜地盤に設置するため、メンテフリー

出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-7 暗渠排水工の配置計画

| 凡例    |      |
|-------|------|
| ..... | ; 本管 |
| —     | ; 枝管 |



震災後の現状地下水位を維持するための暗渠排水工のイメージ

出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-8 集水管（本管）の諸元

| Route Name    | Distance (m) | Pipe Diameter (mm) |
|---------------|--------------|--------------------|
| B1(Balaroa1)  | 3,260        | 250-500            |
| B2(Balaroa2)  | 3,280        | 250-500            |
| P1(Petobo1)   | 5,580        | 250-600            |
| P2(Petobo2)   | 4,280        | 250-500            |
| L1 (Lolu1)    | 5,550        | 250-500            |
| L2 (Lolu2)    | 5,260        | 250-650            |
| L3 (Lolu3)    | 5,220        | 250-700            |
| L4 (Lolu4)    | 6,700        | 250-600            |
| J1(Jono Oge1) | 5,330        | 250-500            |
| J2(Jono Oge2) | 7,480        | 250-500            |
| J3(Jono Oge3) | 6,500        | 250-500            |
| Total         | 58,440       |                    |

## 7-3-2 非構造物対策工案

### (1) 概要

Nalodo 災害の被害を軽減するためには、構造物対策工案と併せて、非構造物対策工案を実施することが極めて重要である。以下の表 7-4 に非構造物対策を以下に示す。

表 7-4 非構造物対策工案

| 対策工        | 概要  | 備考            |
|------------|---|---------------|
| ⑥地下水モニタリング | Nalodo 地区の地下水位をモニタリングし、対策工の効果等を把握する。(灌漑水路の管理にも活用する) | 灌漑水路管理にも活用    |
| ⑦建築規制/基準   | Nalodo 対策として、建築規制及び基準を設定する。                         | 土地利用計画と連携して実施 |

出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

### (2) ⑥地下水モニタリング

#### 1) 計画方針

灌漑水路の復旧に伴って、灌漑水路及び灌漑地に灌漑水が供給され、灌漑地周辺の地下水位が上昇することが想定される。被災地エリアの主産業である農業の復興にとって、この灌漑水路の復旧は空間計画上の大きなポイントである。災害リスクを軽減しつつ、地域復興のための有効な土地利用という BBB の実現に資するよう、当該エリアの地下水位を管理、モニタリングすることが重要といえる。ここで、地下水のモニタリングを継続して実施することで、Nalodo のリスク軽減対策工の効果を検証するとともに、灌漑水路復旧による周辺地域への地下水位への影響を把握することが可能となる。なお、将来的には、この地下水位モニタリング結果を踏まえて、灌漑水路の維持管理（特に、灌漑水配分管理）に活用することが望ましい。

#### 2) 地下水モニタリング実施状況

地下水位のモニタリングは、JICA 調査団が設置したボーリング観測孔（オールストレーナ加工）を用いて毎時の水位観測を 2020 年 3 月より図 7-10 に示す 20 孔で開始した。地下水位は降水量などの外部条件によって変動するため、被災後（灌漑水路復旧前で無対策）の水位環境（地下水レベル）を把握することを目的とし、パル市にある Tadulako 大学の協力を得て実施している。3 月～7 月は、毎月 1 回の計測機器のチェックを兼ねてデータ回収を行い、大気圧補正処理後の水位変動図を作成している。観測データは専用のデータシャトルを介して PC に保存し、電池内蔵式で 5 年程度連続稼働する仕様となっている。一方、降水量は、Palu 空港・BMKG などに政府機関の観測計があるが、本プロジェクトにおいては、JICA プロジェクトオフィスの屋上に自記雨量計を 1 台設置した。なお、本プロジェクトの計測は、2020 年 7 月末をもって終了するが、今後 5 年間自動蓄積されるデータ取得及び整理方法は、調査団から Nalodo 研究センターの一員である Tadulako 大学の先生に技術指導済である。一方、水質については 2018 年の震災前にパル市域において、現地地の ESDM が井戸調査を行い、とりまとめられているが、市街地地域に限定されているため、被災地域をカバーしきれていない。これらの現状も踏まえ、今後はインドネシア側関係機関で役割分担を協議の上、地下水位と水質のモニタリング体制を確定することが望まれる。図 7-9 に、観測孔と自記雨量計、地下水観測点に関する資料を示す。





出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-9 観測孔と HOBOTOPUS 社製ダイバー式の自記水位計及び自記雨量計

<地下水観測地点一覧>

Water level measured with stylus type water level gauge (GL-m)

| area           | Name              | 口元標高<br>Elevation(m) | boring is completed<br>GWL (GL-m) | 2020/2/15<br>GWL (GL-m) | 2020/2/26<br>GWL (GL-m) | 2020/4/13<br>GWL (GL-m) | 2020/5/13<br>GWL (GL-m) | 2020/6/13<br>GWL (GL-m) | 2020/7/13<br>GWL (GL-m) | Highest water level (GL-m) | Lowest water level (GL-m) |      |
|----------------|-------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|------|
| Petobo         | LP-6              | 96.5                 | 19.98                             | Dry                     | Dry                     | Dry                     | Dry                     | Dry                     | Dry                     |                            |                           |      |
|                | LP-6 Atm pressure |                      |                                   |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                            |                           |      |
|                | LP-4              |                      | 53.4                              | 0.80                    | 2.11                    | 2.21                    | 2.26                    | 2.23                    | 2.28                    | 0.71                       | 0.71                      | 2.28 |
|                | AB-3              |                      | 72.0                              | 4.83                    | 5.63                    | 5.81                    | 4.87                    | 4.83                    | 5.07                    | 6.29                       | 4.83                      | 6.29 |
| Blromaru /Lolu | LP-2              | 57.1                 | 2.62                              | 4.05                    | 4.17                    | 3.50                    | 3.45                    | 4.50                    | 4.12                    | 2.62                       | 4.50                      |      |
|                | AB-5              | 68.9                 | 1.68                              | 2.42                    | 2.61                    | 3.00                    | 2.75                    | 3.03                    | 2.04                    | 1.68                       | 3.03                      |      |
|                | AB-6              | 69.7                 | 3.21                              | 4.31                    | 4.53                    | 4.97                    | 4.92                    | 5.20                    | 4.12                    | 3.21                       | 5.20                      |      |
|                | J-6               | 37.2                 | 0.00                              | 1.07                    | 2.13                    | 2.27                    | 2.15                    | 1.92                    | 1.16                    | 0.00                       | 2.27                      |      |
|                | J-13              | 81.6                 | 10.66                             | 10.66                   | Dry                     | Dry                     | Dry                     | Dry                     | Dry                     | 10.66                      | 10.66                     |      |
|                | AB-7              | 65.0                 | 4.10                              |                         | 5.40                    | 5.82                    | 6.78                    | 6.23                    | 5.54                    | 4.10                       | 6.78                      |      |
|                | J-8               | 48.9                 | 0.62                              | (0.25)                  | 2.30                    | 2.02                    | 2.52                    | 2.39                    | 1.78                    | (0.25)                     | 2.52                      |      |
|                | AB-11             | 72.9                 | 6.50                              | 7.87                    | 8.14                    | 8.62                    | 8.83                    | 9.02                    | 8.13                    | 6.50                       | 9.02                      |      |
|                | AB-9              | 63.1                 | 2.63                              | 3.41                    | 3.73                    | 4.02                    | 4.07                    | 3.95                    | 2.75                    | 2.63                       | 4.07                      |      |
|                | AB-10             | 62.4                 | 0.81                              | 1.59                    | 1.81                    | 2.07                    | 2.20                    | 2.17                    | 1.31                    | 0.81                       | 2.20                      |      |
| Jono Oge       | J-3               | 53.3                 | 3.63                              | 0.70                    | 2.21                    | 2.35                    | 2.35                    | 2.36                    | 2.18                    | 0.70                       | 3.63                      |      |
|                | J-4               | 37.2                 | 2.10                              | 2.25                    | 2.45                    | 2.52                    | 2.61                    | 2.53                    | 2.39                    | 2.10                       | 2.61                      |      |
|                | J-10              | 66.1                 | 5.83                              | 9.12                    | 9.30                    | 9.70                    | 9.95                    | 10.12                   | 9.88                    | 5.83                       | 10.12                     |      |
|                | J-11              | 66.1                 | 8.49                              | 8.59                    | 8.58                    | 8.33                    | 8.58                    | 8.56                    | 8.58                    | 8.33                       | 8.59                      |      |
|                | B-3               | 22.4                 | 0.00                              | 0.00                    | (0.17)                  | (0.49)                  | (0.3)                   | (0.26)                  | (0.29)                  | (0.49)                     | 0.00                      |      |
| Balarooa       | B-5               | 19.0                 | 0.55                              | 0.55                    | 1.49                    | 0.89                    | 0.84                    |                         | 0.35                    | 1.49                       |                           |      |
|                | B-6               | 73.8                 | 16.91                             | 16.91                   | Dry                     | Dry                     | Dry                     | Dry                     | Dry                     | 16.91                      | 16.91                     |      |

<観測地点位置図>



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-10 地下水観測孔一覧と配置

### 3) 地下水位管理目標値案

Nalodo 災害のリスク低減に必要な地下水位の適正管理に用いる管理目標値の設定には、雨季乾季を経た通年の降雨、地下水観測データの収集や、その収集データを用いた広域の3次元地下水解析によるシミュレーション等が必要とされる。また、その管理目標値の妥当性の検証には、長期のモニタリングを行い、時点補正をかけながら、現地条件に即した管理目標水位に見直すことが望ましい。

本調査では、この地下水位管理目標値の設定は対象スコープとされていないが、インドネシア政府関係機関から、BBB のコンセプト共有の一環として検討の要請があり、あくまで参考として、地下水管理目標値のあり方について、以下の点を助言した。

- 被災したエリアの地下水位は、地形改変や、灌漑水路の損傷などの影響から、本震災前後で大きく変化している。本震災前は自噴するような高い水頭を有した地下水面が、本震災後は図 7-10 に示すように地表面から平均して-3m程度の深さ（：被災地上流側と下流側で-10m から地表面程度でばらつきあり）となっている。
- 今後、灌漑水路の復旧や土地造成により、現況地下水位を再上昇の可能性があり得るが、それを抑制することが重要となる。
- したがって、地下水位管理目標値は、本震災後の現況地下水位（：被災エリアで平均地表面から-3 m程度）とすることが考えられる。
- 対策としては、暗渠排水路が挙げられる。地下水位を低下させるというよりむしろ、本震災後の現況地下水位を維持するという位置付けである。しかしながら、今後の土地利用の変更や灌漑水路の復旧により地下水面上昇が生じる場合、地下水面上昇を抑えるべきエリアを特定し、地下水流を遮断するための矢板工打設等の大規模な対策工が必要といえる。
- この地下水位の管理目標水位 GL-3m については、あくまでも参考提案であり、最終的には、ADB の灌漑水路関連調査結果（PUSAIR の調査結果）と調整の上、インドネシア側の管理者が、関係機関と協議の上、設定する必要がある。

なお、灌漑水路全体の M/P、F/S を支援する他ドナー（ADB）と合同協議を行い、構造物対策案に加え、ここで述べた非構造物対策案に係る助言及び情報共有を実施した。よって、今後、これら構造物対策案、非構造物対策案を踏まえた計画、設計がなされることが期待される。

#### (3) ⑦建築規制／基準について

先に述べた通り、Nalodo の災害リスクの軽減については、BBB の観点に基づき、土地利用規制として、ハザードレベル 4 のエリアを居住禁止地区、ハザードレベル 3 のエリアを居住は可能な新築禁止地区（既存建築の再建にあたっては強化された建築規制を満足する必要がある）とするなどの空間計画を提案している。

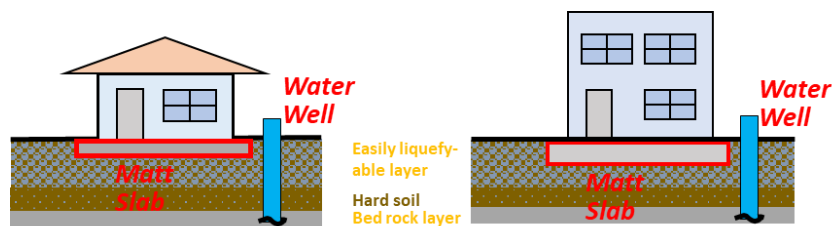
そのハザードレベル 3 のエリアに関する建築規制／基準を図 7-11 に示す。

設定に際しては、Nalodo 災害発生地区の特性（現地の建物の状況、住民の経済状況等）を踏まえて、実現可能な建築規制／基準となるように配慮し、地下水位を低下させるための浅井戸を設置すること、流動土塊に耐え得るために建物基礎を鉄筋コンクリートスラブ構造とすること等を



提案した。例えば、建物基礎については、基礎地盤を完全にセメント改良で固結または杭構造を採用することが信頼性は高いといえるがコストの面で非現実的であると言わざるを得ない。そこで、現地の被災状況を踏まえ、人的被害を最小限におさえることを要求性能に位置付けた軽減対策として、浅井戸の設置や、RCスラブ基礎を提案した。

| ハザードレベル |             | 建築規制／基準   |
|---------|-------------|---|
| Nalodo  | Nalodo HL 1 | 建築構造に関する追加要求事項はない   |
|         | Nalodo HL 2 | 建築構造に関する追加要求事項はない   |
|         | Nalodo HL 3 | 建築物は下記の条件を満足する必要がある。<br>井戸を設置する<br>RC スラブ構造の基礎を設置する<br>Non-engineered building は、仕様に関する最低限の要件を満たす必要がある<br>Engineered building は、SNI1726 に従って設計する必要がある。(with additional seismic forces using Risk Category of one level above as per building use)<br>建築物の高さは、建物の幅の4倍よりも低く設定されなければならない |
|         | Nalodo HL 4 | 居住禁止地区  |

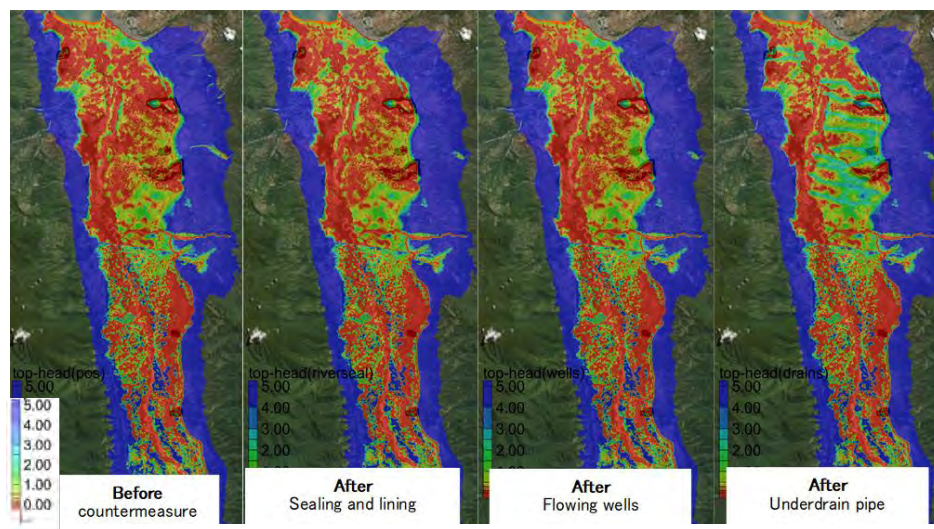


出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-11 ハザードレベルを考慮した建築規制とレベル3の建築規制イメージ

### 7-3-3 対策工整備後の Nalodo ハザードマップ

Nalodo 対策で実施する構造物対策工（灌漑水路のシーリング、自噴井、井戸群、暗渠排水溝等）によるリスク軽減効果を、地下水位の解析モデルを用いて評価した。地下水位解析の結果、対策工整備後の対策実施地域周辺の地下水位は対策前よりも 2～3m 程度低くなった。地下水位解析結果は、図 7-12 に示したとおりである。



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

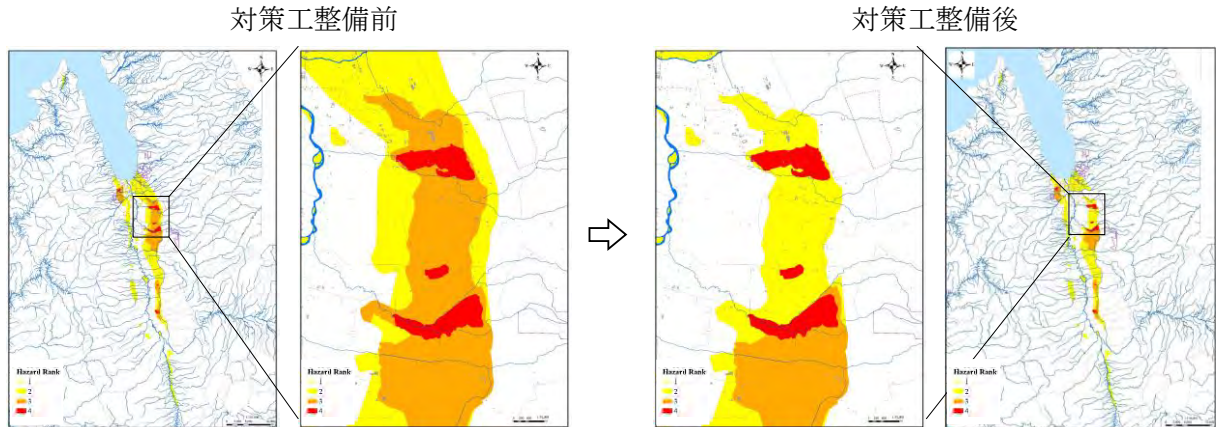
図 7-12 対象地域の地下水解析結果

対策工整備後のハザードレベルは、下記の考え方に従って設定した。

Nalodo 災害は、次の 5 項目の発生要因（①The groundwater level is shallow、②Slope exists (Not perfectly horizontal)、③A loose sandy soil layer is accumulated、④Confined aquifer exists、⑤Low Permeable Cap Layer exists)をすべて満たした地区が、大きな被害を受けたと考えている。しかし、Nalodo の発生要因が明確になったわけではない。従って、対策工整備前のハザードマップは、今次災害の被害の大小（地盤変動の大小）を踏まえてハザードのクライテリアを設定した。

提案した対策工は、5 項目の内、①地下水位低下、④過剰間隙水圧の消散を目的に実施しており（②、③、⑤の地盤の改善・改良は多大な対策費用が必要となるため）、地下水位を下げることで、地域の安全性が高くなること（液状化を起こしにくい）、また、今次災害で大きな過剰間隙水圧が発生した地点に過剰間隙水圧消散工を実施するため、軽減効果は高いと判断した。しかし、他の災害発生要因は残存するため、ハザードレベルを対策工整備前より 1 ランクだけ下げることにした。対策工整備後の Nalodo ハザードマップを、図 7-13 に示した。

なお、ハザードレベル 4 については、今回の災害で大きな被害を受けた地区であり、表土（キャップ層）が回復した場合、災害発生危険度が高くなるため、ハザードレベルは、変更していない。



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-13 対策工整備前後の Nalodo ハザードマップ

## 7-4 灌漑水路の関連情報整理と地下水位観測計画の提案

### 7-4-1 地下水モニタリングの必要性

Nalodo 災害が発生した Petobo と Jono Oge 地区の東側（山側）を南北方向に流れる農業用灌漑水路（灌漑水路）には、今回の地震により大きな被害が生じた。地域の主要産業である農業を復興するためには、地震で破壊された灌漑水路を復旧することは重要であるが、BBB のコンセプトに基づき、災害発生リスクの軽減にも配慮した方策も重要となる。

先にも述べた通り、Nalodo の災害リスクを軽減させるためには、地下水位の上昇を抑え、一定レベルに地下水位を管理することが有効である。灌漑水路を復旧する際には素掘りだった水路をコンクリート被覆して漏水を防ぎ、水門と排水ネットワークを構築し直すとともに、自由地下水が一定水位以上の場合には水門を閉めて当該地域への給水を制限することで、Nalodo 被災エリア全体の地下水観測と併せて適正に地下水管理することが望ましい。

### 7-4-2 現況の地下水モニタリング実施状況

地下水位のモニタリングは、JICA 調査団が設置したボーリング観測孔を用いて毎時の水位観測を 2020 年 3 月より 20 孔で開始した。地下水位は降水量などの外部条件によって変動するため、被災後（灌漑水路復旧前で無対策）の水位環境（地下水レベル）を把握することを目的とし、パルにある Tadulako 大学の協力を得て実施している。

詳細については、7-3-2 項に記載している。

### 7-4-3 地下水観測計画

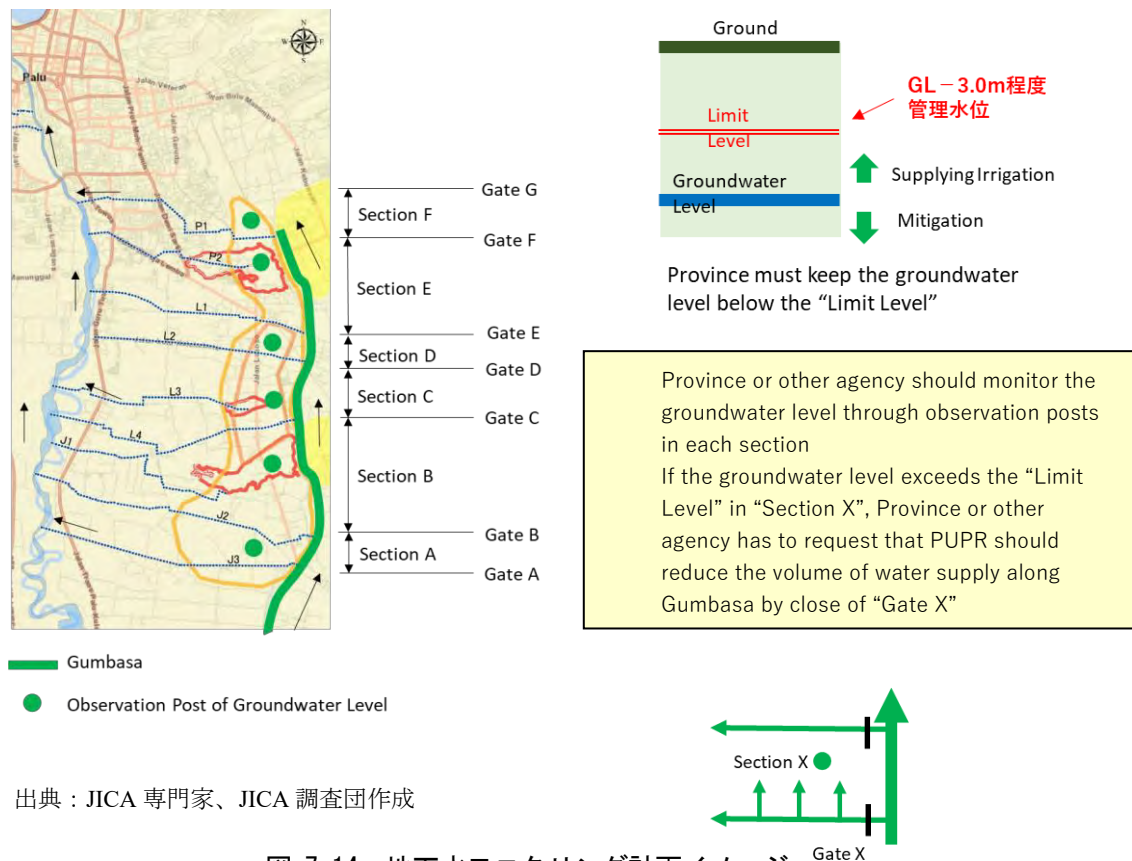
#### (1) 計画概要

地下水モニタリング計画は、既往の調査結果より、地形、地質、被災エリアの状況に加え、既往の地下水観測データ、地下水解析結果などを総合的に検証し、観測箇所数、観測頻度、管理基準水位などを計画する必要がある。現時点での Nalodo 対策工効果検証（地下水位）のモニタリング計画は以下のとおりである。観測箇所は、集水流域を地形から判読し、最小限の箇所数となる

よう計画した。なお、管理水位（案）は以下に示すように地表面から3m程度の深さに設定した。これは、本震災前は自噴するような高い水頭を有した地下水面が、本震災により地形が大きく改変し、また灌漑水路が損壊したことで、現在では地表面から3m程度の深さ（：被災地上流側と下流側で-10mから地表面程度でばらつきあり）で安定していることを踏まえ、現状レベルを維持するとの意図がある。

- 観測箇所数： 6箇所（灌漑水路沿い）
- 観測実施機関：公共事業省もしくは、州政府
- 観測頻度： 毎日
- 観測対象： 地下水位
- 管理水位（案）：地表面-3m程度

図 7-14 に、モニタリング計画概要を示す。



出典：JICA 専門家、JICA 調査団作成

図 7-14 地下水モニタリング計画イメージ

## (2) インドネシア政府関係機関へのデータ共有

将来的な地下水位のモニタリングは、灌漑水路の管理運営機関である PUPR（灌漑局）及び研究機関の PUSAIR との協力体制を構築し、地方政府機関（BALAI・州政府、シギ県）とも連携して、将来のモニタリング体制について検討されることが望ましい。

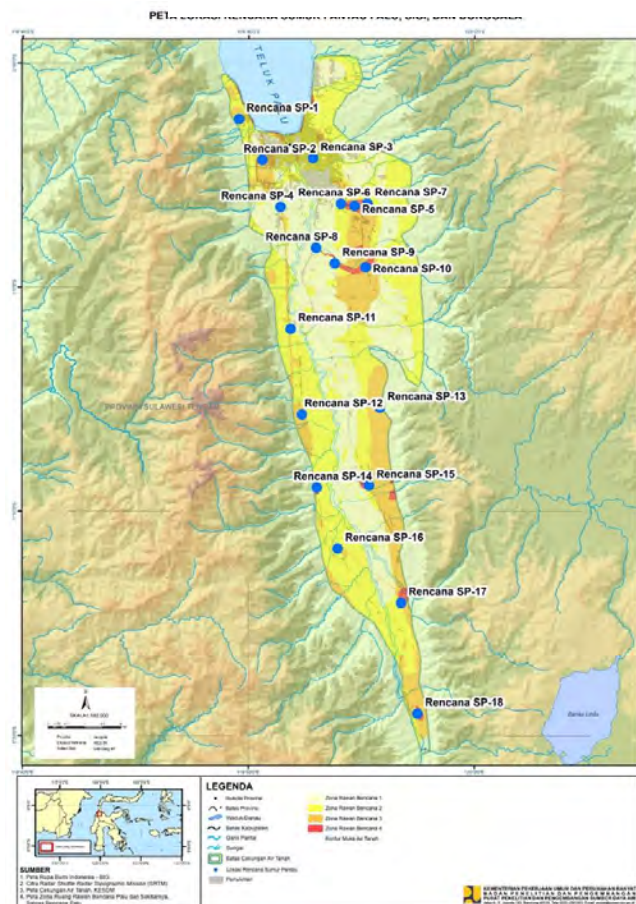
なお、現在 JICA 調査団が設置している観測機器及び取得したデータは、現地政府機関に委譲する予定である。



現段階としては、継続的に観測を実施する個所として Petobo～Jono Oge 付近に現在観測を実施している井戸を活用することを提案している（6ヶ所、図 7-14 参照）。なお、灌漑水路全体については、先に述べた灌漑水路周辺の6箇所に加え、PUSAIRが地下水位観測を推奨している図 7-15に示す18ヶ所の観測井戸を踏まえ、継続的な地下水位観測を実施することが望ましい。

| No | Nama          | X         | Y        | Desa             | Kecamatan     | Kota/Kab  |
|----|---------------|-----------|----------|------------------|---------------|-----------|
| 1  | Rencana SP-1  | 119,82594 | -0,87504 | Silae            | Ulujadi       | Kota Palu |
| 2  | Rencana SP-2  | 119,84325 | -0,90551 | Balaroa          | Palu Barat    | Kota Palu |
| 3  | Rencana SP-3  | 119,88056 | -0,90414 | Lolu Selatan     | Palu Selatan  | Kota Palu |
| 4  | Rencana SP-4  | 119,85651 | -0,94032 | Baliase          | Marawola      | Kab. Sigi |
| 5  | Rencana SP-5  | 119,91118 | -0,93964 | Petobo           | Palu Selatan  | Kota Palu |
| 6  | Rencana SP-6  | 119,90119 | -0,93805 | Petobo           | Palu Selatan  | Kota Palu |
| 7  | Rencana SP-7  | 119,92065 | -0,93778 | Petobo           | Palu Selatan  | Kota Palu |
| 8  | Rencana SP-8  | 119,88285 | -0,97082 | Kabobona         | Dolo          | Kab. Sigi |
| 9  | Rencana SP-9  | 119,89668 | -0,98237 | Langaleso        | Dolo          | Kab. Sigi |
| 10 | Rencana SP-10 | 119,91939 | -0,98532 | Jono Oge         | Sigi Biromaru | Kab. Sigi |
| 11 | Rencana SP-11 | 119,86413 | -1,03105 | Pewunu           | Dolo Barat    | Kab. Sigi |
| 12 | Rencana SP-12 | 119,87246 | -1,09464 | Bobo             | Dolo Barat    | Kab. Sigi |
| 13 | Rencana SP-13 | 119,93001 | -1,08956 | Sidondo I        | Sigi Biromaru | Kab. Sigi |
| 14 | Rencana SP-14 | 119,88358 | -1,14895 | Poi              | Dolo Selatan  | Kab. Sigi |
| 15 | Rencana SP-15 | 119,92205 | -1,14735 | Sibalaya Selatan | Tanambulava   | Kab. Sigi |
| 16 | Rencana SP-16 | 119,89891 | -1,19435 | Baluase          | Dolo Selatan  | Kab. Sigi |
| 17 | Rencana SP-17 | 119,94580 | -1,23468 | Pakuli           | Gumbasa       | Kab. Sigi |
| 18 | Rencana SP-18 | 119,95802 | -1,31707 | Tuwa             | Gumbasa       | Kab. Sigi |

※The planned depth of the wells is 30 meters below ground level



出典：PUSAIR 提供資料

図 7-15 PUSAIR が提案している観測井戸



#### 7-4-4 灌漑水路管理関係者の連携体制

灌漑水路の灌漑水を適正に管理するためには、関係機関が連携して地下水位、灌漑水量、降雨量等のデータを収集・整理し地下水位の状況を把握することが重要である。また、設定した管理水位よりも地下水位が高い場合には、灌漑水を適正に減らす（ゲートを閉めて灌漑水を制御する）必要がある。その場合には、灌漑水利用者（農家）及び一般市民にゲート管理方法や地下水位の状況に関する情報を提供し、管理に協力されることが望ましい。Gumbasa 灌漑水路管理関係者の連携体制イメージを図 7-16 に示す。

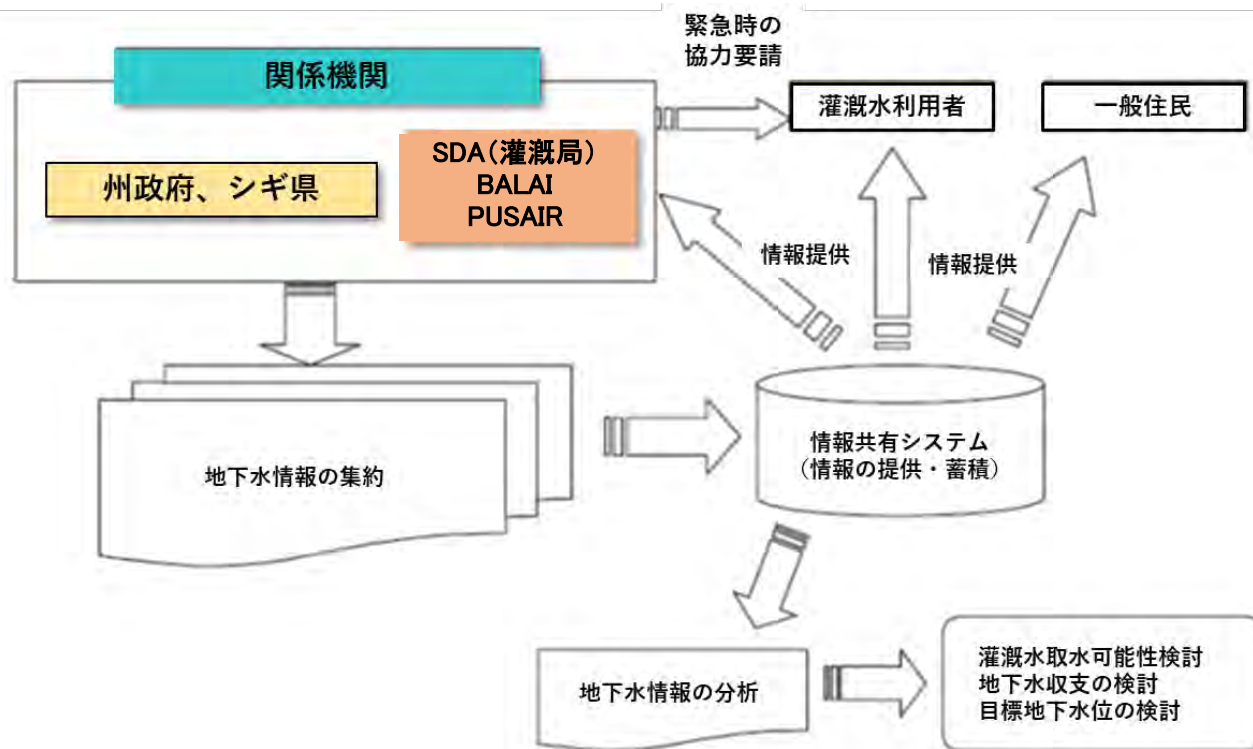


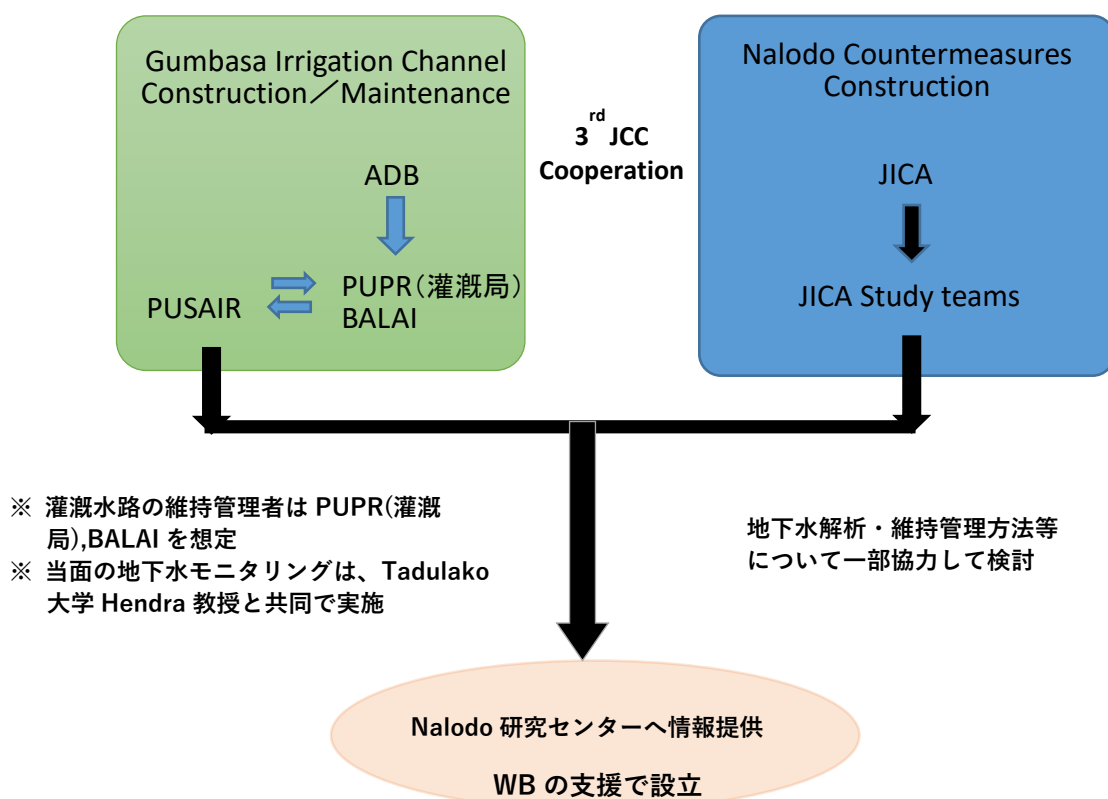
図 7-16 Gumbasa 灌漑水路管理関係者の連携体制イメージ

#### 7-4-5 関係機関及び他ドナーとの役割分担

##### (1) 他ドナー支援事業との調整

灌漑水路関連事業については、ADB の支援により M/P、F/S が実施されており、JICA の支援対象は、その一部区間（Petobo 付近）のみを対象としたローン事業での詳細設計、施工監理が対象となる計画であった。しかしながら、2019 年 12 月に開催された第 3 回 JCC において、BBB の考え方に基づく技術指導（TA）として、Nalodo エリアの地下水モニタリング計画と併せて灌漑水路の水位管理のあり方への助言について、PUPR より支援要請があり、これを実施することになった。

図 7-17 に、灌漑水路復旧事業に関する他ドナーとの区分イメージを示す。



出典：JICA 調査団作成

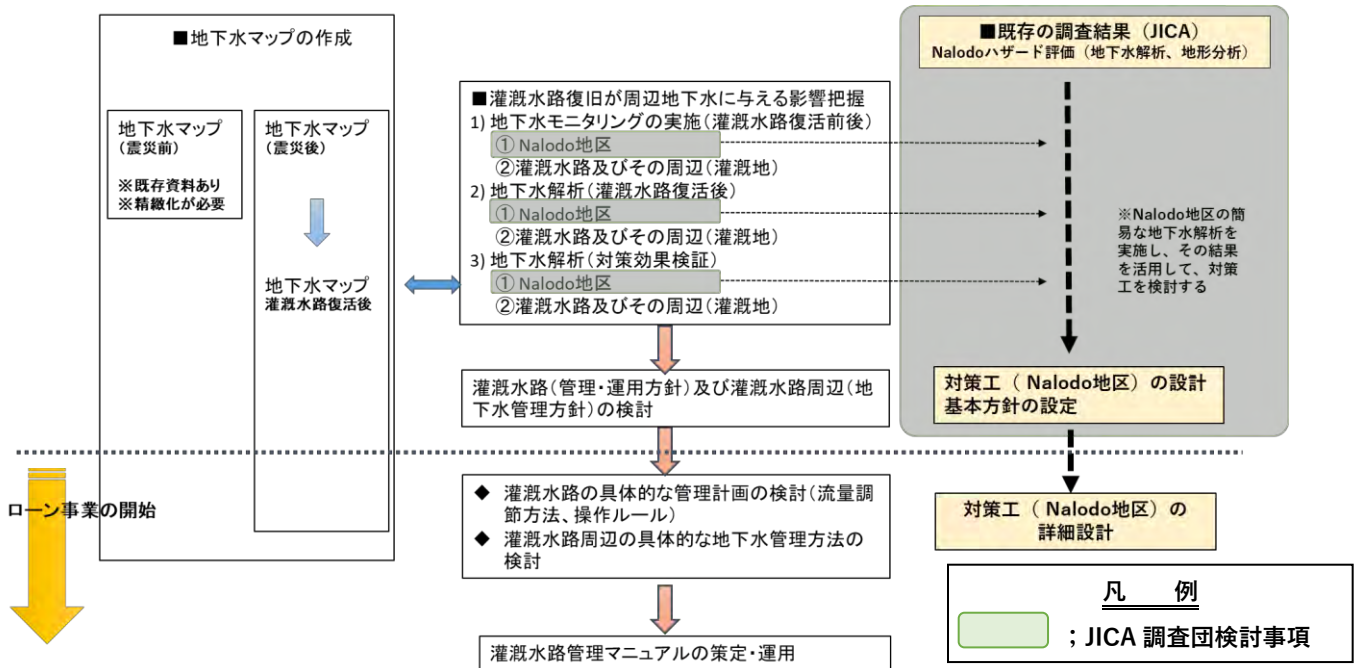
図 7-17 Gumbasa 灌漑水路復旧事業に関する他ドナーとの区分イメージ

## (2) 灌漑水路管理計画に必要な検討項目

BBB のコンセプトに基づき、Nalodo 被災エリアの農地利用の復興と、災害リスク軽減の両立を実現するためには、灌漑水路を適正に維持管理することが重要となる。この維持管理のためには、先に提案した管理体制の構築に加え、地下水モニタリングの継続によるデータ蓄積、データ評価・分析、地下水管理基準レベルの設定、流量調節の方法や操作方法の習得など、多くの検討項目が挙げられる。

図 7-18 に、今後必要と考えられる検討項目と実施主体案を示した。

なお、これら検討項目のうち、本調査において、JICA 調査団としては、既存の調査結果 (Nalodo ハザード評価) を踏まえて、灌漑水路関連事業の一部である Nalodo 地区 (Petobo~Jono Oge 周辺) の地下水位のモニタリング調査を実施し、簡易な地下水解析を実施した上で、灌漑水路の管理・運用方針及び灌漑水路周辺の地下水モニタリング方針について検討するとともに、Nalodo 対策の基本的な考え方を設定した。これら以外の検討項目は、灌漑水路の M/P、F/S を実施している ADB 支援によって実施されることが望ましい。



| 実施すべき事項 |                                       | ADB | JICA | 留意点                                |
|---------|---------------------------------------|-----|------|------------------------------------|
| 1       | 地下水マップの作成（震災前）；Palu 扇状地               | ○   | ×    | PUSAIR が作成、JICA 調査団は情報提供程度         |
| 2       | 地下水マップの作成（震災後、灌漑水路復活後）；Palu 扇状地       | ○   | ×    | PUSAIR が作成、JICA 調査団は情報提供程度         |
| 3       | 灌漑水路復活が周辺地下水に与える影響把握                  | ○   | 支援   | PUSAIR が作成                         |
|         | 1) 地下水モニタリング（灌漑水路復活前後）                | --- | ---  |                                    |
|         | ①Nalodo 地区の地下水モニタリング実施及び分析            | ×   | ○    | Nalodo 地区のパイロット的なモニタリングを実施         |
|         | ②灌漑水路及びその周辺（灌漑地）の地下水モニタリング実施          | ○   | ×    | SDA, BALAI が実施                     |
|         | 2) 地下水解析（灌漑水路復活後）                     | --- | ---  |                                    |
|         | ①Nalodo 地区（地下水水位上昇量の把握）               | ○   | 支援   | 簡易な解析（簡易な農地運営考慮）                   |
|         | ②灌漑水路及びその周辺（地下水水位上昇量の把握）              | ○   | ×    | ADB, SDA, BALAI, PUSAIR が検討        |
|         | 3) 地下水解析（対策工の設定と効果検証）                 | ○   | 支援   | モニタリング結果を考慮                        |
| 4       | 灌漑水路（管理・運用）及びその周辺地区（地下水管理）方針の検討       | ○   | 支援   | 考え方を提示                             |
| 5       | 灌漑水路及び対策工の設計基本方針の設定                   | ○   | 支援   | 考え方を提示                             |
| 6       | 灌漑水路の具体的な管理方法検討（流量調節、操作ルール等）          | ○   | ---  | ADB, SDA, BALAI が検討、ローン事業実施コンサルが支援 |
| 7       | 灌漑水路周辺の具体的な地下水管理方法検討（特に Nalodo 地区）    | ○   | ---  | ADB, SDA, BALAI が検討、ローン事業実施コンサルが支援 |
| 8       | 灌漑水路管理マニュアル（地下水モニタリング含）の作成            | ○   | ---  | ADB, SDA, BALAI が検討                |
| 9       | 灌漑水路及び周辺施設（対策工含む）の詳細設計                | ○   | ---  | ADB, SDA, BALAI が検討、ローン事業実施コンサルが支援 |
| 10      | 関係者間協議（ADB, SDA, BALAI, PUSAIR, JICA） | ○   | ---  | ADB, SDA, BALAI, PUSAIR, JICA      |

出典：JICA 調査団作成

図 7-18 Gumbasa 灌漑水路管理計画に必要な検討項目

## 第 8 章 長距離流動に係る国内支援委員会からの提供資料

2019年9月30日開催の第六回 Nalodo 国内支援委員会では、「ゆる詰めの中積砂層・シルト層が液状化し、緩斜面において側方流動を発生させたことまでは、既往調査結果より明らかとなったが、長距離流動の発生機構の解明のためには、追加の調査の実施が望ましい。」との提言がなされた。

長距離流動のメカニズムについては、各委員及びアドバイザーなど土質系学識者の知見の結集により、地震動伝播特性、液状化の発生、流動化層の残留強度、灌漑水路の影響及び扇状地起源の被圧地下水の、各想定シナリオについて意見が交されたが、長距離流動となりうる主要因については、明確な結論をうるには到らなかった。これは、Palu での地すべりが、その規模において、また発生の様相について、近年に前例を見ない未曾有の大自然現象であったことによる。

ビデオに残された発生時の状況分析及び被災者からのヒアリング結果からは、地震発生時に局所的な地盤破壊が既にあったこと、地盤流動の始まる時間が通常の液状化で考えられるよりも早いこと、及び地盤流動発生時の湧水量が多いことが指摘された。通常考えられる液状化起源の地下水湧出量は、扇状地起源の被圧地下水と灌漑水路起源の上昇地下水位の影響を加味しても、実際に Jono Oge ビデオ画像などで確認できる水量には満たない可能性がある。今次地震で液状化単独で考えられる以外に、強い圧力を伴った大量の湧水が、地震発生直後に必要であることが議論された。

石原委員長及び國生委員からは土質特性・水膜形成について理論的に説明された上で、液状化地すべりの安定性評価に関する論説が提供された。安田委員及び東畑委員からは独自資料を含めた各種資料の分析と地下深所からの水噴出に関する理論が提案された。安田委員からは、Palu が地質構造的に特異な地域であること、Palu における既往地震による温泉の噴出をヒアリング資料分析や水質分析結果から御議論いただいた。また、東畑委員からは、Nalodo の最終変位を検討する方法についても提案されている。清田委員及び岡村先生（アドバイザー）、ハザリカ先生（アドバイザー）からは、Soils and Foundations 60 (2020) に掲載された Palu での研究成果論文が提供された。



## 8-1 石原委員の提供論文

### 8-1-1 液状化した砂の沈降と水膜形成について

#### (1) 不攪乱試料の採取と三軸非排水試験について

Palu においては、Petobo, Lolu, Jone Oge, Sibalaya の各地点で深さ 5-6m の掘削を行い、各層からブロックサンプリング手法により、不攪乱試料が採取された。これらに対しては、日本において、くり返し三軸ねじり試験及び圧密単調載荷非排水試験が行われた。

実験結果は、残留強度比  $Su/\sigma'_v$  の値が 0.1~0.25 位と、若干大きくなっており、試験でえられた応力-ヒズミ関係から明確なフロータイプの変形の形跡は見られなかった。1980 年頃、M.Silver と共に新潟関屋分水開削工場の現場で、ピストンサンプラーを用いて不攪乱試料を多数採取して、液状化試験を実施したことがあるが、すべてくり返し三軸試験であり、単調載荷試験は行っていない。ただし、くり返し試験で、くり返し応力比が  $R=0.15$  位以下のサンプルではフロー型変形を生じただろうと考えている。

Palu 以外の掘削現場からブロックサンプリングを行い、同様な非排水三軸せん断試験を実施したデータが、いくつかあったので、それを調べてみたが、ほぼ同様な結果で明確なフロー型の変形は見られなかった。その理由としては、

- i. ほとんどが低塑性シルトを 30~70% 含んでおり、このような土は、液状化後、多少締固まり、ブロックサンプルを実施して、一時脱水された時には、原位置における緩詰め状態での構造が失われている。
- ii. そのため、実験室でこの状態を復元するのは、現在の所、困難である。  
こと等によるものであると考えられる。

ただし、原位置で細粒分を含んだ砂が流動した例は多く報告され、Spontaneous liquefaction を意味する突発的な流れが生じるためには、むしろ細粒分の含有が必要であると云われている。

以上のことから、細粒土の流動型変形をブロックサンプルで調べるのはよほど注意しないと現状では困難と考えられる。

ただし、室内の再構成サンプルで、細粒土を含む砂の超緩詰め状態を作り出すことは容易で、このことはいつかの論文に報告されている。これらの実験データが、Terzaghi-Peck や Casagrande によって報告されてきた、シルト混じりの砂の Spontaneous liquefaction の室内における実証例であると考えられる。

#### (2) 砂の沈降と水膜形成について（間隙再分布）の実験

液状化後の砂の沈降による水膜形成とその効果については、國生（2003）により詳細に調べられている。ここでは、別の試験を参考にして、この効果について考えてみることにする。

土槽内で、液状化とその後の間隙水圧の時間的変化を観測する実験は、通常の土槽や遠心載荷装置を用いて、いくつかの機関で行われてきた。新潟地震の直後に陶浪（スナミ）氏によって行われた実験結果が、“土質動力学の基礎（石原研而,1976）”に引用されている。これを用いて以下説明してみる。

細長い箱の中にゆるい飽和砂層を人工的に作り、箱全体を水平方向に振動させてやると、振動加速度がある大きくなったとき、箱の中の砂がはげしく振動しはじめる。図 8-1 に示してあるのはこの種の実験の一例である。70×65×30cm の箱にゆるい飽和砂を敷きつめ、側面から取りだし

たビニールパイプにスタンドパイプをつなぎ、水圧上昇を測定できるようにした簡単な装置である。150gal の水平動を加えたときの過剰間ゲキ水圧、及び、砂層表面の沈下の経時変化が示してある。この図より、液状化は、加振を始めて 10 秒位後に、各深さでほぼいっせいに発生していることが知れる。そして、発生した水圧の値は、各深さにおける、初期の有効応力に等しくなっている。液状化が終わると、すぐに最深部の間ゲキ水圧が減り始めるが、引き続き、中央部、上部へ、と水圧の低下が次第に伝わっていく。この間、表面の沈下も進行しており、砂粒子の沈降が起こっていることを物語っている。3 分くらい経過すると、間ゲキ水圧はほぼゼロにもどり、表面沈下もおさまって、沈降が完了している。

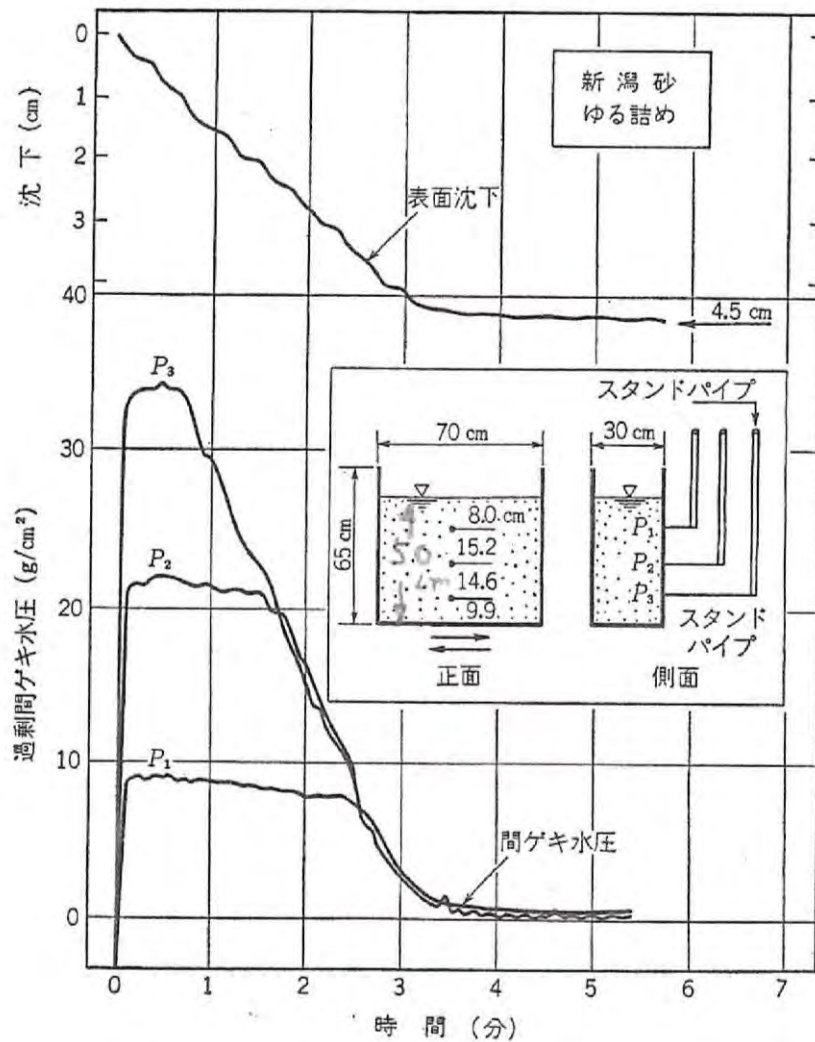


図 8-1 振動箱内での液状化した砂の挙動 (陶浪, 1965)

このプロセスで、間ゲキ水圧の深さ方向の分布が如何に変わるかを示したのが、図 8-2 である。この実験では、砂が沈降中もずっと 150gal の振動を加えつづけている。間ゲキ水圧が上りきった時点で振動を中止してみるとどうなるであろうか。このときにも、間ゲキ水圧は同じ順序で下がってくることに変わりがないが、最終沈下量は約 1/3 ぐらいにとどまり、沈殿が終了したときの砂の密度は、前の場合に比べて少なくなると想定される。

次に、間ゲキ水圧が逸散して、沈殿が完了するまでの時間について考えて見よう。深さ  $H_0$  までの全層が液状化した時点で、過剰間ゲキ水圧は、地表でゼロ、深さ  $H_0$  で  $\gamma H_0$  になっている。

つまり、深さ $H_0$ の点と地表面との圧力差は $\gamma'H_0$ であるから、水頭差は $\gamma'H_0/\gamma_w$ である。よって、底面から地表に向かって透水が起こるわけであるが、このときの透水距離は $H_0$ である。したがって、動水勾配は $\gamma'/\gamma_w$ となるが、これは、実は、限界動水こう配にほかならない。つまり、砂質地盤でボイリング (Boiling) が発生するときの条件と全く同じになっている。よって、振動で砂が液状化したときの状態は、下から上へ向かう透水によって砂地盤にボイリングが起こったときの状態と同じであると考えられる。ところで、砂の中で透水が起こるときの水の流れ速度 $v$ はダルシーの法則より求められる。したがって、液状化が生じたときの間ゲキ水の流出速度は

$$v = k \frac{\gamma'}{\gamma_w} \dots\dots\dots (8.1)$$

で与えられる。ところで、図 8.2 をながめると、沈殿は最も深いところからまず発生し、上方に向かって進行してきている。したがって、最深部で厚さ  $\Delta H_0$  の水平層を想定すると、そこから水が上昇して抜ける速度が (8.1 式) の $v$ にほかならない。この水平層での砂の鉛直ヒズミを  $\epsilon_v$  とすると、その厚さは、 $\Delta H_0 = \epsilon_v H_0$  であるから、これが生ずる時間を  $t$  とすると

$$k \frac{\gamma'}{\gamma_w} \doteq \epsilon_v \frac{H_0}{t} \dots\dots\dots (8.2)$$

なる関係が成り立つ。最深部の沈殿が完了すると、その上の水平層で、再び同じことが起こるから、この層に対しても (8.2) 式が成り立つ。同様にして、時間的にはずれるが、(8.2) 式を満足するような排水と沈下の現象が、下から上へしだいに伝わっていく。図 8.2 を見ると、各層の水の排水速度はそれぞれ同じである。したがって、1つ1つの水平層からの排水速度は、全層の排水速度つまり全層の沈下速度に等しいとみてよかろう。このことは、砂層の表面沈下が図 8.1 で見るごとく終始ほぼ一定速度で起こっていることから理解できる。したがって、(8.2) 式の右辺は $\epsilon_v H_0/t$  となるのである。ただし、 $t$  は全層の沈下が完了するまでの時間である。図 8.2 のデータをこれに適用してみると、 $t=180$  秒、 $\epsilon_v H_0=4.5\text{cm}$ 、 $\gamma'=0.9\text{t/m}^3$ 、 $\gamma_w=1.0\text{t/m}^3$  として、

$$k = \frac{4.5}{0.9 \times 180} = 2.8 \times 10^{-2} (\text{cm/sec}) \quad (8.3)$$

が得られる。このようにして、振動時の砂層の透水性を求めることが可能となる。

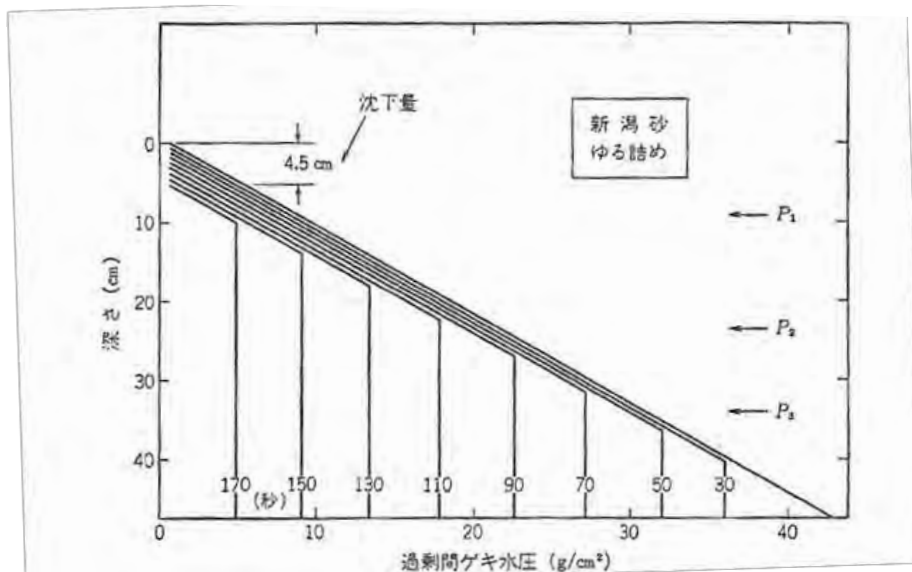
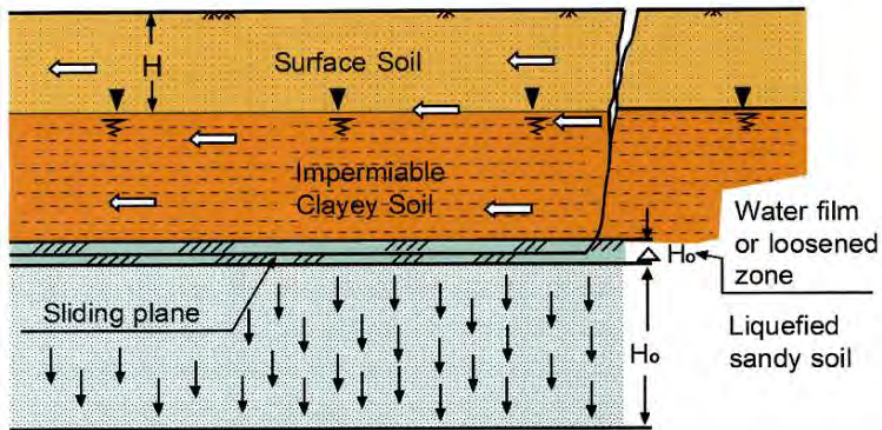


図 8-2 過剰間ゲキ水圧の分布の時間的变化 (陶浪, 1965)

### (3) 原地盤での水膜形成について

以上は、地表面上の沈下に着目したが、仮に、その上に粘土などの不透水層が存在する場合も同様で、地表面で測定された 4.5cm という沈下は、不透水層直下に形成される水膜の厚さであると考えることができよう。

次に原位置の状態を考えてみるに、地下水面より下部の位置で図 8-3 のように、不透水層があり、その下に厚さ  $H_0$  の液状化した層があるとする。この時にも以上のような考え方が適用できるとして、式(8.2)に基づいて、原位置で生じるシナリオについての適応性を具体的に考察してみることにする。



Water film or loosened zone resulting from sedimentation of liquefied sand

出典：石原委員作成

図 8-3 Water film or loose zone resulting from sedimentation of liquefied sand



### 1) 水膜が形成されるまでの時間 $t$ について

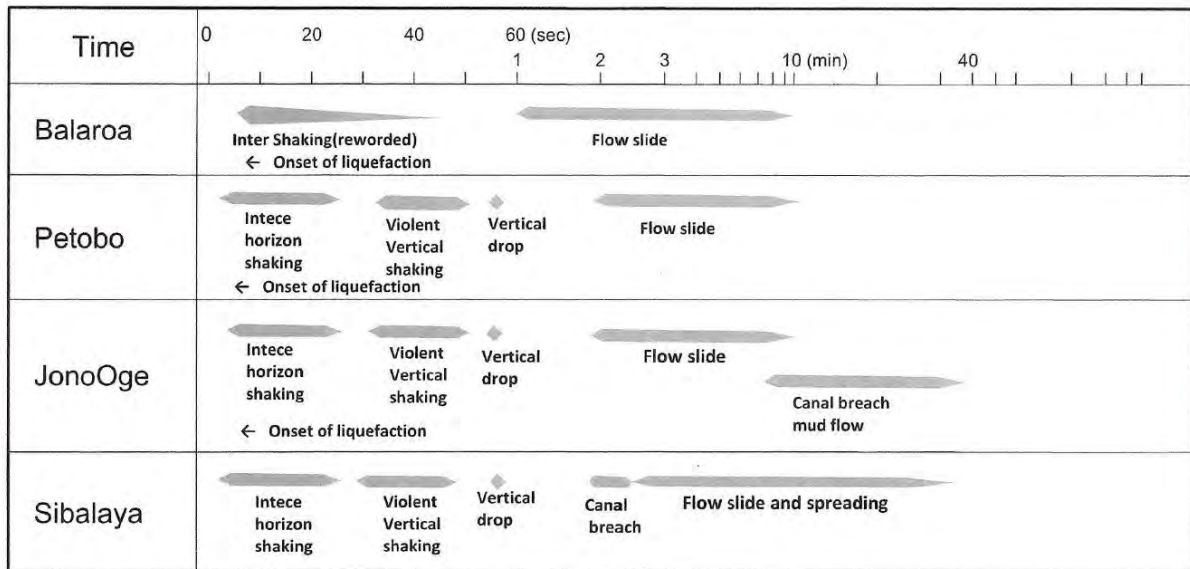
液状化の発生は、主要動の最大加速度が生じたときと考えてよい。Palu 地域の各場所で住民の目撃者聴取を行ったが、その結果の一つが図 8.4 に示してある。これより、流動が始まったのは、地震動が始まってから、1~2 分 (60~120 秒) 後であったことがわかる。従って主要動が 10sec. 位であるとして、流動が始まったのは、50~100 秒後になるので、この時刻に水膜が発生したと考えてみると、式(8.2)の  $t$  は

$$t = 50 \sim 100 \text{ sec}$$

程度であると算出される。よって、解析で予想される水膜形成の時間は、目撃者の証言による流動開始時間とほぼ一致する。

### 2) 透水係数, $k, i$ について

これは粒度に依って大きく変化するわけだが、砂またはシルト質砂で大体  $k = 5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$  程度であると考えてよい。よって、式 (8.3) のように求めた透水係数の値は、常識的な値と一致している。



出典：石原委員作成

図 8-4 地震動と流動発生の時間経過

### 3) 液状化後の体積収縮量: $\varepsilon_v$ について

図 8-1 に示した、土槽実験では、土層の厚さを  $H_0 \div 50\text{cm}$  と仮定して、土槽の収縮ひずみは、以下のように算出される。

$$\varepsilon_v = \frac{4.5}{50} = 0.09 = 9\%$$

一方、液状化による土の体積収縮量は、地盤の沈下を推定する目的で、多くの室内実験で求められてきており、その一例が図 8-5、図 8-6 に示してある<sup>(1)</sup>。この沈下量は液状化した時に土がどの程度攪乱されたかに依存していると考えられるが、その攪乱の大きさを表すために用いたのが、液状化時に非排水状態で土に加わった最大のひずみの大きさ、 $\gamma_{\max}$  又は  $\varepsilon_{\max}$  で、 $\gamma_{\max} = 3.375\%$  又は  $4.13\%$  の時の値が図に示してある。図 8-5 は実験室で作った攪乱シルト質砂に関するデータで、液状化後の体積変化量  $\varepsilon_v = \varepsilon_{\max}$  の値は  $\varepsilon_v = (3 \sim 8) \times 10^{-2}$  であることがわかる。また不攪乱試料

のデータは図 8-5 に示してあるが、 $\epsilon_v = (2\sim 5) \times 10^{-2}$ であることがわかる。

一方、Palu の掘削現場から採取した不攪乱試料に対しても、非排水せん断後の体積変化が測定してあり、その値は同程度のものであった。よって、液状化後の砂の沈殿による体積収縮ヒズミは、 $\epsilon_v = 5\sim 10\%$ のオーダーであると考えられる。

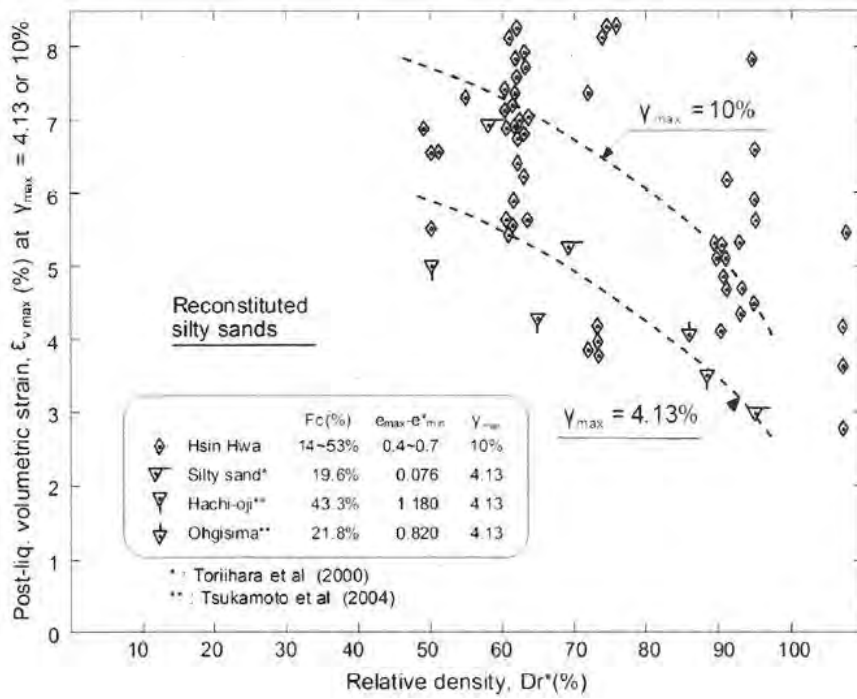
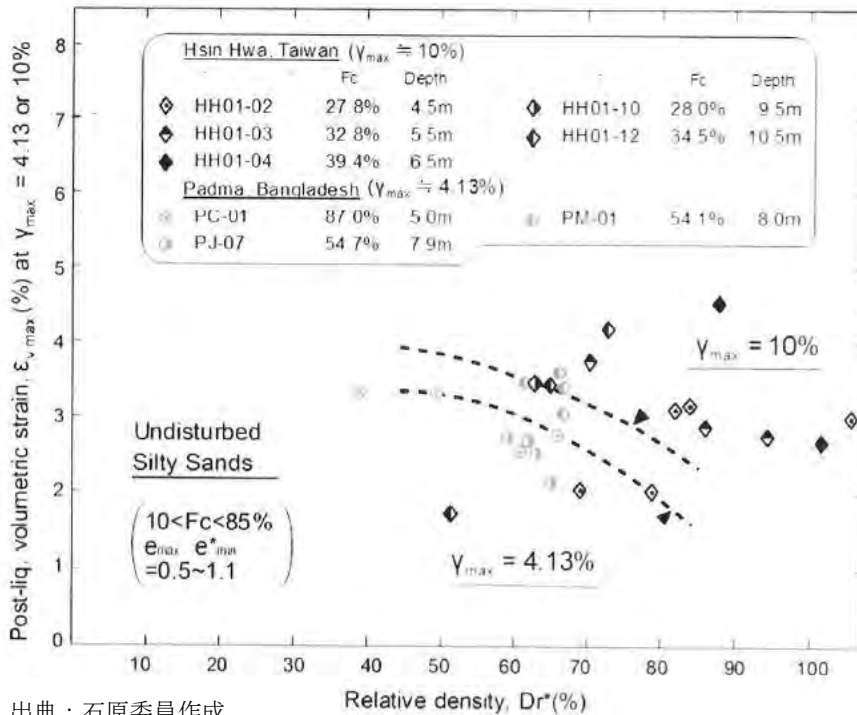


図 8-5 液状化後の排水による砂質土の収縮量（再構成試料）



出典：石原委員作成

図 8-6 液状化後の排水による砂質土の収縮量（不攪乱試料）

#### 4) 液状化層の厚さ: $H_0$

次に問題となるのは、水膜の厚さ  $\Delta H_0$  である。現地で生ずるすべり崩壊に及ぼす水膜発生の影響の度合は、この水膜の厚さに依存していると考えられる。のここでは、すべりを容易にする水膜の厚さとして、 $\Delta H_0 = 20 \sim 30 \text{ cm}$  程度は必要であると仮定してみる。よって  $\epsilon_v = 5 \times 10^{-2}$  と仮定すると、

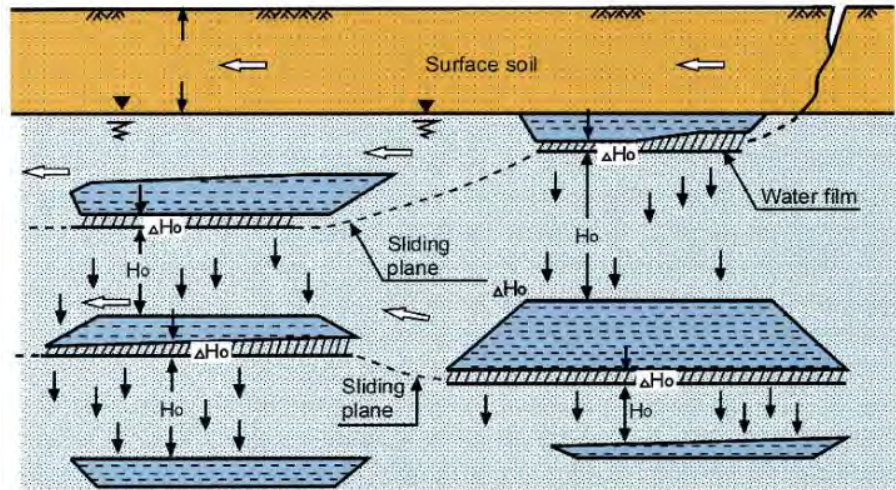
$$H_0 = (\Delta H_0) / \epsilon_v = (20 \sim 30) / (5 \times 10^{-2}) \approx (4 \sim 6) \times 10^2 \text{ cm} = 4 \sim 6 \text{ m}$$

が得られる。

つまり、流動すべりに関与した、液状化層の厚さは大体 4-6m くらいの範囲にあったのではないかと推定できる。つまり、厚さ 4~5m 程度の砂層が液状化したと仮定すると、20~30cm 程度の水膜または弱層が 50~100 秒の間にその上の不透水層の直下に発生しうると考えてよいであろう。

#### 5) 地すべり滑動のシナリオ

不透水層は、図 8-3 に示したような単純な層位でなくても、もっと複雑な層位のもとでも発生しえて、それらが連結して地盤内に一方向のすべりゾーンが形成され、大崩壊につながるシナリオも想像しうる。この想像図が図 8-4 に示してある。



Conceptual figure showing sectional formation of water films

出典：石原委員作成

図 8-7 Conceptual figure showing sectional formation of water films

#### 6) 結論とコメント

液状化が生じた後には、砂質土の沈下が生じるが、上部に不透水層が存在する場合には、その直下が水膜または間ゲキ比の大きい弱層として残留することになる。この弱層が連なって流動崩壊が生じることが、土層実験、目撃者の証言、そして土の収縮特性等の既存のデータを適用して、示された。しかし、Palu の地すべりが、この現象のみが原因となって発生したか否かについては、崩壊が大規模であったことや地盤の変状や動きが激甚であったこと等を考えると、疑義が残る所である。また、個々の場所でえられたボーリング柱状図を分析して、この弱層の深さと厚さを特定することも、現段階では困難であろう。よって、以上の考察は、あくまでも可能性についての推論であり、Palu の地すべりが水膜形式によって発生したと結論づけるには、更なる立証データの積み重ねが必要であると考えられる。

## 8-1-2 単調載荷試験（中空ねじり試験）結果にもとづく残留強度の推定

### （１）基本的概念

地盤内の土要素が液状化するか否かを判定するためには、前節で詳述したくり返し三軸試験の結果が用いられる。液状化が発生した後で地盤が下流側に大きく変形して、流動化するか否かを判定するためには、残留強度が用いられる。一方向の単調載荷で求められる残留強度はそれ以前に加わったくり返し載荷の影響をほとんど受けないので、Palu の現地からブロック法で採取した不攪乱試料に対して最初から単調載荷した非排水中空ねじり試験結果を用いて、残留強度を以下求めてみる。更に、岡村、清田の両氏が独自に実施した非排水三軸試験の結果からも残留強度を求めてみた。その前に、図 8-8 を参照して基本的考え方を簡単に説明しておく。この図には、間隙比が大きいゆる詰め試料 ( $e=0.75$ ) を拘束圧  $\sigma'_0 = 90 \text{ kN/m}^2$  で圧密した後に非排水せん断した時の応力経路 ( $A \rightarrow A' \rightarrow A''$ ) と、間隙比が小さい密詰め試料 ( $e=0.65$ ) を  $\sigma'_0 = 60 \text{ kN/m}^2$  で圧密した後に非排水せん断した時の応力経路 ( $B \rightarrow B' \rightarrow B''$ ) が図の下半分に示されている。対応する応力経路を有効応力  $\sigma'$  と間隙比  $e$  の関係として表した図は図 8-8 の上側に示してある。一般に密詰め土で拘束圧  $\sigma'$  が小さい試料は、応力経路  $B \rightarrow B' \rightarrow B''$  で示されるように、歪の増加とともに応力も増えて行くので、残留強度は  $B''$  点で表されるように相当大きな値となり、流動変形は生じないと考えられる。一方、緩詰め砂質土を大きな拘束圧で圧密した場合には、 $A \rightarrow A' \rightarrow A''$  の応力経路で示されるように、或る程度小さい応力状態（点  $A'$ ）を保持したままひずみが増大するので、土がこのような状態にある時、地盤の流動変形が生じると考えられる。その後、さらに変形が進むと応力は  $A''$  点に向かって、強度は増えるが、実際の地盤では流動で土が攪乱されてしまっているので、 $A''$  点のような状態は出現しないと考えられる。

以上の考察から、最低の抵抗力が出現する  $A'$  点に着目して残留強度  $S_u$  を定義するのが一般的な考え方である。上記の様な応力の最小値が現れ、工学的に意味のある残留強度を定義できるのは、土の初期状態（つまりせん断力を加える前の状態）における、間隙比  $e$  と初期圧密圧力  $\sigma'$  の組み合わせに依存していると考えて良い。これが図 8-8 の上方に示してあるが、まず、初期分割線（Initial Dividing Line, ID-line）という特性線に着目すると、初期状態がこの線より右側の領域にある  $e$  と  $\sigma'$  の組み合わせからスタートして、非排水せん断を行うと、点  $A'$  で示されるように、最低の強度が現れるので、残留強度が定義でき、実際の地盤では流動破壊が生じる、という風に考えてよいことになる。一方、点  $B$  で示されるように ID-line の左側にある  $e$  と  $\sigma'$  の組み合わせが、実地盤の状態であるとする、せん断時の強度は SS-line（定常状態線）で発現され、相当大きな値となるので、流動破壊は生じない、ということになる。この ID-line の代わりに SS-line を、収縮と膨張の区別をする特性線として用いる考え方が提案されてきたが、これは誤りである。SS-line はせん断が加わった状態での  $\sigma'$  と  $e$  との関係にすぎず、初期の  $\sigma'$ - $e$  の関係ではない。

ところで、応力経路は図 8-8 の下方に示してあるように、最初は間隙水圧が上昇するので左方に向かっているが、ある程度上昇した段階で、水圧が減少し始めて逆転し、応力経路は右方に向かうこととなる。この反転する点（ $A'$  と  $B'$ ）を結んで作れるのが準定常状態線（Quasi-Steady State Line, QSS-line）で、これが図 8-8 の上方に示してある。また、IDL（初期分割線）というのは、これより左方の初期状態から出発して非排水せん断が行われると砂質土は、脆弱性の強度を示して大変形が生じえないこと、これより右方の初期状態から出発してせん断が行われると大崩壊が起こりうるという限界線であることを意味している。



## (2) ねじり試験による残留強度の決定

残留強度  $S_u$  は初期の拘束圧  $\sigma'_0$  又は  $\sigma'_v$  に比例して増減するので、よく用いられるのは残留強度率  $\bar{s}_{us0}$  で、これは

$$\bar{s}_{us0} = s_{us} / \sigma'_0 \cdots \cdots \cdots (8.4)$$

によって定義される。三軸非排水単調載荷試験で  $\bar{s}_{u0}$  を求める場合には、応力経路を図 8-9 のように描き、 $\sigma'_0$  と  $\sigma'_s$  を求め、次の式

$$\bar{s}_{us0} = s_{us} / \sigma'_0 = \frac{M}{2} \cos \phi_s \frac{\sigma'_s}{\sigma'_0} \quad M = \frac{6 \sin \phi_s}{3 - \sin \phi_s} \quad (8.5)$$

を用いて算定する。ここで、 $\phi_s$  は大きなひずみが生じる定常状態 (SS-state) における内部摩擦角である。上式から明らかなように  $\bar{s}_{u0}$  の値に影響する大きな因子は、 $\sigma'_0$  と  $\sigma'_s$  の比である。これを実験データから読み取れば、 $\bar{s}_{us0}$  の値が簡単に、上式より算定できる。

以上のような考え方で、Palu 砂質土について  $\bar{s}_{us0}$  を求めた結果が図 8-9 に示してある。Jono Oge のサンプルでは、 $J_{1-10-1}$ 、 $J_{1-9-2}$  で示してあるが、 $\bar{s}_{us0}=0.36, 0.37$  という高い値が得られた。Petobo のサンプルでは  $P_{1-9-2}$ 、 $P_{1-10-1}$  で示してあるが、 $\bar{s}_{us0}=0.33, 0.34$  であった。更に Lolu のサンプルでは  $L_{1-10-1}$ 、 $L_{1-9-2}$  で示してあるが、 $\bar{s}_{us0}=0.26, 0.42$  であった。更に、清田准教授が行った三軸試験からは  $\bar{s}_{us0}=0.156$  が得られた。岡村教授による Sibalaya のサンプルに対する三軸試験データからは  $\bar{s}_{us0}=0.208, 0.234$  が得られ、これらは図 8-10 に示してある。

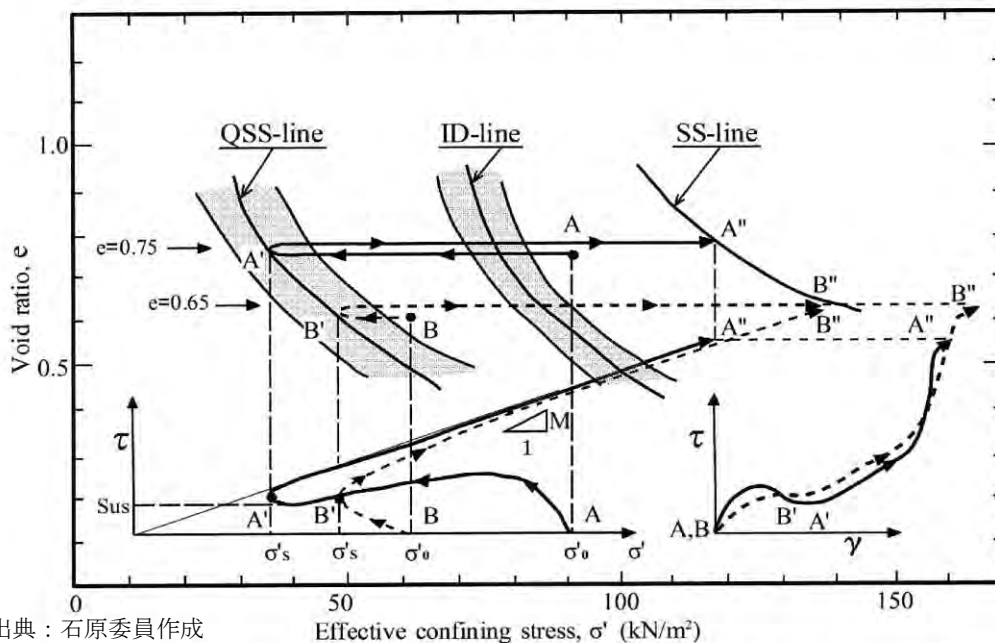
## (3) 残留強度比と N 値との関係

残留強度比については、地震時に流動崩壊を生じた過去の例について事例解析から逆算した値を集約したものが、Olson-Stark による論文に発表されている。この図の縦軸には、 $\bar{s}_u = s_u / \sigma'_v$  がプロットしてあるが  $\sigma'_0 = 2/3 \sigma'_v$  の関係を用いて実験値を修正した値も同じ図に示してある。室内試験の結果は、ほぼ Olson-Stark(2003)の値と一致していることが知れる。Palu の実験データでは正確な N 値が不明なので、 $N=5 \sim 16$  位の範囲を仮定して図示してある。この図から知れることは、まず、事例解析から得られる残留強度比がほとんど  $\bar{s}_u \leq 0.12$  で相当低いことである。Olson-Stark(2003)は、この上限値を推定しているが、N 値が 10 以下では  $\bar{s}_{us} \leq 0.12$  であると推定していることが、図 8-11 から知れる。

一方、今回の調査で求められた  $\bar{s}_{us}$  の値は、図 8-11 に示してあるように、 $0.1 \leq \bar{s}_{us} \leq 0.2$  の範囲にあったと推定してよいと考えられる。この範囲は図 8-11 にも示してある。

## (4) 残留強度比に及ぼす水膜あるいは弱層の影響

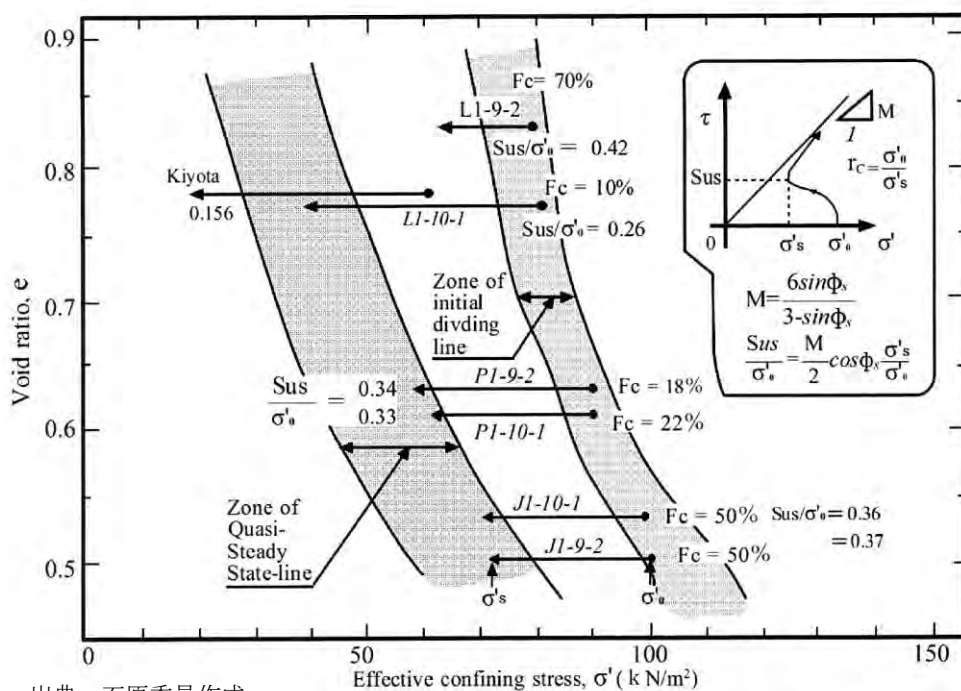
前節で水膜発生に関する考察を行ったが、その影響は安定性の評価にどのような形で現れるのであろうか？。シルトを含んだ砂層では、純粋な水膜ではなく、間ゲキ比の大きい弱層が現れるのではないかと考えられる。この弱層の影響は図 8-11 に示す  $N_1$ -値の低減として現れる。 $N_1$ -値は  $1 \text{ kg/cm}^2$  の拘束圧が存在する時の N-値に換算したものであるから、 $N_1$ -値はそのまま密度の指標と考えてよい。よって、水膜つまり弱層が発生することは、例えば  $N_1$ -値で表すと  $N_1=0 \sim 3$  位の時の残留強度、つまり  $\bar{s}_u=0.05$  程度の強度しか発生しえないすべり面が発生するというふうに解釈してもよいであろうと考えられる。



出典：石原委員作成

Effective confining stress,  $\sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>)

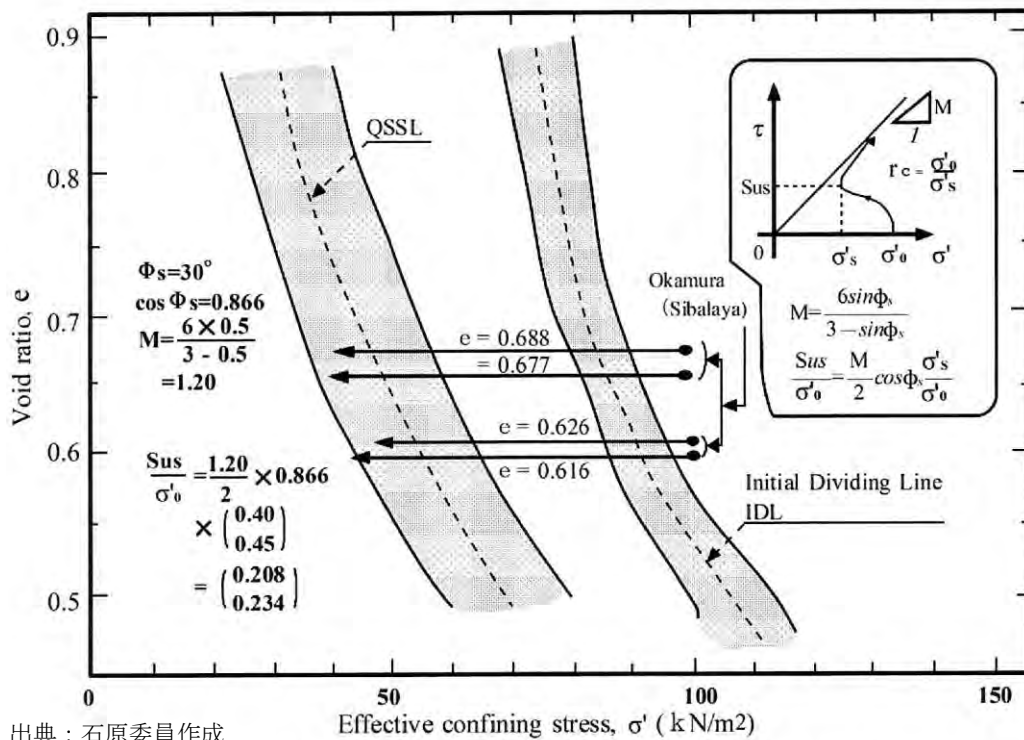
図 8-8 Definition of Initial Dividing (ID), Quasi-steady state (QSS) and Steady State (SS) lines



出典：石原委員作成

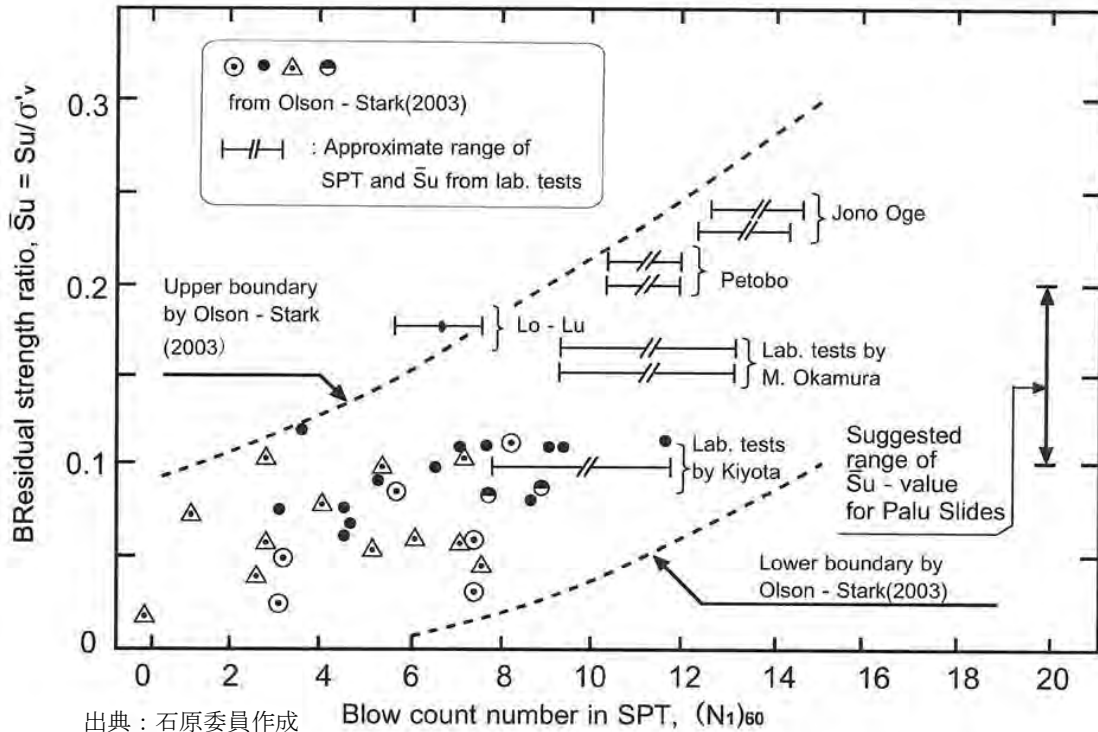
Effective confining stress,  $\sigma'$  (k N/m<sup>2</sup>)

図 8-9 Plotting test data on undisturbed block samples (Kiso-Jiban)



出典：石原委員作成

図 8-10 Plotting test data on block samples from Sibalaya (Okamura et al.)



出典：石原委員作成

図 8-11 残留強度比 $\bar{S}_{us}$  と SPT N-値との関係

## 参考文献

Olson, S.M. and Stark, T.D. (2003) Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129, 727-737. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:8\(727\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(727))

Ishihara, Harada and W.Lee (2016)

“Post-liquefaction settlement analyses based on the volume change characteristics of undisturbed and reconstituted samples”, *Soil and Foundations* vol.56 No.3 pp.553-546

Kokusho, T. (2003), Current state of research on flow failure considering void redistribution in liquefied deposits, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, PP.585-603



### 8-1-3 液状化発生後のすべり安定解析

図 8-12 に示すごとく、液状化発生時の地盤の安定性は 2 段階に分けて考えることができる。最大加速度が加わる時刻に間隙水圧は急上昇するが、そのときを対象としたのが、液状化がそもそも発生するか否かを判定する液状化解析である。これについては前章で詳述してある。液状化が生じた後は、間隙水圧の消散による地盤の沈下と地盤の流動の発生が課題となる。地盤が水平な場合は沈下のみが課題となるが、地盤が多少でも傾斜しているときには、横方向への流動が大きな問題となる。

Palu の地すべりでは、傾斜はわずかでも流動が発生しているので、図 8-12 に示すごとくこれについて検討してみることにする。

図 8-13 のごとく単純化したすべり土塊を考えてみる。地下水面は地表面から下方を正として、 $h$  の深さにあるとする。幅が  $B$  深さ  $H$  の土塊が滑動している状態を考えると、これに加わる滑動力は  $F=W\sin\alpha$  であり、それに抵抗するすべり面に作用する力は  $BS_u/\cos\alpha$  である。よって、すべりに関する安全率  $F_s$  は以下の式で与えられる。

$$F_s = \frac{S_u}{\gamma_t H \sin\alpha \cdot \cos\alpha} F_s = S_u \gamma_t H \sin\alpha \cdot \cos\alpha \quad (8.6)$$

ここで、 $S_u$  は残留強度と呼ばれるが、それは残留強度比  $\bar{S}_u$  と有効上載圧  $\sigma_v'$  を用いて

$$\bar{S}_u = \frac{S_u}{\sigma_v'} \quad \dots\dots\dots (8.7)$$

で与えられる。図 8-13 に示してある諸元の値を用いると、式 (8.6) は

$$F_s = \frac{1}{\sin\alpha \cdot \cos\alpha} \left( \gamma' + \frac{\gamma_w h}{\gamma_t H} \right) \bar{S}_u F_s = 1 \sin\alpha \cdot \cos\alpha \gamma' \gamma_t + \gamma_w \gamma_t h H S_u \quad (8.8)$$

となる。ここで  $\gamma' = \gamma_t - \gamma_w = 0.8t/m^3$  は土の水中単位体積重量である。この式で  $h$  は地下水面の深さであるから、被圧地下水が存在すれば  $h$  が減少して安全率  $F_s$  は低下してくることがわかる。Palu における地すべりは地形の傾斜が、

$$\tan\alpha = 2/100, 3/100 \quad \dots\dots\dots (8.9)$$

程度の場所で発生したと仮定して、安全率  $F_s$  が 1.0 になる時の  $\bar{S}_u$  と  $h/H$  の関係を示す式 (8.8) を図示してみると、図 8-14 のようになる。更に代表的なすべり面の深さが、地表面から  $H=5m$  の位置にあったと仮定して、 $F_s=1.0$  の時の残留強度比  $\bar{S}_u$  と地下水面の深さ  $h$  との関係を示すと図 8-15 のようになる。云うまでもなく、 $F_s>1.0$  の領域ではすべりが発生せず、 $F_s\leq 1.0$  の領域に  $\bar{S}_u$  と  $h$  の値がある場合には流動すべりが発生する、と云うことになる。

さて、Palu の地域の土の残留強度比  $\bar{S}_u$  がどの位の値であったのかを知る必要があるが、図 8-11 に示してあるように、この値は、既往のデータと今回の試験データを総合して

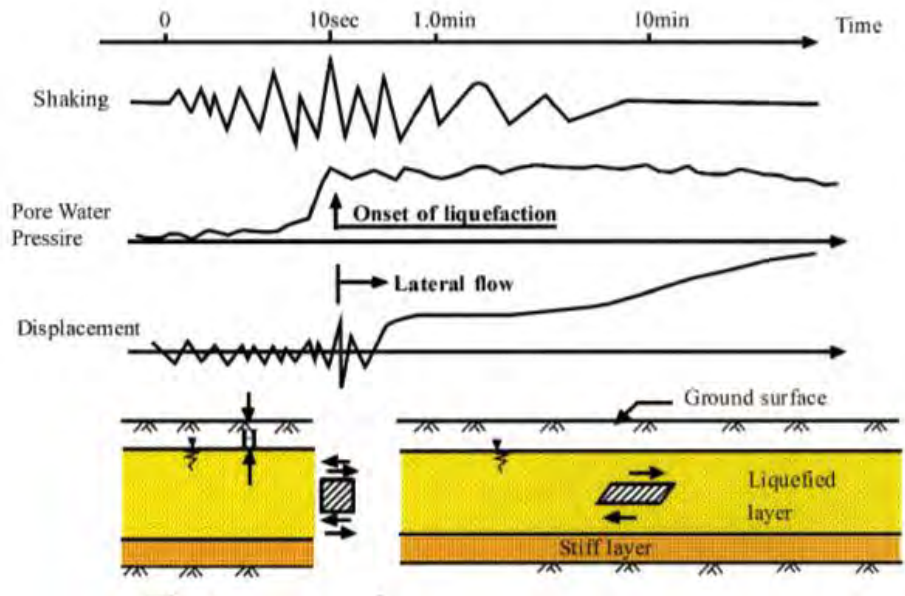
$$0.1 < \frac{S_u}{\sigma_v'} < 0.2 \quad \dots\dots\dots (8.10)$$

の範囲にあったと考えてよいだろう。この値を図 8-15 のチャートに適用してみると、すべりが発生する  $F_s\leq 1.0$  の範囲では、地下水面の深さが

$$h = -1m \sim -3m \quad \dots\dots\dots (8.11)$$

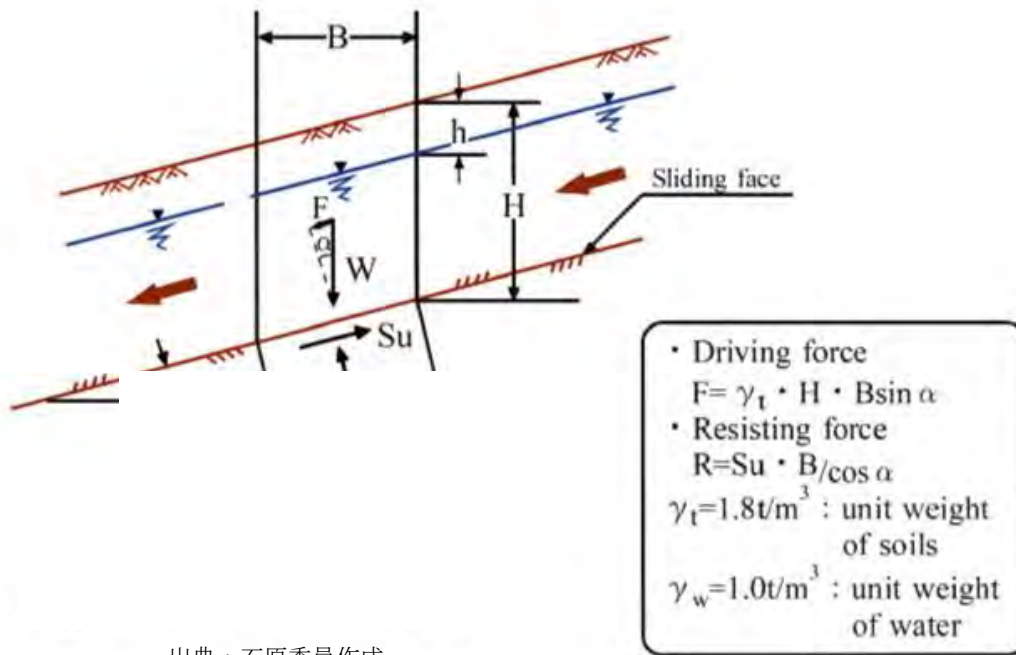
であったと推定される。つまり、被圧地下水の影響により、地下水面は地上 1.0~3m 以上の位置にあったのではないかと推定されるのである。この被圧地下水の存在が Palu の大地すべりの根元

的理由であると考えられる。



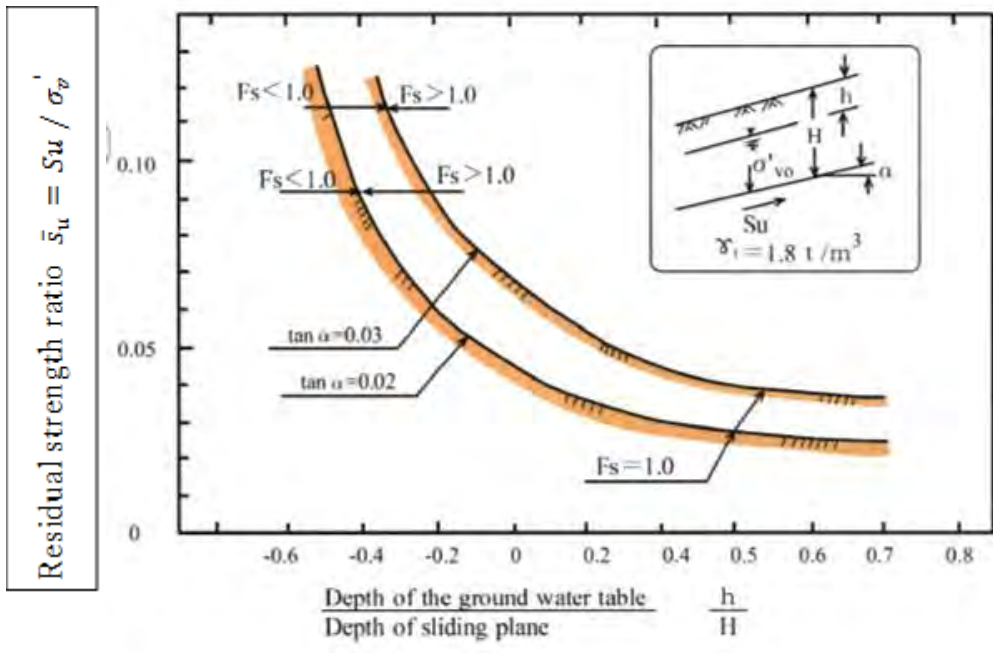
出典：石原委員作成

図 8-12 液状化発生と流動すべりの発生

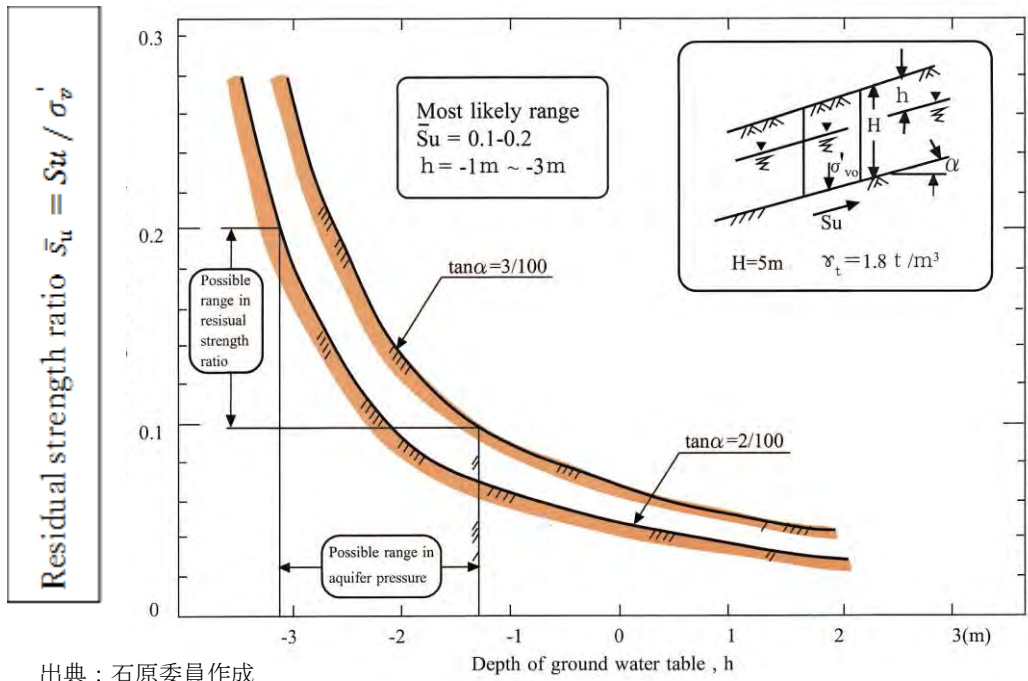


出典：石原委員作成

図 8-13 すべり土塊に作用する力



出典：石原委員作成 図 8-14 残留強度比 $\bar{s}_u$ と $h/H$ の関係



出典：石原委員作成 図 8-15 安全率  $F_s$  が 1.0 以下になる時の残留強度比と地下水面との関係

#### 8-1-4 被圧地下水の由来

大規模な地すべりをもたらした主要な原因は Palu 川の下流地帯に存在する被圧地下水によるものと考えられる。それらは量的には特定しがたいが、大別して 3 つの原因によるものと推定される。これらについてのコメントを取りまとめたのが表 8-1 である。

表 8-1 被圧地下水の由来に関するコメント

| 被圧地下水源             | コメント  |
|--------------------|---|
| 灌漑用水路からの漏水         | 1980 年代に用水路が作られ、稲作が発展してきた。用水路の側底面のライニングは無く、大小の亀裂を通して漏水が生じてきた可能性がある。Balarooa には用水路が無い。 |
| 扇状地での地下水           | Petobo、Jono Oge の地すべり背後には新期時代の扇状地があり、地震前には地下水面が高く、礫質地盤を通して地下水が補給されていた。                |
| 地震時の断層を通しての深層からの湧水 | 地すべり頭部に南北に連なる湧水帯があり、地震前から温水が湧き出していた。地震当時の状況ヒアリングによると Nalodo 発生時・発生後に大量の湧水が発生している。     |

出典：石原委員作成

## 8-2 國生委員の提供論文

### 8-2-1 Palu 緩斜面の液状化水膜流動メカニズム(國生委員)

#### (1) 要約

- ① Palu 斜面流動は扇状地末端の勾配 1~3°の緩傾斜沖積地盤で発生したが、被災地域は周辺山岳斜面と無巻き用水路から大量の浸透水が供給され、地下水位は浅く斜面の湧水位置から下流域では被圧状態にあった。
- ②  $M=7.5$  の強い直下地震で砂・礫・シルトの互層構造からなる沖積地盤が液状化した。被圧地下水の上向き浸透流により液状化は生じやすかったが、液状化による有効応力ゼロの状態から、さらに浸透流による鉛直力が直接的に地盤を押し上げて斜面流動を起し易くしたわけではない。
- ③ 砂・礫・シルトの互層地盤が液状化し相対的に透水性の低い層の直下に複数の水膜が形成されたため、それらを通ずるすべり面に沿ってその上に載るキャップ層が不安定化し滑動開始したと考えられる。この水膜メカニズムにより単純な 1 次元地盤モデルで推定した水膜成長時間によって、住民の証言による地震終了からすべり開始までの時間遅れがほぼ説明できる。
- ④ 水膜の作用で滑動開始したのち、広域のキャップ層が 1~3%の緩斜面に沿って下流に滑動開始することで解放される重力エネルギーにより直下の液状化層が激しくせん断攪乱されて地山湧水も加わり高含水の砂・礫・シルト混合体となり、これがせん断抵抗を極めて低く押し下げてキャップ層の長距離流動を可能にしたと思われる。
- ⑤ 高含水の砂・礫・シルト混合体が極めて低いせん断抵抗を発揮するメカニズムに関して、一般に非塑性細粒分が細砂に加わるとダイレイタンス特性が収縮側になり液状化時に流動破壊を起しやすくなることが知られている。しかし今回 Palu で採取した砂礫試料では非塑性細粒分が多いにも関わらずそのような挙動は低密度の攪乱試料でも見られなかった。その一因としては、Palu の試料がこれまで研究対象とされてきた貧配合の細砂とは異なり良配合の砂礫であることが考えられる。さらにこのような単純な室内試験に基づく知見を超えた激しい粒子攪拌を伴う動的現象が重要なカギを握る可能性など考えられ、更なる検討が必要である。
- ⑥ なお、これまで液状化による緩斜面の長距離流動破壊の報告は新潟地震での水膜による数 m 程度のすべりの報告 (Kokusho & Fujita 2003) はあるものの、陸上部では稀であるように見える。1920 年に中国甘肅省で起きた海原地震による石碑原での 2.5°程度の緩斜面流動破壊の軌跡は乾燥地帯でもあり未だに明瞭に確認できる (國生 2009)。一方、多雨地帯では流動軌跡は浸食堆積作用により消滅し易く、100 年以上の長期を超えて地形的特徴を残すかについては疑問が残る。一方、海底地すべりでの類似事象は必ずしも珍しくはなく、1964 年アラスカ地震での Valdez や Sward, 1999 年トルコ・イズミット地震で数度の勾配の海岸を巻き込んだ海底地すべりが起きている (Kokusho 2003)。1980 年にカリフォルニア沖で起きた地震では 20km×2km の水深 60m の砂泥互層海底地盤 (傾斜 1°以下) が流動を起している (Field et al.



1982)。Palu の海底地すべりについても海岸に面した同じような扇状地末端地形で起きたとの津波グループの見解が紹介され、陸上部と海底部のメカニズムに大きな違いがない可能性がある。

## (2) 被圧地下水の役割

- ① Palu での液状化による緩勾配斜面流動破壊の特徴の一つは、被圧地下水の関与が疑われる点である。均質地盤での動水勾配  $i=h/z$  一定の 1 次元鉛直定常浸透流を考えると、被圧水頭  $h$  は地表付近ではゼロで深さ  $z$  に比例して増加するとした場合の浸透速度  $v$  は透水係数によりダルシーの式 (1) で表され、同じ水頭  $h$  でもそれが深部 ( $z$  が大) で設定されるほど動水勾配は小さく流速も小さくなる。これは一般的に深部の被圧起源ほど地表付近での湧出速度が小さくなることを意味している。例えばボーリング孔で同じ地表+1m の水頭が測定されても、 $z=-3m$  あるいは-30m の深度により動水勾配  $i$  も湧水速度 (湧出量)  $v$  も 10 倍違うことになる。

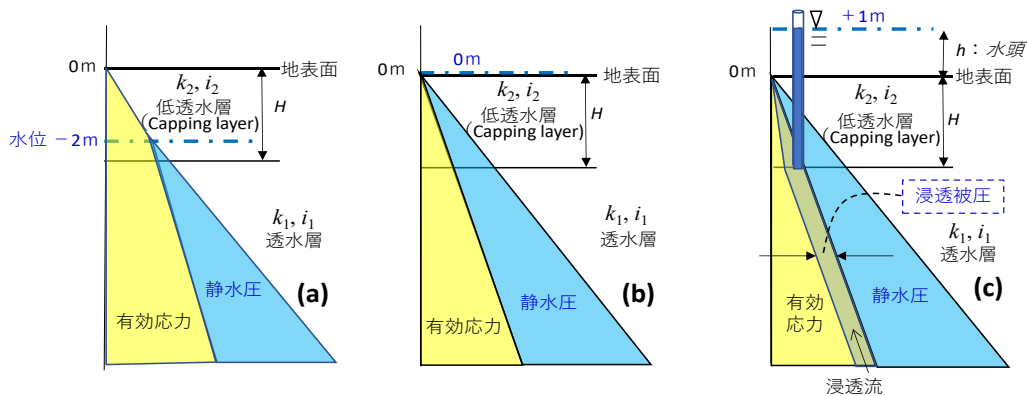
$$v=k \times i = k \times h/z \dots\dots\dots (1)$$

- ② 図 8-16(a), (b), (c) では Palu 地盤を単純な 2 層系に置換え、地下水位が GL.-2m, 0m, +1m (被圧水頭) の 3 ケースについて有効応力と水圧の深度分布を描いている。地表は厚さ  $H$  の低透水 Cap 層がありその下に液状化し易い透水層があると仮定している。このうち(a)-2m, (b) 0m のケースについては理解しやすく、この地盤が液状化した時は有効応力が全て過剰間隙水圧に転換される。被圧状態の(c)では低透水層下面で GL.+1m の水頭が定義され、地表での水頭は 0m で湧水は地表面から流れ去る。その時の全応力と静水圧は(b)と同じなので、図(c)の圧力の深度分布に示すように有効応力は被圧の分だけ削られ、次式が成り立つ。

$$\text{全応力 (全土被り)} = \text{有効応力} + \text{浸透被圧} + \text{静水圧} \dots\dots\dots (2)$$

- ③ 透水層と低透水層の透水係数を  $k_1, k_2$  ( $k_1 \gg k_2$ ) 動水勾配を  $i_1, i_2$  とすると、この 2 層系地盤の浸透流速  $v$  は次式となる。

$$v=k_1 i_1 = k_2 i_2 \dots\dots\dots (3)$$



出典：國生委員作成

図 8-16 有効応力・水圧の深度分布：(a)地下水位-2m, (b) 0m, (c)+1m

透水層では動水勾配  $i_1$  は小さく水頭の深度方向の変化は小さいが、低透水層では動水勾配  $i_2$  が大きく被圧水頭は深度に比例して減少し地表でゼロとなる。

- ④ 地震時に透水層が液状化する場合、(c)では上向き浸透流により有効応力が低下しているため浸透流の無い(b)よりも液状化が生じやすい。しかし液状化してしまえば有効応力分が過剰間隙水圧に転換され、浸透流の有無に関わらず (b)と同じ応力状態に至る。

### (3) 水膜生成メカニズム

- ① Palu の地盤は砂・礫・シルトの互層構造となっているため、液状化すると相対的に透水性の低い細粒土層の直下に水膜ができると考えられる (Kokusho 2003)。水膜生成メカニズムは液状化による土粒子骨格の体積収縮により生まれる余剰間隙水の上昇流が相対的に透水層の低い層の下面で一時貯留されることで説明できる。定常浸透現象では式(3)により2層の流速は  $v=k_1i_1=k_2i_2$  で等しく水膜は生成しないが、液状化すると限界動水勾配  $i_{cr}$  により流速は液状化層で  $v_1=k_1i_{cr}$  となる。低透水層では  $v_2=k_2i_2$  のままであれば  $i_{cr} \gg i_1$  で  $v_1 > v_2$  となり、低透水層の直下に水膜が生成することになる。なお、限界動水勾配  $i_{cr}$  は  $\rho_{sat}$ =飽和土の密度、 $\rho_w$ =水の密度により次式で計算される。

$$i_{cr} = (\rho_{sat} - \rho_w) / \rho_w \dots \dots \dots (4)$$

- ② ケース(c)で液状化が生じると液状化層での全応力が浸透被圧の有無に関わらず全て水圧になることは(b)と変わらない。浸透被圧は式(2)のように全応力に既に包含されており、液状化時の全応力にさらに加算されるものではないからである。この時に動水勾配は式(4)による限界値に達することも(b)と変わらない。その時の浸透流速  $v=k_1i_{cr}$  はケース(b)と変わらず、したがって水膜の成長速度も変わらない。浸透流はケース(b)では液状化のみで生じるが、(c)では液状化に加えさらに被圧起源からの浸透流が合わさって起きる。浸透流速は同じでも、水膜の存続時間はケース(c)では (b)より長く液状化終了後も長時間にわたり浸透流の流入が継続する。ただし①で述べたように被圧起源での被圧水頭が同じでもそれが深部・遠方で定義された水頭であるほどそれによる動水勾配は小さく、低透水層直下の液状化による浸透流に比べて浸透速度 (浸透水量) はかなり小さいと考えられる。
- ③ 液状化による低透水層直下での水膜生成速度については、図 8-17 に示す 1次元砂層模型実験 (Kokusho 2003)が参考になる。この実験では透明アクリルチューブに豊浦砂 (細砂) により 2.1 m 厚さの飽和砂層を作成し、その中間に低透水シルトシームを挟み込み、ショックを加えて全体を瞬時に液状化させる。液状化直後から砂層の沈下に伴いシルトシーム直下に水膜が成長し最大厚に達したのち消滅するまでのあいだ長時間存続し続ける。その上部の砂層が傾斜していればその安定性に重大な影響を及ぼす。一方、粗砂の中間に厚さ 5 cm の豊浦砂を挟み込んだ類似の実験では、相対的に透水性の低い豊浦砂層の直下にも同様に水膜が生成されるが、シルトシームの場合に比べ水膜厚さの成長速度ははるかに速く存続時間は短い。

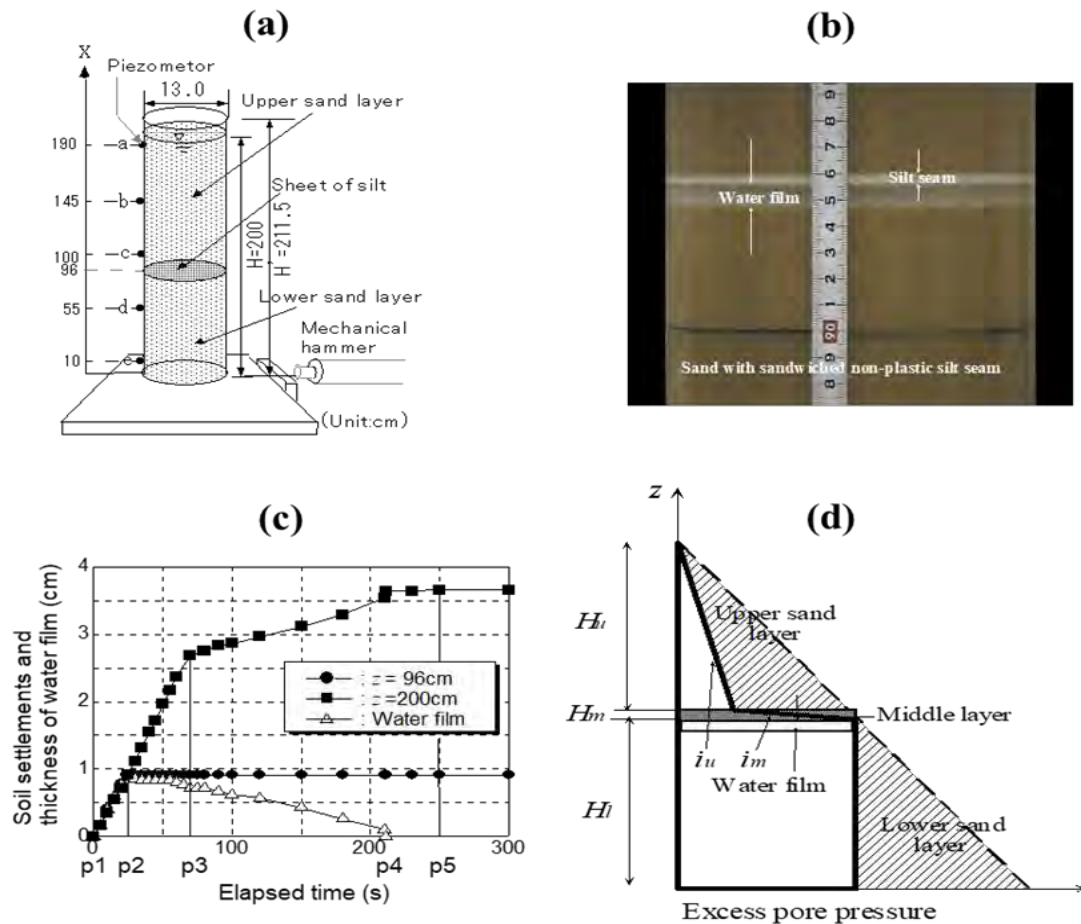


図 8-17 1次元砂層模型実験 (Kokusho 2003) : (a) 1次元アクリルパイプに作成したシルトシームを挟む飽和砂層, (b) 液状化によるシーム直下に生成した水膜, (c) 液状化に伴う水膜厚さと砂層各深度の沈下の時刻歴, (d) 水膜生成時の過剰間隙水圧分布と動水勾配

④ 図 8-18 は図 8-17 の実験による種々の相対密度  $D_r$  に調整した細砂・粗砂の水膜直下での沈下速度  $v_s$  の測定結果 (図-3 の中空プロット) である。液状化層での限界動水勾配  $i_{cr}$  と液状化する以前の透水係数  $k$  を用いてダルシーの式から計算した浸透流の流速  $v = ki_{cr}$  (図 8-18 の塗潰しプロット) に近い値であることが分かる。細砂 (Fine sand) にシルトシームを挟んだケースでは  $v_s \doteq 4 \times 10^{-2} \text{cm/s}$  であるから, これを水膜厚の成長速度とみなすと 1 分で 2.4cm となる。粗砂 (Coarse sand) の間に豊浦砂を挟んだケースでは  $v_s \doteq 0.5 \text{cm/s}$  であるから 1 分で

30 cm となる。これは周辺地山からの浸透流による流速よりかなり大きいと考えられる。

- ⑤ 液状化層中に低透水薄層があれば水膜はその直下で発生し、その成長速度はそれ以下の砂層厚には依存せず浸透速度  $v = ki_{cr}$  のみで決まり、砂層が厚いほど水膜の最大厚が大きくなりそこまで要する時間が長くなる。液状化する範囲に低透水薄層が  $m$  層存在すれば、各層の直下で同時に水膜が同じ速度で成長するため、1層の場合に比べ水膜の成長に必要な時間は大幅に短縮され、薄層が等間隔に挟ま

れているとすれば  $1/m$  となることに注意が必要である。いっぽう水膜に貯留された水は鉛直亀裂が発生すればそこから急速に抜けるが、それ以外は低透水薄層を通して徐々に上方に浸透するため地盤の不安定性が継続する時間は一般に水膜成長時間よりはるかに長い。

- ⑥ 実際の地盤では地層構造が 2 次元・3 次的に複雑に変化し複数の水膜が水平方向に不連続に異なる深度で同時発生する状況が想定され、1 次元の成層構造よりはるかに複雑であるが、現象の基本的理解は 1 次元モデルでも可能と考えられる。例えば液状化層厚が 5 m として、 $5\text{ m} \times 3\% = 15\text{ cm}$  の総厚の水膜が 3 深度に分かれて 5 cm ずつ同時に出現した場合について水膜成長時間を試算すると、細砂（水膜成長速度  $4 \times 10^{-2}\text{ cm/s}$ ）であれば 125 秒程度、粗砂であれば（水膜成長速度  $0.5\text{ cm/s}$ ）であれば 10 秒程度となる。すなわち上記のような条件に基づけば液状化発生から 10 秒～2 分程度の時間で地盤の不安定状態はピークに達することになり、Palu での被災住民の証言（強い揺れと地盤変状開始までの時間間隔）とは矛盾しないように思われる。

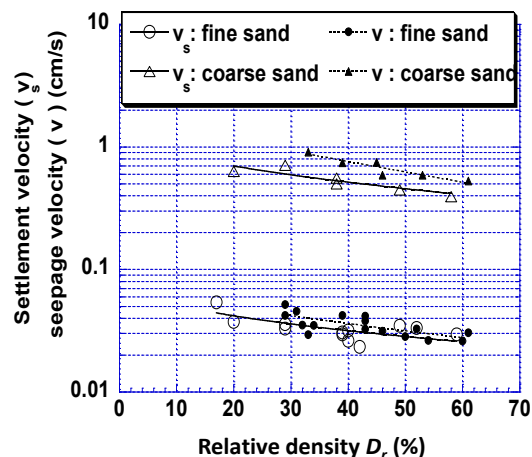


図 8-18 1次元砂層模型実験(Kokusho 2003)による細砂層（豊浦砂）と粗砂層の沈下速度  $v_s$  と浸透速度  $v$

#### (4) 液状化層でのボイリングの影響（追加検討）

- ① 液状化した砂層での動水勾配は式(4)の理論限界動水勾配  $i_{cr}$  で与えられる。上昇浸透流がある場合の液状化についても理論限界動水勾配に変わりはなく、図 8-16(c)に示したように浸透流による動水勾配に液状化時の過剰間隙水圧による動水勾配が加わって同じ動水勾配となることは既に述べた。つまり液状化層では動水勾配  $i_{cr}$  を考えればよいはずだが、念のため何らかの理由（例えば周辺地山からの地下水圧の急上昇など）により液状化発生後に異常に強い浸透流が加わり  $i_{cr}$  以上の動水勾配を受けて激しいボイリングが生じた場合についても考えてみる。

- ② 液状化砂層中の流速は  $v_1=k_1i_{cr}$  であり液状化層の透水係数  $k_1$  に支配される。室内実験によれば液状化中の砂層の沈降速度から計算された透水係数は液状化前とは大きくは

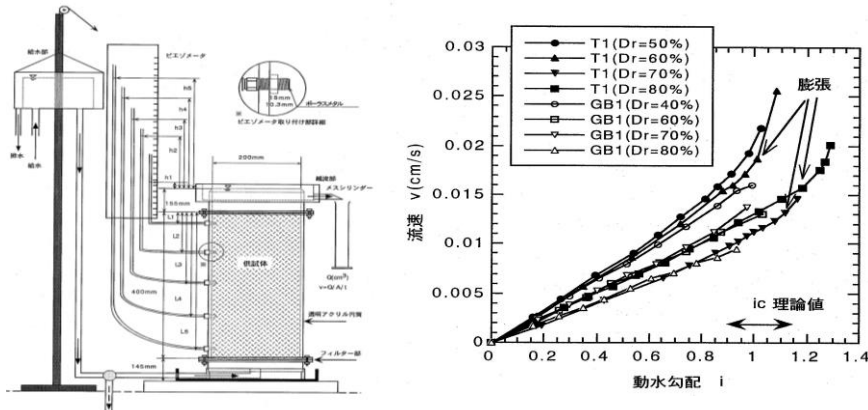


図 8-19 低水位透水試験による砂礫のボイリング試験 (Kokusho et al. 1998)

変化しないことが示されている (Kokusho 2003)。しかし液状化により限界動水勾配に達してから何らかの原因で  $i_{cr}$  を超える動水勾配が作用して激しいボイリングが発生した場合には、 $k_1$  は大幅に増加することが砂礫の定水位透水試験の流速～動水勾配カーブ (図 8-19) の勾配から読み取れる (Kokusho et al. 1998)。そこでそれが水膜への流入速度に及ぼす影響を調べるため、図 8-16(c)の液状化砂層 ( $H_1, k_1$ ) の下に非液状化砂層 ( $H_0, k_0$ ) を加えた出典：國生委員作成

図 8-20 のモデルを考えると、両者を連結した鉛直透水係数  $k_V$  は

$$k_V = (H_1 + H_0) / (H_1/k_1 + H_0/k_0)$$

$k_1 = \alpha k_0$  で表わすと：

$$k_V = (H_1 + H_0) k_0 / (H_1/\alpha + H_0)$$

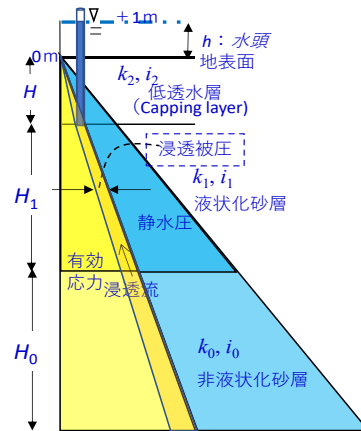
液状化前に  $\alpha=1$  と仮定した場合は当然:  $k_V = k_0$  であり液状化後のボイリング継続時に液状化砂層の透水係数は 10 倍増加したとして、 $\alpha=10$  と仮定した場合は：

$$H_0 = H_1 \text{ とすれば } k_V = 1.8k_0$$

$$H_0 = 2H_1 \text{ とすれば } k_V = 1.4k_0$$

$$H_0 = 10H_1 \text{ とすれば } k_V = 1.1k_0$$

つまり、被圧浸透流は液状化層の下にある非液状化層を通過してくることを考えると、 $k_V$  はその部分の透水性に大きな影響を受ける。したがって液状化層の透水性が液状化後にボイリングが継続して 10 倍に増加したとしても  $k_V$  は  $k_1$  からそれほど増加しない。



出典：國生委員作成

図 8-20 下部の非液状化砂層を考慮した有効応力・水圧の深度分布

### (5) 斜面流動時の摩擦抵抗

- ① 前述のように液状化直後から水膜が液状化砂層中に複数発達し始める。水膜の最大層厚は液状化層の最終沈下量に等しいと考えると層厚の 3～5% 程度となる。Palu での液状化層厚を 5～10m とすれば最大水膜厚は 15～50cm となるが、これが複数の深度に分散して出現すると考



えられる。水膜が成長するにしたがい緩傾斜地盤は不安定に向かい、その不安定度合いは地盤の傾斜勾配、水膜厚さ、水膜上下面の平坦性などに依る。地表面勾配は1%以下でも水平に数メートル流動した新潟地震の例があるが (Kokusho & Fujita 2003)、勾配が大きくなるほど当然ながら駆動力は増す。いっぽう勾配が大き過ぎると低透水層下面に沿った上方への水の流れが発生し厚い安定した水膜にはなりにくいことが模型実験で観察されており、Palu 地点の1~3%は水膜生成にとって適度な勾配であったと思われる。

- ② 水膜があるレベルまで成長しそれより上部のCap層のすべり安全率が1.0を下回った時点で、斜面表層部の滑動が始まる。複数の水膜を通るすべり面が関わり、その上部のキャップ層が必ずしも一斉にはなく時間ズレを伴いながら水平移動を開始した。Cap層が広域に滑動開始した後は1~3%の斜面勾配が流動土塊の重力エネルギーを供給し、それが損失エネルギーとバランスしてほぼ一定の運動エネルギー（自転車並みの一定速度）を保ちながら長距離流動した。
- ③ Paluでの最大の謎は、なぜ1~3%の緩勾配斜面の表層が最大1km以上の長距離を流動する低い摩擦抵抗を実現できたかである。そのためPaluの地盤流動中に実際に発揮された残留強度を推定することが重要であり、以下のエネルギーバランス式が適用できる (Kokusho 2017)。

$$\Delta E_{gr} + \Delta E_{eq} = \Delta E_{dp} + \Delta E_k \quad (5)$$

ここに、 $\Delta E_{gr}$ =重力エネルギー増分= $\rho g H(\Delta \delta) \tan \theta$

$\Delta E_{eq}$ =地震波動エネルギー増分=0 (流動時は地震終了している)

$\Delta E_{dp}$ =流動土塊損失エネルギー増分= $(\rho g H - u)(\Delta \delta) \tan \varphi$

$\Delta E_k$ =流動土塊運動エネルギー増分=0 (一定速度流動条件)

$\rho g$ =流動土塊重量、 $H$ =流動土塊厚さ、 $u$ =すべりゾーンの間隙水圧、

$(\Delta \delta)$ =水平流動距離増分、 $\theta$ =地盤傾斜角、 $\varphi$ =すべりゾーンの等価摩擦角

$\rho_{sat}$ =流動土塊飽和密度、 $\rho_w$ =水の密度

式(5)から導かれる  $\Delta E_{gr} = \Delta E_{dp}$  より

$$\tan \varphi = \rho g H / (\rho g H - u) \times \tan \theta \quad (6)$$

地下水位が流動土塊の下面から上面にあるとすれば  $u=0 \sim \rho_w g H$  であるから；

$$\tan \varphi \doteq 1 \sim 2 \times \tan \theta$$

すなわち流動中に発揮された残留摩擦角としては  $\varphi=1 \sim 6^\circ$  の極めて低い値が逆算される。

- ④ 緩勾配斜面に沿ってCap層が長距離流動するために、その直下の液状化層がこのように極めて低い残留摩擦角を発揮したメカニズムの解明が必要になる。低透水層の直下で水膜が連続的に成長しすべり面が長距離流動中もすべて水膜中を通過すればその抵抗はゼロになる。しかし実際の地層堆積状況は複雑で水膜形成されてもその上下面は滑らかでないことや、複数の水膜に分かれて不連続に発生するため、すべり面は水膜中に留まらず砂層中も通過することは確実である。長距離流動の間に勾配1~3%程度といえども斜面から連続的に与えられる重力エネルギーにより、表層直下の液状化層は激しく混合攪乱されて高含水の砂・礫・シルトの混合体が形成されるとするのが現実的である。さらに被圧湧水による豊富な地下水も加わって、かなり緩い密度が出現し分級も起こると考えられる。
- ⑤ 以上よりPaluの緩斜面の長距離流動には残留摩擦抵抗が極端に低下するメカニズムが必要であり、それは激しい粒子運動を伴う極めて動的な現象と考えられる。その再現には従来の実

験室レベルでの準静的実験では再現性に限界があるとも思われるが、ここでは従来の室内土質試験的手法の延長上での可能性について以下で考えてみる。

### (6) 摩擦抵抗低下のメカニズム

- ① 液状化層に含まれる非塑性細粒分は砂の非排水せん断特性（ダイレイタンスー特性）を膨張から収縮に変え、液状化後の残留抵抗を大幅に減少させることが多くの既往研究により示されてきた (Ishihara 1993, Yang et al.2006, Papadopolou and Tika 2008, and Rahman and Baki 2011)。図 8-21 はその一例として相対密度  $D_r \approx 30\%$  の富津砂に非塑性石粉細粒分を混合した場合の非排水単純せん断試験の結果を示す (Kokusho 2017)。細粒分含有率  $F_c=0\%$  の時には体積膨張による水圧減少によって強度回復するのに対し、 $F_c$ が増加するにつれ体積収縮に転じ、 $F_c=20\%$  ではピーク強度に達したあとひずみ軟化して抵抗ゼロまで流動破壊する。つまり非塑性細粒分を多く含む緩い砂は大ひずみを受けて抵抗ゼロの液体のように流動する可能性を示唆している。Palu の地盤調査結果から、液状化層には低塑性細粒分が多く含まれておりこれが低透水 Cap 層直下の水・砂混合体の極めて低いせん断抵抗に結びつき、水膜生成後に緩勾配斜面を長距離流動させた可能性が考えられた。
- ② そこで実際の Palu (Petobo 地点) の試料 (細粒分含有率  $F_c=35.9\%$ ) を用いて、斜面が流動開始後に攪乱状態となった場合に応力～ひずみ関係にひずみ軟化特性（ピーク強

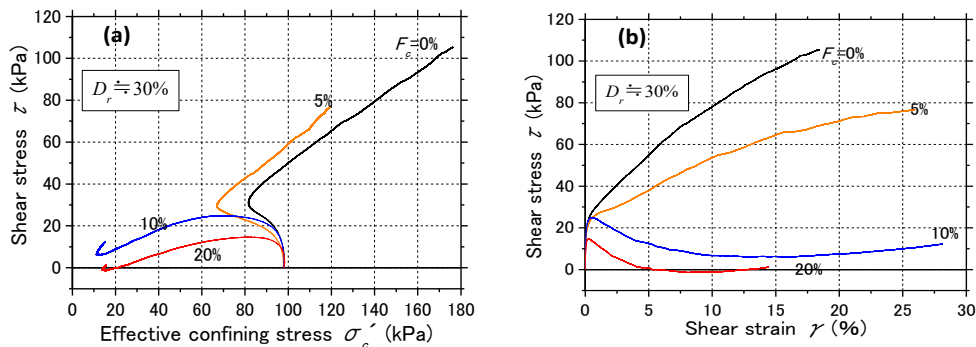
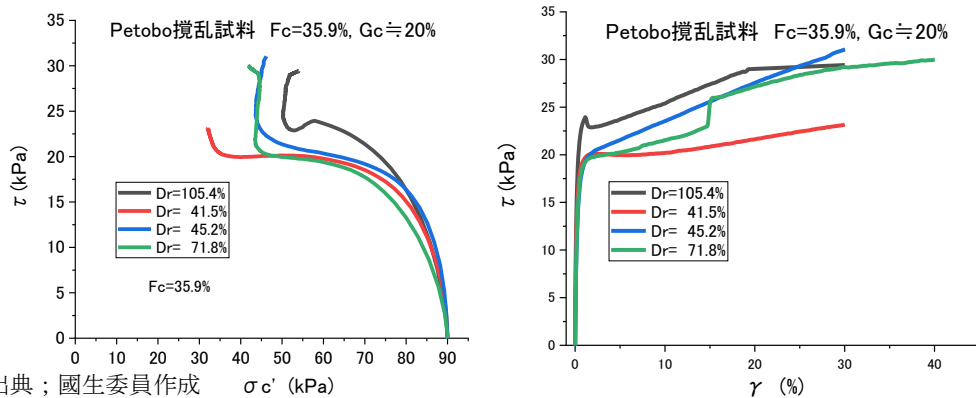


図 8-21 富津砂+非塑性石粉細粒分の中空ねじり非排水単調せん断試験での非塑性細粒分の含有率  $F_c$  の影響：(a) 有効応力経路，(b) 応力～ひずみ関係 (Kokusho 2017)



出典；國生委員作成  
図 8-22 Palu 砂礫 ( $F_c=35.9\%$ ) の相対密度  $D_r$  の異なる室内調整試料の中空ねじり非排水単調せん断試験：(a) 有効応力経路，(b) 応力～ひずみ関係 (基礎地盤コンサルタンツ試験結果)

度の後にせん断抵抗が減少し流動する) が現われるか、その場合どの程度まで残留強度が低下し得るかを中空ねじりせん断試験 (供試体外形 60mm 内径 40mm 高さ 60mm : 基礎地盤コンサルタンツ実施) で調べた結果を図-7 に示す。室内調整により相対密度を  $Dr=100\%$  から 40%程度まで段階的に変化させたが、富津砂+非塑性石粉細粒分のようなひずみ軟化・流動特性は表れず、明瞭な強度低下も生じない。この原因としては、砂や細粒分の性質の違い、特に図 8-23(a)に示すように Palu 砂礫は礫分を 10~30%程度含み良配合であるのに対し、従来行われてきた研究は富津砂のように礫分 0%の貧配合の細砂を対象としていることが関係していると考えられる。

- ③ 細粒分含有率  $F_c$  の増加が砂の非排水せん断特性を膨張から収縮に変化させるメカニズムは図 8-23(b)に示す間隙比( $e$ )~有効拘束圧( $\sigma'_c$ )平面上の定常状態線(SSL)と関わっていることが知られている (Casagrande 1971)。つまり砂の  $e \sim \sigma'_c$  平面上の位置が SSL より左下方ではせん断時のダイレイタンシー特性が膨張性に対し、右上方では収縮性となりせん断抵抗が減少して流動破壊する現象が現われる。一方、この SSL は細粒分含有率  $F_c$  が 0%から増加するにしたがって左下方に移動する傾向が実験的に得られており、図 8-21 に例示した  $F_c$  の増加に

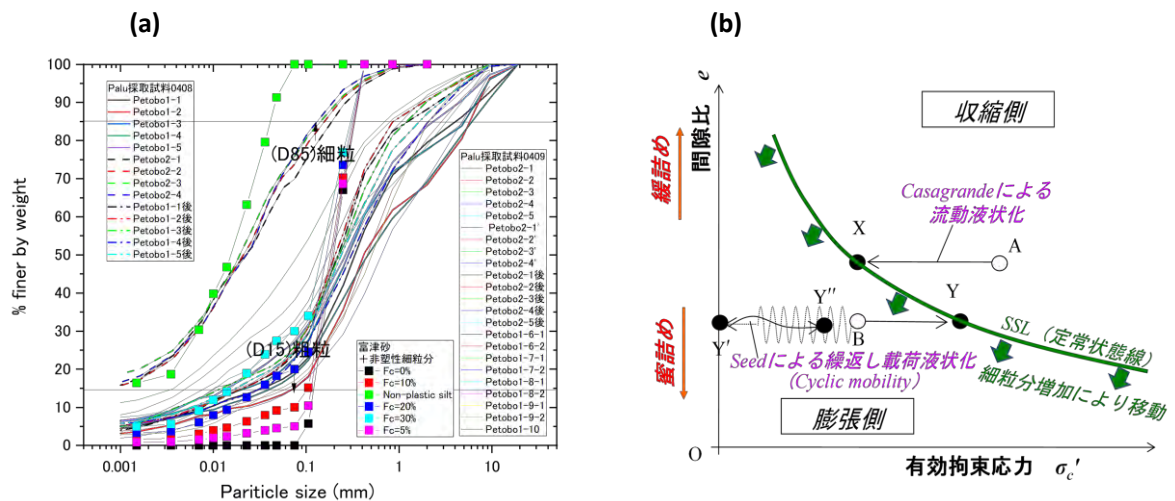
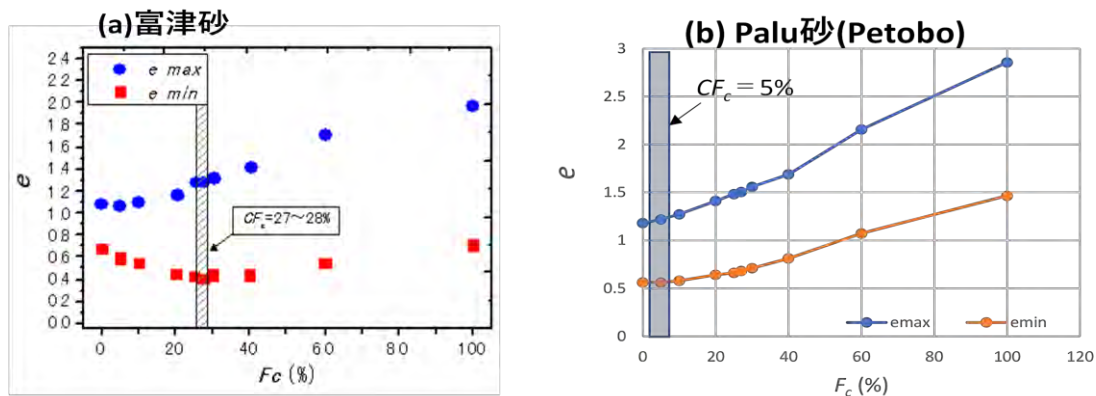


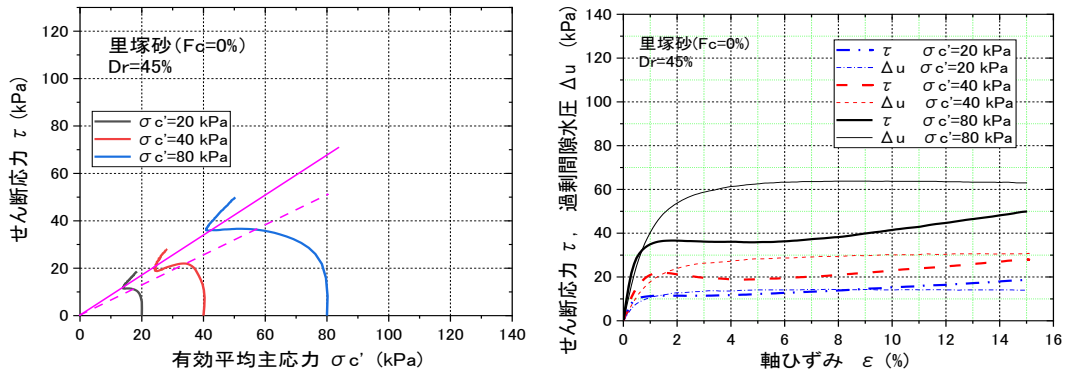
図 8-23 (a)富津砂と Palu 砂礫 (Petobo) の粒度分布の比較, (b)  $e \sim \sigma'_c$  平面上での SSL と砂の収縮性・膨張性



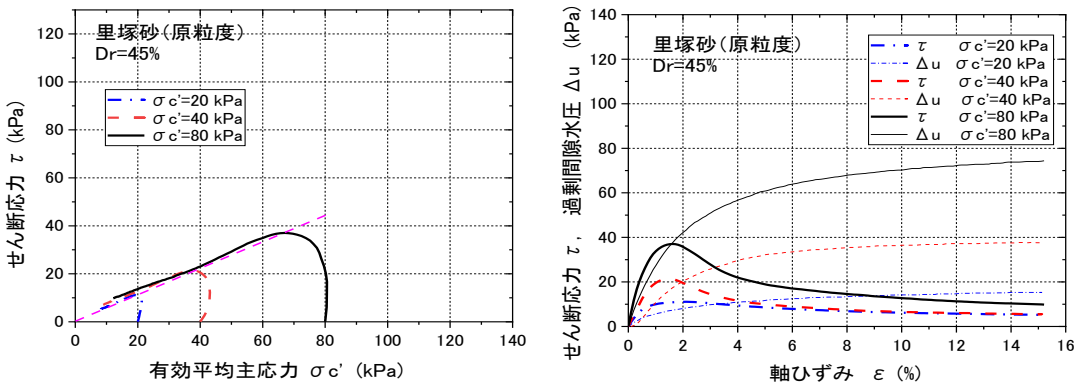
出典 ; 國生委員作成

図 8-24 最大・最小間隙比~細粒分含有率  $F_c$  の関係 : (a) 富津砂, (b) Palu (Petobo) 砂礫

(a) 細粒分  $F_c=0\%$



(b) 細粒分  $F_c \approx 35\%$



出典：國生委員作成

図 8-25 札幌里塚砂の有効応力経路と応力ひずみ関係：(a) $F_c=0\%$ 、(b) $35\%$

より砂の流動性が増す現象がこれにより説明できる。ただし限界細粒分含有率  $CF_c$  (細粒分が粗粒分の間隙から溢れ出る限界の  $F_c$ ) を超えるとこの傾向は逆転することも指摘されている (Yang et al.2006, Papadopoulou and Tika 2008, and Rahman and Baki 2011)。図 8-24 には一例として富津砂と Palu 砂礫についての最大・最小間隙比  $e_{max}, e_{min}$  の  $F_c$  による変化を示すが、これまでの研究例では貧配合の砂で  $CF_c = 20 \sim 30\%$ 、良配合砂礫では  $CF_c = 10 \sim 20\%$ であったが (Kokusho 2007)、Palu (Petobo) 砂礫では  $CF_c \approx 5\%$ と非常に小さい値が得られた。両者のせん断特性を詳細に比較するためには、粒度分布の違いを考慮した  $F_c$  の影響の検討が今後さらに必要となる。

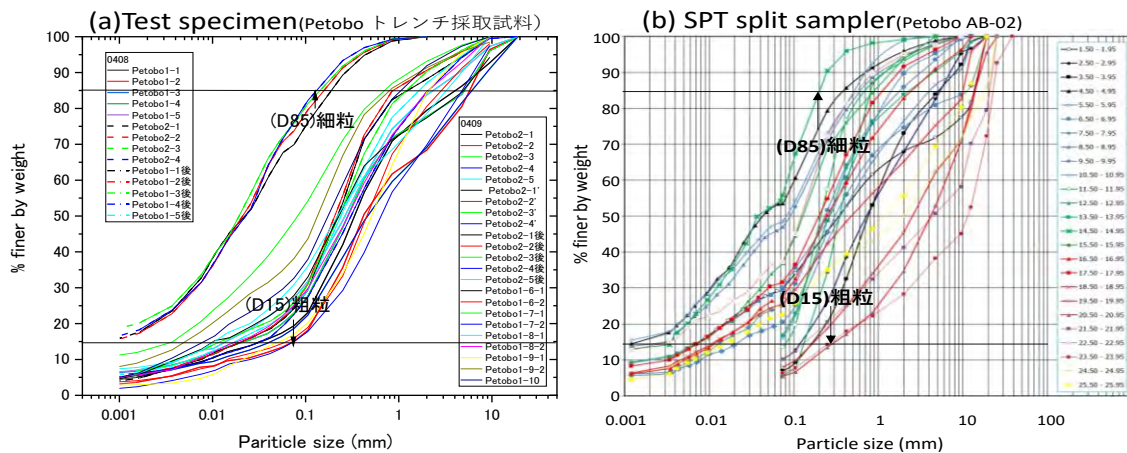
- ④ 参考までに 2018 年北海道胆振東部地震で液状化・流動化し緩斜面の地中を 200m ほど流動して地上に噴出した札幌市里塚造成宅地盛土砂の三軸圧密非排水せん断(CU)試験の結果を図 8-25 に示す (Kokusho et al. 2021)。細粒分が加わることで砂がひずみ硬化からひずみ軟化に変化し明瞭な流動特性を示すことが分かる。これらの試験や世界的にも他の研究者が行ってきた同様な三軸 CU 試験の結果と Palu 砂礫との違いが何かを考えると、細粒分特性の違いなど色々考えられる中でもまずは、Palu 砂礫では良配合で大きな粒径が含まれているのに対し、他の研究では全て豊浦砂に近い平均粒径が 0.2mm 程度の貧配合砂を使っている影響が大きいと思われる。

## (7) Mixingによる摩擦抵抗低下メカニズム

- ① ここでは液状化した砂の残留強度が低下し流動性を帯びる可能性のあるもう一つのメカニズムとして、ここまで取り上げてこなかった”Mixing”(二粒度混合時体積収縮現象)について考えて見る(Naesgaard 2011)。この現象が指摘されたのは液状化ではなく1970年にアフリカ・ザンビアの鉦滓堆積場で起きた事故が契機である。鉦滓ダムに層状に堆積していた砂とシルトが突然流動化して水と共に坑道に流れ込み多くの死者が出た事故の原因調査のレポートで、砂とシルトが鉦滓法面崩壊により混合し流動性を増して一気に流下したと分析されている。この現象に関して独自に試みた簡単な実験で、混合が起きる条件として以下のような知見が示された(Naesgaard 2011)。
- ◆ 異なる粒径からなる2層が層状に堆積し、粗粒層の層厚はその間隙に細粒層の粒子が収まる十分な層厚がある。
  - ◆ 粒子骨格の有効応力を低減する高い動水勾配や攪拌流や単調・繰返しせん断など2層の混合を促す外力が働く。
  - ◆ 土粒子骨格間隙に大量の間隙水が非排水状態で存在し、水圧上昇や液状化を引き起こす。
  - ◆ 細粒層の土粒子が粗粒層の間隙に移動し、それに伴い両者を合わせた土粒子骨格の体積が大幅に縮小する。移動し易さの判定にはフィルター則： $(D_{15})_{\text{filter}}/(D_{85})_{\text{soil}} < 4 \sim 5$  に倣い、2層のMixingが起きる条件として $(D_{15})_{\text{粗粒}}/(D_{85})_{\text{細粒}} > 3 \sim 4$ が簡易実験から得られた。ただし、細粒が粗粒の上部にある場合のみMixingが起きやすく、逆では起きにくい。
  - ◆ 液状化時の水膜生成時に粗粒砂と細粒砂の境界( $(D_{15})_{\text{粗粒}}/(D_{85})_{\text{細粒}} = 3.5$ )でMixingが実際に起きることは、Kokusho(2003)の水膜実験ビデオでも示されている。
  - ◆ Bazier and Dobry(1995)はSan Fernandoダムの崩壊メカニズムに関して、2粒度の2層からなる不均質供試体の繰返し三軸試験を行い、成層供試体に比べてMixingした同じ間隙比の混合供試体の強度は1/4まで低下する結果を示している。
- ② 以上の研究を参考に、図8-26に示すようにPaluのPetobo地点での不攪乱供試体(a)と標準貫入試験のサンプラー(b)の度分布の変動の範囲をグラフ化し、 $(D_{15})_{\text{粗粒}}/(D_{85})_{\text{細粒}}$ の値の範囲を調べた。その結果；
- ◆ 細粒土と粗粒土に平均粒径 $D_{50}$ では10倍以上のひらきがあるものの、 $(D_{15})_{\text{粗粒}}/(D_{85})_{\text{細粒}} \approx 1$ であり、Mixingが起きる条件 $(D_{15})_{\text{粗粒}}/(D_{85})_{\text{細粒}} > 3 \sim 4$ には当てはまらない。これは、Naesgaardの実験では $U_c = 2$ 程度の貧配合土を対象としているのに対し、Paluは $U_c = 10 \sim 100$ の良配合土であり、 $D_{50}$ では10倍程度の違いがあるにも関わらずフィルター則にしたがって計算すると、 $(D_{15})_{\text{粗粒}}/(D_{85})_{\text{細粒}} \approx 1$ となってしまうためである。



- ◆ 今回調べた Palu 試料の個々の粒度分布曲線は高さ 10~20cm 程度の範囲で採取した土質試験用不攪乱試料, あるいは標準貫入試験の 30cm 長さの採取試料を混ぜ合わせ, 篩い



出典 ; 國生委員作成

図 8-26 3 か所のトレンチでの採取試料の粒度分布

分け試験して得られたものである。しかしながら粒度分布を正しく把握するには, 採取試料を詳細に観察してその粒度組成がほぼ均質な区間と変動する区間を特定し, 図 8-26 のような良配合粒度カーブがほぼ均質な供試体を反映しているのか, あるいは互いに異なる粒径からなる薄層が重なった不均質構造で個々の薄層はほぼ均一粒径でありながら人工的に混ぜ合わせることでこのように良配合に見えるのかを判別することが重要であり, 今後の検討課題である。

参考文献 :

- ◆ Kokusho, T. and Fujita, K. (2002): Site investigation for involvement of water films in lateral flow in liquefied ground, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society for Civil Engineers, Vol. 128, No. 11, 917-925.
- ◆ 國生剛治 (2009) : 「液状化現象-巨大地震を読み解くキーワード-」、鹿島出版会。
- ◆ Kokusho, T. (2003): Current state of research on flow failure considering void redistribution in liquefied deposits, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Vol.23 , 585-603.
- ◆ Field, M. E., Gardner, J. V., Jennings, A. E. and Edwards, B. D. (1982): Earthquake-induced sediment failures on a 0.25°slope, Klamath River delta, California, Geology, V.10, pp.542-546.
- ◆ Kokusho, T., Fujikura, Y., Arai, T., et al.: Instability of Masa soil due to upward seepage flow, Proc. of the International Symposium on Problematic Soils, Japanese Geotechnical Society, pp.505-509, 1998.
- ◆ Kokusho, T. (2017): Innovative earthquake soil dynamics, CRC Press, Taylor and Francis Group.
- ◆ Ishihara, K. (1993): Liquefaction and flow failure during earthquakes, 33rd Rankine Lecture, Geotechnique, Vol.43, No.3, 351-415.
- ◆ Yang S, Lacasse S, Sandven R. Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines. Geotech Test J, ASTM 2006;29(2):102-7.
- ◆ Papadopoulou A, Tika T. The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands. Soils Found, Jpn Geotech Soc 2008;48(5):713-25.
- ◆ Rahman MM, Lo SR, Baki MAL. Equivalent granular state parameters and undrained behavior of sand-fines mixtures. Acta Geotechnica 2011;6:183194.

- ♦ Casagrande, A. (1971): On liquefaction phenomena, *Geotechnique*, London, England, Vol.XXI, No.3, 197-202.
- ♦ Baziar, M.H., and Dobry, R., 1995. Residual strength and large deformation potential of loose silty sands. *J. Geotech. Engineering Div., ASCE*, Vol. 121 (12), pp. 896-906.)
- ♦ Naesgaard, E. (2011): A hybrid effective stress – total stress procedure for analyzing soil embankments subjected to potential liquefaction and flow, PhD Thesis, The Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia, Canada.
- ♦ Kokusho, T.: Liquefaction strengths of poorly-graded and well-graded granular soils investigated by lab tests, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, 159-184, Springer, 2007.
- ♦ Kokusho, T. Hazarika, H., Ishizawa, T., Ishibashi, S. and Ogo, K. (2021): Liquefaction-induced flow failure of gentle slopes of fines-containing loose sands by case histories and Laboratory Tests, *Proc. CREST*, Springer, in print.

## 8-3 安田委員の提供論文

### 8-3-1 伏在する断層に沿って地震時に地下水が噴出して流動したと考えられるメカニズム

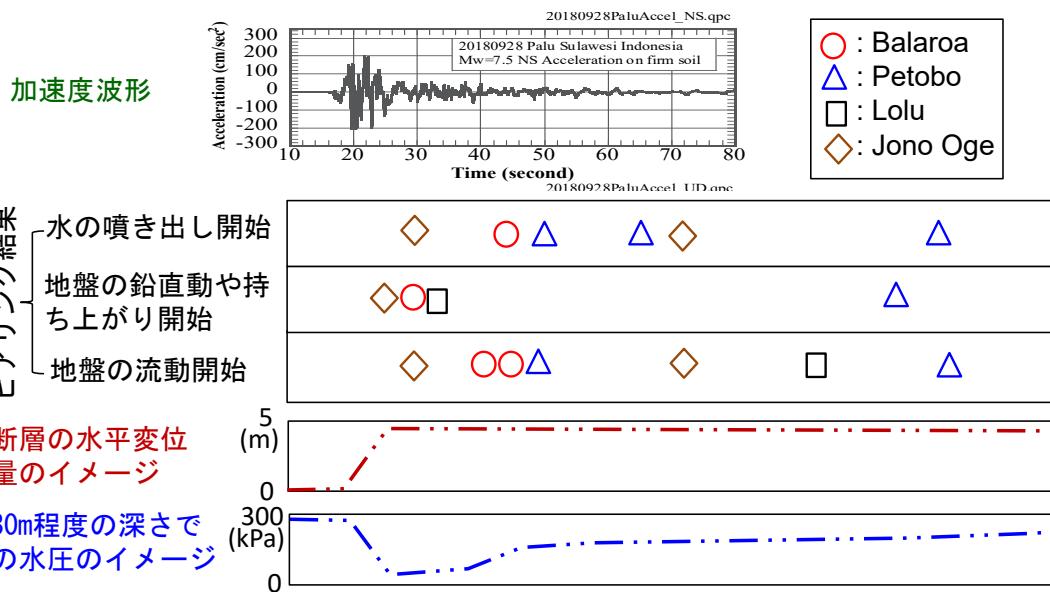
#### (1) はじめに

今回の地震により Petobo などの緩やかな傾斜地盤が長距離流動の Nalodo が発生した原因として、地震発生直後に被災地区に存在する伏在断層に沿って地下水が噴出し、表層地盤を持ち上げて、傾斜に沿って流れていったのではないかと考えられた。その主な根拠としたのは住民からのヒアリングである。また、この地区が年間約 40 mm にも及ぶ活発な横ずれ断層によって形成されているプルアパート堆積盆に該当し、また複数のプレートが重なりあっている三重会合点に位置し、さらに近くに温泉も湧き出ているといった地質的に特異な場所であることをもとにしている。これらの根拠とした事項を以下に述べる。

#### (2) 住民からのヒアリングに関する考察

住民からのヒアリングの概略をまとめてみると以下のようなになる。

- ① 図 8-27 に示すように、Balarooa、Lolu、Jono Oge では地震の水平揺れが終わったと同時に大きな鉛直動や盛り上がりが発生し、Petobo では少し遅れてこれらが発生した。持ち上がった時間は 10 秒程度である。表層地盤が持ち上がり裂け目もできた時に、地盤の唸りや地盤が壊れる音が発生した。
- ② 地震の水平動が終わったと同時とか 2 分程度以内に地下水が噴き上げたり湧き出したりした。地下水は広い範囲で一様ではなく、あっちこっちで噴き上がった。噴き上げた地下水の一部は温かった。
- ③ 地盤の流動変位も地震の水平動が終わった同時からとか 2 分程度以内に始まった。これらをもとに、地震直後に生じたことの考察を行うと以下のようなになる。
  - i) 噴き上げた水の量は大量であったため、地下水の噴き上げにより表層地盤が持ち上げられて、地表面はデコボコの状態になり、裂け目ができて、そこから泥水が噴き出したのではないかと考えられる。
  - ii) 水圧で地盤が持ち上がった時間は 10 秒程度であり、この間に地下水の水圧の勢いの変動し地盤が上下に動いたため、その上にいた人は鉛直動を感じたのではないかと考えられる。また、近くにいても地下水が噴き出さなかった所や、噴き出しの水圧が高くなかった所にいた人は鉛直動を感じなかったのではないかと考えられる。
  - iii) 地盤が持ち上がった後、表層地盤とその下の地盤の間に生じた水の層に乗って表層地盤が波打つように流れだしていったものと考えられる。
  - iv) 流動範囲のうち湧水帯付近が噴き出した地下水の圧力が最も高く、その付近では最大 10m 程度も表層地盤が持ち上がったのではないかと考えられる。逆に湧水帯から離れた所では低い圧力で地下水が噴き出したため、地盤が持ち上がった量が小さく、また、鉛直動も感じない程度となっていたのではないかと考えられる。



出典；安田委員作成

図 8-27 地下水の噴き出しなどのタイミングや断層変位、水圧の時間変化のイメージ

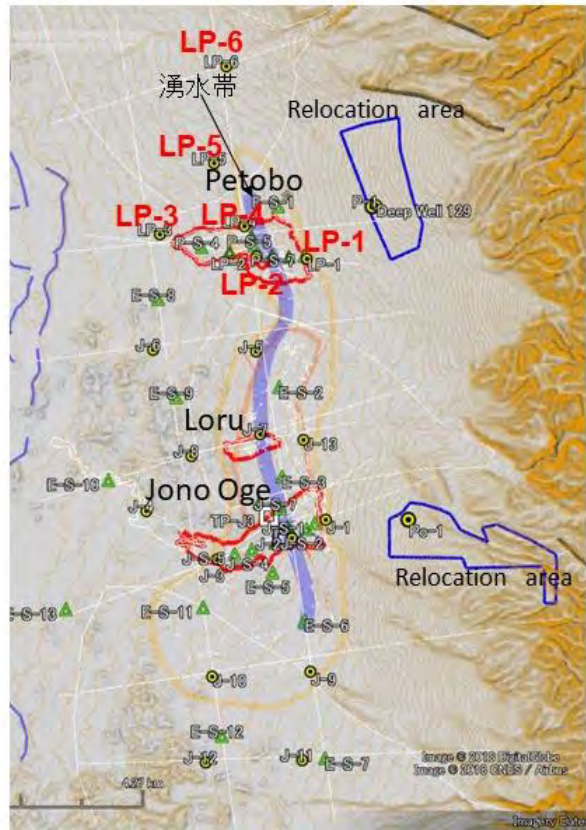
### (3) 被災した地域の地形、地質、地震の発生の特徴の概要

スラウェシ島はユーラシア、インド・オーストラリア、フィリピン海プレート（+太平洋プレート）の三重会合点にあたり、スラウェシ島は時計回りに回転している。それにより Palu-Koro 左横ずれの断層が生じ、その変位速度は非常に早く年間約 40mm と推定されている。断層間に北北西から南南東にかけて、プリアパート堆積盆にあたる構造的な沈降帯による細長い平野が形成されている。平野中央部の深いところでは、厚さ 300m ほどの第四系堆積物 ( $V_s=300\text{m/s}$  以下) が堆積しているとのことである。また、堆積盆の特徴は、南南東方に沈降の中心が移動し、南南東側から大量の砂礫が供給されていて、沈降の中心域に近い所には、地熱地帯があると推定されている。

平野の西側には Balaroa のすぐ背後から 2000m 級の山が、東側には Petobo などから数 km 離れた所から 1000m 級の山が聳えている。これらの山地は花崗岩及び花崗変麻岩から構成され、平野には前述した第四系の層が厚く堆積し、その下部に堆積岩が存在するようである。平野の両側の下部には伏在断層が存在し、中央に向かって高角で傾斜している。そのうち 2018 年の地震では西側の一部の断層の変位が地表に明瞭に現れた。モーメントマグニチュード  $M_w=7.5$  と特に巨大地震ではなかったのに、地表に現れなくても深部ではその他の断層も動いた可能性もあるのではないかと考えられる。さて、東側で流動が発生した Petobo、Jono Oge は扇状地の末端に位置する。Jono Oge の流動範囲の北端には扇頂からの流路があるが、常時は水は流れていないワジとなっている。ところが、流動範囲内にはワジに直交する線上に図 8-28 に示すように湧水帯が形成され、常時地下水が湧き出ているとのことである。Balaroa の流動範囲内にも図 8-29 に示すように同様の湧水帯が流動方向に直交して存在する。

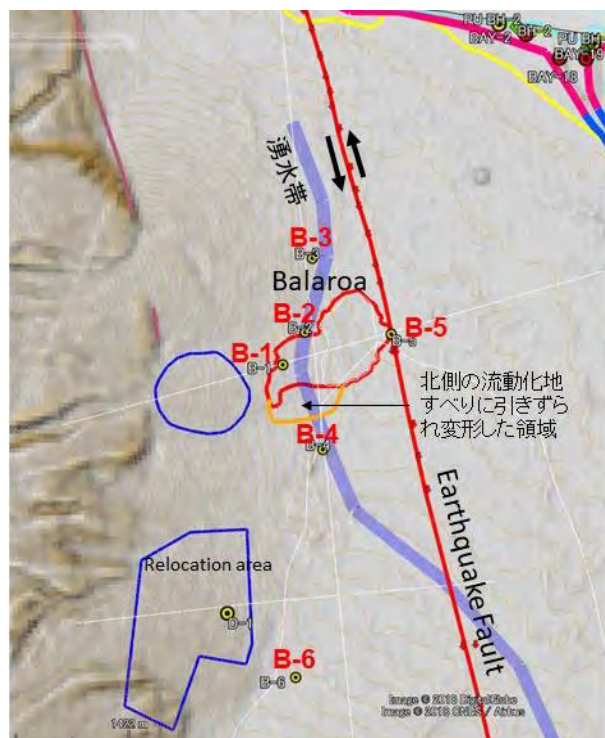
この湧水帯が形成されている原因としては、①流動範囲の上端付近に灌漑用水があり止水が不十分でそこから漏れた水がここで湧き出している、②背後の山から流れてきている地下水がこの地点で湧き出している、といったことが指摘されている。これらのうち、①に関しては **Balaroa** には灌漑用水はないので、①だけで説明することはできない。②に関しては、まず、湧水帯が面状ではなく綺麗な線状になっていることが注目される。扇状地末端に崖線があってそこから湧水しているのであれば分布は線状になる可能性があるが、湧水帯には崖線はない。また **Petobo** や **Jono Oge** の扇状地に流れ込む河川水は、線状に湧水するほどそもそも流量が多くない。地震後の流動範囲内の地下水位の分布を見ても、動水勾配は非常に小さくて、扇状地からの伏流水だけで大量に湧き出すことは考え難い。

さらに、地震後に採水した湧水の水質検査の結果によると、**Jono Oge** の湧水は天水線から少し「有馬型」のスラブ起源流体に似た水と、古海水の間の方に寄る結果となった。この水は地震の約1年後に採ったものなので、地震前の湧水や地震時の噴水そのものではない。それでも **Jono Oge** の地震後の湧水に「有馬型」や古海水の地下深部からの水の成分が含まれていることは注目すべきことと考えられる。以上を総合して考えると、湧水帯は断層の割目や破碎帯に沿って地下から湧き上がってきている深層水に、表層の天水（東西両側の山とか、灌漑用水、南の山地からの浸透水を含む）が加わって希釈された水が、地表に湧き出して形成されているのではないかとと思われる。そして、地震後に湧水量は減った可能性が考えられる。



出典 ; JICA 調査団作成

図 8-28 Petobo から Jono Oge にかけての湧水帯



出典 ; JICA 調査団作成

図 8-29 Balaroa の湧水帯



#### (4) 断層割目や断層帯から常時湧水しているメカニズムに関して

断層の割目や破碎帯に沿って地下から深層水が湧き上がってきていると考えた場合、想定される3つのメカニズムを挙げてみると、次のようなものがあるのではないかと考えられる。これらの3つとも可能性があると考えられ、甲乙を付け難い。また、1)+3)や2)+3)と、複数の発生源が合わさって湧水が発生していることも考えられる。なお、南に位置する Pemandian Air Panas Bora (温泉) から採取した水の水質検査結果でも、「有馬型」で深部のスラブ (海洋プレートがマントルに沈み込んだ部分) 起源流体に似たような水質と、古海水の水質になっている。

##### 1) スラブ起源流体による

Palu 付近は複数のプレートが複雑に押し寄せてきている三重会合点にあたる。今回地震を発生させたのは比較的浅部の横ずれ断層によるものであるが、その深部には海洋プレートが沈み込んでいる可能性も考えられる。その場合、図 8-30 に示されるように含水プレートが沈みこんでいくと深部で脱水が生じて、融点を下げ、上部のマントルを部分融解してマグマを生じ、それが上昇してマグマ溜りができ、温泉が湧出することが考えられる。有馬温泉での湧出の仕方としては図 8-31 の概念図が示されている<sup>1)</sup>。なお、海洋プレートが沈み込んでいるかどうかは、地震の発生記録を調べるなどしないと分からないが、既に研究されている可能性もあると考えられる。

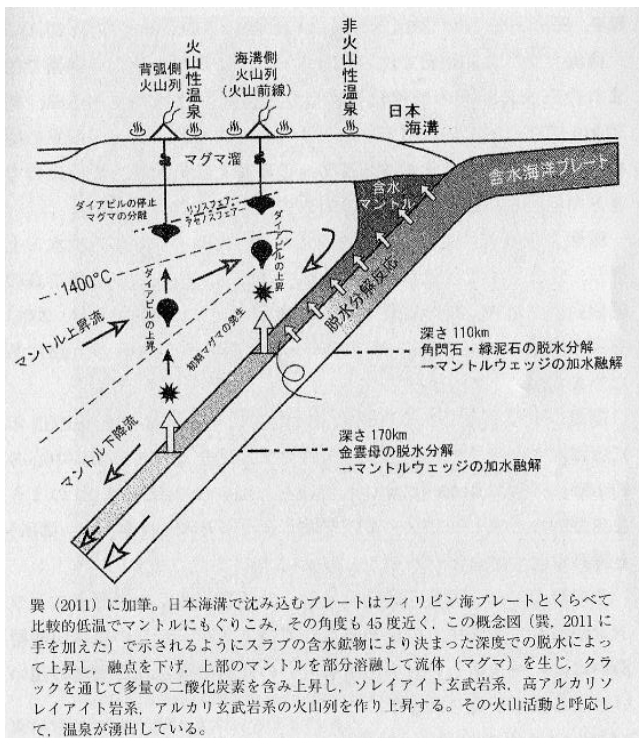


図 8-30 プレートの沈み込みに起因して発生する温泉の説明<sup>1)</sup>

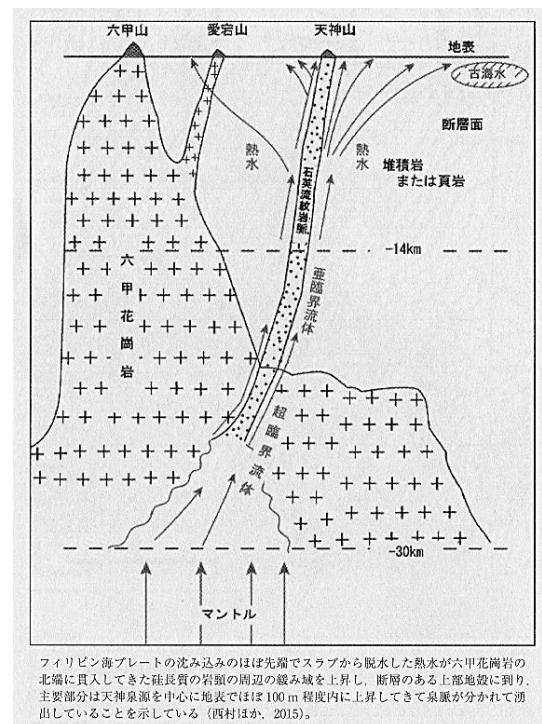
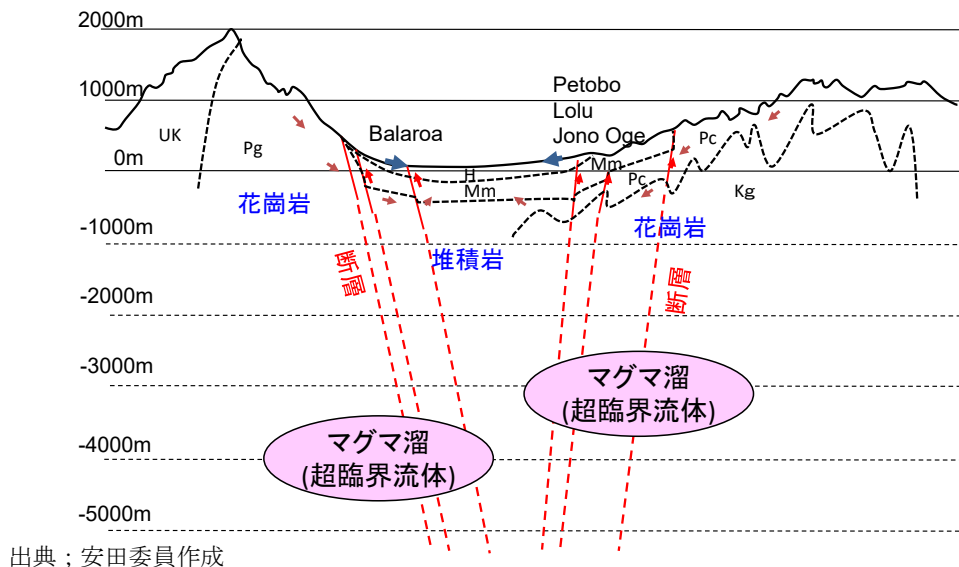


図 8-31 有馬温泉での湧出の仕方<sup>1)</sup>

この考えを Palu に当てはめてイメージ図を作成してみたのが図 8-32 である。これは本文の図 2-32 の東西断面図に、5 km までの深さの断層面を推定して破線で付け加え、マグマ溜を適当な深さに分布させてみたものである。したがって、単なる概念図にすぎないことをお断りしておく。この図では平野部の浅層に H 層 (Sedimentary rocks (Holocene))、Mm 層 (Sedimentary rocks (Middle Miocene))が堆積しているように表示されている。今回ボーリングは 30m の深さまでしか行われていないが、Thein ら<sup>2)</sup>が微動観測で求めた  $V_s$  の深度分布によると、図 8-33 に示すように 200~300 m の深さまでは  $V_s$  が 100~500 m/s 程度、それ以深は 1300 m/s 程度となっている。したがって、図 8-34 にイメージ図を描いたように地表から 200~300 m の深さまでは砂礫層が堆積し、



出典；安田委員作成

図 8-32 スラブ起源で湧水が発生する場合のイメージ

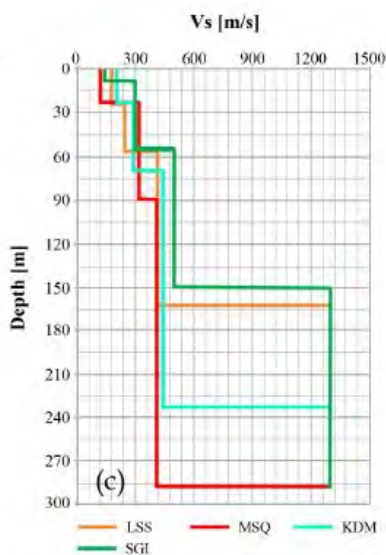
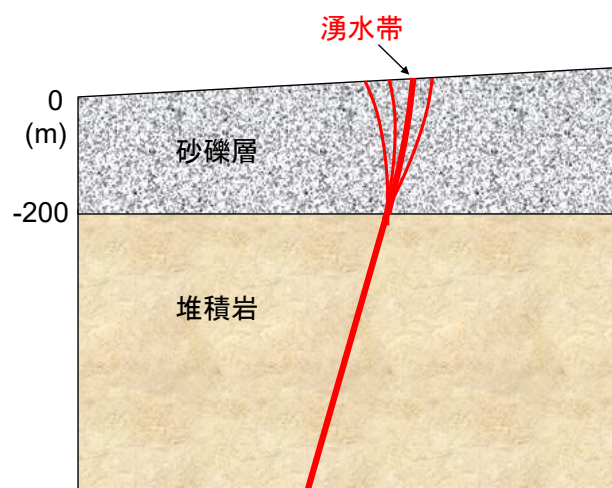


図 8-33 微動測定結果による  $V_s$  の深度分布<sup>2)</sup>



出典；安田委員作成

図 8-34 表層での断層割目の拡がり（フラワー）のイメージ

その下部には堆積岩があると考えられる。その場合、図 8-34 に示すように下部の堆積岩内では 1 本である断層でも、表層の砂礫層に上がってくるとフラワー状に分かれているのではないかと考えられる。そのうちの主要な 1 本（例えば約 100 年前の地震時に大きくずれた地表地震断層面）

が湧水帯となっていることが考えられる。

## 2) ジオプレッシャーによる

米国メキシコ湾岸の油田地帯や日本の新潟県ではジオプレッシャー型の熱水が存在する。これは海底に泥や砂が堆積する際の厚い堆積物の間隙に閉じ込められた海水に由来している。透水性及び熱伝導率の非常に小さい地層（キャップロック）に覆われると、荷重の増加による間隙水の排水が行われず、図 8-35 に示されるように静水圧より高い水圧になると考えられている<sup>3)</sup>。図 8-36 には新潟地域の石油・天然ガス付随水及び松之山温泉で測定された  $\delta$  ダイアグラム<sup>1)</sup>を示すが、これらは天水より右側に位置している。

Palu の平野の下の地盤は図 8-34 に示したように堆積岩が存在するため、新潟と同様のジオプレッシャーが貯留している可能性は十分考えられる。このようなジオプレッシャーによって湧水が発生する場合のイメージ図を図 8-37 に示す。なお、表層で断層がフラワー状に分かれるイメージは図 8-34 と同様である。

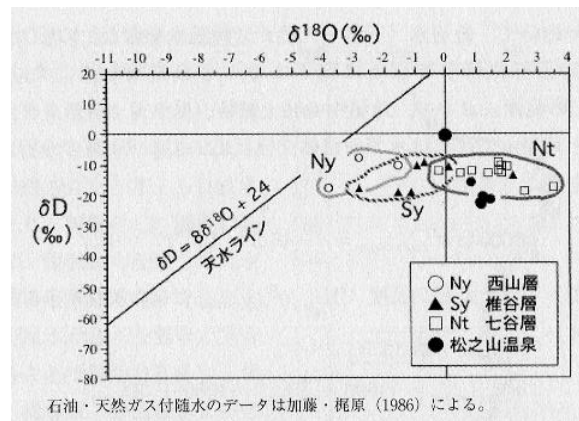
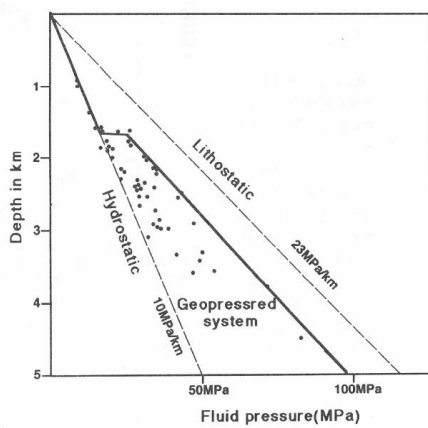
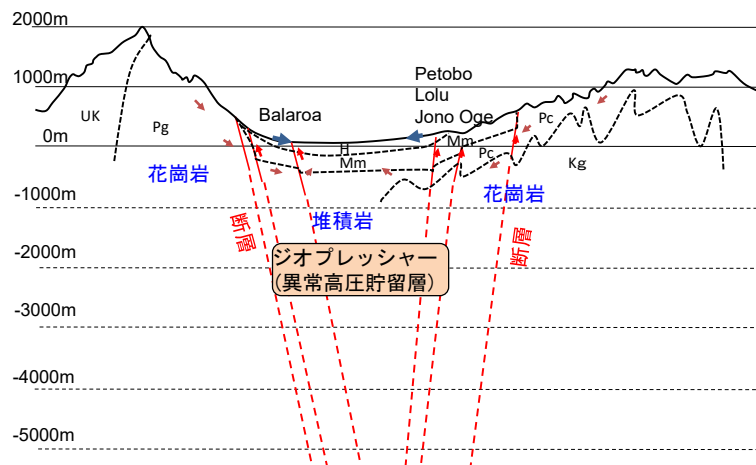


図 8-35 新潟で測定されたジオプレッシャー<sup>3)</sup>

図 8-36 新潟の水の  $\delta$  ダイアグラム<sup>1)</sup>

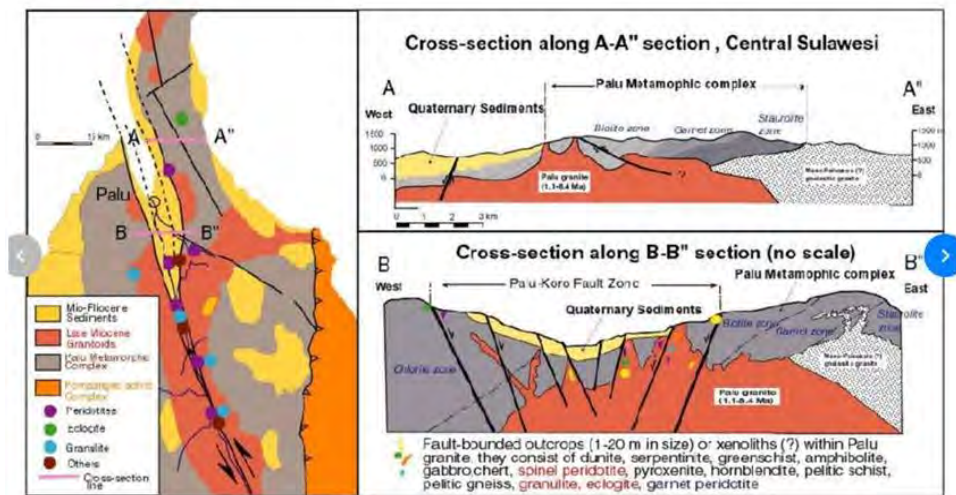


出典：安田委員作成

図 8-37 ジオプレッシャーにより湧水が発生する場合のイメージ

### 3) 比較的浅部の高温岩体からの加熱による

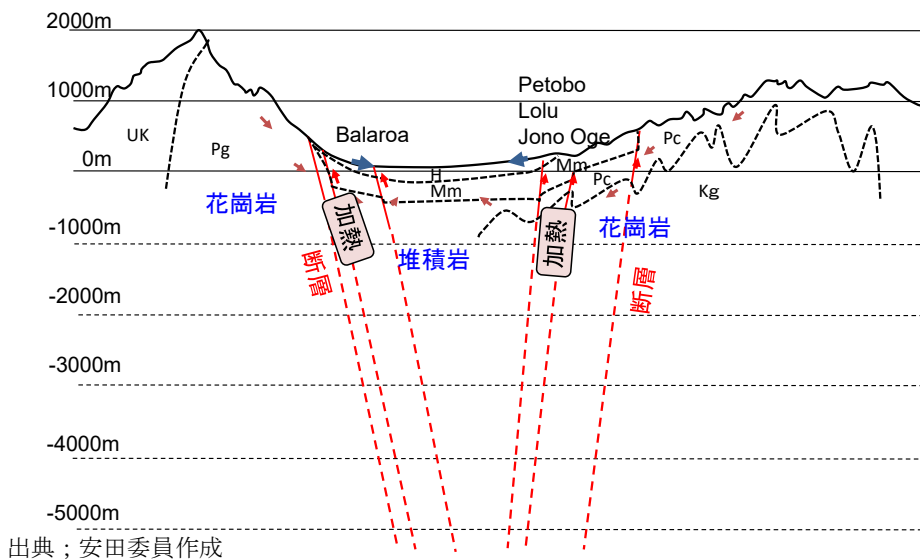
本文の図 2-2 に示されている別の地質断面図 (図 8-38) でも Palu の深部には花崗岩が分布していることが示されている。さらに図 8-38 では断層面に接して下部に花崗岩が貫入しているように描かれている。花崗岩の温度は分からないが、形成されたのが古くないと岩体がまだ冷えきっていないで高温になっている可能性がある。



Detailed geological map and cross-section of Palu-Koro region (modified from Sopaheluwakan et al., 1995). The sample localities and mode occurrences of the rocks are also shown.

出典：JICA 調査団作成

図 8-38 別の地質図 (Kadariusman et al., 2011 による)



出典：安田委員作成

図 8-39 高温岩体からの加熱によるイメージ

したがって、数 100m といった比較的浅い箇所でも花崗岩の岩体は高温のままであり、そこに断層の割目や破碎帯があって地下水が存在すると常に沸騰している状態になっており、それが地表に向かって湧き出している (ただし浅部で天水と混じって水温は下がっている) ことが想像される。

このような比較的浅部の高温岩体からの加熱により湧水が発生する場合のイメージ図を図

8-39 に示す。なお、表層で断層がフラワー状に分かれるイメージは図 8-34 と同様である。

#### (5) 地震時に湧水帯および付近で地下水が噴き出したメカニズムに関して

地震の際に地下水が噴き出したことに関して、これまで以下の 4 つの考えが提案されてきている。

①浅層地盤が液状化して発生した過剰間隙水圧により地下水が噴き出した。

②東や西の背後の山や灌漑用水から流れてくる浅層の地下水が被圧していて、地震時に被圧水が噴き出した。

③横ずれ断層による割目や破碎帯、深層に被圧した地下水がある状況にあったところに、深層の水圧が増大したことによって断層がずれて地震が発生し、それとともに被圧水が噴き出した。

④横ずれ断層によって生じている断層の割目や破碎帯が南北方向に存在し、その割目や破碎帯から深層の被圧した地下水が常時湧き出してきている状態にあった。そこに、地震が発生し、割目のズレやプルアパートか何かに起因して、被圧した深層の地下水が大量に噴き出した。

そこで、上記の住民からのヒアリング結果をもとにこれら 4 つの考えの可能性に関して考察してみた。まず、①に関しては 1964 年新潟地震や 2011 年東日本大震災の時に撮影された動画によると、地表への噴水は地震の主要動から 1 分半程度後から生じている。これに対し、Palu では図 8-27 に示したように水平動が終わったと同時に水が噴き出しており、相当早い時期に噴き出しているので、通常の液状化による噴水と異なると考えられる。②に関しては東や西の背後の山や灌漑用水から流れてくる浅層の地下水の温度は常温のはずであるが、Petobo においては温かい地下水が噴き出したとの証言がある。また、噴き出した水量に関しては、「地震の 10 秒後に泥が沸騰した水のように出てきて埋まった」とか「1 分後に 1m ほど水浸した」、「泥がない安全な区域に泳いでいった」といった証言があるなど、大量の水が短時間に発生しており、東や西の背後の山からの地下水だけでこれだけ大量の水が短時間で噴出するとの考えに疑問を感じる。③に関しては、ダムを建設し湛水したら地震が発生し始めたといった事例は多く報告されており、同様に、ジオプレッシャーやマグマ溜に起因した水圧の増加が地震を発生させたことが考えられなくはないであろう。

これらに対し、④の考えの可能性が高いのではないかと筆者には思われる。ただし、その場合でも具体的なメカニズムとして以下の 2 つが挙げられる。この 2 つとも甲乙付けがたいが、地震の主要動の直後に地盤の唸りや地盤が壊れる音とともに、高い水圧の水が一気に噴き出したと考えると、2) の可能性が高いのではないかと考えられる。なお、図 8-34 に示したように表層の砂礫層内の断層の割目や破碎帯は、地表に形成している湧水帯だけでなくフラワー状に何本もあると考えられる。そして、地震時には湧水帯を中心に流動範囲内の両側でも泥水が噴き出したのではないかと考えられる。

##### 1) 断層変位で深層の岩盤の割目が繋がって浅部の水が噴き出した



深部において温泉などの流体が通るクラックとそのつながりの概念図として、図 8-40 の図が示されている<sup>3)</sup>。地震時に断層変位が急速に発生すると、このようなクラックのつながりが突然繋がって、深部の高い圧力が浅部に急速に伝わり、その加圧によって浅部の地下水が押し出されたことが考えられる。

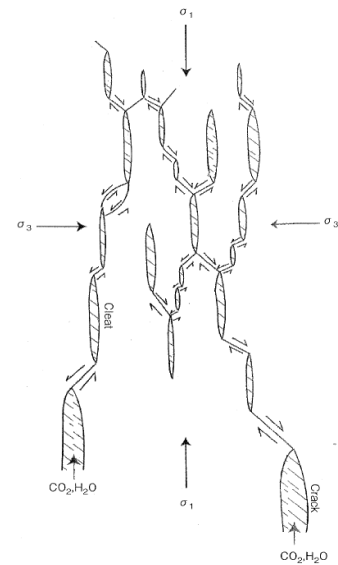


図 8-40 岩盤内の割目を通して流体が流れるイメージ<sup>1)</sup>

**2) 断層の急速な動きで浅層の砂礫層内で間隙水圧が急減し、砂礫層内の地下水の沸点が下がり沸騰して蒸気が発生し、それが浅部の地下水を押し上げて噴出が生じた**

今回流動被害が発生した地区の地盤は、図 8-33 に示したように 200~300m の深さまで砂礫層が締まった状態で堆積している。この層が地震時の断層の動きによって間隙水圧が急減した可能性が考えられる。図 8-41 には水の蒸気圧曲線を示すが、水の圧力が減少すると沸点は下がる。砂礫層中の間隙水は深部からの熱水が天水で希釈されており、常時は沸騰するまでの温度になっていないと考えられる。ところが、水圧が急低下すると、沸点が急激に下がって一気に沸騰し、体積が急激に増え、それが地表に向かって噴き出す突沸が発生すると考えられる。そして、上にある地下水を押し上げながら急速に上昇し、間欠沸騰泉<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>や水蒸気爆発と同様に、轟音（地盤の唸り）を伴いながら地上に勢いよく噴き出したのではないかと考えられる。

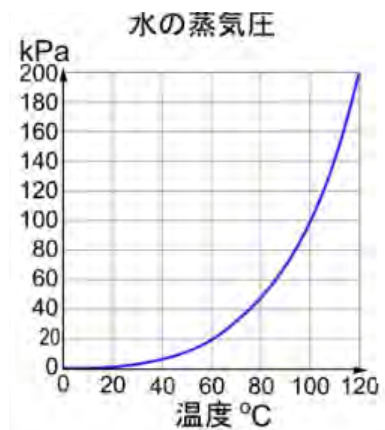


図 8-41 水の蒸気圧曲線

間隙水圧が急減する原因としては以下の 2 つほど挙げられよう。

**a) せん断によるダイラタンシーによって**

断層の急速な変位により、断層面付近では、地下水位以下の飽和した密な砂礫層が急速にせん断させられたと考えられる。そうすると、密な砂礫層の場合には正のダイラタンシーが発生するはずである。そして、急速载荷のために砂礫層といえども非排水状態でせん断させられたと考えられる。そうすると、図 8-27 の最下段に概念図を示したように、断層が動いた数秒間の間に砂礫層の間隙水圧が急低下したことが考えられる。

**b) プルアパートによって体積が膨張する力が働くことによって**

上述したように、長距離流動が発生した地区は、横ずれ断層によって形成されたプルアパート堆積盆にあたる構造的な沈降帯に位置する。今回の地震でも西側の断層が動き最大 5m もの地表断層が生じたため、局所的にプルアパートが生じたと考えられる。その範囲は分からないが、本文で紹介してある 2 つの地質図上に、現地形から推測される範囲を示してみたのが、図 8-42 の青破線である。このような範囲内で局所的にプルアパートが生じたとすると、その区域では以下のメカニズムで間隙水圧が急減したことが考えられる。

- ①断層変位によって地盤を北北西方向に延びさせる力が急速に働く。
- ②幅が一定だと体積を膨張させる力が急速に働くことになる。

③地下水位以下の飽和した土は非排水状態で引っ張られるため、間隙水に大きな負圧が急速に働く。

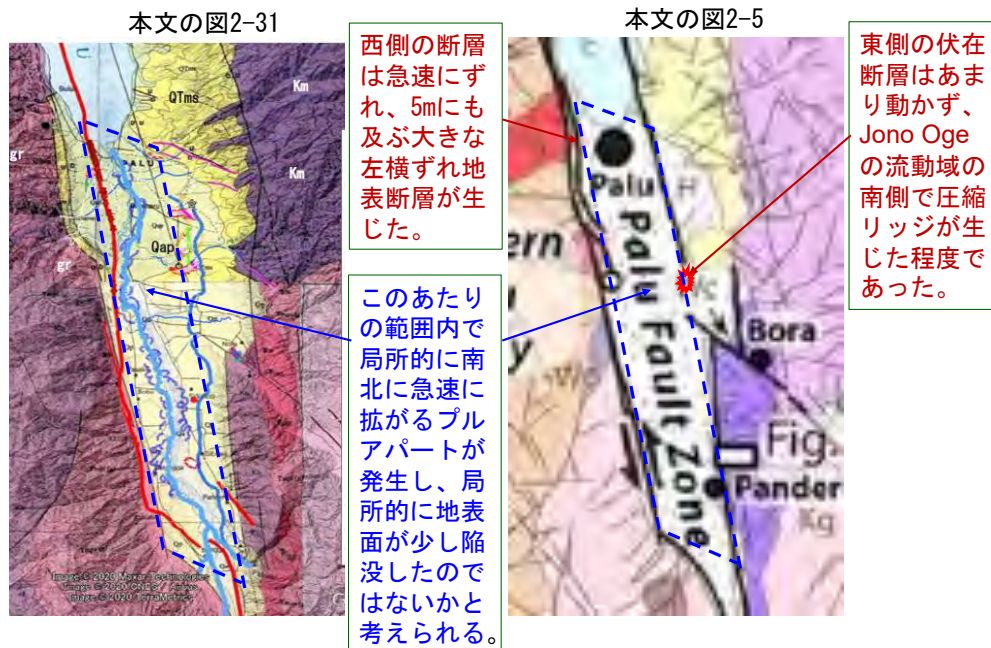


図 8-42 断層位置とプルアパートが発生したと考えられる範囲

#### (6) 地震時に横ずれ断層区域で熱水が噴き出したと考えられる事例

地震時に地下水が噴き出す現象は、8-4 で東畑委員が報告されているように 1960 年松代群発地震などで発生している。このような事例を探してみると、1999 年トルコ・コジャエリ地震でも熱水が噴き出し、今回と同様な現象が生じていたのではないかと思われた。そこで、筆者も参加した地盤工学会調査団の報告書<sup>6)</sup>をもとに、以下に考察してみる。

この地震はトルコを東西に走っている北アナトリア断層に起因して発生した。地表に現れた断層は右横ずれ断層で最大変位は約 4m であった。地盤工学会の調査団で現地調査した箇所を図 8-43 (1)に示す。西端は Yalova 付近で、イズミット湾の南側海岸付近を通り、Gölcuk (ギョルジュック)付近では図 8-43 (2)に示すように陸地に現れ、Sapanca 湖を通り、Arifiya を通る線で断層が発生した。イズミット湾の水深は Degirmendere (デイルメンデレ) 付近を境に東側では湾奥まで浅く、最大でも 34m 程度である。それに対し、西側の特に南岸沿いでは海岸線から急に水深が深くなり、湾中央付近では 200m 以上の水深となっている。地震の被害は東西で異なり、ギョルジュックの東側の南岸沿いの各地では図 8-43 (3)に示す区域で地盤の沈降が発生した。一方、デイルメンデレから西側では、Karamusel までの間の数か所で、海岸の地盤が海に向かって流失する被害が発生した。

デイルメンデレでは図 8-43 (3)に A と示した地区で、間口 250~300 m、奥行き約 100 m の海岸の地盤がイズミット湾に向かって流出した。そこにはホテルやレストランなどの建物があり、地盤と一緒に海中に没した。流失状況を図 8-43 (4)、(5) に示す。ここの地盤は扇状地性の砂礫からなる自然堆積地盤である。海岸線と直交方向に地震後に水深測量を行い、地震前の水深と比較

したのが、図 8-43 (6)であるが、20m 程度の厚さで海底地すべりの変状が生じていた。

ここでは流失した建物にいた多くの人が行方不明になった（地震発生は夜中）。助かった従業員などから以下のような証言が得られた。

1) 海水温度が 40 度位の高温であった。

2) 海に流され生還した人が背中に火傷を負って治療を受けた。その人の話によると、①轟音を聞きつけて海の方を振り返ると海が割れ夕焼けのような赤い光が見えた、②直後に波にさらわれ木か電柱につかまっていたところ熱い泥のような波に運ばれて陸にたどり着いた、③全身泥まみれで漁師に助けられて応急措置を受けた、④海に投げ出されたときあたりに沸騰していない湯をかけられた時のような火傷を負った、とのことである。

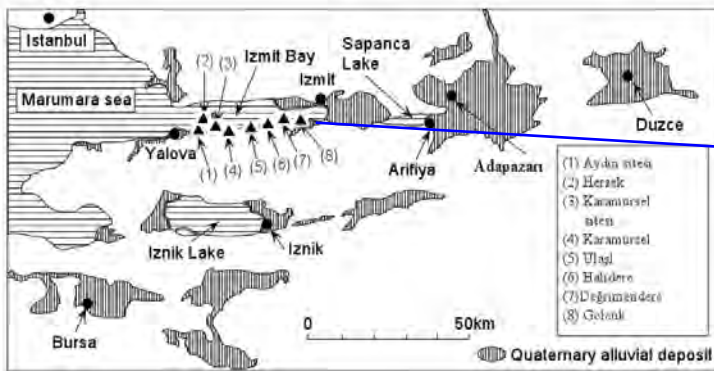
3) 地震と同時に海中からなにか火山爆発のような熱い物が吹き上げた。

次に、ギョルジュックのうち、図 8-43 (3)に B と示した地区内で地盤が沈降し水没した範囲を図 8-43 (9)に示す。この地区では図 8-43 (7)、(8)に示すように約 1.5m ほど地盤が沈降した。ただし、街灯や街路樹は倒れずにそのまま立っていた。そして、図 8-43 (9)に赤○で示した付近で船から海に落ちた人が背中にやけどしたとの証言が得られている。

これらダイールメンデレやギョルジュックでの証言をもとに考えると、断層に沿って地震時に熱水が噴き出してきたと言えよう。そして海岸線の地盤が滑って流失したのも地震の慣性力に加えてこの噴き出した水圧が影響していた可能性も考えられる。また、この地区から Sapanca 湖にかけては地震によってプリアパートが生じたと考えられる。したがって、Palu での地下水の噴出のメカニズムとして挙げた、①断層変位で深層の岩盤の割目が繋がって浅部の水が噴き出した、②断層の急速な動きで浅層の砂礫層内で間隙水圧が急減し、砂礫層内の地下水の沸点が下がり沸騰して蒸気が発生しそれが浅部の地下水を押し上げて噴出が生じた、のどちらでも熱水の噴き上げが説明できそうであり、Palu と類似していると言えそうである。

なお、今回の地震において Palu 川河口の海岸線では、図 8-43 (10)に示すように木が立ったまま水没する被害が発生した。海岸の地盤が液状化してすべった場合には木々は倒れ、また地表面に引張り亀裂が報じるはずである。したがって、図 8-43 (7)、(8)に示されるギョルジュックの被害と同様に、Palu 川河口の海岸線の沈降もプリアパートによる地盤の沈降によって生じたのではないかと筆者には思われる。





(2) 陸上に現れた右横ずれの地表断層

(1) 地盤工学会の調査団で被害調査を行った箇所<sup>6)</sup>



(4) 空から見た地盤の流失



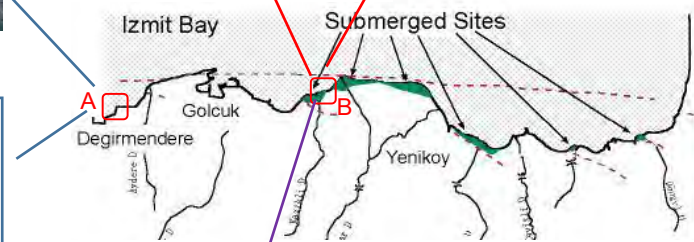
(7) 空から見た水没状況



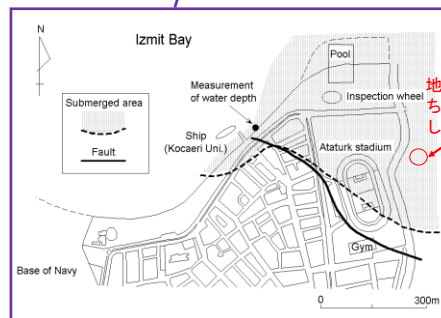
(8) 地表から見た水没状況



(5) 海岸から見た地盤の流失

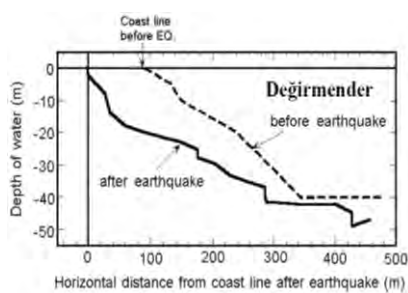


(3) イズミット湾奥からデイルメンデレの南岸



地震時に船から海に落ちた人が背中にやけどしたとの証言あり。

(9) ギョルジュックで地盤の沈降により水没した範囲



(6) 地震による水深の変化<sup>6)</sup>

図 8-43 1999 年トルコ・コジャエリ地震によるイズミット湾岸の被害と今回の Palu 川河口海岸の変状



(10) Palu 川河口海岸線の変

## (7) 地下水の噴き上げで地盤が持ち上がったことに関して

地下水の噴き上げで地盤が持ち上がるとかデコボコになるためには、最表層に硬い層や不透水層が数 m の厚さで存在する必要があると考えられる。例えば最表層が緩い砂地盤であると泥水が噴き上げるだけで地盤は持ち上がらないと考えられる。

地震後の 2018 年に流動範囲の際を中心に多くのボーリングが行われ、その後、2019 年に流動範囲内で追加のボーリング (AB-○と番号が付けられたもの) が行われている。これらの最終掘削深度は 30m を標準とされ、途中の掘削深度に応じて地下水位の深さが測定されている。そこで、途中の地下水位をもとに全てのボーリングの間隙水圧の深度分布図を作成してみた。ただし、地下水位は季節変動があるので、各地点でボーリングの途中過程と、30m 掘削した時点でのボーリング孔内水位をその深度での間隙水圧と判断した。

その結果、図 8-44 に代表例を示すように、間隙水圧の分布には主に次の 4 つのタイプがあると考えられた。なお、図中の青破線の勾配は静水圧分布の場合の勾配と等しくしてある。また、間隙水圧分布をもとに、①30m 掘削時の地下水面深さ、②掘削時地下水面出現推定深さ、③途中の掘削深度における地下水面の深さを判断して図中に示している。

[タイプI]: 全層静水圧分布をしており 30m の深さまでは単一の地下水が存在している。

[タイプII]: 全層静水圧分布であるが、表層に厚い不透水層があって地下水位は深い。30m の深さまでは単一の地下水が存在しているが、表層に不透水層があるため、不透水層の下面では見かけ上被圧状態となっている。

[タイプIII]: 浅部は静水圧分布であるが 30m 程度と深くなると被圧している。

[タイプIV]: 表層のみ静水圧分布で下層になると水圧が下がる。表層には宙水が存在するが、その

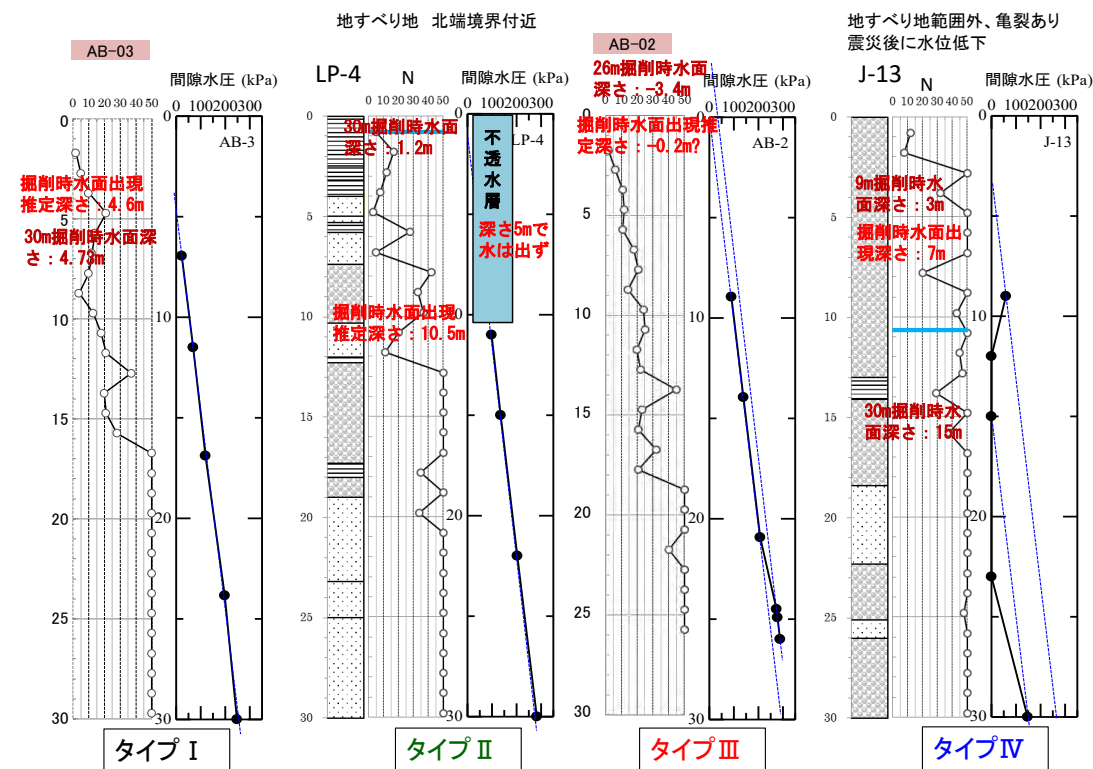


図 8-44 間隙水圧の深度分布の 4 つのタイプ

出典：安田委員作成



下の 20m 程度の深さでは不飽和層になっており、さら 30m 程度の深部で飽和層になっている。

表 8-2 間隙水圧の深度分布の 4 つのタイプの分布箇所

| 間隙水圧の深度<br>分布のタイプ      | 該当するボーリング地点             |  |                                 |                                      | 分布箇所の位置的な<br>特徴                  |
|------------------------|-------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
|                        | Balaroa                 | Petobo                                   | Lolu                            | Jono Oge                             |                                  |
| タイプ I、全層<br>静水圧        | AB-12,<br>B-2, B-<br>5, | AB-3,                                    | AB-14, AB-<br>7, AB-16,<br>AB-5 | AB-10,<br>AB-11, J-<br>1, J-10       | 流動範囲外及び流動<br>範囲内でも湧水帯か<br>ら離れた地点 |
| タイプ II、表層<br>に不透水層     | B-3, B-<br>4,           | LP-3, LP-2,<br>LP-1, LP-4,<br>LP-5, LP-6 | J-5, J-6, J-<br>8,              | J-2, J-4,<br>J-3, J-12,<br>J-11, J-9 | 流動範囲外                            |
| タイプ III、30m<br>程度の深さ被圧 | B-1,                    | AB-1, AB-2                               | AB-15,                          | AB-9                                 | 流動範囲内の湧水帯<br>付近                  |
| タイプ IV、20m<br>程度深さ不飽和  | AB-13,<br>B-6           |  | J-13                            |                                      | 流動範囲外の山側                         |

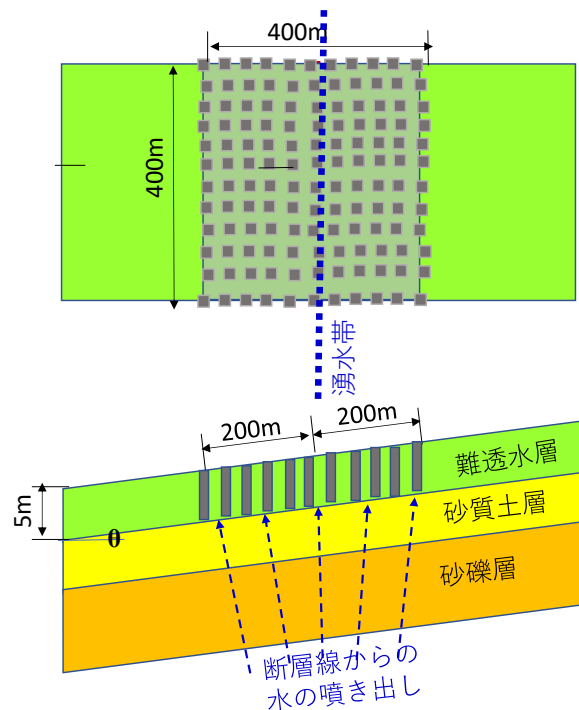
出典：安田委員作成

ボーリング No ごとにどのタイプであったかを表 8-2 に示す。流動が発生した範囲内ではこの最表層は流れさって存在しないので、流動範囲の際のボーリングデータを見てみる。Balaroa では湧水帯に位置する B-3 に 7m の厚さ、B-4 に 10m の厚さで存在し、前者は  $N$  値  $> 50$  の密な礫層、後者は  $N$  値が 10 程度の緩い砂層となっている。Petobo では LP-1～LP-6 のいずれの地点でも 8～16m の厚さで存在し  $N$  値  $> 50$  程度の密な砂礫か  $N$  値が 10～20 の粘性土から構成されている。Lolu では J-5, 6, 8 に 9～11m の厚さで存在し  $N$  値  $> 50$  の密な砂質土である。そして、Jono Oge では J-3, 4, 9, 11, 12 に 7～18m の厚さで存在し  $N$  値  $> 50$  の密な砂質土や粘性土で構成されている。したがって、地震前には、流動が発生した範囲内にもこのような不透水層（密な砂礫層やある程度硬い粘性土層）が表層に数 m の厚さで堆積していたのではないかと推定される。そして、地下水の噴き出しによってこの不透水層が持ち上げられたのではないかとと思われる。

自然に堆積しただけの地盤で、しかも表層にある新しい層は、一般にこのように密にならない。そこで考えられるのは、常時の温水の湧水による珪化作用によって硬くなっていたことである。例えば、阿蘇の内牧温泉の地盤で温泉水によって表層が珪化作用を生じ、硬くなっていると考えられている事例<sup>7)</sup>がある。

## (8) 伏在する断層に沿って地震時に地下水が噴出して流動したと考えられる場合の対策方法

今回の流動範囲の近くに過去の地震の際に Nalodo が発生した痕跡があることが、本文に述べられており、将来の地震においても今回の流動範囲の近くで Nalodo が発生する危険性があると考えられる。それによる被害を防ぐための対策方法として考えられることには、①地震時に地下水が噴出しないように対策する、②地震時地下水が噴出しても地盤の長距離流動が生じないように対策する、といったことが挙げられるが、①は実現不可能と言える。そこで、②の考えで実現できそうな対策方法を示すと図 8-45 となる。ここでは表層に数 m の厚さで難透水層（密な砂礫層や硬い粘性土層）が存在すると仮定している。そして、部分的にその層を貫く透水性の高い粗石の柱やケーシング（中は空）を設けておき、地震時に地下水が急に噴き出したとしてもその部分だけは持ち上がらなく、すべりに対する抵抗するようにしておくとの考えである。対象地区の土地利用を考慮してこの粗石の柱やケーシングの径と間隔を適切に設計すれば、地すべり防止杭と同様に、地盤全体の流動をくい止めることができるのではないかと考えられる。



出典：安田委員作成

図 8-45 伏在する断層に沿って地震時に地下水が噴出して流動したと考えられる場合の対策方法案

### 参考文献

- 1) 大沢信二・西村進 編：温泉と地球科学、ナカニシ出版、189p.、2016.
- 2) Thein, P. S., Pramumijoyo, S., Brotopuspito, K., Kiyono, J., Wilpo, W., Furukawa, A., SetiL3, A. and Putra., R. R. : Estimation of S-wave velocity for sedimentary layered media using Microtremor array measurements in Palu City, Peocedia Environmental Sciences, Elsevier, 28, pp.595-605, 2015.
- 3) 大木靖衛・徐輝竜・石坂信之・河内一男：信濃川地震帯のジオプレッシャー熱水を伴う活断層と歴史被害地震、温泉科学、第 48 巻、pp.163-181、1999.
- 4) 後藤泰裕・中里真悟：間欠泉を人工的に再現してみよう！、  
[https://www.hakko.co.jp/contest/report02/03\\_20081219.pdf](https://www.hakko.co.jp/contest/report02/03_20081219.pdf)
- 5) 鏡裕行：間欠泉の噴出機構の研究の現状と展望、温泉科学、No.65、pp.120-126、2015.
- 6) 地盤工学会：1999 年トルコ・コジャエリ地震調査報告書、2000.
- 7) Yasuda, S., Irisawa, T. and Kazami, K.: Liquefaction-induced settlements of buildings and damages in coastal areas during the Kocaeli and other earthquakes, Proc. of the Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, 15<sup>th</sup> ICSMGE, pp.33-42, 2001.

- 8) 安田進・石川敬祐・野村勇斗：微動アレイ観測にもとづいた熊本地震で発生した陥没の解析、第 55 回地盤工学研究発表会、DS2-15、2020.

## 8-3-2 Palu の住民からのヒアリング結果に関する考察

### (1) はじめに

2018年インドネシア・スラウェッシュ地震 ( $M_w=7.5$ ) により Palu の 5 地区で発生した Nalodo (ここでは長距離地盤流動と呼んでおく) に関して、被災地区の住民から当時の状況に関するヒアリングが行われ、すでに委員会で調査団から報告されてきている。ただし、何度かに分けて報告されてきて、また文章化されていないため、まだ委員の方々の共通認識ができていないと思われる。そこで、これまでに報告されたものを統一してまとめ、考察を行ってみた。

ヒアリング結果の解釈に関して調査団とは完全にはすり合わせができていないので、筆者の解釈がこの原稿には含まれている。

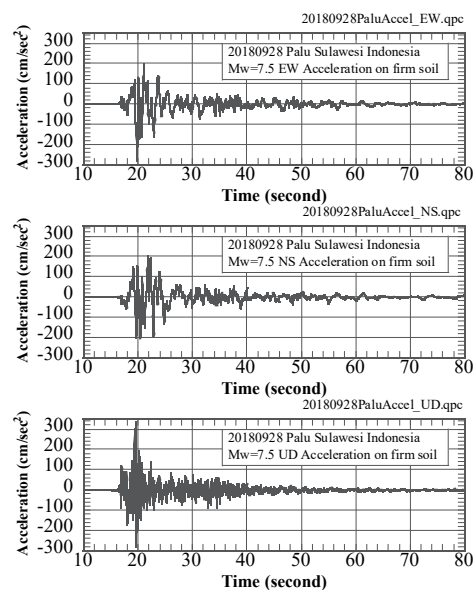
### (2) 地震記録と周辺の震動被害の概要

この地震では長距離地盤流動が発生した Balaroa の近くで図 8-46 に示す地震記録がとれている。これによると EW 方向、NS 方向、UD 方向のピーク加速度はそれぞれ 281gal、203gal、335gal であった。Palu の直下の 10km と浅いところで地震が発生したので、鉛直動のすぐ後に水平動も発生し、3~4 秒でピークに達し、その後 10 秒程度揺れて、揺れがおさまっている。したがって住民の方々が大きな揺れを感じたのは 10 秒間程度と思われる。その後 40 秒後までの記録によると、大きな震動は発生していない。

長距離地盤流動が発生した周辺では震動によって全壊したような住宅は見当たらなかった。したがって、震動自体はそんなに大きくはなかったと考えられる。ただし、4~5m の左横ずれ断層が地表に現れた線上では、強制変位により建物が被災していた。

長距離流動が発生した地区の動画としては、下記のものが入手されている。

- (1) Jono Oge で流されている家の屋根から流動状況を撮影 (図 8-48)
- (2) Baraloa のサッカー場に始まり、バラロアの南西側の地区で人々が逃げまどっている状況
- (3) Lolu のガソリンスタンド付近で地割れが動いている状況



出典：BMKG

図 8-46 Balaroa 近くの地震波形



図 8-47 Lolu での翌朝の地下水湧出状況

また、Lolu での翌朝の地下水湧出状況の写真も入手されている（図 8-47）。



図 8-48 Jono Oge で流されている家の屋根から流動中を撮影した人の証言

### (3) ヒアリングの種類

#### 3.1 JICA で行われて行われてきたヒアリング

##### 3.1.1 流動範囲きわの住民からの地盤と噴水に関するヒアリング(B1～J5)の結果の表

- ・英文でオレンジと緑の表の 2 種類で示されて国内委員会配布。  
(オレンジと緑では地下水の状況と地盤の状況に焦点を当てた整理が行われている)
- ・緑の表は日本語でも表示。

##### 3.1.2 上記のヒアリング震動や流動、噴水の時間経過をまとめた表

- ・英文で図が作成されている。
- ・3.1.1 の表に載っていない証言の時間経過も示されている。

##### 3.1.3 流動範囲内から逃げた住民の証言

- ・英文で地盤の動き、噴水、人の動きなどが時間経過でまとめた図が作成されている。



### 3.1.4 Jono Oge で動画を撮った人からの証言

・ 図 8-48 (前掲)

### 3.2 GEER の報告書の時間経緯をまとめた表

GEER の報告書から石原先生により以下のようにまとめられている。

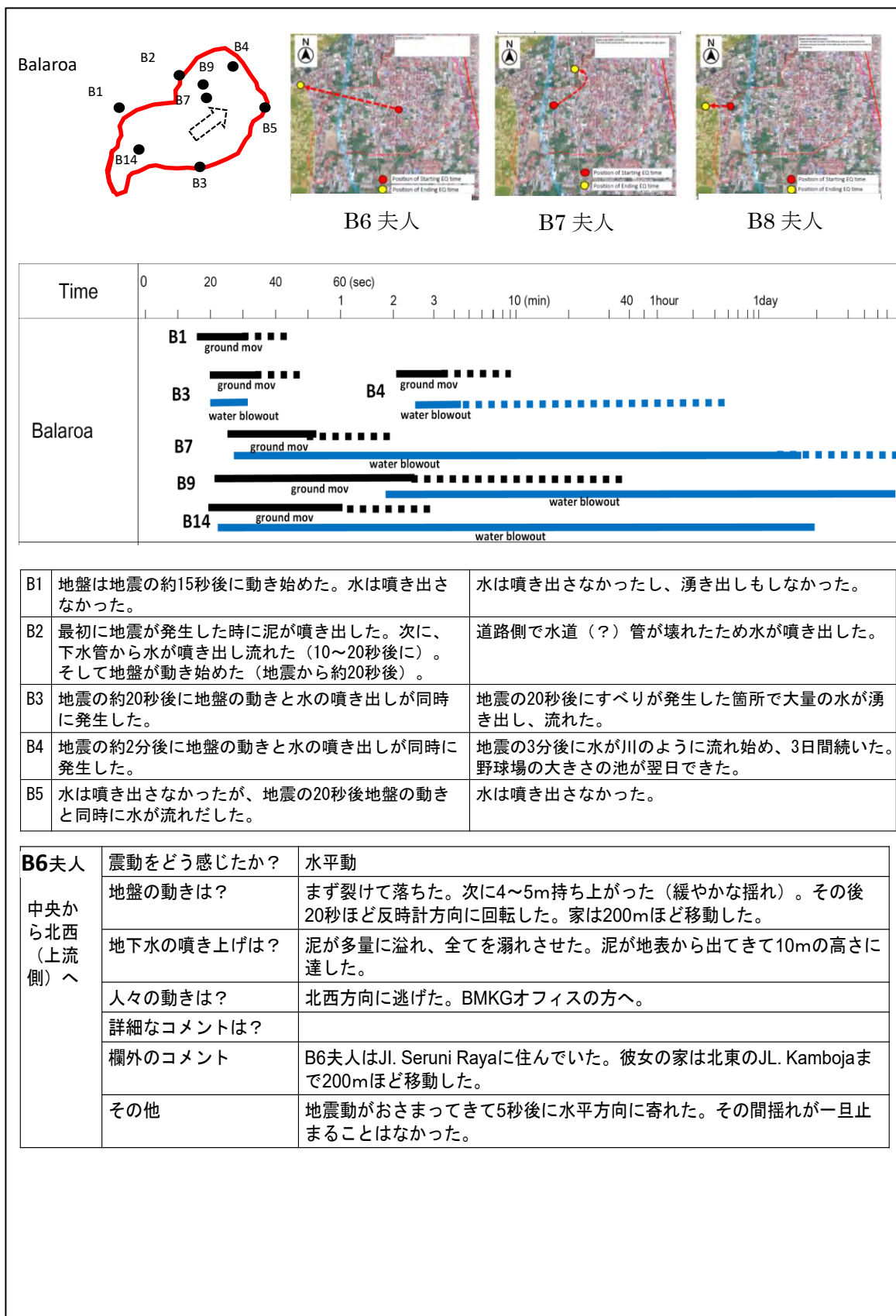
| Time     | 0                       | 20 | 40                       | 60 (sec) | 1             | 2 | 3            | 10 (min)                 | 40                    |
|----------|-------------------------|----|--------------------------|----------|---------------|---|--------------|--------------------------|-----------------------|
| Balaroa  | Inter Shaking(reworded) |    | ← Onset of liquefaction  |          | Flow slide    |   |              |                          |                       |
| Petobo   | Intece horizon shaking  |    | Violent Vertical shaking |          | Vertical drop |   | Flow slide   |                          |                       |
| JonoOge  | Intece horizon shaking  |    | Violent Vertical shaking |          | Vertical drop |   | Flow slide   |                          | Canal breach mud flow |
| Sibalaya | Intece horizon shaking  |    | Violent Vertical shaking |          | Vertical drop |   | Canal breach | Flow slide and spreading |                       |

出典：石原委員作成

### 3.3 以下の各地区のまとめと考察に示す図と表

- ① 3.1.1 と 3.1.3 のヒアリングをした住民の位置を示した地図 (調査団作成)
- ② 3.1.2 のヒアリング結果をまとられた時間経過の表 (調査団作成)
- ③ 3.1.1 のオレンジと緑の表を安田が日本語にした表 (安田委員作成)
- ④ 3.1.3 の表の内外に書いてある英文を安田が日本語にした表 (安田作成)

(4) Balaroa でのヒアリング結果のまとめとコメント



|    |   |  |
|----|---|--|
| B1 | 地盤は地震の約15秒後に動き始めた。水は噴き出さなかった。   | 水は噴き出さなかったし、湧き出しもしなかった。                    |
| B2 | 最初に地震が発生した時に泥が噴き出した。次に、下水管から水が噴き出し流れた（10～20秒後に）。そして地盤が動き始めた（地震から約20秒後）。 | 道路側で水道（？）管が壊れたため水が噴き出した。                   |
| B3 | 地震の約20秒後に地盤の動きと水の噴き出しが同時に発生した。  | 地震の20秒後にすべりが発生した箇所で大水量の水が湧き出し、流れた。         |
| B4 | 地震の約2分後に地盤の動きと水の噴き出しが同時に発生した。   | 地震の3分後に水が川のように流れ始め、3日間続いた。野球場の大きさの池が翌日できた。 |
| B5 | 水は噴き出さなかったが、地震の20秒後地盤の動きと同時に水が流れだした。                                    | 水は噴き出さなかった。                                |

|                      |            |  |
|----------------------|------------|--|
| B6夫人<br>中央から北西（上流側）へ | 震動をどう感じたか？ | 水平動  |
|                      | 地盤の動きは？    | まず裂けて落ちた。次に4～5m持ち上がった（緩やかな揺れ）。その後20秒ほど反時計方向に回転した。家は200mほど移動した。 |
|                      | 地下水の噴き上げは？ | 泥が多量に溢れ、全てを濡れさせた。泥が地表から出てきて10mの高さに達した。                         |
|                      | 人々の動きは？    | 北西方向に逃げた。BMKGオフィスの方へ。  |
|                      | 詳細なコメントは？  |  |
|                      | 欄外のコメント    | B6夫人はJl. Seruni Rayaに住んでいた。彼女の家は北東のJl. Kambojaまで200mほど移動した。    |
|                      | その他        | 地震動がおさまってきて5秒後に水平方向に寄れた。その間揺れが一旦止まることはなかった。                    |

|                            |            |  |
|----------------------------|------------|--|
| B7夫人<br>上流部の湧水帯付近から中流部の北東へ | 震動をどう感じたか？ | 最初に水平動があり、続いて鉛直動が約20秒間発生した。途中揺れが途切れることはなかった。   |
|                            | 地盤の動きは？    | (鉛直動の時?) 家は地面に10mほど入った(?)。10秒後に家は20mの高さまで持ち上がり、破壊前に回転した。30秒後に地面がでこぼこになり、反時計回りに回転し、破壊する前に北東のJl. Manggis方向に移動した。                           |
|                            | 地下水の噴き上げは？ | 地面が回転した後、地下水が泥を伴って噴き出した。水と泥のかさは増し、時々溢れた。   |
|                            | 人々の動きは？    | Jl. Manggisへ避難した。そこは地震で亀裂がはいった。  |
|                            | 詳細なコメントは？  | 家があった地区はSago trees's spring systemに近かった。   |
|                            | 欄外のコメント    | B7夫人はJl. Saguに住んでいた。彼女の家は元の位置から北東のManggis通りに300mほど移動した。そこは地震断層によって裂けた。最も近いManggisに避難した。  |
|                            | その他        |  |
| B8夫人<br>上流端から西(上流側)へ       | 震動をどう感じたか？ | 最初に水平動があり、続いて鉛直動が発生した。途中揺れが途切れることはなかった。その10秒後に水平動。   |
|                            | 地盤の動きは？    | 30秒後に家が回転し、落ちて地面に刺さった(打ち付けられた?)。Gawalise道路は壊れて、アスファルトはGawalise畑に投げ出された。砂と灰が地面から噴き出した。地面はでこぼこになった。10分後に畑の地面が裂けた。家の地盤が75mほど北東に移動した。基礎が落ちた。 |
|                            | 地下水の噴き上げは？ | Gawalise畑から地下水が噴き上げた。  |
|                            | 人々の動きは？    | 畑の方に逃げたが畑が裂けたため、西の村役場の方に走って逃げた。  |
|                            | 詳細なコメントは？  | 畑に最初は水はなかったが軟らかかったので、畑に投げ出されたアスファルトは足場として用いた。  |
|                            | 欄外のコメント    | B8夫人はJl. Gawalise Rayaに住んでいた。彼女の家は移動して回転し地面に刺さった(打ち付けられた?)。3日後に壊れた屋根の下をチェックしたら水が上がっていた。  |
|                            | その他        |  |

出典：JICA 調査団データを基に安田委員編纂

## 1) 震動に関して

震動のタイミングと方向に関しては、流動範囲から逃げた3名の人の証言が得られている。B7夫人とB8夫人は上流部の湧水帯近くにおいて、2人とも最初に水平動を10秒程度感じ、その後鉛直動を20秒程度感じている。一方、B6夫人は中央部において水平動だけを感じている。

## 2) 流動範囲から逃げた3名の証言に関して

流動範囲から逃げた3名のうち上流部の湧水帯近くにおいたB7夫人は家が10mほど地面に入り10秒後に20mまで持ち上がり、30秒後に地面がデコボコになり反時計回りに回転したと証言している。B7夫人は300mほど流されたとのことである。近くにおいたB8夫人は30秒後に地面が回転したあと、家が落ちたと証言している。

一方、中央部にいたB6夫人はまず地面が裂け落ちた後、4~5mほど持ち上がり(その間緩やかな震動で)、その後20秒ほど反時計回りに回転したと証言している。また、回転している頃に泥が多量に溢れ、10mの高さまで噴出したと話している。

## 3) 流動範囲きわの住民からの証言

最上流で湧水帯の少し上流側で流動範囲の北の縁においたB1の人は地震の15秒後に地盤が動き出したが水は噴き出さなかったと証言している。

中流部で流動範囲の北の縁においたB2の人は地震が発生した時に泥が噴き出し、埋設管から水

が噴き出し、そして地盤が動き出したと証言している。中流部で反対の南側の縁にいた B3 の人は地震の 20 秒後に地盤の動きと水の湧き出しが同時に発生したと証言している。

最下流で縁より少し流動範囲内にいた B4 の人は地震の 2 分後に地盤の動きと水の湧き出しが同時に発生し、3 分後に水が川のように流れ 3 日間続き野球場の大きさの池が翌日できたと証言している。これに対し、最下流の南側の縁にいた B5 は水は噴き出さなかったが地震の 20 秒後に地盤の動きと同時に水が流れたと証言している。

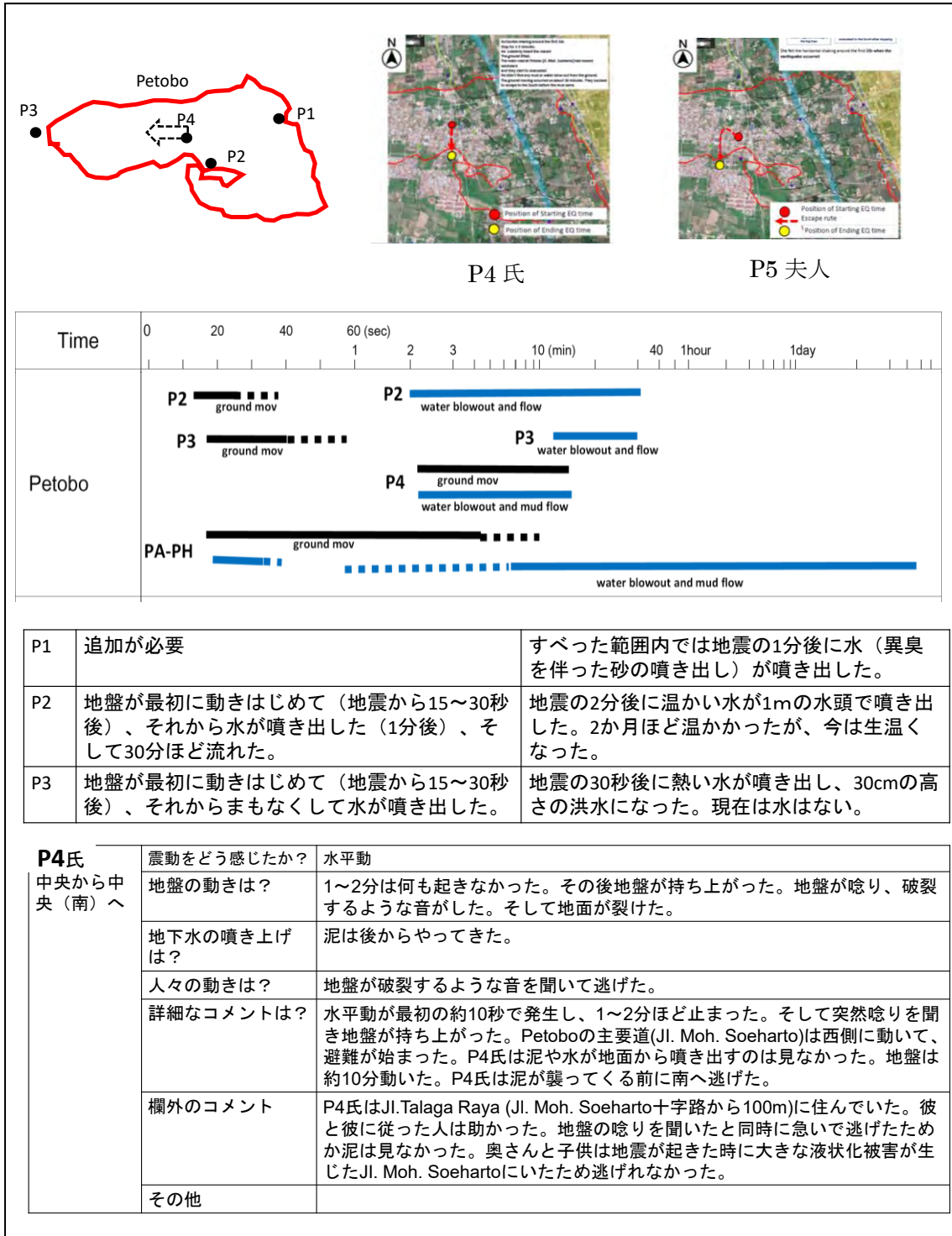
#### 4) BALAROA で起きたことに関する考察

まず流動範囲内ではほぼ湧水帯の位置にいた B7 夫人と B8 夫人の証言が貴重と思われる。2 人も最初に水平動を 10 秒ほど感じ、続いて鉛直動を 20 秒ほど感じている。最初の水平動は当然地震そのものによる揺れであるが、続く 20 秒の鉛直動は地震記録にはないので、流動範囲の局所的な地盤の振動によるとしか考えようがないであろう。B7 夫人の証言の英文の中の *enter* の意味と *it was lifted* の *it* が地盤なのか家なのか不明であるが、地面が大きく波打つように 10m 程度局所的に持ち上がって、その後落ちたのではなかろうか。この間に 20 秒ほど鉛直動を感じたのではないかと思われる。B8 夫人も 30 秒後に家が落ちた(?)との証言をしており、その間地盤が大きく持ち上がったり落ちたりしていたのではないかと思われる。そして、B7 夫人は地面が回転した頃に地下水が泥を伴って湧き出しや噴き出し、B8 夫人もその頃に砂と灰が噴き出したと証言しているので、水圧によって表層があっちこちでデコボコに持ち上げられ、裂け目ができ、そこから水が湧き出しや噴き出したのではないかと考えられる。いずれにせよ 10m も表層を持ち上げる水圧は驚くべき高かったのではないかと考えられる。なお、この付近で流動範囲の北の縁にいた B1 の人は、地震の 15 秒後に地盤が動き出したが地すべり外では水は噴き出さなかったと証言している。ただし、流動範囲内で噴き出さなかったと言っているのか、それとも自分がいた縁あたりで噴き出さなかったと言っているのか分からない。

次に、中流部で流動範囲内にいた B6 夫人は、地面が落ちた後に後に、地面が持ち上がったと感じている。高さは 4~5m と上流側の 2 人の半分程度と証言し、鉛直動も感じていない。この場所は湧水帯から下流に 400(?)m 程度離れており、噴き出した水の水圧が湧水帯付近より小さかったのではないかと考えられる。ただし、この位置でも水の湧き出しや噴出があり、それによって地盤が持ち上がり動き出したことになる。なお、中流部の南の縁にいた B3 の人も、地震の 20 秒後に地盤が動き、同時に大量の水が湧き出したと証言している。

最下流端にいた B4 の人は、地震の 2 分後に地盤の動きと水の噴き出しが同時に発生したとのことで、上・中流部に比べて、2 分近く遅れて地盤が動いている。やはり下流端にいた B5 の人は水は噴き出さなかったと証言しており、下流部では水が噴き出さず、上・中流部から流れてきただけの水で浸水した可能性もある。ただし、3 日間水の流れは続き、野球場の大きさの池ができたとのことで、上・中流部では 3 日間にわたって大量の水が噴き出したり湧き出したことになる。

(5) Petobo でのヒアリング結果のまとめとコメント





|                     |            |  |
|---------------------|------------|--|
| P5夫人<br>中央から南<br>東へ | 震動をどう感じたか？ | 揺れている時は水平動。Soeharto通りは10m持ち上がった。   |
|                     | 地盤の動きは？    | 北の区域が南に動いた。2分後に地面が割れ、家が動いた。  |
|                     | 地下水の噴き上げは？ | 泥は0.5mの高さの波のように流れた。泥の流れは南の方向に回転した。   |
|                     | 人々の動きは？    | 大きな木を掴みながら一緒に流れた。流れが止まってから南の方向に逃げた。  |
|                     | 詳細なコメントは？  | 地震が発生して最初の10秒間水平動を感じた。   |
|                     | 欄外のコメント    | P5夫人はJl. Mawar (Petobo SD1の後)に住んでいた。地震が起きたので家を飛び出し家の前の通りで他の人と集まった。1~2分経って通りと家が動くのを見た。そして2秒後に突然泥の波がやってきて家や通りを洗い流した。波の高さは約0.5mであった。彼女と子供は突然倒され泥の中に浸かった。幸運にも彼女は木の根を見つけ、立ち上がった（？この後証言が日付に隠れて見えない！） |
| その他                 |            |  |

出典：JICA 調査団データを基に安田委員編纂

### 1) 震動に関して

震動のタイミングと方向に関しては、流動範囲から逃げた2名の人から、水平動だったとの証言が得られている。ただし、2人とも流動範囲の中央部のほぼ同じ所で、湧水帯からは700(?)m程度下流側の離れた所にいた。

### 2) 流動範囲から逃げた2名の証言に関して

2人とも中央部のほぼ同じ所において、P4氏は地震で揺れた後1~2分は何も起きず、その後地面が持ち上がり、唸って破裂するような音がして裂けたと証言している。急いで逃げたので泥や水が地面から噴き出すのは見なく、泥が後からやってくる前に南に逃げたとのことである。もう一人のP5夫人は地震による揺れの2分後に地面が割れ、家が動き、泥は0.5mの高さの波のように流れ、南の方向に回転したと証言している。また、地面が動いている最中はSoeharto通りのアスファルトが10mほど持ち上がったとのことである。

### 3) 流動範囲きわの住民からの証言

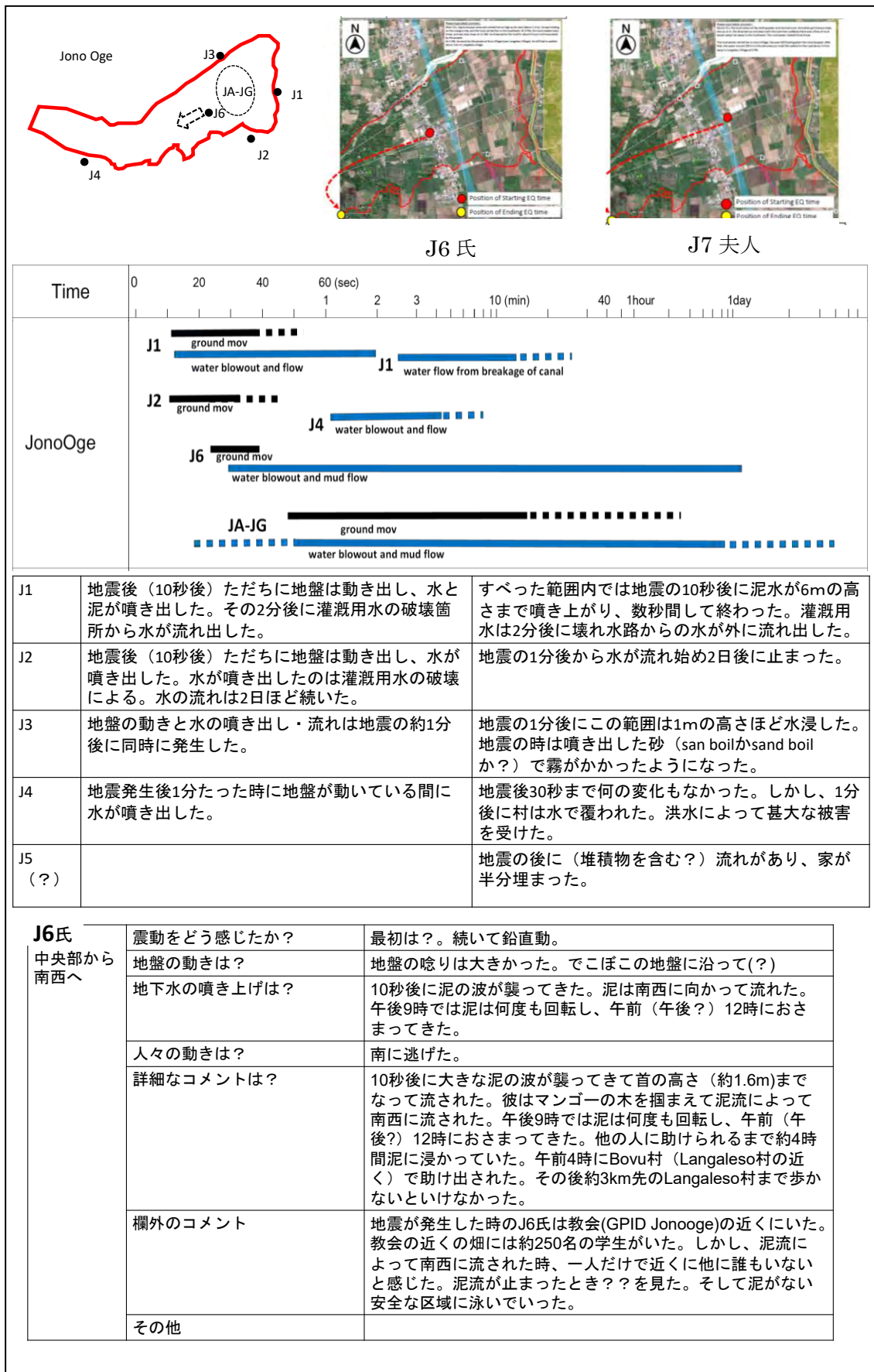
流動範囲の上流端にいたP1の人は地震の1分後に水（異臭を伴った砂）が湧き出したと証言している。中央部で湧水帯から500(?)m程度下流にいたP2の人は、地震から15~30秒後に地盤が動き始め、1分後に水が噴き出し、30分ほど流れたと証言している。また、地震の2分後に温かい水が1mの高さで噴き出したとのことである。さらに2カ月ほど温かく今は生温いと話しており、地震後2カ月も温かい水が噴き続けたのかもしれない。下流端にいたP3の人は地震から15秒~30秒後に地盤が動き始めて、間もなくして水が噴き出したと証言している。また、地震の30秒後に熱い水が湧き出し、30cmの高さの洪水になり、今は湧水はないとも言っている（これが本当だと、上流側から地盤が流れてきて下流端で乗り上げただけでなく下流端付近も独自に動いたことになる。P3は本当にこの位置であろうか？間違っていないか？ヒアリング結果をまとめた時間経過の表の水の噴き出しのタイミングとも合っていない）。

#### 4) PETOBO で起きたことに関する考察

震動のタイミングと方向に関しては、流動範囲から逃げた P4 氏と P5 夫人の 2 名とも水平動だったとの証言している。ただし、P4 氏は地震で揺れた後 1~2 分は何も起きず、その後地面が持ち上がり。唸って破裂するような音がして裂けたと証言している。P5 夫人は Socharto 通りのアスファルトが 10m ほど持ち上がったと証言している。2 人とも流動範囲の中央部のほぼ同じ所で、湧水帯からは 700(?)m 程度下流側の離れた所にいた。この付近は流動化域から圧縮堆積域の境付近に該当する。P4 氏の証言の地面が持ち上がったのは自分がいた位置でなく上流側の「流動化域（調査団が推定された範囲）」であったのではないかと仮定し、P5 夫人の証言と合わせて考えると、「流動化域」では地盤が持ち上がり鉛直動も発生していたのではないかと思われる。

流動範囲の上流端にいた P1 の人によると、地震の 1 分後に水が噴き出したとのことである。中流部の南端にいた P2 の人は地震の 2 分後に温かい水が 1m の高さまでで噴き出した、また、下流端の P3 の人は地震の 30 秒後に熱い水が湧き出したとのこと、流動範囲内で広く水が噴き出したり湧き出したことになる。湧水帯付近の証言者はいないので、湧水帯付近で噴き上げた高さは不明である。ただし、地面が 10m ほど持ち上がったということなので、Balaroa と同じように湧水帯付近（流動化域）ではかなりの高さ噴き上がったのではないかと考えられる。また、噴き上がった水は温かいとか熱い水とのことで、間欠泉の温泉のように噴き出してきたのではないだろうか。

(6) Jono Oge でのヒアリング結果のまとめとコメント



|                              |            |  |
|------------------------------|------------|--|
| J7夫人<br>中央部（湧水帯付近）から南西（下流側）へ | 震動をどう感じたか？ | 最初の5秒は水平動でその後の5秒は鉛直動   |
|                              | 地盤の動きは？    | 唸りは大きく、地盤が爆発したように聞こえた。地面が裂けてこぼこになった。   |
|                              | 地下水の噴き上げは？ | 約10秒後に泥が沸騰した水のように湧き上がってきて全てを引きずり込んだ（？）。泥の波は南西に向かって流れた。   |
|                              | 人々の動きは？    | （午後9時に？）南へ逃げた。   |
|                              | 詳細なコメントは？  | 約10秒後に泥が沸騰した水のように湧き上がってきて彼女は埋まった。そしてバナナの木を掴んでその上に上がった。木と一緒に彼女は上へ下へと溺れていたら、突然泥の波がきて南西に押し流された。泥流は3回ほど回転した。泥流は彼女をBovu村まで運んだ。泥流が止まった時には彼女はまだ浮かんでいた。その後、安全な区域（泥がない場所）まで約200泳いだ。そして道路を3～4kmほど離れたLangaleso村まで歩いた。午後9時に着いた（？）。 |
|                              | 欄外のコメント    | J7夫人はJonoOge-Palolo道路の東に住んでいた。そこは液状化で無くなった。地震が起きたときは家にいた。家の背後500mにあったココナツの木が家の近くまで動いたのを見た。災害の後木の位置は家の所まで動いていたので、ココナツの木は約500m南西に動いたことになる。   |
| その他                          |            |  |

出典：JICA 調査団データを基に安田委員編纂

### 1) 震動に関して

流動範囲から逃げた2名とも流動範囲の中流部において、J6氏は湧水帯の少し下流側、J7夫人は湧水帯の少し上流側にいた。震動のタイミングと方向に関しては、J6氏は最初は不明でその後鉛直動を感じている。J7夫人は最初の5秒は水平動でその後5秒は鉛直動だったと証言している。

### 2) 流動範囲から逃げた3名の証言に関して

地盤の挙動としてJ6氏は鉛直動の頃に地盤が唸り地表面はでこぼこになり、10秒後に泥の波が襲ってきて首の高さ（約1.6m）までなると証言している。彼はマンゴーの木を掴まえて泥流によって流された。一方、J7夫人は地盤の唸りは大きく地盤が爆発したように聞こえ、地面が裂けてデコボコになったと証言している。また約10秒後に泥が沸騰した水のように湧き上がってきて全てを引きずりこんで（？）、泥は南西に流れたとのことである。彼女は泥に埋まったがバナナの木を掴んでその上に上がった。そして突然泥の波がきて南西に流された。

### 3) 流動範囲きわの住民からの証言

流動範囲の上流端にいたJ1の人は地震の10秒後に地盤は動き出し、遠方の中央部では泥水が6mの高さまで噴き上がったと証言している。また、噴水は数秒間して終わり、灌漑用水は2分後に壊れて水が外に流れ出したとのことである。

中流部で上流近くの南端にいたJ2の人も地震の10秒後に地盤が動き出し水も湧き出したと証言している。また、地震の1分後から水が流れ始め2日後に止まったとも話している。中流部の北端にいたJ3の人は地震の1分後に地盤の動きと水の湧き出し及び流れが発生してと証言している。また1分後に1mほどの高さに水浸し、地震の時は噴き出した砂で霧がかかったようになっ

たとも話している。

一方、下流部にいた J4 の人は地震後 30 秒間何の変化もなく、1 分経った時に地盤が動いている間に水が湧き出したと証言している。また、1 分後には村は水で覆われたとのことである。

#### 4) JONO OGE で起きたことに関する考察

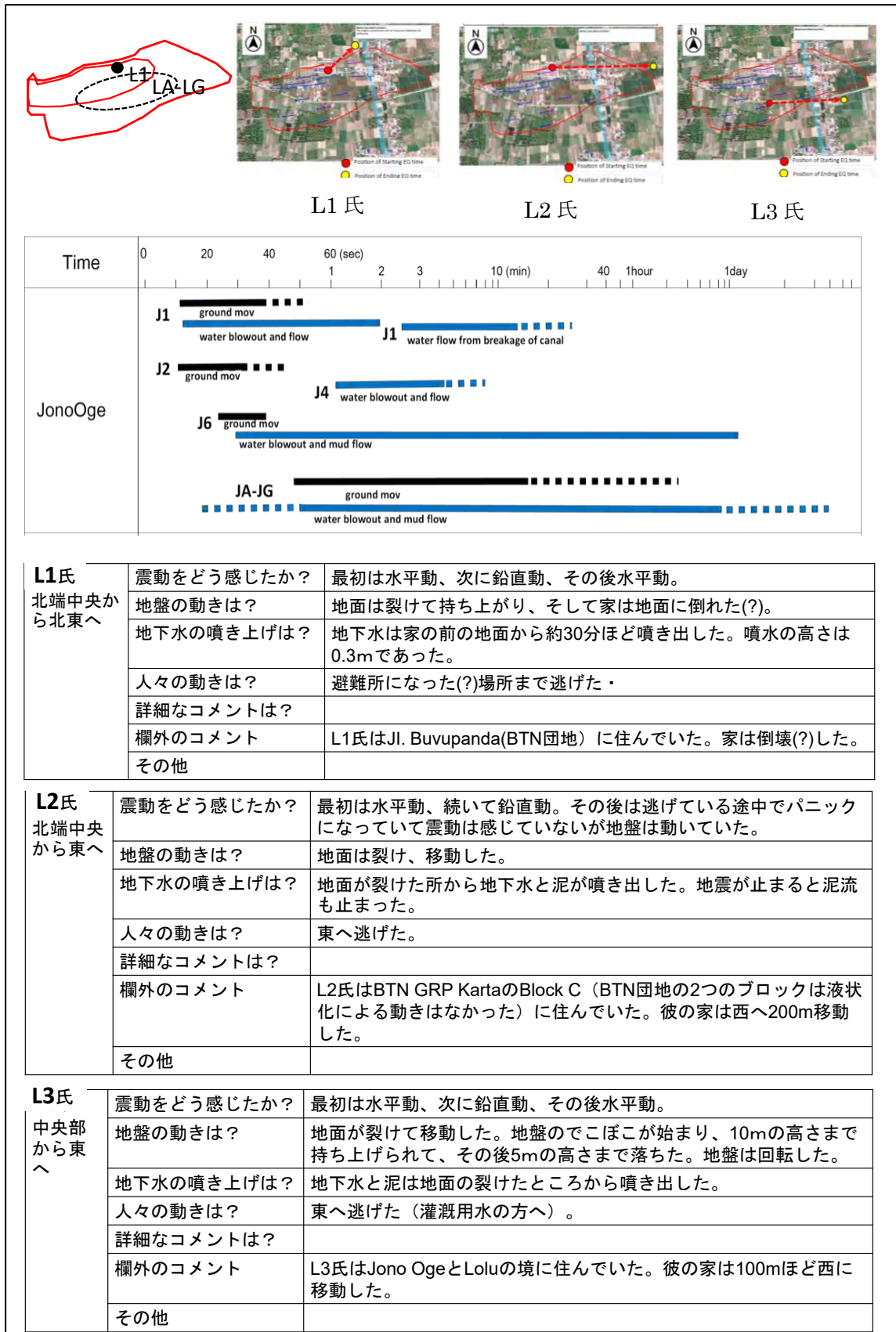
流動範囲の内の中流部には J6 氏が湧水帯の少し下流側、J7 夫人が湧水帯の少し上流側にいて、震動に関して貴重な証言をしている。J7 夫人は最初の 5 秒は水平動でその後 5 秒は鉛直動だったと証言し、J6 氏は最初は不明でその後鉛直動を感じている。この鉛直動の頃に二人とも地盤の唸りや爆発したような音を聞き、地表面がデコボコになったこと、及び泥が襲ってきて流されたと話している。図 8.48 に示した自分自身が流されながら動画を撮影した人も近くにおいて、10 後に地盤が割れて動き出したと話している。ただし、その時に噴水は見ていなく強い揺れも感じていない。同じく中流部で流動範囲の南の縁にいた J2 の人も地震の 10 秒後に水が湧き出し地盤が動き出したと証言している。したがって、湧水帯付近では 5～10 秒後に水や泥が噴き出し、地盤がデコボコになり、流動も始まったのではないかと考えられる。

上流端にいた J1 の人は地震の 10 秒後に地盤が動き出し、遠方の中央部で泥水が 6m の高さまで噴き出したと証言している。また、地震の 2 分後に灌漑用水が壊れ水路からの水が流れ出したとのことである。

一方、下流にいた J4 の人は地震発生後 1 分後に水が湧き出したとのことである。上述した動画を撮影した人はその時点で J4 まで流されていない。また、灌漑用水が壊れたのもその後である。したがって、下流の J4 付近でも水が湧き出したことになり、上流端から J4 付近まで広い範囲で水が噴き出したり湧き出したと考えられる。



(7) Lolu でのヒアリング結果のまとめとコメント



出典：JICA 調査団データを基に安田委員編纂

## 1) 震動に関して

流動範囲から逃げた3名とも流動範囲の中流部で湧水帯から100(?)m程度下流側にいて、L1氏とL2氏は北側、L3氏は中央付近にいた。3人とも最初は水平動、続いて鉛直動、それから水平動が発生したと証言している。地震動の感じ方は、それぞれ10秒程度となっている。

## 2) 流動範囲から逃げた3名の証言に関して

L1氏は地面は裂けて持ち上がり地下水は家の前から30分ほど噴き出し、その高さは0.3mであったと証言している。L2氏は地面が裂け地盤が移動し、裂けた所から地下水と泥が噴き出したと証言している。

L3氏は地面が動き出したのは地震発生後1~2分後であり、地面が裂け地盤が移動し、地盤のデコボコが始まり10mの高さまで持ち上げられ、その後5mまで落ちたと証言している。そして地下水と泥は地面の裂けた所から湧き出したと言っている。

## 3) LOLUで起きたことに関する考察

流動範囲から逃げた3名とも流動範囲の中流部で湧水帯から100(?)m程度下流側にいて、3人とも最初は水平動、続いて鉛直動、それから水平動が10秒程度ずつ発生したと証言している。また、地盤のデコボコや10mの高さまでの持ち上げ、裂けて移動が発生し、裂けた所から水と泥が噴き出したと話している。したがって、地震動に続いて地下水が湧き上がり、地盤が持ち上がったデコボコが発生し、その時に鉛直動も生じたと考えられる。

### (8) 4つの地区を総合した考察

以上を総合する場合、まず、流動範囲内にいた人と範囲外にいた人での証言を分け、さらに、流動範囲内でも湧水帯付近にいたのか離れていたのか分けて考察する必要がある。

そのうち、流動範囲内で湧水帯付近にいた人が真の被災状況を見ていると考えられる。そのような人はBalarooの2名、Jono Ogeの2名、Loluの3名である。これらの人はすべて10秒程度の水平動のあとに、鉛直動を感じている。最初の水平動は地震そのものによる揺れのはずである。鉛直動の長さはBalarooで20秒、Jono Ogeで5秒、Loluで10秒なので、10秒程度揺れたと考えられる。この鉛直動の時に発生した現象として、地盤の唸りや破壊するような音、地盤の持ち上げ、地面のデコボコや波打ちの発生、亀裂の発生とそこからの泥水の噴出があったと証言している。また、地盤は10mほど持ち上がったとか、水が6mの高さまで噴きあがったとのことなので、地下水が非常に高い水圧で噴きあがったことを物語っていると考えられる。地盤がデコボコになったとのことで、線状ではなく面状に至る所で噴き出したのではないかと考えられる。さらに、大量に地下水が噴き出している。

Balarooでは湧水帯から400m(?)程度下流側にもB6夫人がいて証言がある。そこでは鉛直動は感じなかったが地面は4~5m持ち上がったとのことである。したがってこの付近までは地下水が噴きあがったが湧水帯ほど激しくはなかったのではないかと考えられる。

Petoboでは湧水帯より700m(?)程度下流にいた2人の証言がある。それによると、揺れは水平動

しか感じなかったが、地盤が唸り破裂するような音がし、地盤が持ち上がったとか、地盤やアスファルトが持ち上がったとのことである。それが2人がいた場所か離れた所か分からない。他の3地区と同様なことが起きていたのではないかと推定される。なお、このような鉛直動の発生はGEERの報告とも符合している。

このような証言から、地下水の噴き出しで表層地盤が持ち上げられて流動が始まったと考えられる。地盤が裂けたとの証言が多いので、表層には硬い層があったのではないかと考えられる。軟弱な粘土や緩い砂であれば地盤が裂けたとの証言にならないであろう。

## 8-4 東畑委員の提供論文 Nalodo 長距離斜面流動のメカニズム Mechanism of long-distance flow in Palu

### 8-4-1 はじめに

Sulawesi 島の Palu-Koro という活発な断層沿いで 2018 年に多数発生した地盤流動 Nalodo 現象は、他に類例を見ない現象であり災害であった。その発生機構をめぐっては、現地での掘削と断面観察、載荷試験、土のサンプル採取と室内試験などが精力的に行われ、多くの仮説が唱えられた。筆者も上記の調査結果を参考にしながら既往の災害の中から類例を発見し、Nalodo の発生メカニズムを解明しようと努めた。しかし、大量の水が地中から噴出し、それが流動を促進したことまでは研究者の間で合意が得られたものの、その先の噴出の原因は特定できなかった。Nalodo 現象が他に類例を見ない以上、かなり特異な状況が現地には存在し、あるいは地震時に作用した荷重が特異なものであったと考えざるを得ない。しかし、何が特異なのか、特定できなかったのである。本稿では、筆者の取り組んだ内容を中心に、まず Nalodo 問題の難しさを記述する。

次に水の噴出を前提として、Nalodo のような長距離流動を定量的に再現・予測できる解析手法を説明する。この予測法は、水の噴出によって流動が容易になることだけを前提としており、特定の原因メカニズムには依存しない。数百 m に及ぶ流動が発生するためには、斜面長もそれなりに大きなものが必要である。そして斜面下流部で地盤が崩壊しなければ、上流部が長距離流動して流れ込む余地ができないことが、示された。すなわち、Nalodo 的な流動が開始するかどうかは、地盤、土質や地震動の問題である一方、長距離流動できるかどうかは、斜面の規模の問題なのである。

### 8-4-2 Nalodo の特異性

液状化した地盤が側方流動する現象は、決して珍しい出来事ではない。事例だけをとりても、1964 年のアラスカ地震や新潟地震、1983 年の日本海中部地震をはじめ、1994 年のノースリッジ地震、1995 年の兵庫県南部地震など枚挙にいとまがない。その発生メカニズムについても、液状化砂層のせん断強度が微弱になること、重力の作用によって標高の高いところから低いところへ向かって動くことなどが知られている。そして水膜形成も、流動変位を促進するメカニズムとして研究されてきた。事例調査によれば、流動変位も 10m 近いものが起こりうるということがわかっている。しかしスラウェシ島で発生した Nalodo は、流動変位が 500m を超えた点で、既往の液状化地盤流動とは全く異なる様相を呈している。Nalodo の特異性の裏に、異常な材料物性が隠れているのか、あるいは荷重や地盤形状が他とは全く異なっていたのか、なんらかの異常性があると考えざるを得ない。さもないと Nalodo 的な長距離流動がありふれたものということになり、これまでの経験とまったく異なるのみならず、今後は全世界的に頻繁に発生しうる液状化関連災害と見なすことになり、リスク評価や対策に過重な負担を要求しかねないからである。

不可解なことに、きわめてまれなはずの Nalodo が Palu では、Balarooa、Petobo、Jono Oge、Sibalaya の 4 か所で発生したばかりか、Lolu でも長距離流動の兆しが起こった。記録された地震荷重が世界各地と比較して特殊とも思われないので、Palu の断層低地には何らかの特殊条件が存在してい

ると考えざるを得ない。過去の Nalodo 痕跡とも思われる地形も報告されており、それが確かとすれば、Palu-Koro 断層の谷に、何らかの恒久的な特異性が存在していると考えに至った。

### 8-4-3 土の物性は異常か？

ゆる詰め砂では、非排水せん断の進行とともに間隙水圧が急増して有効応力が微小に（ゼロに）なってしまうことがある。特に非塑性のシルト分が含まれていると、このような軟化挙動が強まるものと、考えられてきた。そのような砂が Palu 周辺の現場に存在していたとすれば、Nalodo の発生は不思議ではなく、他所と比べても現地が特異な条件を備えていた、と結論できたはずである。しかし現地で採取した不攪乱砂試料を用いて様々なせん断実験が行われたものの、期待していた軟化挙動は起こらなかった。粒度組成が豊配合であることが原因かもしれないが、まだはっきりしたことはわかっていない。いずれにせよ、軟化が起こらないことは明白であり、Nalodo には他の原因を求めなければならない。

様々な大きさの粒子が交じり合って流動性を増す、という Mixing 理論があり、その適用性を国生委員にお願いして検討いただいた。結果は、該当しそうにない、とのことであった。

雲母を多量に含む砂は、流動性に富む、という知見がある。その観点から砂の鉱物組成を調べていただいたが、雲母の含有量は微量であった。

風積土である Loess で構成されている斜面は、水浸と地震荷重が重複した時に大崩壊、長距離流動を起こすことがある (Ishihara, 1990; Wang ほか, 2010)。この現象は、水浸によって粒子を接着しているセメンテーション物質が溶解、除去されたところへ過大な地震力が作用するためとされており、砂質土からなる沖積地盤である Palu の状況とは異なるものである。不攪乱試料の実験でも大崩壊的挙動は見いだせなかった。

以上、物性の面から Nalodo の原因が追究されたものの、結果は否定的であった。現場の土は、長距離流動を起こしにくい抵抗を備えている。なお、今回とは状況が異なるが、火山灰斜面には大量の地下水が含まれていて、地震に際して全面的に崩壊、長距離流動した事例がある。図 8-49 はその一つで、スマトラ島の Padang 郊外で起こったものである。



出典：東畑委員撮影資料

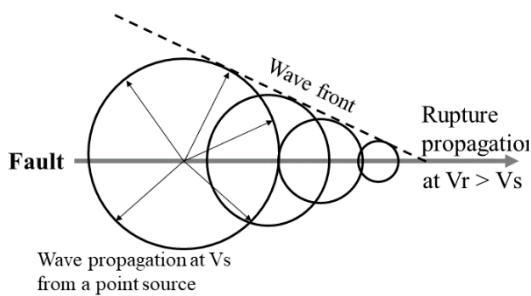
図 8-49 火山起源のスコリア斜面の長距離流動破壊 (2009 年 Padang 地震、Mw=7.5)



#### 8-4-4 地震動は特異か？

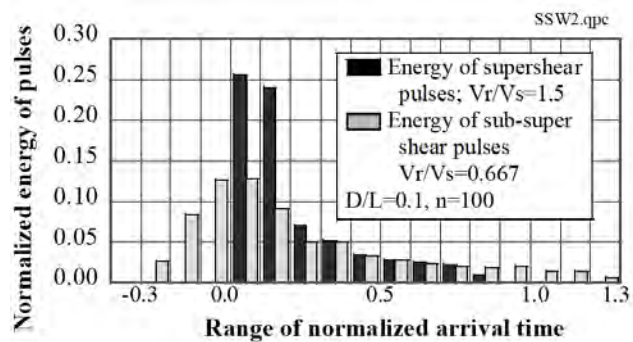
Palu の谷の西側で地震断層の変位が起こった。それよりさらに西、Balaroa の流動斜面の山手側で計測された地震加速度記録には、特異な性質は無いように考える。最大加速度値も水平方向合成加速度値で 333 ガルに留まっており、これだけから特異なまでに強大な地盤震動が起こったとは言い難い。

他方、今回の地震発生機構は Supershear と呼ばれる特殊なものであった、という論文がある (Bao ほか、2019)。Supershear とは、起震断層にそって破壊が伝播して行く速度  $V_r$  が、S 波伝播速度  $V_s$  を上回るものをいう。高速のモーターボートの通過した後は、波が V 字型に広がることはよく知られている。超音速の飛行体の後ろにも衝撃波と呼ばれる V 字型の波動伝播が起こる。Supershear は、これらとよく似た波が断層面から投射される現象である (図 8-50)。通常の S 波伝播より震動のエネルギーが短時間に凝縮されること (図 8-51)、距離減衰が起こりにくいこと (図 8-52) が、特徴である。



出典：東畑委員作成資料

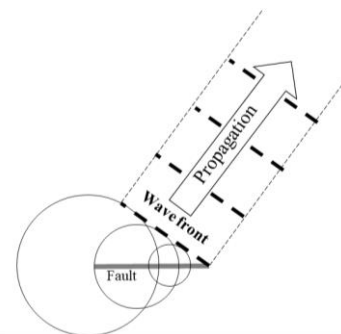
図 8-50 Supershear 時に起震断層から発射される S 波群



出典：東畑委員撮影資料

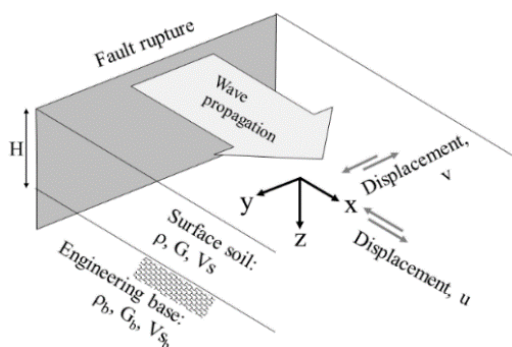
図 8-51 Supershear で多くの波源からのエネルギーが短時間に凝縮して到着、震動が激しくなる計算結果

さらに、起震断層のメカニズムが横ずれを主としていたので、Supershear の伝播も地表付近では横ずれのラブ波が強かったと推測してよいであろう。液状化の発生予測では、従来、鉛直方向への重複反射が仮定されてきた。これは水平面内で繰り返せん断応力が作用して砂を液状化させると考えるものであるが、ラブ波の伝播（図 8-53）では、水平面に加え、波が進行する x 方向に垂直な面にも繰り返せん断応力が作用する（図 8-54）。



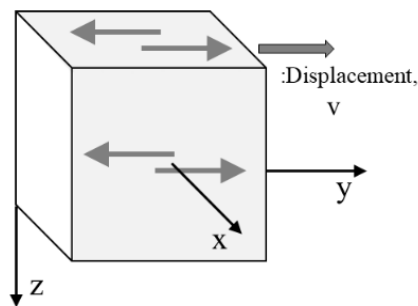
出典：東畑委員作成資料

図 8-52 Supershear が波頭を形成、遠距離まで伝達しやすい状況



出典：東畑委員作成資料

図 8-53 二層地盤の表面を伝播するラブ波



出典：東畑委員作成資料

図 8-54 水平面と垂直面の双方に独立して繰り返せん断が発生する状況

しかもこの垂直面内のせん断応力は地表に近づいてもゼロに減少することがなく、浅層では液状化を起こす力が高い。すなわち、Supershear には液状化を起こす危険性の高いラブ波を遠方まで到達させる力があり、Palu の谷を隔てて起震断層と反対側にある Petobo などでも激しい液状化災害を誘起した可能性があったかもしれない。ただし液状化の程度や層厚が大きかったとしても、それだけで Nalodo のような数百mの流動が起きたという論拠は、「地中に更に厚い水膜が形成された」可能性がある、という点以外に見当たらない。そして、どのくらいの厚さの水膜が形成されると地盤はどのくらいの遠方まで流れられるのか、という疑問に対して、現在われわれは解答を持たない。過去の液状化災害の事例では Nalodo のような長距離は知られていない、と言うのみである

#### 8-4-5 地形は特殊か？

Nalodo の発生した地点はいずれも、古い大型の扇状地に挟まれた、ごく浅い、谷とも言えないほどの低地である。また流動土砂の停止した先端は、Palu 川に沿って古い扇状地の扇端に並んでいる。そこから、Palu の谷で古くから繰り返されてきた土砂輸送現象の一端が 2018 年の Nalodo であり、同じ災害は今後も繰り返されるであろう、という印象を受けた。すると問題は、Palu の谷で進行している扇状地形成メカニズムに、世界の他の場所ではめったに見られない特殊なプロ

セスが進んでいるらしい、そしてそれは何なのか、ということである。このような疑問を抱きながら、世界の扇状地あるいは地震被災地を見渡し、Nalodo 的な現象の事例を探してみた。

### (1) 長い断層に沿う扇状地

Palu-Koro 断層は、活動度が著しく高い横ずれ断層である。このような断層沿いの大規模な谷に向かい、東西の山地から扇状地が発達して並んでいる。このような地形が強震動を被り、長距離地盤流動を引き起こした事例が、過去にあったであろうか。トルコの北アナトリア断層は、長大な横ずれ断層として有名である。ここで 1966 年に Varto 地震 (M=6.7-6.9) が起こり、地表に亀裂と斜面の速報移動が多数発生した(Wallace, 1968)。しかし、Nalodo のような緩斜面の長距離流動ではなかった。濃尾平野西端の養老断層沿いの地方や中央構造線の通る伊那地方には扇状地が発達していて、土砂災害も珍しくない(大石・水谷, 1969)(飯田, 1978)。しかし過去の事例は豪雨時の土石流、浸食、堆積などに留まり、地震災害の報告が少ない。伊那地方では、1718 年の遠山地震(マグニチュード 7.0) が中央構造線の活動によって引き起こされたという説がある。そして斜面崩壊が多発した(坂本, 2014)。そのうちのいくつかは河道閉塞を起こす(都司, 1979) など長距離流動ないしは扇状地の崩壊であったかもしれないと思われるが、規模など詳細がよくわからない。1586 年天正地震 (M=7.9) は濃尾平野西南部、木曾川デルタにも多大な被害を起こしたが、斜面崩壊こそ起きたが、扇状地の流動的な破壊は認識されていない。我が国にも大断層とそれに沿う峡谷は多いのだが、Palu-Koro 断層の谷ほど幅が広くない。これは後に Nalodo の変位予測で述べることだが、斜面(扇状地)がある程度長くないと、液状化で不安定化はするとしても、数百 m に及ぶ Nalodo 的な変位は発生することができない可能性がある。そうであれば、狭い峡谷ばかりが多い我が国では、Nalodo の先例が見当たらないことも、あながち不思議ではない。台湾西部の平野には、山地から流出してきた土砂で扇状地が形成されている。そしてそこには地下水資源が包蔵されている。1999 年の集集地震に際しては車籠埔断層が逆断層的な破壊をしたが、そのとき震動によって地下水の流れ、透水性などが変化したことが報告されている(Jang et al., 2008; 中筋ほか, 2000)。しかし扇状地の崩壊などは記述されていない。なお、発生機構不明ながら、断層に関連して起きた、とされている図 8-47 の斜面崩壊は、緩斜面で長距離流動しているように見える。詳細を台湾に問い合わせたが、詳しい情報を発見することはできなかった。1847 年善光寺地震でも、各地で斜面崩壊と河道閉塞が起きた。山地の斜面崩壊が多いようであるが、図 8-56 の例は、扇状地地盤の長距離流動かもしれない。



図 8-55 台湾集集地震における太平地すべり  
(中筋ほか, 2000)



図 8-56 善光寺地震押野地点の斜面崩壊 (中央防災会議, 2007)

## (2) 地震後に地下から水が排出された事例

地震時に地下水噴出と言うと液状化がすぐに想起されるが、液状化だけが地下水噴出ではない。Muir Wood and King (1993)は、大地震に際して地下からの湧水が急増し、河川の流量が増えることを論じた。具体的な例としては、北米の Hebgen Lake 地震(1959, Mw=7.2)と Borah Peak 地震(1983, Mw=6.9)とが挙げられている。しかし具体的な被害実態を見ると、Borah Peak 地震で湧水の起きたのは地震後数時間から数日後であった (Witkind et al., 1962; Wood and Steedman, 1992)。より古い Hebgen Lake 地震では Waag (1985)が大量の水の噴出があったことを述べているが、それが地震後どのくらいの時間が経過してからであったのかは、述べられていない。同じ地震について Swenson (1965) は、Hebgen Lake 地震の後で噴出した地下水は、気温よりその水温が高かったと記しているが、詳細は不明である。同じ地震に関して Wood (1985)も大量の湧水に触れているが、湧水は地震後(ある程度)時間が経過してから発生したと考えているような書きぶりである。特に、震央から 30 km離れた Lupine Lake で起きた 20 万立方メートルの泥流は、増加した湧水が原因で、地震後二日経過してから発生したと明記されている。また Clayton 銀鉱山では、地震の 3 時間後に大量の湧水が始まった。これらの湧水は、地殻の圧縮ひずみが地震によって高まったことと、新たに開いた亀裂を通して外界へ流出しやすくなったことが原因、と考えられた。

米国の事例では、湧水の増加は flood という呼称がふさわしい規模であった。これに比して我が国の事例では、兵庫県南部地震に際して六甲山中の坑道で圧縮ひずみが増加して、湧水が平常時の 10 倍の最大 6.5 リットル毎秒に増加した (藤森ほか, 1995)。また佐藤は、2011 年 4 月の福島県の余震のち湧水が増加し、それが 4 年間も続いていることを報告した。ただし湧水の水温は温泉とはいえ 27°C に留まっている。

## (3) 地下水の噴出によって誘起された斜面崩壊の例

我が国の事例で、flood という呼称にふさわしい湧水が地震時におきたのは、1960 年の松代群発地震である (Tsuneishi and Nakamura, 1970; Hagiwara, 1972)。この群発地震の原因は、通常地震のような地球の地殻内部の応力が断層のせん断強度を上回ったことにあるのではなく、地球内部から上昇してきた水の圧力によって既存断層中の有効応力とせん断強度が低下、その結果として

断層が破壊したことにある（中村 1981 の水噴火説）。このメカニズムは、ダムやシェールガス採掘が地震を誘起するメカニズムと、共通している。そして地表から水が噴出したのも、その一環であろう。地震動と水の噴出の時間関係は定かではないが、発震機構から考えて、両者の時間差がごく短くても不思議とは言えない。



図 8-57 松代の牧内地すべり(1966年9月17日信濃毎日新聞撮影)

地下から水が上昇することにより有効応力の低下した斜面が不安定化し、崩落した。図 8-57 の牧内地すべりが最大で、崩壊 2 時間前に、斜面の上部から湧水のあったことが知られている。そして他にも近隣の 2 か所で同様の斜面崩壊が起こった（Morimoto 他, 1967）。

地盤工学では、地下水の圧力が静水圧を上回って存在していることを、被圧地下水と呼ぶ。建設の視点からの議論なので、想定される深さは 10 ないし 100m のオーダーである。これと同様ではあるが、地質学的見地からは、1000m のオーダーの深さで静水圧を上回る水圧が存在していることを、ジオプレッシャー（渡部ほか, 1997）あるいはオーバープレッシャーと呼ぶ。渡部ら（2009）によると、(国内の) ジオプレッシャーには、次のような特徴があり、斜面不安定の原因になっている：

- ① 厚い堆積盆地に発達し、熱伝導率及び透水性の低い厚層泥岩をキャップロックとして、地下 2～7 km に分布する。
- ② 静水圧を大きく上回る異常高圧を有する。筆者註：全応力を上回ることはない。
- ③ 熱水の起源は変質した化石海水であり、大量のメタンガスを伴う。筆者註：海水起源なので塩分を含むことは自明である。
- ④ 熱水の温度は通常 50～150℃ である。
- ⑤ 非火山性で、かつ流体による熱移送を伴わない静的な熱水系であり、熱源は貯留母岩からの熱伝導である。

ジオプレッシャーの生ずる原因としては、地殻のテクトニックな押し引きと、上部に透水性の低いキャップの存在することが挙げられている(Wei, 2015)。また Sibson (1995) は、ジオプレッシャーが断層に作用すると、有効応力が低下して地震が起こりやすくなることを論じた。

1962年から1963年にかけて新潟県で発生した松之山地すべり（湊元, 1982）は、延長 3600m、幅 900m で（図 8-58）、ジオプレッシャーが斜面表層に作用して誘起した可能性がある（渡部ほか, 1997）。2020年7月に筆者らは松之山地すべり地帯を踏査したが、上記のジオプレッシャーの特徴



と比して、松之山温泉などの湧出、異常高圧の結果と思われる泥火山が存在すること、塩分濃度の高い(3.5%; 海水とほぼ同等)兎口温泉が存在することなど、共通の性状を見出した。松之山の泥火山は、現時点では活動が微弱であるものの(図 8-59)、地中には過去に泥の噴出した痕跡である柱状構造が存在して圧力を帯びており、鍋立山トンネルの掘削がこれに正面から遭遇し、粘土が著しい膨潤をして9111mの掘削に22年を費やす難工事となった(図 8-60、田中・石原、2009)。

世界には活動の活発な泥火山も多く、インドネシアのLUSI(図 8-61)、アゼルバイジャンのGobustan(図 8-62)は著名である(Manga, 2007)。またMellorsら(2007)は、泥火山の噴出と近隣の地震との間には相関があると論じた。



図 8-58 新潟県松之山地すべりの被害状況(谷口, 1964)



図 8-59 新潟県松之山の蒲生泥火山(手前のボールペンと寸法比較されたい)

出典: 東畑委員撮影



図 8-60 松之山、鍋立山トンネル難工事地点直上の情景

出典: 東畑委員撮影



図 8-61 インドネシア・ジャワ島の LUSI 泥火山  
出典：東畑委員提供



図 8-62 アゼルバイジャンのGobustan泥火山群  
出典：東畑委員

#### (4) 扇状地の地震斜面崩壊

扇状地で発生した斜面流動破壊については、独立した一節を設けて議論する。筆者は扇状地の Nalodo 的な斜面崩壊の前例を求めて文献調査を行ったが、崩壊の例には事欠かないものの、数百 m 以上の長距離流動を発見することができなかった。探索が容易でなかった理由として、すべり層厚が 10 m 以下で薄いため、浸食や農地としての開拓によって、地形が容易に改変されてしまうこと、そもそも数百 m の流動を起こすためには、Palu のような谷地形の場合は谷幅がキロメートルのオーダーでなければならず、そのような大型の峡谷が、特に我が国では、ほとんど存在しないこと、の二つが考えられた。そのような困難の中で着目したのが、赤城山の南麓が西暦 817 年の弘仁地震（マグニチュード推定値が 7.5 以上）で斜面災害を起こしたことであった。

Google Map で各地の斜面を観察している過程で、赤城山南麓の苗ヶ島地区の斜面に馬蹄形の陥没とおぼしき地形を見出した。9 世紀の弘仁地震は、従来想定されていた相模方面の地震ではなく、文献（菅原道真編纂の類聚国史）の再解釈によって上州方面の災害として見直されていた（能登, 1990; 松田, 1991; 早川ほか, 2002）。この見直しを補強する考古学上の成果として、赤城山の南麓、ただし馬蹄形陥没からはやや外れた標高の低い地域で、埋没した村落や田畑が発見されてきた ([http://kounin-jishin.ees.st.gunma-u.ac.jp/PDF\\_forHP/panel02.pdf](http://kounin-jishin.ees.st.gunma-u.ac.jp/PDF_forHP/panel02.pdf))、という経緯がある。これらの遺跡は土石流や泥流によって埋没されており、埋没の年代は、火山灰のテフラクロノロジー調査及び土器の編年によって 8 世紀から 9 世紀の間と判断されており、弘仁地震の被害であるとの仮説と矛盾しない（能登ほか, 1990）。

これらの知見を踏まえ、2020 年の 6 月と 7 月の二度にわたり、現地、群馬県前橋市苗ヶ島地区の斜面（図 8-63）を踏査し、図 8-64 のような外観を持つ地形の実態把握を試みた。この地域は有史以前に赤城山が巨大な崩壊を起こした時に堆積した物質で覆われており、一種の扇状地である。源頭崖とおぼしき地点の勾配は図 8-63 の程度であり、国土地理院の地形図では見出しがたいものである。そして斜面をさらに下方へ移ると、遺跡、湧水（峰岸・能登, 1981）や流れ山（新里村教育委員会, 1991）が散在している。そして興味深いことに、Nalodo 跡と目された地区は上代遺跡の空白域であり（図 8-65）、かつて存在していた遺跡は 9 世紀の斜面災害で流失した可能性がある。また土地利用の面では水田が卓越しており（図 8-66）、現地は水が豊富で地震時には崩壊しやすい地盤ではないか、と予想した。





図 8-63 苗ヶ島地区の状況（手前が低い）

出典：東畑委員撮影



図 8-64 苗ヶ島の Google Map 画像に馬蹄形崩落

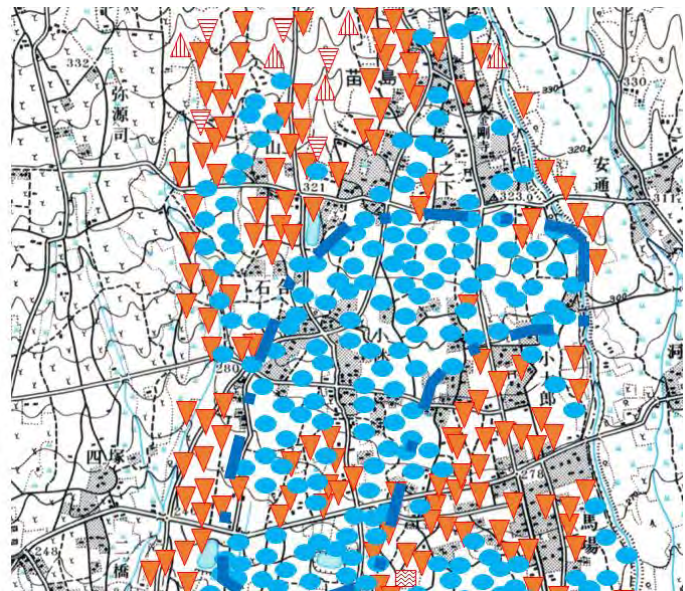
跡らしき地形が見える

出典：東畑委員編集



図 8-65 苗ヶ島地区の遺跡の空白（マッピングぐんま上に筆者加筆）

出典：東畑委員編集



- 水田
- 畑
- ▼ 桑畑
- 果樹園
- ▽ 広葉樹林
- ▲ 針葉樹林

図 8-66 苗ヶ島地区の土地利用（国土地理院旧版地形図1929年版に筆者加筆）

出典：東畑委員編集

調査団の地質担当者と現地踏査を行い、地形の縦断形状を測定した。対象地域は図 8-67 のとおり、苗ヶ島地区の源頭崖から堆積域までを含むと想定された領域である。得られた地形を国土地理院の電子マップと比較したのが図 8-68、その詳細が図 8-69 である。詳細な図に示されている通り、455m付近に2m程度の段差があり、これが源頭崖の痕跡かもしれない。ただしここは、図 8-64 において馬蹄形で囲まれた地域の内部であり、馬蹄形そのものではない。それでは馬蹄形の崖・陥没に見えたところはどうであったか、図 8-70 のルートに沿って踏査した。現場の写真が図 8-71 である。確かに高低差が存在するものの、東方より西方の方が低く、そのまま西の谷へ下がっていた。これは、馬蹄形の陥没から予想していた地形と逆であり、筆者が当初見たのは、Google Map の画像に時折みられるゆがみであったと判断した。以上をまとめると、苗ヶ島地区には古い時代の斜面崩壊の跡らしき地形が微かに残っている(図 8-69)が、それは Google Map で想像されたものとは異なる。当該地域の遺跡の空白や土地利用の状況は、ここが古い時代の斜面災害の現場であったことと整合はする。しかしその災害が弘仁地震に起因する斜面崩壊であったとは言い切れない。

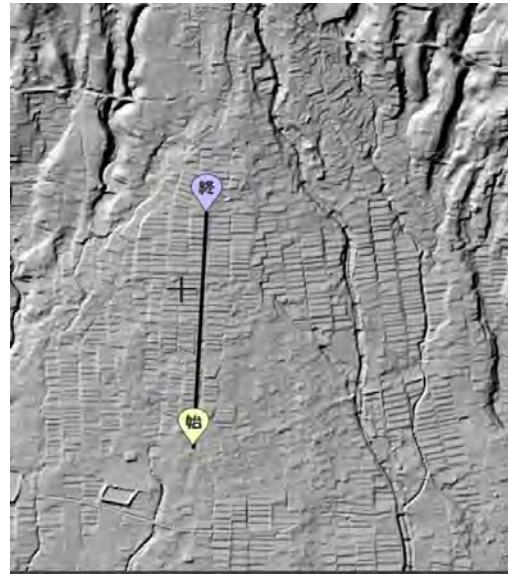
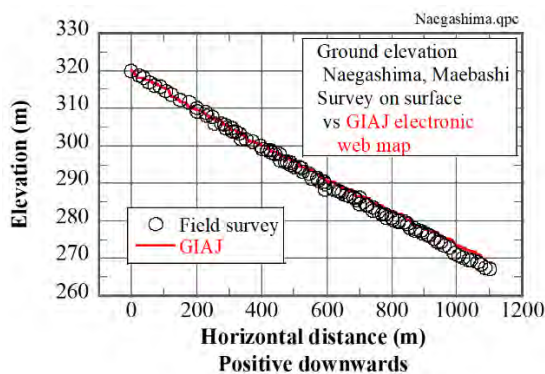
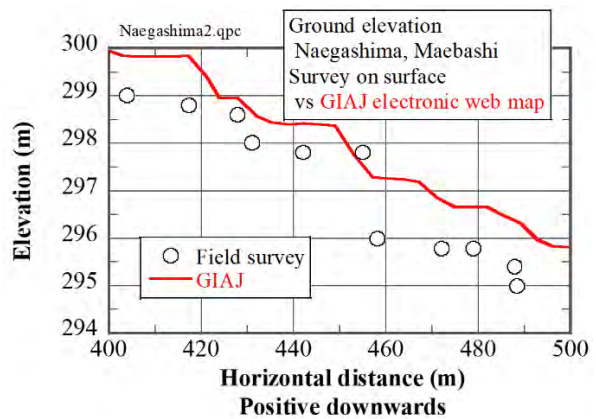


図 8-67 前橋市苗ヶ島地区で地形調査した領域



出典：東畑委員作成資料

図 8-68 苗ヶ島地区の地形（調査団の地質担当者による現地計測及び国土地理院の電子データ）



出典：東畑委員作成資料

図 8-69 苗ヶ島地区の地形の部分詳細図（出典は図 15 に同じ）





図 8-70 苗ヶ島地区の踏査ルート（2020年7月12日）



図 8-71 苗ヶ島地区西方で馬蹄形陥没崖と思われる地点の実情

#### 8-4-6 Nalodo 的長距離流動距離の算定方法

Nalodo に関する現在までの現地調査や検討の結果を踏まえ、長距離大規模地盤流動の原因を提案し、それに基づき変位（静的解析に基づく運動最終停止位置）の予測方法を考案した。提案する発生メカニズム、及び予測方法が再現できる現象は、それぞれ以下のとおりである。

##### （1）発生原因

- (a) 強い地震動により、地質学的に若齢の砂地盤が液状化した。
- (b) 同様の液状化はこれまで頻繁に起こっているが、過去の事例調査によっては、緩斜面における長距離大規模流動の事例は発見できなかった。今回は 4 か所において同時に地盤流動が起こっており、何らか特別な素因・誘因が存在していたものと考えざるを得ない。
- (c) 表層が構造物を載せたまま長距離流動したことからわかるように、下方の液状化層が極端に剛性を喪失し、液状化後の非排水せん断時に見られる正のダイレイタンスと強度回復すら起こらなかった。その原因として、非塑性細粒分の影響、被圧地下水ないしは断層起因の水圧噴出が議論されている。液状化層上面の水膜形成も、重要な可能性である。ここで提案する解析方法は、いずれが Nalodo の発生機構であってもよく、地表の不飽和層と下層との間のせん断抵抗が消滅することだけが解析の前提である。
- (d) 下方の液状化砂層からのせん断抵抗が消滅し、地表層は重力の斜面方向分力によって、圧縮されるようになった（図 8-72）。圧縮力は斜面下方へ向かって累積し、ある位置を越えると表層内の受働抵抗を上回って、表層を破壊させた。その結果、表層はブロックに分かれて受働崩壊面に沿って隣接ブロックに乗り上げた。乗り上げと重合は、斜面の長さが縮まることを意味する。斜面が長大である結果、受働破壊域の収縮は数百メートルに達し、破壊していない斜面上部は下方へ向かって、数百メートルを流動変位した。

##### （2）変位予測法によって再現できる事象 入力土質データは、表層の内部摩擦角と単位体積重量のみである。

- (a) 長大な斜面でなければ大変位が発生しないのは、表層で受働破壊が発生しなければならない



からである。

- (b) 斜面中流から上部にかけて、大変位が起きる。
- (c) 斜面下部に崩壊した表層地盤が集積する（受働破壊）。
- (d) 軸対称形状の斜面（丘の周囲）より一次元的形状の長大斜面の方が、変位が大きい。以下に内容を説明する。

### （３）表層非液状化層の受働破壊

水で飽和した砂層が液状化して、表層にせん断応力を及ぼさなくなる。傾斜  $i$  の表層には重力が働いているが、下方からせん断応力が作用しなくなるので、重力の斜面方向分力はすべて、表層内の軸力になる（図 8-72）。軸力は斜面下方ほど増大し、ついには受働破壊を起こす。受働破壊域より上方の表層は、下方へ向かって大変位することができる。

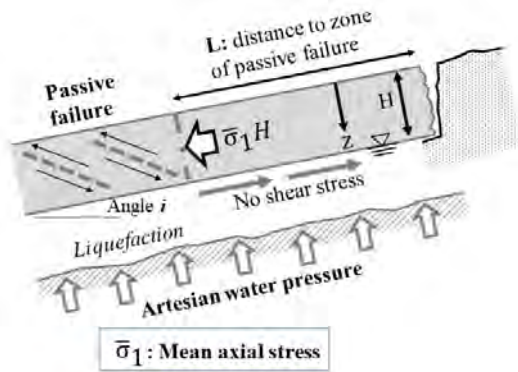


図 8-72 地表不飽和層の横方向自重圧縮  
出典：東畑委員作成資料

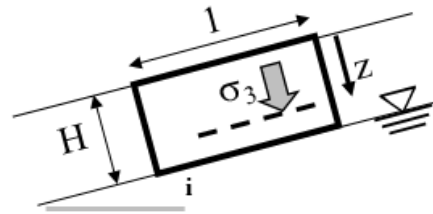


図 8-73 地表不飽和層内の最小主応力  $\sigma_3$   
出典：東畑委員作成資料

### （４）軸応力と受働破壊の計算

地表不飽和層の厚さを  $H$ 、斜面再上端の開口部からの距離を  $L$ 、土の単位体積重量を  $\rho_s g$  とすると、不飽和層の平均軸応力  $\bar{\sigma}_1$  は、

$$\bar{\sigma}_1 H = \rho_s g H L \sin i \quad (8.4.1)$$

である。ただし実際は、最大主応力  $\sigma_1$  は深さ  $z$  とともに増加するので、

$$\sigma_1 = 2\rho_s g L \frac{z}{H} \sin i \quad (8.4.2)$$

同様に最小主応力  $\sigma_3$  も深さとともに増加して(図 8.4.25)、

$$\sigma_3 = \rho_s g z \cos i \quad (8.4.3)$$

斜面を下るつれて距離  $L$  が増加し、最終的に受働崩壊域に入る。すると土質力学が教えるように、主応力間に次の破壊基準が成り立つ。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2L \sin i}{H \cos i} = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$L = L_a \frac{H}{2 \tan i} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (8.4.4)$$

この距離  $L_a$  を越えると受働破壊が起こり、表層地盤は自重の働きによって斜面並行方向に圧縮される。たとえば厚さ  $H=3\text{m}$ 、内部摩擦角  $\phi=30^\circ$ 、勾配  $\tan i=0.02$  とすると、 $L_a=225\text{ m}$  で受

働崩壊が起こる。これを言い換えると、斜面の長さが 225m 以下であれば受働崩壊は起こらず、表層は自重で非破壊圧縮変形をするにとどまり、Nalodo のような大規模な破壊と長距離流動を起こさないのである。先に Nalodo の事例が見つかりにくい理由の一つとして谷の幅が狭いことを挙げたが、その背景がこれである。

### (5) 長距離流動を促進する諸要因

- (a) 表層 H が薄いと近距離 L で受働破壊域に達し、それより下部の広い領域が破壊、斜面上部の自由な流動を許す。
- (b) 斜面が長いと受働破壊域も長く、上部がそこへ長距離で流れ込める。
- (c) きわめてゆる詰めを砂を除き、非排水せん断された砂はある程度変形すると正のダイレイタンス性を発揮して有効応力を回復、せん断抵抗を生じる。したがって図 8-72 のような流動は停止する（水膜の効果を除く）。しかし下部から水の供給があると（被圧地下水）、有効応力の回復が遅れるので表層の流動が増加する。
- (d) 斜面の平面形状（図 8-74）：下部ほど広がる斜面では表層の重量が図 8-72 ほどには軸応力  $\sigma_1$  に転嫁されないため、受働破壊メカニズムが起こりにくい。逆に下部が狭まる場合は側方境界によってアーチ作用が起こり、軸応力が増えず、やはり受働破壊が起こりにくい。結局、直線状の斜面が最も流動変位を起こしやすい。
- (e) 二次元透水現象について考察する。2018 年の液状化現象は、古い扇状地に挟まれた、ごく浅い谷部で発生した。ただし被圧地下水はもっと広域で等しく存在している、と考えてよからう。液状化によって透水係数が増えるので、被圧地下水の流れ（上向き透水）は、以前の一次元均質ではなく、液状化域に集中する（図 8-75）。水の供給が増えるので、土の正のダイレイタンス性はよりいっそう妨げられ、有効応力がゼロの完全液状化状態は、より長く続くのではないか。

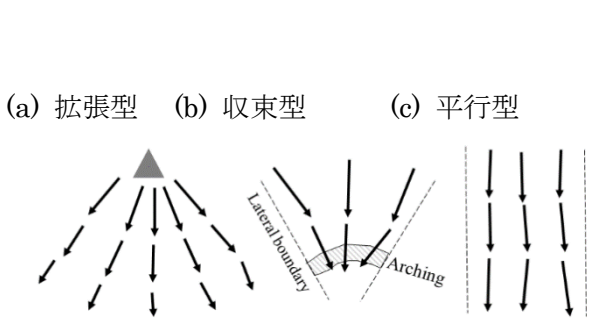


図 8-74 三通りの変位類型

出典：東畑委員作成資料

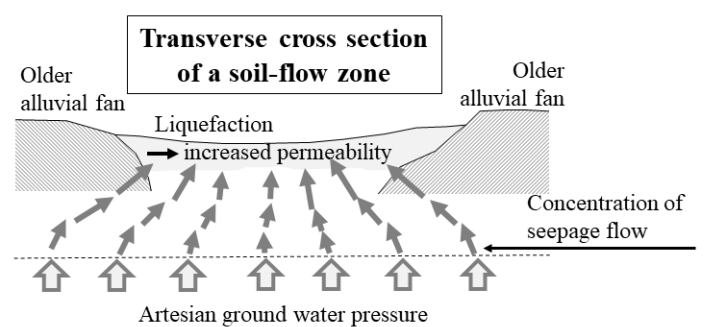


図 8-75 多次元の透水を想定すれば、地表不飽和層が破壊されやすいことの推論

出典：東畑委員作成資料

### (6) 流動変位の予測は可能か

受働破壊だけでは流動速度を予測することはできない。おそらく水膜形成と、被圧地下水供給によるその促進が重要なのであろう。しかし可能最大変位の推定は可能である。そこで、受働破壊域の長さ収縮が斜面上部の変位に等しいと考える。図 8-76 のように受働破壊ブロックが重なり合うと横方向の長さが少なくなり、本来のブロックの長さ 1 は、回転によって  $(1/2)/\cos(45^\circ - \phi/2)$  を占めるのみとなる。したがって長さ縮小率は  $1 - (1/2)/\cos(45^\circ - \phi/2)$  である。変位計算手順は；

1. 液状化斜面の全長を定める。
2. 長さ  $L$  を計算する。
3. 受働破壊域の長さは全長- $L$ 。
4. これに縮小率を乗じて変位を得る： $(\text{全長}-L) \times \{1-(1/2)/\cos(45^\circ-\phi/2)\}$   $\phi$  が 30 度のとき、縮小率は 0.42。受働破壊域の長さが 1000m なら縮小量（流動変位）は 420m となり、実際の Nalodo の変位と比べて妥当と言える。

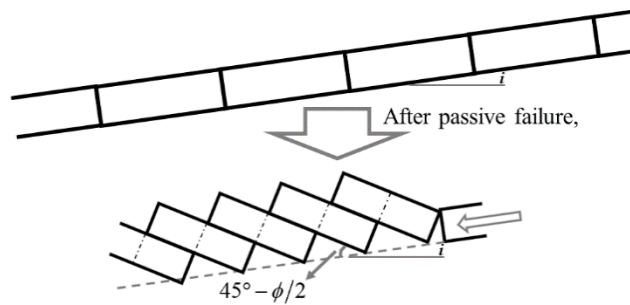


図 8-76 斜面下部の受働破壊により表層土塊が集積し、横方向の寸法が収縮するメカニズム

出典：東畑委員作成資料

### (7) 流動変位の詳細解析

これまで解析法の原理を説明してきた。しかし図 8-76 において表層ブロックのうちで下流側隣接ブロックに乗り上げる部分がちょうど2分の1で、乗り上げに届かない（後刻崩落する）部分も2分の1になる理由が示されなかった。実際にはこの比率は 1:1 の一定ではなく、斜面の下端に近くて軸力の大きいところほど、すべり抵抗に打ち克って乗り上げる距離も大きいのであろう。そこで、乗り上げ部とそうでない部分の長さをそれぞれ  $a$  と  $b$  で表し、その定量評価を試みる。なお幾何学的関係により  $b=H/\tan(45^\circ-\varphi/2)$  である（図 8.4.29）。液状化域上端からの距離を  $x$  とする。軸応力の大きさは、

$$\sigma_1 = 2\rho_s g x \frac{z}{H} \sin i \quad (8.4.5)$$

その  $z$  方向の平均値は

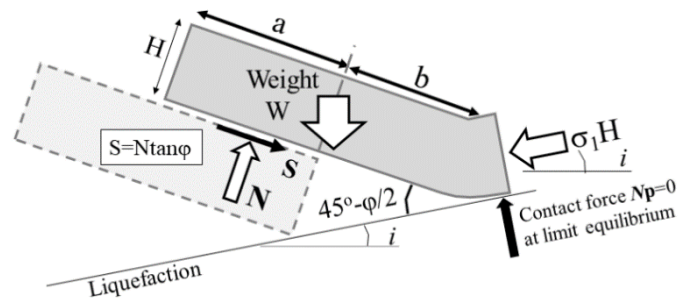
$$\bar{\sigma}_1 = \rho_s g x \sin i \quad (8.4.6)$$

である。これは受働破壊における最大主応力であり、もう一つの最小主応力の大きさは

$$\sigma_3 = \rho_s g z \cos i \quad \text{である。二つの主応力が受働破壊の条件を満足するのは、}$$

$$x \geq L_a = \frac{H}{2 \tan i} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (8.4.7)$$

のときである。ただし  $x$  座標がこの範囲にある時、受働破壊応力がこのようなブロック押し上げと長さ収縮に結びつくとは限らない。この点を図 8-77 で議論する。



出典：東畑委員作成資料

図 8-77 受働破壊ブロック押し上げ機構の詳細

斜面に平行な方向の力のつり合いは

$$\bar{\sigma}_1 H + W \sin i = N \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) + S \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$$

斜面に垂直な方向の力のつり合いは

$$W \cos i = N \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) - S \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) + N_p$$

極限つり合いでは、接触力  $N_p$  をゼロとする。これらを  $S$  と  $N$  について解くと、

$$S = \bar{\sigma}_1 H \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) + W \left\{ \sin i \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) - \cos i \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \right\}$$

$$= \bar{\sigma}_1 H \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) - W \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} - i\right)$$

$$N = \bar{\sigma}_1 H \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) + W \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} - i\right)$$

乗り上げ面においてせん断破壊が起きているので  $S = N \tan \phi$  であり、

$$\bar{\sigma}_1 H \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) - W \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} - i\right) = \left\{ \bar{\sigma}_1 H \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) + W \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} - i\right) \right\} \tan \phi$$

$$W = \bar{\sigma}_1 H \frac{\cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \tan \phi}{\sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} - i\right) + \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} - i\right) \tan \phi} \quad (8.4.8)$$

土ブロックの重量  $W = \rho_s g H(a+b)$  と最大主応力の値  $\bar{\sigma}_1 = \rho_s g H x \sin i$  を代入すると、

$$a+b = \sin i \frac{\cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \tan \phi}{\sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} - i\right) + \cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} - i\right) \tan \phi} x = \sin i \frac{\cos\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)}{\sin\left(45^\circ + \frac{\phi}{2} - i\right)} x \quad (8.4.9)$$

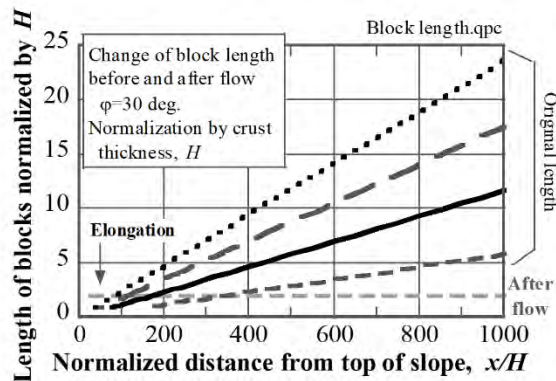


図 8-78 受働破壊と流動が起こったのちの地表土塊の斜面方向圧縮率  
出典：東畑委員作成資料

こうして乗り上げブロックの全長  $a+b$  が算定できた。流動前のこの長さが、ブロック乗り上げによって

$$b/\cos(45^\circ - \phi/2)$$



に縮まるが、

$$b = H/\tan(45^\circ - \phi/2)$$

なので、結局縮まった寸法は

$$H/\sin(45^\circ - \phi/2)$$

である。流動前後のブロック長を層厚  $H$  で正規化し、受働破壊の起こる領域  $x/H > L_a/H$  についてプロットした (図 8-78)。流動によって概ね長さが縮まっているが、 $x/H$  の小さい上流側には、逆に伸びているような部分がある。これについては、次に説明する。

縮小率は次のように算定できる。

$$\begin{aligned} \text{Contraction ratio} &= 1 - \frac{\text{Length after displacement}}{\text{Original length}} = 1 - \frac{H}{(a+b)\sin(45^\circ - \phi/2)} \\ &= 1 - \frac{H \sin\left(45^\circ + \frac{\phi}{2} - i\right)}{x \sin i \cos^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)} \end{aligned} \quad (8.4.10)$$

この縮小率は、受働破壊域  $x > L_a$  に対して成り立つ。

$$x > L_a \text{ or } \frac{x}{H} \geq \frac{L_a}{H} = \frac{\tan^2(45^\circ + \phi/2)}{2 \tan i} \quad (8.4.11)$$

縮小率を  $x$  方向にプロットしたのが図 8-79 である。巨視的に見れば、この縮小率は圧縮ひずみであるが、実際の変形がブロック乗り上げによって起きていてひずみではないので、圧縮率という用語を用いている。また  $x$  の小さい領域で縮小率がマイナスになる (伸張) のは、 $a+b$  が小さすぎるケースである (図 8-80)。このような領域は以下の変位計算から除外し、縮小が起こる次の  $X$  の領域のみを取り扱う。

$$\alpha \equiv \frac{\sin\left(45^\circ + \frac{\phi}{2} - i\right)}{\sin i \cos^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)} < \frac{x}{H} < \frac{\text{Bottom of slope}}{H} \quad (8.4.12)$$

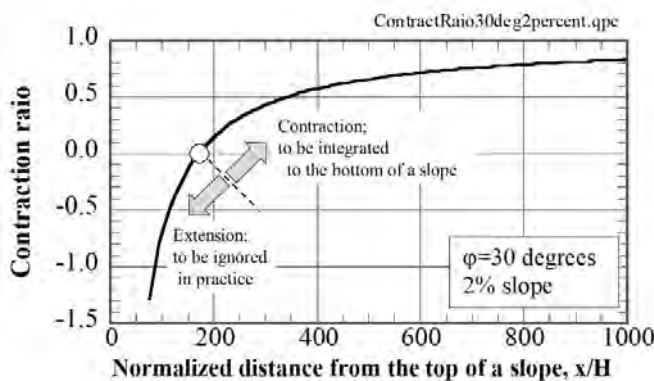


図 8-79 斜面表層の横方向圧縮率  
出典：東畑委員作成資料

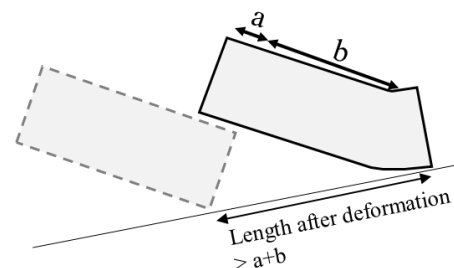
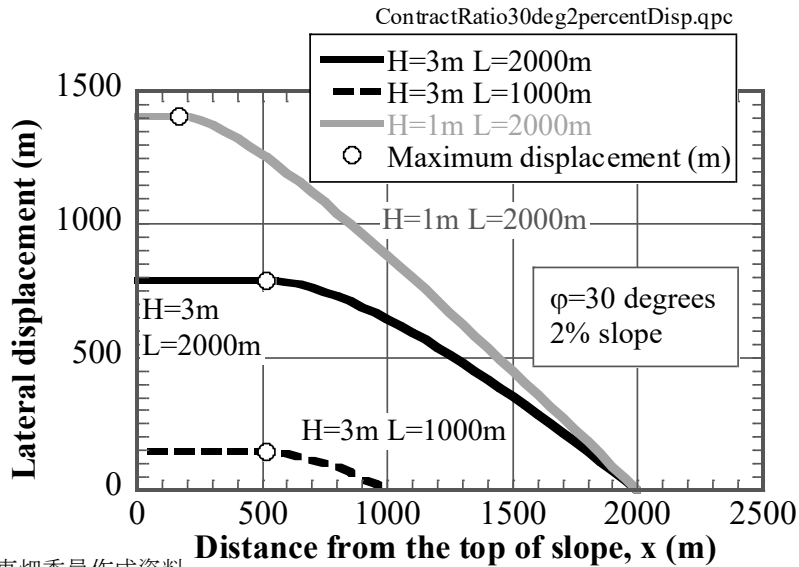


図 8-80 算上伸張が起こる状況  
出典：東畑委員作成資料

長さの縮小はブロックごとに離散的に発生し、 $X$  に関する連続関数ではない。したがって全縮小量はブロックごとの縮小を加算するのが本来の姿であろう。しかしこの計算は煩雑なので、縮小率を  $X$  について積分することで代行する。すると全収縮量=斜面上部の変位は

$$Displacement = (L - x) - \alpha H \ln \frac{x}{L} \text{ for } \alpha H \leq x \leq L \quad (8.4.13)$$

ここで L は斜面の全長であり、受働破壊条件が成り立たない斜面上部も含む長さである。変位計算例を図 8-81 に示す。



出典：東畑委員作成資料

図 8-81 Nalodo による地盤変位と斜面上部からの距離との関係

繰り返しになるが、斜面全長が  $L_a$  より短い場合には、本稿で論じているようなタイプの変位変形（受働破壊）は起こらない。

受働破壊応力が生ずるために必要な最小斜面長さ

$$L_a = \frac{\tan^2(45^\circ + \phi/2)}{2 \tan i} H \quad (8.4.13)$$

さらに、受働破壊域で長さが縮小するには、斜面全長がもっと大きくなってはならない。

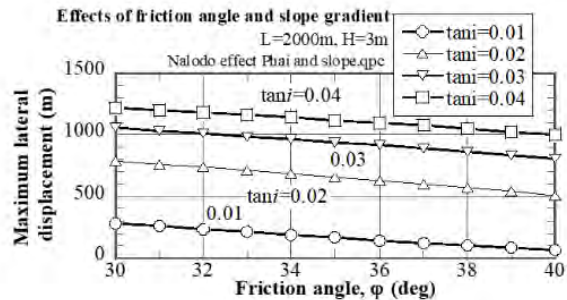
$$\alpha H = \frac{\sin\left(45^\circ + \frac{\phi}{2} - i\right)}{\sin i \cos^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)} H \quad \text{圧縮変形が起こるために必要な最小斜面長さ。} \quad (8.4.14)$$

表 8-3 に、これら二種の斜面長さ最小値を例示する。図 8-82 は、土の内部摩擦角や斜面勾配を変えた時の最大変位値（ $x = \square H$  での変位）である。

表 8-3 Nalodo が起こるに要する最低斜面長  $L_a$

|               | $\square=30 \text{ deg.}$       | 35 deg.        | 40 deg.        |
|---------------|---------------------------------|----------------|----------------|
| $\tan i=0.01$ | $L_a=150H,$<br>$\square H=344H$ | 185H,<br>414H  | 230H,<br>505H  |
| 0.02          | 75H,<br>171H                    | 92.5H,<br>206H | 115H,<br>251H  |
| 0.03          | 50H,<br>113H                    | 61.7H,<br>137H | 76.6H,<br>167H |
| 0.04          | 37.5H,<br>84.6H                 | 46.1H,<br>102H | 57.5H,<br>124H |

H: 地表の非液状化層の厚さ



出典；東畑委員作成資料

図 8-82 斜面勾配と内部摩擦角が Nalodo 変位に及ぼす影響

### (8) 丘を取り囲む二次元軸対称地形

これまでの議論では一次元の形状を持つ斜面 (図 8-74c) を想定してきたが、次に軸対象の形状を持つ斜面 (図 8-74a) についても若干の検討を行う。図 8-83 のように、対称軸から変形斜面の上端までの距離を  $r_0$ 、この上端から斜面に沿って下り方向の距離を  $r$  で表す。流動変位する土層の厚さは  $H$ 、斜面勾配は  $i$  である。

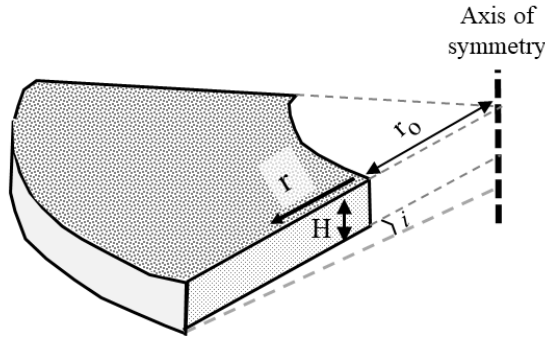


図 8-83 軸対称丘陵の流動解析モデル

出典：東畑委員作成資料

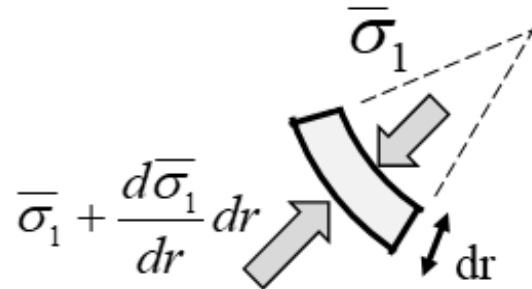


図 8-84 軸対称応力分布

出典：東畑委員作成資料

半径方向の主応力  $\bar{\sigma}_1$  (深さ  $z$  方向の平均) に関する力のつり合いから、軸対称条件 (図 8-84) での微分方程式が、次式で与えられる。

$$\bar{\sigma}_1 + \frac{d\bar{\sigma}_1}{dr}(r+r_0) = \rho_s g \sin i (r+r_0) \quad (8.4.15)$$

境界条件は、 $\bar{\sigma}_1 = 0$  at  $r=0$  なので、

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{\rho_s g \sin i}{2} \left\{ (r+r_0) - \frac{r_0^2}{r+r_0} \right\} \quad (8.4.16)$$

これと一次元の場合の平均応力 (式 8.4.6) とを比べると、

$$\frac{\text{2-dimensional stress}}{\text{1-dimensional stress}} = \frac{\left(\frac{r}{r_0} + 1\right)^2 - 1}{2 \frac{r}{r_0} \left(\frac{r}{r_0} + 1\right)} \quad (8.4.17)$$

この比をプロットしたのが図 8-85 である。比は 1 を上回ることが無い。すなわち変動する斜面からの距離が同じであれば、2次元軸対称地形の方が応力が小さい。その結果、受働破壊の生じる地点までの距離は二次元斜面の方が長く、斜面の全長が同じであれば、これより下方で受働破壊、長さ収縮を起こす領域は短くなるので、二次元斜面の方が変位は小さくなる。

受働破壊の生じる地点では、

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{\rho_s g \sin i}{2} \left\{ (r+r_0) - \frac{r_0^2}{r+r_0} \right\} = \frac{\rho_s g \sin i}{2} \cos i \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$r+r_0 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{H}{\tan i} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + \sqrt{\left( \frac{H}{\tan i} \right)^2 \tan^4 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 4r_0^2} \right\} \quad (8.4.18)$$

変位する斜面上端からの距離  $r$  を一次元の場合の  $L_a$  (式 8.4.13) と比較すると、

$$\frac{r_{\text{at passive failure}}}{L_a} = 1 + \sqrt{1 + \left\{ \frac{2 \tan i \times r_o}{\tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) H} \right\}^2} - \frac{2 \tan i \times r_o}{\tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) H} \quad (8.4.19)$$

式 8.4.19 を図 8-78 にプロットした。受働破壊開始までの距離は、二次元の場合に、一次元の 2 倍程度まで増えることがある。すなわち、残る受働破壊域の長さが小さくなり、変位もまた一次元斜面より小さくなる。

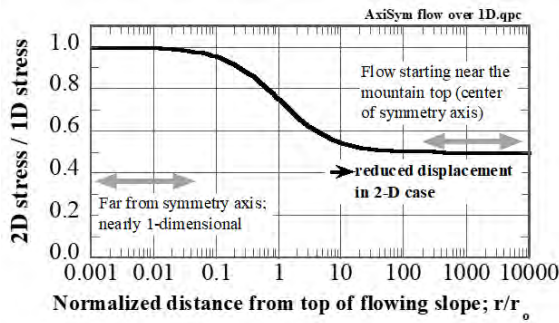


図 8-85 平行斜面と軸対称斜面の応力比較の距離

出典：東畑委員作成資料

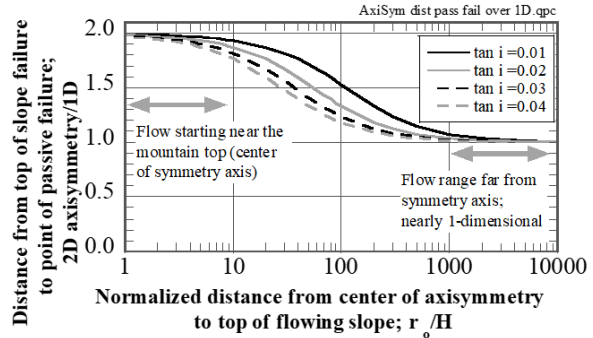


図 8-86 斜面上部から受働破壊開始位置まで (平行斜面と軸対称斜面の比較)

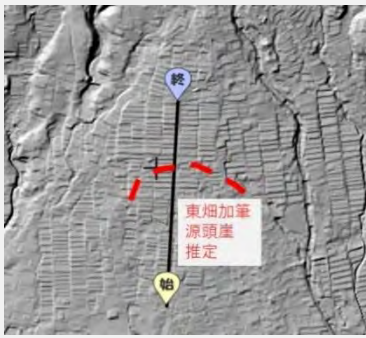

出典：東畑委員作成資料

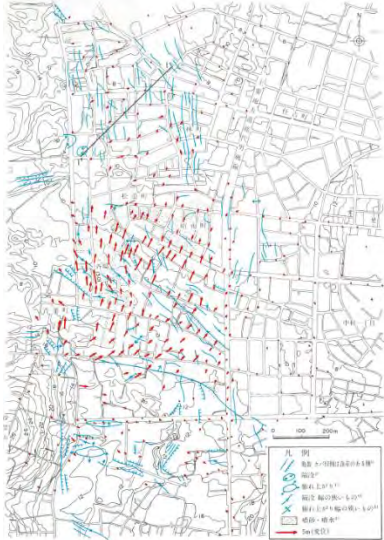
### 8-4-7 Nalodo の発生原因に関する提案の比較検討

Nalodo の発生原因について多くの調査と議論が行われた。しかし遺憾ながら議論は一つの結論には収束せず、解決は後世にゆだねられた。ここでは原因説を、液状化を主と見るものと、地下の深部からの水の噴出を重視するものとに分類して、それらを比較する。地下深部からの水の噴出も、比較的浅いところに存在する被圧地下水層を水の起源とするものと、地殻の深部を起源と見るものがあるので、合計 3 種の原因説を比べることになった。

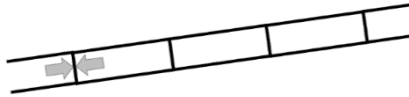
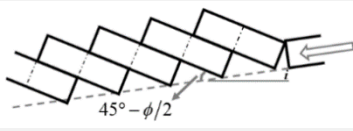
表 8-4 Nalodo 原因三説の比較

○△×は筆者の個人的評価

| 項目      | 液状化砂からの排水説         | 地下深所からの水噴出<br>1. 被圧地下水起源   | 地下深所からの水噴出<br>2. 断層等からの噴出   |
|---------|--------------------|--|---|
| 側方変位の事例 | 日本海中部地震 能代 約 2% 勾配 | 赤城山南麓、AD818 弘仁地震か?<br><br>調査団の地質担当者と共に | 松代群発地震牧内地すべり<br><br>信濃毎日新聞撮影 |

|                       |   |  |  |
|-----------------------|---|--|--|
|                       |  <p>濱田・安田・磯山・恵本(1986)<br/>土木学会論文集 376/III-6,<br/>pp.221-229.</p> | <p>の現地踏査：<br/>源頭崖らしき地形：高低差<br/>3m</p>  |  |
| 水膜理論との関係              | ○排出水が滞留、水膜形成  | ○排出水が滞留、水膜形成   | ○排出水が滞留、水膜形成   |
| 地震動直後に流動が開始したことの関係    | ×既往の知見では、震動終了後に圧密透水が始まり、水膜形成まで分ないし10分単位の時間が必要である  | △透水には数分程度以上の時間が必要であろう。ただし、地震動開始時には被圧地下水がすでに地表近くまで浸透して高い間隙水圧状態になっていたとすれば○だが、そのような同時発生確率は低そうである。 | △透水には数分程度以上の時間が必要であろう。ただし、地震動開始時には断層水が上方へ浸透して高い間隙水圧状態になっていたとすれば、○。そのような同時発生確率は低そうにみえる。しかし高い間隙水圧が断層全体に行き渡っていたからこそ、あつとき地震が起こった、と考えれば○。プレートの三重会合点に近い現地の特殊な地質条件なのかもしれない。 |
| 大量の水の噴出を説明できるか        | △液状化層が5m程度、体積収縮が3%であれば、水深15cm分しか噴出しない。Love波のSupershearで液状化の程度が強烈であったとすれば、もっと多い。   | ○量的には可能。透水計算では否定的な結果となっていたが、使用している砂礫層の透水係数が砂質土のそれとあまり異ならず、過小評価と思われる。現場試験方法の再検討が必要。             | ○量的には可能。松代群発地震の事例あり。1959 Hebgen Lake earthquake, 1983 Borah Peak earthquake の事例あり。ただし水噴出は震動直後ではない。数時間から一日後らしい。   |
| 数百mに及ぶ流動距離を説明できるか？現地の | ×既往の事例では、液状化緩斜面の流動は数mに限られる。例：新潟市大形地区、能代市前山、ロサンゼ   | △変位距離に関しては既往の知見がない。Sulawesi では斜面がkm単   | ○松代の牧内地すべりは、地下からの水   |



|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| <p>砂が特殊（雲母含有など）ではなく、不攪乱サンプルの非排水せん断試験でも流動的挙動は発生せず。</p> | <p>ルスの Balboa Street。<br/>△ただし、これは該当斜面の全長がそもそも数百mしかなく、その中で起こりうる流動は制約されていたからかもしれない。制約メカニズムとは、側方移動によって非液状化表層が側方へ圧縮変形して自重の斜面方向成分を支えることである。</p>  <p>表層の自重斜面方向成分が圧縮力となる。その下の土層は液状化して（水膜）せん断力を負担できない。ただし斜面が短いと、この圧縮力は強すぎず、表層変形は弾性域に留まった。</p> | <p>位で長いので、左で述べた流動距離制約メカニズムを超越し、表層の圧縮応力が受働土圧を超過して破壊を誘起し、長距離流動に至った可能性がある。</p> <p>下流側の支え・抵抗が消滅しなければ、上流側の地盤は長距離移動できない。そのメカニズムが下流側表層の受働破壊である。上流側の地盤ブロックが下流側へ乗り上げ積み重なった。</p>  | <p>の湧昇によって惹起され、長距離流動破壊と言える。</p>                      |
| <p>住宅のm単位の上<br/>下運動を説明できるか？</p>                       | <p>△既往の液状化事例で、表層の上下運動は知られていない。ただし右記の表層受働破壊メカニズムが起こるほど斜面が長ければ、住宅は上下運動しうる。</p>  | <p>○被圧地下水圧で地盤が持ち上げられた。そのあと表層地盤はブロックに分裂崩壊、亀裂から水が噴き出して地盤は落下した。なお動画では上下運動のシーンは記録されていない。</p> <p>○なお、上記の受働破壊メカニズムで、地盤ブロックの乗り上げと積み重なりで住宅の上下移動を説明できる。</p>  | <p>○同左</p>   |
| <p>熱い水の噴出との関係</p>                                     | <p>○温度上昇の原因は説明できないが、既往の液状化事例では熱い水の噴出報告あり。ただし1990 フィリピンの養魚池で魚が煮えた、1999 トルコのコジャエリ地震、2001 インドのグジャラト地震など、緯度の低い地域に限定されることが不思議。我が国の十勝港発破液状化実験では噴出水の温度は気温と同じであった。新潟空港で液状化を撮影した弓納持氏は膝まで水に漬かったが、熱さは感じなかった。</p>   | <p>×できない</p>  | <p>○温泉水の噴出か。ただし、地震直後の温泉噴出事例では、量的には微小。局所的に泉が湧く程度。</p> |
| <p>地鳴りが起こるか？</p>                                      | <p>×液状化と地鳴りは無関係。近傍の建築が倒れたのであれば、話は別。</p>   | <p>○表層地盤の破壊音。</p>   | <p>○表層地盤の破壊音。</p>                                    |
| <p>Palu 湾海底地すべりや津波との関係</p>                            | <p>○海底斜面も液状化した可能性は否定できない。斜面が崩壊して津波が起きた事例は Alaska の Valdez、フランスのニ</p>  | <p>○海底斜面に被圧水が噴出した可能性は否定できない。</p>  | <p>○海底斜面でも断層から水が噴出した可能性は</p>                         |

|                         |  |                                     |   |
|-------------------------|--|-------------------------------------|---|
|                         | ース沖などが知られる。  |                                     | 否定できない。   |
| 地形地質との関係、ハザードマップはどうなるか？ | 沖積緩斜面、長さ 1 ないし 2 km 以上すべて。<br>Nalodo をありふれた事象として普遍的なハザードマップを作るのは、安全過剰。 | 長大な扇状地。谷の幅が数 km 程度必要。多くはないが少なくともなし。 | 断層を伴う構造谷。Pull-apart ないしプレートの三重会合点との関係があるかもしれない。珍しい状況。 |

出典：東畑委員作成資料

## 引用文献

- Bao, Han, Ampuero, Jean-Paul, Meng, Lingsen, Fielding, Eric J., Liang, Cunren, Milliner, Christopher W. D., Feng, Tian and Huang, Hui (2019) Early and persistent supershear rupture of the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake, *Nature Geoscience*, 12(3): 200–205.
- 中央防災会議災害教訓の継承に関する専門調査会 (2007) 報告書 1847 善光寺地震。
- 藤森邦夫、山本剛靖、大塚成昭、石井紘 (1995) 六甲高雄観測室における地殻変動と地下水の観測 -1995 年兵庫県南部地震に関連した変化、*京都大学防災研究所年報*, 38(B-1): 287-296.
- Hagiwara, T. (1972) Cause of shallow earthquakes occurring in the Earth's crust as suggested by the accompanying land deformation, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 6(4): 250-255.
- 早川由紀夫、森田悌、中嶋田絵美、加部二生 (2002) 『類聚国史』に書かれた 818 年の地震被害と赤城山の南斜面に残る 9 世紀の地変跡、*歴史地震*, 18: 34-41.
- 飯田波事 (1978) 歴史地震の研究 (1): 天正 13 年 11 月 29 日(1586 年 1 月 18 日) の地震の震害、震度分布および津波について、*愛知工業大学報告 B*, 13:161-167.
- Ishihara, K., Okusa, S., Oyagi, N. and Ischuk, A. (1990) Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in Soviet Tajik. *Soils and Foundations* 30(4): 73-89.
- Jang, C.S., Liu, C.W., Chia, Y., Cheng, L.H. and Chen, Y.C. (2008) Changes in hydrogeological properties of the River Choushui alluvial fan aquifer due to the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Hydrogeology Journal*, 16(2):389-397.
- Manga, M. (2007) Did an earthquake trigger the May 2006 eruption of the Lusi mud volcano?, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 88(18): 201.
- 松田猛 (1991) 平安時代初期の地震－『類聚国史』弘仁九年の記事を中心に、*群馬県史研究*, 34: 51-63.
- Mellors, R., Kilb, D., Aliyev, A., Gasanov, A. and Yetirmishli, G. (2007) Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B4): B04303.
- 湊元光春 (1982) 松之山地すべり、日本の代表的地すべり－2、アーバンクボタ, 20: 4-5.
- 峰岸純夫、能登健 (1981) 赤城山南麓の開発と遺構《女堀》、アーバンクボタ, 19: 52-56.
- Morimoto, R., Nakamura, K., Tsuneishi, Y., Osaka, J. and Tsunoda, N. (1967) Landslides in the Epicentral Area of the Matushiro Earthquake Swarm—Their Relation to the Earthquake Fault, *地震研彙報* 45(1): 241-263.
- Muir-Wood, R. and King, G.C.P. (1993) Hydrological signatures of earthquake strain, *Journal of Geophysical Research*, 98(B12): 22035–22068.
- 中村一明 (1981) 松代地震で学んだこと—手に入れた地震制御へのデータ—, *科学朝日*, 10 月号, 127-133.
- 中筋章人、谷内正博、佐野正明、塚本哲、藤原賢也 (2000) 1999 年 9 月台湾大地震 (集集地震) による被災概況、*応用地質*, 41(3):155-164.
- 新里村教育委員会 (1991) 赤城山麓の歴史地震 弘仁九年に発生した地震とその災害：資料集。
- 能登健、内田憲治、早田勉 (1990) 赤城山南麓の歴史地震—弘仁九年の地震に伴う地形変化の調査と分析、*信濃*, 42: 755-772.
- 能登健 (1990) 弘仁九年地震災害についての覚書、*群馬県史研究*, 34: 38-50.
- 大石道夫、水谷武司(1969) 地形条件からみた扇状地の土砂災害について、*国立防災科学技術センター 研究報告*, 2 巻。
- 坂本正夫 (2014) 遠山地震 (1718 年) の災害調査、*伊那谷自然史論集*, 15: 1–18.
- 佐藤努 (2015) 地震に伴って発生し四年以上も継続する温泉湧出, *IEVG News Letter*, 産総研活断層・火山研究部門, Vol. 2(3): 1-4.
- Sibson, H. (1995) Implication of fault-valve behavior for rupture nucleation and recurrence, *Tectonophysics*, 211: 283-293.
- Swenson, F.A. (1964) Ground-water phenomena associated with the Hebgen Lake earthquake, *USGS Professional Paper* 435-K, The Hebgen Lake, Montana, earthquake of August 17, 1959, pp. 159-165.
- 田中和広、石原朋和 (2009) 鍋立山トンネル周辺の泥火山の活動と膨張性地山の成因、*地学雑誌*, 118(3): 499-510.
- 谷口敏雄 (1964) 新潟県松之山地すべりについて、*土木技術*, 19(4): 47-64.

- 都司嘉宜 (1979) 東海地方地震津波史料 I 上巻, 防災科学技術研究資料, 35: 290-292.
- Tsuneishi, Y. and Nakamura, K. (1970) Faulting associated with the Matsushiro swarm earthquakes, 地震研彙報, 48(1): 29-51.
- Waag, C.J. (1985) Groundwater eruptions and sediment boil formation in the Chilly Buttes area, MT. Borah, Idaho earthquake, Proc. Workshop XXVIII on the Borah Peak earthquake, Idaho, USGS Open-File Report 85-290, pp. 593-611.
- Wallace, R.E. (1968) Earthquake of August 19, 1966, Varto Area, eastern Turkey, Bulletin of the Seismological Society of America, 58(1):11-45.
- Wang, L.M., Yuan, Z.X., Sun, H.M. and Deng, J. (2010) Criteria, prediction and prevention of loess liquefaction, 5th Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, Paper No. OSP11.
- 渡部直喜、佐藤寿則、大木靖衛、白石秀一、佐藤修、日下部実 (1997) 第三紀層地すべり地の深層地下水、地盤工学会誌、Vol. 32(6): 32-34.
- 渡部直喜、大木靖衛、佐藤修、日下部実 (1997) 新潟県松之山地すべり地の Na-Cl 型地下水の起源、新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報、18: 81-92.
- 渡部直喜、佐藤壽則、古谷元 (2009) 新潟地域の大規模地すべりと異常高圧熱水系、地学雑誌、Vol. 118(3): 543-563.
- Wei, A. (韦阿娟) (2015) Characteristics, origin and quantitative evaluation of overpressure in strike-slip and compression-shear booster zone of Tan-Lu Fault 郟庐断裂增压带超压特征、成因及其定量评价 -以渤海海域辽东湾锦州 27 段为例, Petroleum Geology & Experiment 石油实验地质, 37(1): 47-52.
- Witkind, I.J., Myers, W.B., Hadley, J.B., Hamilton, W. and Fraser, G.D. (1962) Geologic features of the earthquake at Hebgen Lake, Montana, August 17, 1959, Bulletin of the Seismological Society of America, 52(2): 163-180.
- Wood, R.M. and Steedman, R.S. (1992) Earthquake induced groundwater changes and liquefaction, Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, 3: 1337-1341.
- Wood, S.H. (1985) Regional increase in groundwater discharge after the 1983 Idaho earthquake: Coseismic strain release, tectonic and natural-hydraulic fracturing, Proc. Workshop XXVIII on the Borah Peak earthquake, Idaho, USGS Open-File Report, 85-290, pp. 573-592.

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Soils and Foundations 60 (2020) 722–735

[www.elsevier.com/locate/sandf](http://www.elsevier.com/locate/sandf)

Geo-Disaster Report

## Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia

Takashi Kiyota<sup>a,\*</sup>, Hisashi Furuichi<sup>b</sup>, Risqi Faris Hidayat<sup>c</sup>, Naoto Tada<sup>d</sup>, Hasbullah Nawir<sup>e</sup><sup>a</sup> Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan<sup>b</sup> Water Resources Department, International Division, Yachiyo Engineering Co., Ltd., CS Tower, 5-20-8, Asakusabashi, Taito-ku, Tokyo 111-8648, Japan<sup>c</sup> Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan<sup>d</sup> Disaster Risk Reduction Expert, Japan International Cooperation Agency Indonesia Office, Sentral Senayan II, 14th Floor, Jalan Asia Afrika No. 8, Jakarta 10270, Indonesia<sup>e</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Bandung Institute of Technology, Jalan Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia

Received 27 January 2020; received in revised form 12 March 2020; accepted 18 March 2020

Available online 26 May 2020

### Abstract

On 28th September 2018, an earthquake of Mw 7.5 struck Donggala Regency, Central Sulawesi, Indonesia, resulting in a catastrophic disaster and a large numbers of casualties. In this report, the results of the preliminary field investigations carried out by the authors' team are summarized. The earthquake caused four major long-distance flow-slides on very gentle slopes of approximately 1–5% in and around Palu City: Balaroa, Petobo, Jono Oge and Sibalaya. The maximum flow distance at each site was several hundred meters or more. Spring waters were found in all affected areas even though there had not been a lot of rainfall before the survey. Interviews with local residents and witnesses of the flow-slide provided much evidence that the shallow groundwater in the affected areas had been pressurized before the earthquake. This confined groundwater is thought to have played an important role in the occurrence of long-distance flow-slide. In addition, the thickness of the flowed ground was found to be about 1.5 m by pit excavation survey in Jono Oge. Based on the results of the field survey and provided evidence, the likely fundamental mechanisms of the flow-slide are discussed. © 2020 Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of The Japanese Geotechnical Society. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

**Keywords:** Sulawesi earthquake; Long-distance flow-slide; Damage survey; Confined groundwater

### 1. Introduction

An earthquake with a moment magnitude of Mw 7.5 struck Donggala district, Palu City, the central part of Sulawesi Island, Indonesia, on 28th September 2018, at 18:02:45 local time, with a focal depth of about 20 km (USGS, 2018). The epicenter of the earthquake (0.256 S and 119.846 E) was located about 70 km north of Palu City

(Fig. 1). This earthquake triggered a tsunami in the coastal areas of Palu, Donggala, and Mamuju and long-distance flow-slides on very gentle slopes (approximately 1–5%) in a number of areas, including Balaroa, Petobo, Jono Oge and Sibalaya. This led to the deaths of 2101 people, with 4438 people injured and 1373 missing (The National Agency of Disaster Management, 2018).

Bao et al. (2019) and Socquet et al. (2019) reported that the earthquake was driven by the mechanism of super-shear rupture with the strike-slip movement of Palu-Koro Fault. The rupture propagated south from the epicenter with its maximum slip of 4 m. Vigny et al. (2002) showed that there is an annual relative displacement along

Peer review under responsibility of The Japanese Geotechnical Society.

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp) (T. Kiyota), [furuichi@yachiyo-eng.co.jp](mailto:furuichi@yachiyo-eng.co.jp) (H. Furuichi).

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.03.015>

0038-0806/© 2020 Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of The Japanese Geotechnical Society.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



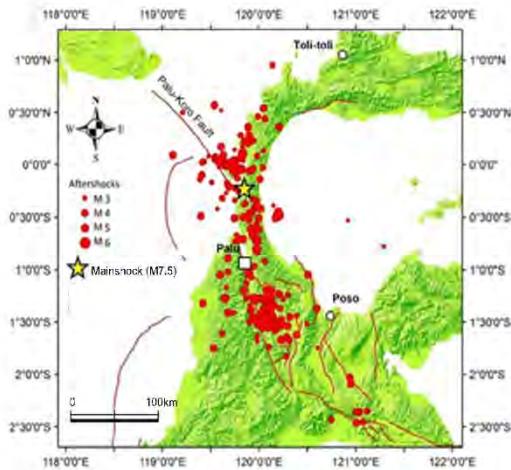


Fig. 1. Epicenters of the 2018 Sulawesi earthquake and the aftershock distributions along Palu-Koro Fault (after PuSGeN, 2018).

Palu-Koro Fault of about 34 mm, which suggests that the return period of the earthquake is every 120 years, approximately. However, no reliable records remain concerning the flow-slide-induced damage in the past events. Fig. 2 shows the earthquake fault trace in Palu City and the locations of the long-distance flow-slide and seismological station. Fig. 3a) and b) show the two measured horizontal motions (EW and NS), the vertical motion (UD) and their power spectrum at the seismological station, respectively, provided by BMKG and JICA (2018). The resultant peak horizontal vector acceleration (PGA) of 333 Gal was recorded during the earthquake. The power spectra suggest that the dominant frequency of strong motion is from 0.2 to 0.6 Hz, and the intense shaking in the small frequency

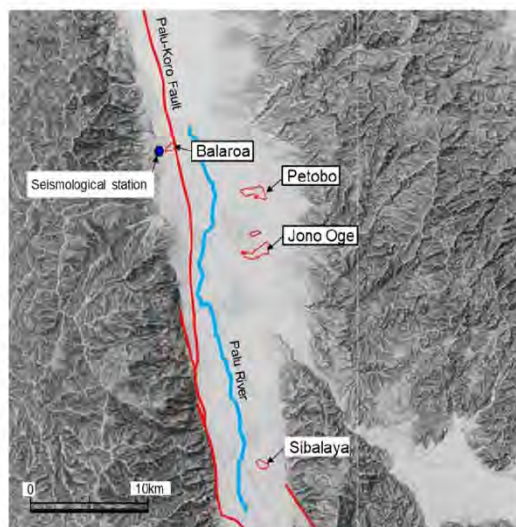


Fig. 2. Palu-Koro fault trace in Palu City and locations of long-distance flow-slide and seismological station (after JICA, 2019).

range may well have been responsible for the severe geotechnical damage.

Following the earthquake, the Japanese Geotechnical Society (JGS) and Japan Society of Civil Engineers (JSCE) dispatched a reconnaissance team to the affected areas from 17th to 19th October 2018 to conduct detailed investigations on the long-distance flow-slide, and additional surveys are ongoing. In this report, a preliminary damage survey from the above investigations is summarized. The results of portable Dynamic Cone Penetration Test (DCPT), trench/pit excavation, and interview survey in and around the affected areas are also presented.

## 2. Outline of geology, topography and groundwater environment

Sulawesi Island has a complex tectonic collage that separates the converging Eurasian, Indo-Australian, and Philippines Sea Plates (Kadarusman et al., 2011; Bellier et al., 2001; Watkinson, 2011). As a result of the collision and interaction of the three plates, Sulawesi Island has several active faults. One of the faults is Palu-Koro Fault that crossed the Palu City and had triggered the earthquake in 2018. The topography of the greater Palu area is characterized by 10 km-wide lowland and mountains on both east and west banks as shown in Fig. 2. Palu-Koro Fault lies along the west side of Palu River, and another fault reportedly lies along its east side. The lowland in the valley is considered to be a pull-apart basin created by the faults.

The geological setting of Palu City and the surroundings differs from east to west as part of lowland area along Palu River. A geological map reported by Van Lecuwen (2005) indicates that the base rocks on the east side are mainly Triassic to Jurassic metamorphic rocks (Palu Complex, Gumbasa Complex), while those on the west side are sedimentary rocks of the Upper Cretaceous, and there are intrusive rocks (Palu Granite, Kambuno Granite) in the base rocks. The lowland along Palu River is covered by Holocene deposits, mainly alluvial fan deposits. The geology of the catchment area of Balaroa, Petobo, Jono Oge and Sibalaya where the long-distance flow-slide occurred consists of granites and granitic metamorphic rocks (gneissose granite) which tend to become sandy soil with a small uniformity coefficient of particle size when weathered. On the west side of Palu Valley, there was no flow-slide in the area of sedimentary rocks, which are widely distributed around the flow-slide area of Balaroa.

Clastic rock materials from the steep terrain on the mountains on both east and west banks creates many small to large alluvial fans stretching from the valley mouth to the lowland area (Fig. 4). Because of the consist of coarse gravel layers, the new alluvial fans located at higher altitudes are relatively small, with a slope of 5% or more and a deep groundwater level. On the other hand, old alluvial fans located at lower altitudes are relatively large, and they have a slope of 2–5%. These areas are typically used as paddy fields, and some villages have formed in these areas



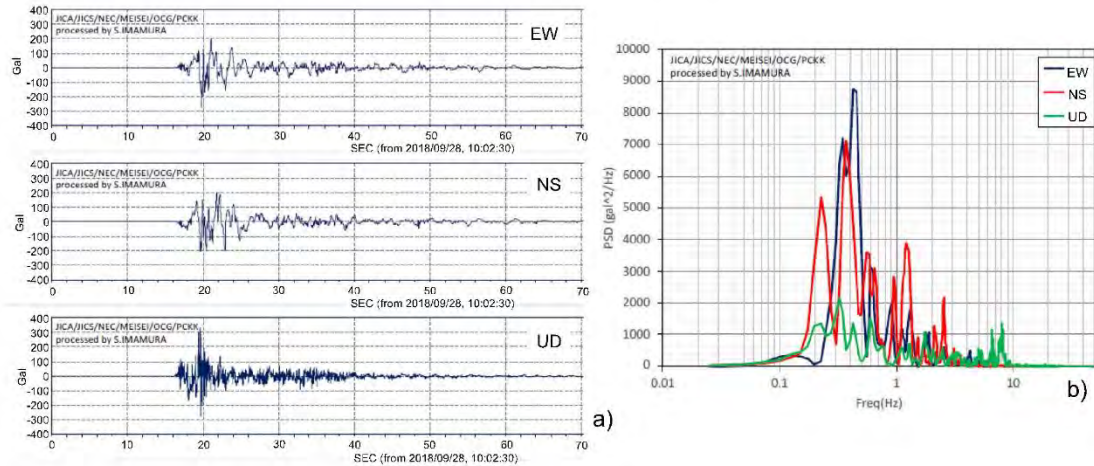


Fig. 3. a) Strong ground motion and b) power spectrum at the seismological station (BMKG and JICA, 2018).

because the groundwater is shallow and accessible for consumption. The low-elevation area between the large old fans is a floodplain and has loose sediment layers at the surface. These areas, in fact, suffered from long-distance flow-slide due to the 2018 earthquake (Fig. 5). The authors conducted a carbon 14 dating to estimate the age of the sediments in the affected area, and found that the sediments shallower than 3 m were Holocene deposits, formed approximately 1000–2000 years ago.

As detailed in the next section, the presence of spring water was found at many locations in the affected areas. This confined groundwater probably played an important

role in the occurrence of the long-distance flow-slides. The flow-slides took place 20–80 m above sea level and more than 20 m above the riverbed of the Palu River. Therefore, it is reasonable to conclude that the confined groundwater was either or both of the following: (1) shallow groundwater which infiltrates from the ground surface under the influence of the ground slopes and permeability of the soil layers in the alluvial fans, and, (2) deep groundwater which has passed through deep formations from the mountains on both side of lowland and tends to have a higher water head usually.

There was an irrigation channel in the south to north direction on the east side of Palu Valley as shown in Fig. 4, and it was directly above the flow-slide of Petobo, Jono Oge and Sibalaya. It was also found that the irrigation channel suffered from significant damage due to the earthquake. A local resident in Jono Oge stated that the irrigation channel was constructed in the 1980s to supply the water for paddy-field and crops in the surrounding areas. Before the construction, it was difficult for residents in the downstream area to access the groundwater. However, in the one to two years after the construction of the irrigation channel, the residents have been able to collect



Fig. 4. Distribution of alluvial fans and the locations of long-distance flow-slide in the eastside of Palu River (after JICA, 2019).

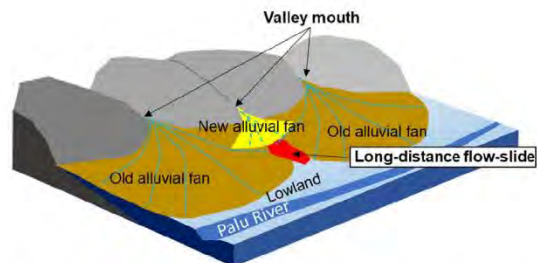


Fig. 5. Schematic illustration of topography around long-distance flow-slide.



the groundwater easily. This infers that the presence of the irrigation channel affected the shallow groundwater conditions, and also played a role in the liquefaction and flow-slides in Petobo, Jono Oge and Sibalaya (Cummins, 2019; Bradley et al., 2019; Watkinson and Hall, 2019). It should be noted, however, that there was no irrigation channel above the flow-slide in Balaroa, the west side of Palu Valley. Therefore, it cannot be deemed that the presence of an irrigation channel was, in itself, the cause of the flow-slides.

### 3. Long-distance flow-slide and induced damage

The earthquake caused four major long-distance flow-slides. The flow-slides and the surrounding terrain have several features in common. Fig. 6 shows the overview of the flow-slide which consists of collapsed part (main scarp), flow part and sedimentation part, and the maximum flow distance of each site was several hundred meters or more. The affected areas have very gentle slopes, averaging 1–5%, and are located directly below a knick line on a

newly developed alluvial fan. In addition, the presence of surface water was found in all affected areas even though there had not been much rainfall before the survey. The results of the damage survey in each area are summarized as follows.

#### 3.1. Balaroa

The damaged area of the flow-slide in Balaroa is about 40 ha, and is located on the west side of the Palu Valley. The catchment area of the affected area is estimated at 4 km<sup>2</sup>. The flow-slide occurred at the bottom of the alluvial fan created at the valley mouth where the discharged water was not observed during the survey. The maximum distance of flowed objects confirmed by the authors' survey in Balaroa was about 300 m. An inclination of the slope before the flow-slide was very gentle (3–5%), however, it was still steeper than the other damaged areas, Petobo, Jono Oge and Sibalaya.

A google earth image of the Balaroa area after the earthquake is shown in Fig. 7 (date of original image taken: 2nd of October 2018). At the main scarp of the flow-slide, as shown in Fig. 8, debris flow deposits including granite boulders covered the coarse sandy layer with a thickness of 3–4 m. The evidence of sand ejecta was also confirmed in the coarse sandy layer. At the uppermost part, significant subsidence and tensile cracks were identified. Most of the surface layer at the uppermost part flowed eastward. The ground elevation was lowered by 3–4 m at the upper part, while that at the bottom of slope raised by around 5 m. The flow-slide occurred in a densely populated area, and the surface soil flowed together with the houses. As a result, the number of the building damaged by the flow-slide were over 1,300 units. During the survey, the authors found that some locations in the affected area were

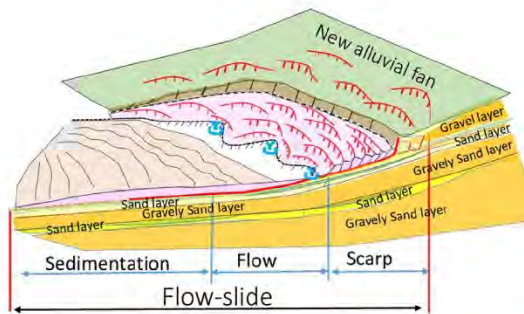


Fig. 6. Overview of long-distance flow-slide (after JICA, 2019).

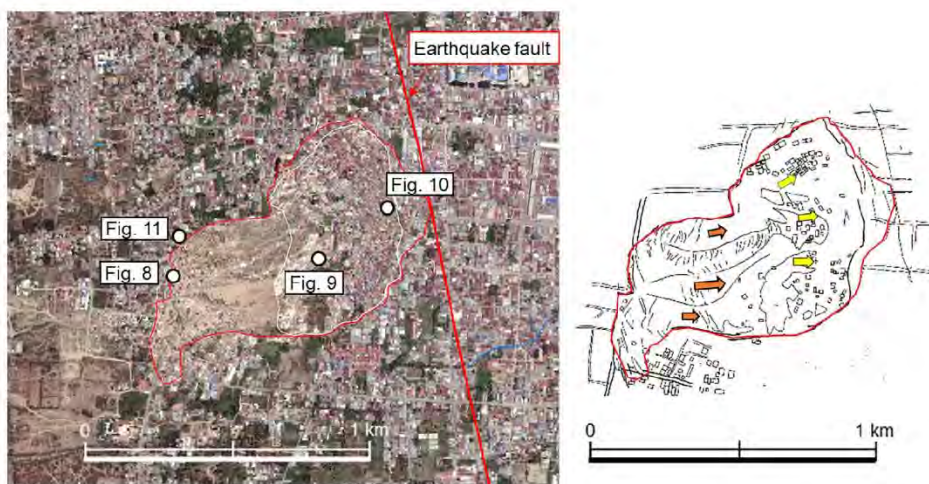


Fig. 7. Balaroa area after the earthquake, captured from google earth (date of original image taken: 2nd of October 2018).





Fig. 8. Soil profile observed at the main scarp of flow-slide in Balaroa.

inundated and there was a presence of spring water in the middle portion as shown in Fig. 9.

In Balaroa, the flowing ground was captured by a video camera, and the video is still available on the website (<https://www.youtube.com/watch?v=wDkogRglXvY>, date last confirmed: 7th of March 2020). The ground was mud-like and residential houses collapsed as the flow proceeded. A witness mentioned that the ground surface was undulated up and down during the earthquake. After the shock, mudflow started to occur and pushed the houses to the lower elevation. Another witness mentioned that the mosque shown in Fig. 10 moved 250 m and rotated several times as it flowed, before finally stopping and falling down. Fig. 11 shows the sand ejecta, evidence of liquefaction, on the house near the crown of flow-slide. Residents who have been living in the surrounding areas for decades reported that the affected area in the Balaroa area has a shallow groundwater table and it was under pressure (confined groundwater) in some places. In addition, a local well-digger who worked for decades in Balaroa reported that before the earthquake, when a 6-meter-water pipe inserted to the ground, groundwater ejected above the ground



Fig. 9. Water inundation appeared after the earthquake (Balaroa).



Fig. 10. Mosque rotated as it flowed 250 m (Balaroa).

surface at a height of 0.5–1 m. This information also suggests the presence of confined groundwater.

### 3.2. Petobo

The damaged area of the flow-slide in Petobo is about 180 ha, and is located on the east side of Palu Valley. The catchment area of the affected area is estimated at 14 km<sup>2</sup>. The flow-slide occurred at the bottom of the alluvial fan created at the valley mouth. However, it was confirmed that the river water disappears into the ground at about 3 km east of the flow-slide and probably becomes underground water. Fig. 12 shows an image of the Petobo area after the earthquake captured by google earth (date of original image taken: 2nd of October 2018). An inclination of the slope before the flow-slide was very gentle (2–3%). A common feature of the affected areas on the east side of Palu Valley is the presence of an irrigation channel directly above the flow-slide. The irrigation channel was parallel to the main scarp with a distance of about 30 m. The irrigation channel also suffered significant damage for about 1.2 km (Fig. 13). After the earthquake, the water in the irrigation channel had disappeared.



Fig. 11. Sand ejecta found at the upper part outside of flow area (Balaroa).



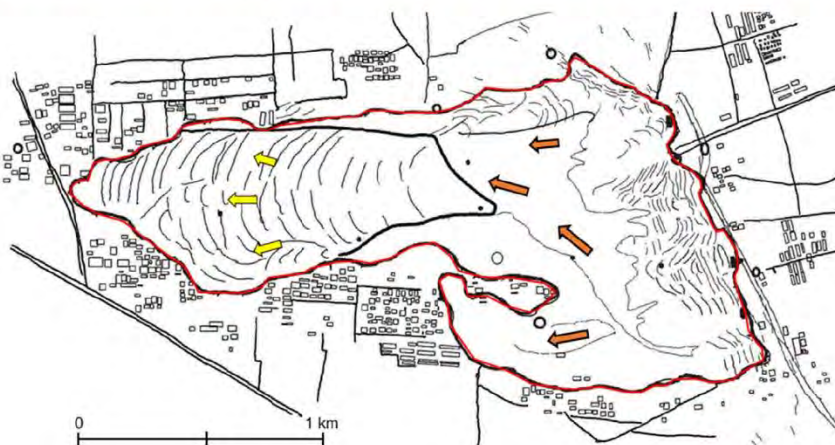
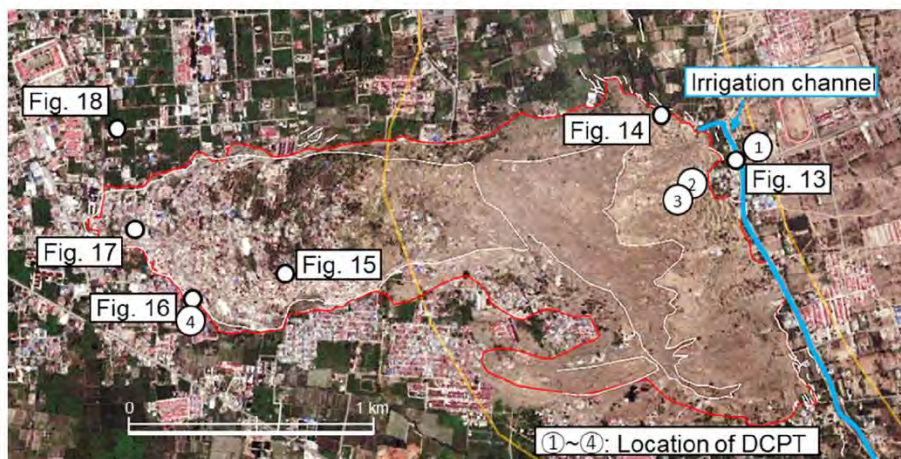


Fig. 12. Petobo area after the earthquake, captured from google earth (date of original image taken: 2nd of October 2018).

The flow-slide occurred mainly in two directions. The surface soil profile confirmed at the main scarp was an



Fig. 13. Damage to the embankment of irrigation channel (Petobo).

alternating layer of silty sand and gravelly soil, which was parallel to the ground surface as shown in Fig. 14. These were likely flood deposits. At the uppermost portion of the flow-slide indicated in Fig. 12, many tensile cracks and dips upstream were confirmed on the ground surface that did not flow largely after the earthquake. Immediately to the west, traces of the intense flow-slide were found in the northwest and west directions, and the ground elevation had lowered by about 5 m.

Fig. 15 shows the damage to a tower structure, which flowed for about 1100 m from its original position, which is the maximum distance any object was confirmed to have flowed in the authors' survey. In Petobo, approximately 1920 buildings were reportedly damaged by the flow-slide. It was remarkable that the buildings outside the flow area were undamaged (Fig. 16). From the center to the bottom part, the houses were buried by the thick soils (fine sand, gravel, and organic soil) deposited after the flow.





Fig. 14. Soil profile observed at the main scarp of flow-slide in Petobo.

Similar to the case in Balaroa, the presence of a lot of surface water due to spring water and the small streams formed by collecting them were confirmed in Petobo (Fig. 17). Furthermore, such springs were also confirmed in the downstream sedimentation area which was elevated for about 5 m from the original elevation. These features suggest the presence of confined aquifer (artesian water) below the surface ground.

A witness living around the affected area reported that the sand ejecta was seen during and after the earthquake. Fig. 18 shows the sand ejecta, evidence of liquefaction, which was found at several locations in and around the affected area during the survey.

In Petobo, portable Dynamic Cone Penetration Tests (DCPTs) were conducted at four locations in and around the affected area as shown in Fig. 12. Note that the sand ejecta was found near No. 2, 3 and 4. The converted  $N_{SPT}$  values from DCPT are shown in Fig. 19. At No. 1, above the irrigation channel, there was no groundwater and  $N_{SPT}$  values higher than 10 could be found at GL-2 m or deeper. The values of  $N_{SPT}$  in the affected area are represented by No. 2 and No. 3. The groundwater levels were identified to be around 1 m, as determined by the water line left on the DCPT rod, and soft soil deposits with  $N_{SPT}$  values less than 5 could be found for a thickness of about 4 to 5 m from the ground surface. No. 4 represents the soil condition at the bottom of the slope (outside the flow-slide). The surface groundwater level and  $N_{SPT}$  at No. 4 were almost the same as No. 2 and 3. However, at No.4, when the DCPT rod was pulled out, spring water came out of the penetration hole, which suggests the presence of a confined aquifer. The combination of loose soil and shallow groundwater with pressure possibly led to the occurrence of liquefaction due to the earthquake.

### 3.3. Jono Oge

The damaged area of long-distance flow-slide in Jono Oge is about 210 ha, located on the east side of Palu Valley,



Fig. 15. Damaged tower structure flowed for about 1100 m (Balaroa).



Fig. 16. House and buildings outside the flow area are undamaged (Petobo).



Fig. 17. A stream was formed by spring water on the flowed deposits (Petobo).

about 4 km south of Petobo. It is reported that a total of 500 houses were damaged. The catchment area of the affected area is estimated at 4 km<sup>2</sup>. The flow-slide occurred at the bottom of the alluvial fan created at the valley mouth where the discharged water was not observed during the survey. Similar to Petobo, the affected area is located in





Fig. 18. Sand ejecta found in and around the affected area (Petobo).

the gap between old large fans that have a gentle slope, relatively low elevation and high groundwater level. Fig. 20 shows google earth image of the flow-slide in Jono Oge after the earthquake (date of original image taken: 2nd of October 2018). The width of the affected area is about 1 km, and the length is around 3 km with the average slope is 1%, the largest and the gentlest as compared to the other three sites. Although a seasonal river is on the northern edge of the affected area, there was no river water at the time of the earthquake.

At the uppermost portion of the flow-slide, the main scarp has appeared with tensile cracks for 1.1 km along the irrigation channel. Before the earthquake, the channel was reportedly operated with a certain level of water. The water vanished after the earthquake because of significant damage to the embankment. The surface soil profile confirmed at the main scarp was an alternating layer of sand, silt and organic soil that once covered the ground surface (Fig. 21). This feature suggests the probability that this area was once a wetland at the bottom end of the old fan. The center part of the affected area, about 500 m west

of the main scarp, suffered from the intense flow and the ground elevation was lowered for about 2 m.

Fig. 22 shows the damage to the irrigation channel in Jono Oge. According to witness living at the uppermost part of the flow-slide, the ground movement and a groundwater blow out with a height of 6 m took place at almost the same time, about 10 s after the earthquake, and two minutes later the embankment of irrigation channel broke, followed by an outflow of irrigation water. This information suggests that the damage to the embankment of the irrigation channel was not caused by the earthquake motion, but that it was caught in the flow-slide. Another witness at the downstream area reported that after the earthquake, thick mud water flowed down for an hour, and the houses along the river were inundated, as shown in Fig. 23, which suggests that the depth of mud water hitting the downstream area was about 7 m above the current river water level. Although the source of this huge amount of water may have been irrigation water, no other floods have been reported in other areas, Petobo and Sibalaya, where similar damage has occurred in the irrigation channel. Therefore, the origin of the mud water that caused the flood in Jono Oge was most likely the confined aquifer beneath the affected area of flow-slide.

In Jono Oge, a survivor was shooting video while being flowed, which is currently available on the website (<https://www.youtube.com/watch?v=bl2DZYzWGNk>, date last confirmed: 7th of March 2020). It was captured that the surface ground during flow was muddy with a large amount of moisture, and it swept away while undulating vertically and horizontally. After analyzing the video, it was found that the movie was taken at the middle of the flow where the flow velocity was faster than at the edge because the camera was overtaking a tower in the flow at the edge. It was also found that there was a house with red roof that stood still in the same position as shown in Fig. 24, while the surrounding houses were all swept away for several hundred meters with a velocity of about

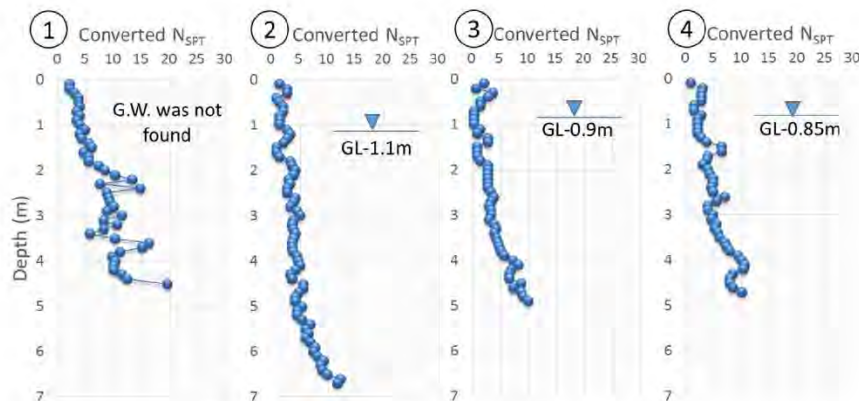


Fig. 19. Converted N-SPT value from the DCPT tests (Petobo).

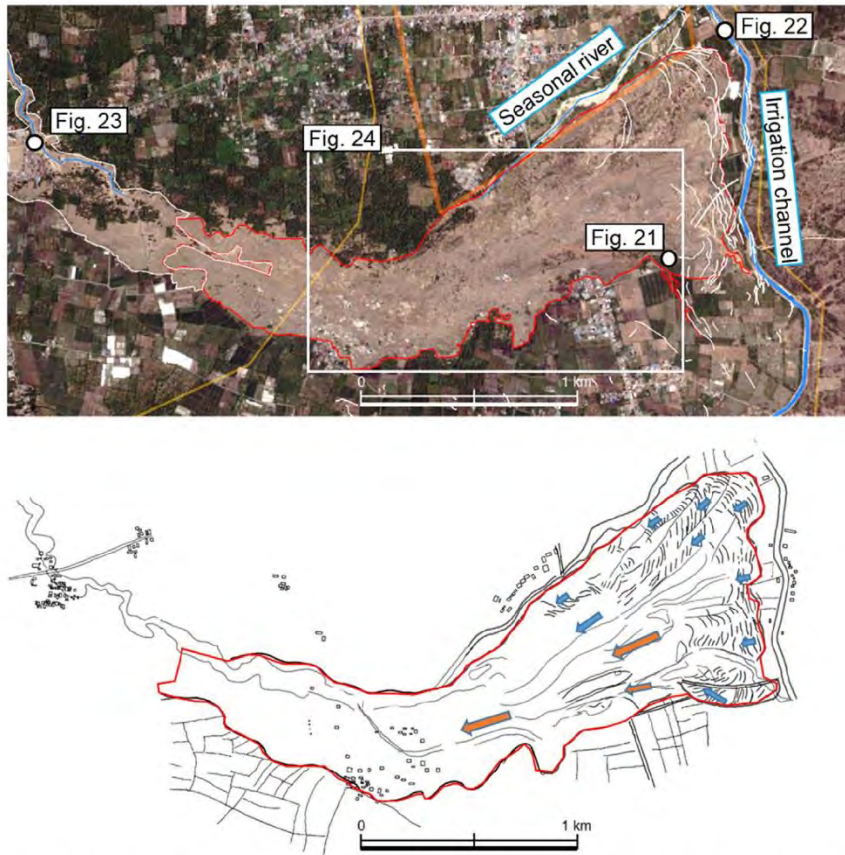


Fig. 20. Jono Oge area after the earthquake, captured from google earth (date of original image taken: 2nd of October 2018).

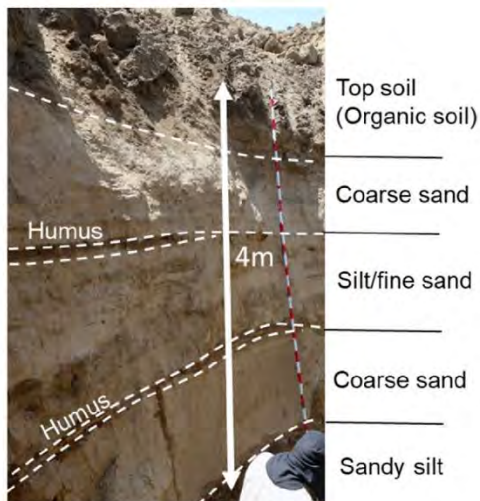


Fig. 21. Soil profile observed at the main scarp of flow-slide in Jono Oge.



Fig. 22. Damage to irrigation channel in Jono Oge.

15–20 km/h estimated by their relative positions with the house with red roof. This indicates that only the foundation of the house with red roof could resist the flow-slide. In order to confirm the bottom boundary of flowed





Fig. 23. Mud mark on the house indicates the likely thickness of the mudflow (Jono Oge).

ground, some trench/pit surveys and a DCPT were conducted near the unmoved house.

Fig. 25 shows the soil profile around the unmoved house and the result of DCPT. The cross-section lies in perpendicular to the flow direction. A foundation of the unmoved house in Jono Oge is a massive mat foundation with a thickness of 1 m, placed on the previous ground surface and rubble stones. The previous ground surface disappears at trench No. 2, about 5 m away from the house, and the bottom boundary of the flowed ground was found at 1.5 m below the current ground surface. On the other hand, a mud-mark on the outer wall of the unmoved house, a trace indicating the height of flowed ground immediately

after the earthquake, was about 3 m above the current ground surface. As shown in Fig. 26, there was relatively thick sediment on the upstream side of the unmoved house. The elevation of the sediment is about 50 cm lower than the mud-mark on the outer wall, which suggests that the flowing ground had expanded in volume, and consolidated after the flow stopped.

From the DCPT shown in Fig. 25 conducted right next to the unmoved house, there existed soft soil deposits with  $N_{spt}$  values less than 5 for 3-meter-thick below the previous ground surface. This suggests that the soil deposits at shallow depth may have liquefied and affected the occurrence of flow-slide around the unmoved house. However, the extent of liquefaction was probably not significant right below the house due to the heavy weight of the house with its massive mat foundation. For further details on the possibility of liquefaction in Jono Oge, refer to Hazarika et al. (2020) who conducted many DCPTs as a survey team with the authors.

### 3.4. Sibalaya

The damaged area of long-distance flow-slide in Sibalaya is located on the east side of Palu Valley, 18 km south of Jono Oge. The catchment area of the affected area is estimated at 5.3 km<sup>2</sup>. According to local people, the groundwater level in the affected area rises to near the ground surface after a few days of rainfall. The flow-slide occurred at the bottom of the alluvial fan which was created at the valley mouth where water is not usually discharged. The



Fig. 24. Flow distance of structures in Jono Oge.



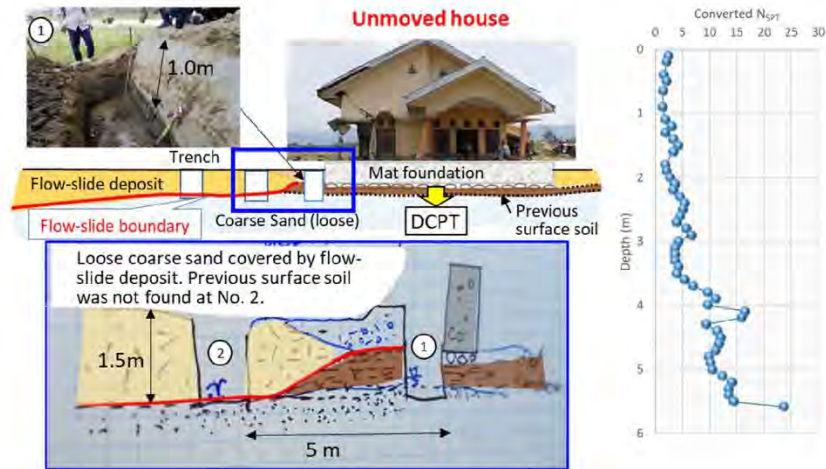


Fig. 25. Soil profiles and result of DCPT at the unmoved house in Jono Oge.

upper alluvial fan has a steep slope of about 8%. However, in the area of flow-slide, the slope is 4% at the top part and about 2% in the middle and bottom parts. Fig. 27 shows the google earth image of the flow-slide in Sibalaya after the earthquake (date of original image taken: 25th of July 2019). The surface ground was divided into three blocks and each flowed 200–400 m in the north-west direction. As was the case in both Petobo and Jono Oge, there is an irrigation channel above the main scarp, which was significantly damaged.

The surface soil profile confirmed at the main scarp was an alternating layer of gravelly sand, silt and organic soil as shown in Fig. 28. Since non-carbonized wood fragments were found in the deposits, it is reasonable to conclude that the sedimentation age of this area was relatively young. Except for the top part, the ground flowed to the west to spread, leaving the shape of the paddy fields and standing trees on it. However, unlike other affected areas, the flowed

ground did not accumulate thick at the bottom of the slope. The ground flowed far down to the paddy field, and tensile cracks were formed in the entire affected area. For further details on the characteristics of flow-slide in Sibalaya, refer to Okamura et al. (2019) who conducted many trench excavations and interviews with the local residents as a survey team with the authors.

#### 4. Possible mechanism of long-distance flow-slide

From the damage survey after the earthquake, many water springs were found on the surface ground in the affected areas of long-distance flow-slide. The interviews with residents in the affected areas and witnesses of the flow-slide provided evidence that before the earthquake there were several places where the groundwater was spouted when residents dug a hole for a well and that several meters of water spouted immediately after the earthquake in the affected areas. This evidence suggests that the shallow groundwater in the affected areas was under pressure, and this confined groundwater probably played an important role in the occurrence of long-distance flow-slide. When the void water in the loose sandy layer is being under pressure higher than static hydraulic pressure, effective stress of the sandy layer becomes lower than the normal conditions, which results in a high possibility of occurrence of liquefaction during an earthquake. In addition, from the results of DCPTs carried out in the flow zones, relatively low values of  $N_{SPT}$  were measured at a shallow depth, which also suggests a high possibility of liquefaction during the earthquake.

Generally, when liquefaction occurs, an upward dissipation of excess pore water pressure and void redistribution take place in the liquefied soil followed by ground settlement. On the other hand, it is known that when a less



Fig. 26. Thick sediment on the upstream side of the unmoved house in Jono Oge.



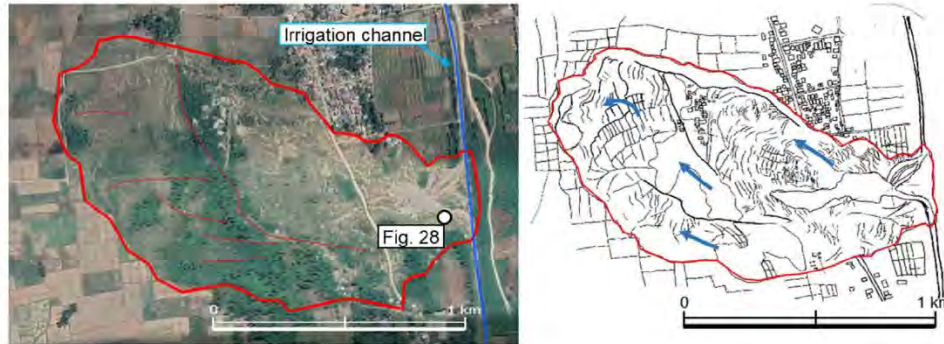


Fig. 27. Sibalaya area after the earthquake from google earth (date of original image taken: 25th of July 2019).

permeable silt or clayey layer exists directly above the liquefied layer, a water interlayer (water-film) with no shear resistance is formed just below the less permeable layer as shown in Fig. 29. Further, Kokusho (1999) reported based on his experimental results that when the water interlayer is formed below the sloped less permeable layer, a large deformation takes place in the less permeable layer and its upper layers due to the gravity force while maintaining their shape. In fact, there was a minor flow-slide with a flow distance of about 100 m in between Petobo and Jono Oge, and the surface layer flowed almost maintained its shape. It was also confirmed that at the several locations in the affected areas that there is a less permeable layer just

above the liquefiable sandy layer. If there was a less permeable layer covering the liquefiable layer throughout the entire affected areas, it would be concluded that the cause of the long-distance flow-slide could have been the formation of the water interlayer.

On the other hand, Okamura et al. (2019), who conducted many trench surveys in Sibalaya, reported that the above conditions are not always met. The authors also confirmed in the video taken in Balaroa and Jono Oge that the flowing surface ground was mud-water like. Although the flow-slide may have been initiated due to the formation of the water interlayer, that alone cannot explain the long-distance flow exceeding several hundred meters. Therefore, the authors consider the possibility that the long-distance flow-slide occurred because the effective stress and the shear strength of the surface ground significantly reduced by a large amount of groundwater supplied from the confined aquifer as illustrated in Fig. 30. However, the depth of the confined aquifer has not been ascertained yet. JICA (2019) reported that a depth of confined aquifer confirmed by a borehole survey after the earthquake was about 30 m below the ground surface. Therefore, the water supplied to the ground surface during the earthquake and flow-slide could have come from a much deeper layer than expected.

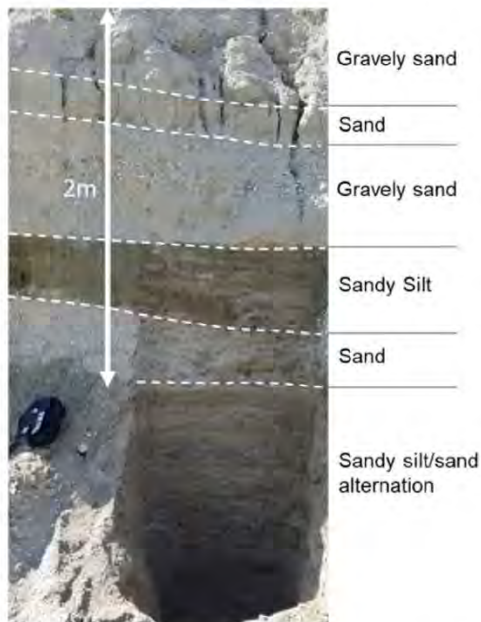


Fig. 28. Soil profile observed at the main scarp of flow-slide in Sibalaya.

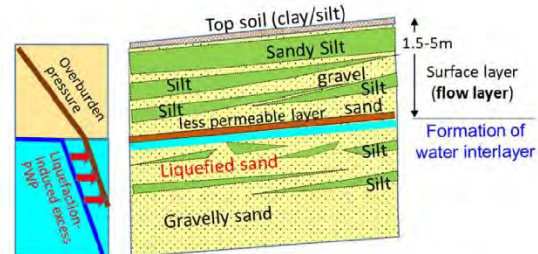


Fig. 29. Schematic illustration of flow-slide based on water interlayer formation.



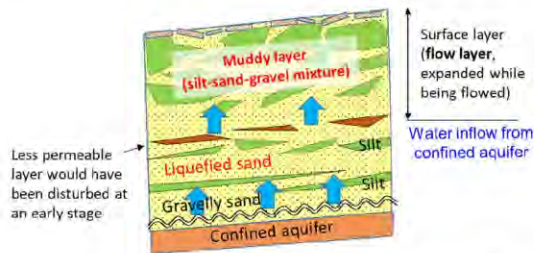


Fig. 30. Schematic illustration of long-distance flow-slide based on water inflow from confined aquifer.

Since the surface ground of the affected areas is composed of alternating layers of sand, silt, gravel, and organic soils, the overall vertical permeability of the surface layer may be small. This suggests that it takes a long time to dissipate the excess water pressure even if the upward water pressure exceeds the critical hydraulic gradient which is supplied from the confined aquifer. In the typical laboratory undrained shear test, positive dilatancy associated with increasing shear strain is restrained, and strength and stiffness are eventually recovered even very loose sand (Kiyota et al., 2013), which suggest that the long-distance flow-slide is unlikely to occur at the gently sloped ground under the undrained condition. However, considering the inflow of the groundwater from the confined aquifer, the significant positive dilatancy which occurs for surface ground due to water absorption reduces the shear resistance of the surface ground, resulting in a long-distance flow-slide even in the gently sloped ground. A series of laboratory experiments related to this issue has been conducted by Sento et al. (2004) and Yoshimine et al. (2006).

The above hypothesis is consistent with the following: 1) the surface ground during flow was muddy with a large amount of moisture, and it swept away while undulating vertically and horizontally; 2) several meters of water spouted immediately after the earthquake in the affected areas; 3) a mud mark remains 3 m above the current ground surface on the outer wall of the unmoved house in Jono Oge, suggesting that the surface ground was expanding while it flowed; 4) a large amount of water that caused flooding downstream for an hour was supplied from probably the underground in Jono Oge. However, since the groundwater environment within and around the affected area has changed due to the flow-slide after the earthquake, it is difficult to identify the exact depth of the confined aquifer and its hydraulic pressure quantitatively before the earthquake. It is likely that it was higher than it is at present because the less permeable surface layer has disappeared and a large amount of groundwater has already been discharged.

One example of landslides caused by the blowout of confined groundwater after the earthquake was the 1966 Makiuchi landslide, Nagano Pref., Japan. Morimoto et al. (1967) reported that the direct cause of the landslide was likely to have been the plentiful supply of the

groundwater to the sliding mass through the cracks formed by the movement of a buried earthquake fault. Given this past case, the groundwater may have been supplied from underground faults in the case of the flows in Palu Valley after the Sulawesi earthquake.

## 5. Summary

The Sulawesi earthquake, with a Mw 7.5 on the 28th of September 2018, triggered long-distance flow-slide on very gentle slopes of approximately 1–5%, in Palu City and the surrounding areas in Sulawesi Island, Indonesia. The flow-slide affected areas are located in the floodplain between large old alluvial fans, and the geology of the catchment area consists of granites and granitic metamorphic rocks. The authors have conducted damage surveys, including interviews and surveys with local residents, a portable Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) and trench/pit excavation survey in Balaroa, Petobo, Jono Oge and Sibalaya after the earthquake, and the follow-up survey is still ongoing. The current results that seem to be important for elucidating the mechanism of long-distance flow-slide from the damage survey are summarized as follows:

- 1) The flow-slide affected area consists of the collapsed parts (main scarp), flow part and sedimentation part, and the maximum flow distance was several hundred meters or more. The surface ground elevation at the flow part was lowered by approximately 2–4 m. The thickness of flowed soil visually confirmed by the trench survey was 1.5 m near the unmoved house in Jono Oge.
- 2) The surface soil profile confirmed at the main scarp of flow-slides was an alternating layer of sand, silt, gravel, and organic soils. On the other hand, the video recording the flow-slide suggests that the surface ground during flow was muddy with a large amount of moisture, and it swept away while undulating vertically and horizontally.
- 3) The irrigation channel directly above the flow-slide in Petobo, Jono Oge and Sibalaya, in the east side of Palu Valley, had possibly affected the shallow groundwater condition as well as the occurrence of flow-slide. However, the cause of flow-slide cannot be determined solely by the presence of the irrigation channel because there was no irrigation channel in Balaroa, the west side of Palu Valley.
- 4) The values of converted  $N_{SPT}$  from DCPTs at the flow part of Petobo and Jono Oge were less than 5 for a thickness of 3–5 m below the current ground surface, while the groundwater depths were around 1 m at the DCPT locations. The presence of a lot of surface water due to spring water was found at many locations in the flow-slide affected areas despite not having a lot of rainfall before the survey. The results of the interview survey suggest that before the earthquake the shallow groundwater in the



affected areas was under pressure, and the above conditions probably played an important role in the occurrence of liquefaction and/or flow-slides.

- 5) The flow-slides may have been initiated due to the formation of a water interlayer below the surface layer. In addition, there is the possibility that the shear strength of the surface ground significantly reduced and the flow-slides travelled a long distance due to the large amount of groundwater inflow from the confined aquifer. To date, the depth of the confined aquifer has not been ascertained. Further studies are needed to clarify the depth of the confined aquifer and the detailed mechanism of long-distance flow-slide caused by the groundwater inflow.

### Acknowledgment

The authors would like to express their sincere gratitude to the JICA Domestic Technical Support Committee members, in particular, Prof. Kenji Ishihara, Prof. Takaji Kokusho, Prof. Susumu Yasuda, Prof. Ikuo Towhata, Dr. Kimio Takeya, Prof. Mitsu Okamura and Prof. Hemanta Hazarika for their collaboration and help during the field investigation. This work was partly supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP19KK0108 and grant funding of the JSCE committee of Promoting Innovation in Infrastructure Management.

### References

- Bao, H., Ampuero, J.P., Meng, L., Fielding, E., Liang, C., Milliner, C.W. D., Feng, T., Huang, H., 2019. Early and persistent supershear rupture of the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake. *Nat. Geosci.* 12, 200–205.
- Bellier, O., Sebrier, M., Beaudouin, T., Villeneuve, M., Braucher, R., Bourles, D., Siame, L., Putranto, E., Pratomo, I., 2001. High slip rate for a low seismicity along the Palu-Koro active fault in Central Sulawesi (Indonesia). *Terra Nova* 13 (6), 463–470.
- BMKG and JICA, 2018: Palu Earthquake strong motion wave form by observation system developed by Japan.
- Bradley, K., Mallick, R., Andikagumi, H., Hubbard, J., Meilianda, E., Switzer, A., Du, N., Brocard, G., Alfian, D., Benazir, B., Feng, G., Yun, S., Majewski, J., Wei, S., Hill, E.M., 2019. Earthquake-triggered 2018 Palu Valley Landslides Enabled by Wet Rice Cultivation. *Nat. Geosci.* 12, 935–939.
- Cummins, P.R., 2019. Irrigation and the Palu landslides. *Nat. Geosci.* 12, 881–882.
- Hazarika, M., Pasha, S.M.K., Rohit, D., Masyhur, I., Arsyad, A., Nurdin, S., 2020. Large distance flowslide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia. *Soils Found.* (accepted).
- JICA, 2019. Brief explanation of “Nalodo” assessment and mitigation, presentation material in National Workshop on Joint Research, Assessment and Mitigation of Liquefaction Hazards (Lesson learned from the 2018 Palu earthquake).
- Kadarusman, A., van Leeuwen, T.M., Sopaheluwakan, J., 2011. Eclogite, Peridotite, Granulite, and Associated High-Grade Rocks from The Palu Region, Central Sulawesi, Indonesia: An Example of Mantle and Crust Interaction in A Young Orogenic Belt, in Proceedings JCM Makassar.
- Kiyota, T., Koseki, J., Sato, T., 2013. Relationship between limiting shear strain and reduction of shear moduli due to liquefaction in large strain torsional shear tests. *Soil Dynam. Earthquake Eng.* 49, 122–134.
- Kokusho, T., 1999. Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 125 (10), 817–826.
- Morimoto, R., Nakamura, K., Tsuneishi, Y., Osaka, J., Tsunoda, N., 1967. Landslides in the epicentral area of the Matsushiro earthquake swarm, their relation to the earthquake fault. *Bull. Earthquake Res. Inst.* 45, 241–263.
- National Agency of Disaster Management, Gempa Bumi Sulteng, 2018. <https://bnpb.go.id/geoportal.html>. (Nov. 13th 2018).
- Okamura, M., Ono, K., Arsyad, A., Minaka, U.S., Nurdin, S., 2019. Large-scale flowslide in Sibalaya caused by the 2018 Sulawesi Earthquake. *Soils Found.* 59 (5), 1148–1159.
- PuSGeN (National Research Center for Earthquake Studies), 2018. Quick report on Palu Earthquake 2018, Indonesia National Center for Earthquake Studies, Research and Development Agency of Ministry of Public Work and Housing.
- Socquet, A., Hollingsworth, J., Pathier, E., Bouchon, M., 2019. Evidence of supershear during the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake from space geodesy. *Nat. Geosci.* 12, 192–199.
- Sento, N., Kazama, M., Uzuoka, R., Ohmura, H., Ishimaru, M., 2004. Possibility of postliquefaction flow failure due to seepage. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 130 (7), 707–716.
- USGS, 2018. Earthquake Hazards Program “M7.5-7.0km N of Palu, Indonesia”, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/executive>. (Oct. 28th 2018).
- Van Leeuwen, T.M., 2005. Stratigraphy and tectonic setting of the Cretaceous and Paleogene volcanic-sedimentary successions in northwest Sulawesi, Indonesia: implications for the Cenozoic evolution of Western and Northern Sulawesi. *J. Asian Earth Sci.* 25, 481–511.
- Vigny, C., Perfettini, H., Walpersdorf, A., Lemoine, A., Simons, W., van Loon, D., Ambrosius, B., Stevens, C., McCaffrey, R., Morgan, P., Bock, Y., Subarya, C., Manurung, P., Kahar, J., Abidin, H.Z., Abu, S. H., 2002. Migration of seismicity and earthquake interactions monitored by GPS in SE Asia triple junction: Sulawesi, Indonesia. *J. Geophys. Res.* 107(B10), 7.1–7.11.
- Watkinson, M.I., 2011. Ductile Flow in the Metamorphic Rocks of Central Sulawesi, The SE Asian Gateway: History and Tectonics of the Australia-Asia Collision, 355, pp. 157–176.
- Watkinson, I.M., Hall, R., 2019. Impact of communal irrigation on the 2018 Palu earthquake-triggered landslides. *Nat. Geosci.* 12, 940–947.
- Yoshimine, M., Nishizaki, H., Amano, K., Hosono, Y., 2006. Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application to analysis of flow slide of infinite slope. *Soil Dynam. Earthquake Eng.* No. 26, pp. 253–264.

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Soils and Foundations 60 (2020) 1050–1063

[www.elsevier.com/locate/sandf](http://www.elsevier.com/locate/sandf)

Geo-Disaster Report

## Large-scale flowslide in Sibalaya caused by the 2018 Sulawesi earthquake

Mitsu Okamura<sup>a,\*</sup>, Kohei Ono<sup>a</sup>, Ardy Arsyad<sup>b</sup>, Utari S. Minaka<sup>a</sup>, Sukiman Nurdin<sup>c</sup><sup>a</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, Japan<sup>b</sup> Faculty of Engineering, Hassanudin University, Makassar, South Sulawesi, Indonesia<sup>c</sup> Faculty of Engineering, Tadulako University, Palu, Central Sulawesi, Indonesia

Received 22 January 2020; received in revised form 15 March 2020; accepted 27 March 2020

Available online 14 August 2020

### Abstract

On 28th September 2018, an earthquake of  $M_w$  7.5 hit the Central Sulawesi province in Indonesia. This was followed by liquefaction-induced large-scale ground flows in several areas in Palu city and its neighborhood. A significant characteristic of the ground flows at these sites was that large volume of soil slid downhill along gentle topographic gradients and travelled long distances (more than several hundred meters). To gain a better understanding of the fundamental mechanisms contributing to ground flows, this geo-disaster report summarizes a site investigation conducted at Sibalaya, one of the sites where massive ground flows were observed.

We conducted interviews to reveal the time sequence of the event, including the main shaking that was followed by a sudden drop of the ground surface, the time at which the massive ground flow was initiated (with an extremely loud sound), as well as the change in the water level of wells. Water leakage from the unlined irrigation channel was confirmed to contribute significantly to the increase in the ground water level in this area, which thus increased the liquefaction potential. In situ tests, including eight large trench excavations and dynamic cone penetration tests, were carried out, which helped identify the liquefied and largely sheared layers. An analysis of the change in topography using satellite images and UAV photos also played an important role in capturing the overall picture of the event. Finally, a hypothesized mechanism for the extremely long slide was discussed.

© 2020 Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of The Japanese Geotechnical Society. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

**Keywords:** Earthquake; Liquefaction; Landslide; In situ test

### 1. Introduction

An earthquake of  $M_w$  7.5 hit the Central Sulawesi province in Indonesia on 28th September 2018. This was followed by liquefaction-induced, large-scale ground flows in several areas in Palu city and its neighborhood. Four sites with particularly large ground flow incidents were identified: Balaroa, Petobo, Jono Oge, and Sibalaya,

located 80–110 km south of the epicenter. An acceleration observatory is located on a bedrock near the Balaroa site, where peak ground accelerations of 203 Gal (NS), 281 Gal (EW) and 335 Gal (UD) were recorded. Detailed information about the earthquake records and the geology of these sites can be found in the papers by Hazarika et al. (2020) and Kiyota et al. (2020).

The massive ground flow areas are situated along the margins of the alluvial flood deposit in the Palu River valley. A significant characteristic of the ground flow at the sites is that ground areas larger than 0.5 km<sup>2</sup> slid downhill along gentle topographic gradients and travelled more than

Peer review under responsibility of The Japanese Geotechnical Society.

\* Corresponding author.

E-mail address: [okamura@cee.ehime-u.ac.jp](mailto:okamura@cee.ehime-u.ac.jp) (M. Okamura).

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.03.016>

0038-0806/© 2020 Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of The Japanese Geotechnical Society.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



several hundred meters. Such ground flows are a type of lateral spreading, which is a liquefaction-induced deformation phenomenon identified by surficial soil layers breaking into blocks that progressively slide downhill or toward a free face during and after earthquake shaking. Hamada et al. (1986) investigated the horizontal ground displacement of lateral spreading at many sites impacted by the 1964 Niigata and the 1983 Nihonkai-Chubu earthquakes. Bartlett and Youd (1995) and Youd et al. (2002) compiled extensive case histories of liquefaction-induced lateral spreading from many earthquakes mostly in Japan and the U.S. The data ranges were earthquakes with a magnitude of  $6 < M_w < 8$  that hit liquefiable sites with a topographical ground slope within the range from 0.1% to 6%. They classified data into two categories: (1) lateral spread toward a free face such as an incised river channel or some other abrupt topographical depression and (2) lateral spread down gentle slopes without a free face. The maximum ground displacement in the case histories was approximately 10 m for the free-face conditions, whereas smaller displacements were observed for the gentle slope conditions. It is obvious that displacements of more than several hundred meters observed at the four sites in Palu are extraordinarily large.

The fundamental mechanism of this unusual event is of particular research interest. We conducted two extensive site investigations: in February and in June 2019. Sibalaya was selected as our target site because the number of houses in the ground flow area was relatively small (approximately a hundred) compared to the other major ground flow areas and no one had been buried alive. By contrast, in other sites, people were believed to be buried alive/missing, making it difficult to conduct site investigations, such as performing excavations or drilling boring holes. Another reason was the ground water condition; unlike other sites, the ground water level in and around Sibalaya lowered after the earthquake, making it easier to excavate trenches for direct visual inspection of the soil profile, including the liquefied layers. Moreover, the Sibalaya site was well preserved and fully accessible during the investigation.

This geo-disaster report summarizes the site investigations conducted at Sibalaya to facilitate a better understanding of the fundamental mechanisms contributing to the ground flows.

## 2. Interviews of eyewitnesses

Fig. 1(a) presents the location of the Sibalaya site, which is 26 km south of the Palu city center, and whose site topography is an alluvial fan. GEER (2019) adopted the term “flowslide” to describe the massive ground flow after Hungr’s classification system (Hungr et al., 2014). This geo-disaster report uses the same term. The flowslide area in Sibalaya shown by the broken line in the figure extended 1100 m from an irrigation canal, upstream to downstream. The solid line indicates the boundaries of the flowslide area

before the earthquake and the soil in this area spread, while the boundary translated to the broken line.

A main road passed through the area. There were approximately 60 houses built along this road. Fig. 1(b) shows the locations of the houses where the interviewed residents were living in during the earthquake. A total of 23 residents (ten male and thirteen female), agreed to take part in our survey. All the interviewees felt a strong ground shaking that lasted 10 to 20 s, which is consistent with the acceleration recorded at the observatory near Balaroa. Shortly after the shaking ceased, about several to ten seconds, almost all interviewees felt a sudden drop. This vertical movement after the main shock, was not recorded with the accelerometers near Balaroa, but felt by many people near the flowslide areas on the eastern side of the Palu River, including not only Sibalaya but also the Petobo and Jono Oge areas (Kiyota et al., 2020, GEER, 2019). Then, after about less than a minute, almost all the interviewees heard an extremely loud sound, like structure breaking or thunder. Meanwhile, eight interviewees who stayed close to the flowslide area saw houses and coconut trees moving downslope toward the Palu River at a rate faster than the average walking speed, which lasted about one minute, while soil dust covered the area. Considering the flowslide distance at this site (approximately 350 m), the flowslide speed was likely to be of the order of 20 km/h, which corresponds with that observed in Petobo and Jono Oge (Kiyota et al., 2020). Several interviewees witnessed water from the broken irrigation canal flowing downhill immediately after the movement ceased. All these events occurred within a few minutes. The water continued to flow for almost a day until a canal gate located 8.35 km upstream was closed and the channel dried up.

Information of the ground water level is a key when investigating the liquefaction potential. We found eleven wells at the locations shown in Fig. 1(b) and interviewed their owners. Fig. 2(a) shows a photograph and a schematic illustration of well #1, whose internal diameter and depth were 1 m and 10 m, respectively. Its water level before the earthquake was 5.6 m below the ground surface with small seasonal variations (in the order of a few tens centimeters), which was confirmed through the trace left on the inside wall of the well. Soon after the earthquake, the owner noticed that water overflowed from the well; this overflowing lasted two days. Thereafter, the water level gradually lowered and the well completely dried up in the next two weeks. Although outside the flowslide area, some features typical to areas of liquefaction-induced lateral spreading were detected near the well, including cracks on house walls and fences, house subsidence, as well as sand ejecta on the ground surface. All the other wells, wells #2 - #11, had a similar structure, as shown in Fig. 2(b); a 12-m-long pipe was installed at the bottom of a 4–5.5 m-deep excavated well, through which water was pumped up. They did not observe any water at the bottom of the excavated well before the earthquake, indicating that the ground water level was lower than 5 m in the neighbor-



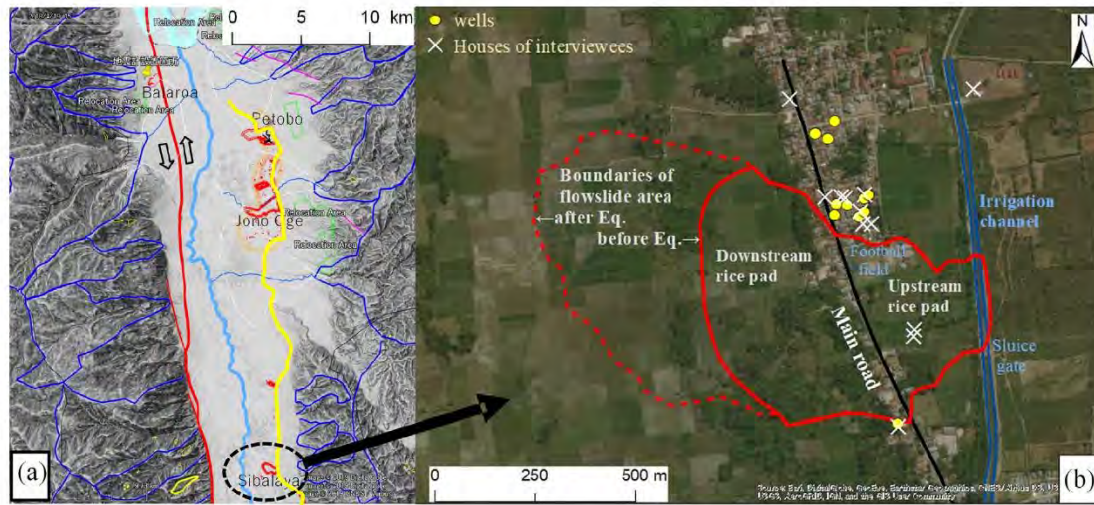


Fig. 1. Locations of major flowslide and houses of interviewed eyewitnesses in Sibalaya. (a) Locations of major flowslide and earthquake fault and irrigation channel (after Kiyota et al., 2020), (b) Satellite image before the earthquake with locations of houses of interviewees, surveyed wells, main road, irrigation channel and flowslide affected area.

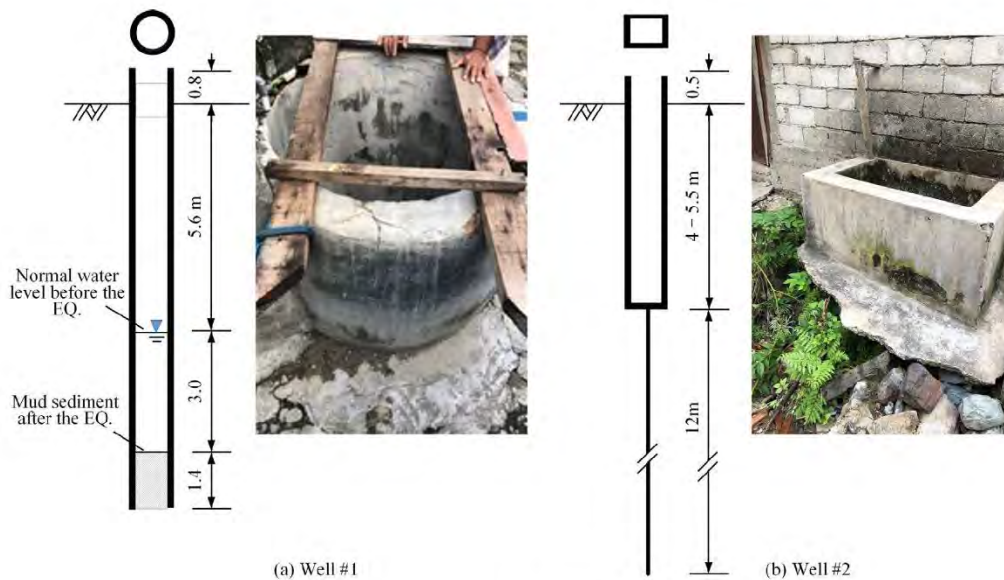


Fig. 2. Photos and cross sections of wells near flowslide area.

hood. Additionally, even several weeks after the earthquake, water could not be pumped up from all the wells except for well #3, whose pipe tip depth was 17.5 m below the ground surface, while for the rest, it ranged between 12 m and 17.5 m. Therefore, it is reasonable to assume that the ground water table was at 5.6 m and 17.5 m before and after the earthquake, respectively.

When it was constructed in the 1930s by the Dutch colonial government, the Gumbasa irrigation channel was a simple dike, and water was used for daily life instead of irrigation. To develop farmland in the neighborhood, the construction works of the Gumbasa irrigation channel began in 1970 and was completed in the 1980s. Since then, the channel has been supplying water for more than 30 years



to rice paddies. It is most likely that water leakage from the unlined irrigation channel allowed water to seep down-slope, maintained the ground water level high, approximately at 5.6 m high before the earthquake, which resulted in an increased liquefaction potential.

### 3. Ground movements

Two orthophotomaps, the World Imagery Map provided by Esri (Esri, 2019) before the earthquake and an assembled map from overlapping UAV photographs

obtained using a motion structure software after the earthquake, were used to analyze the ground movements. A total of 25 markers were set in the area to be reflected in photos, whose relative height and locations were surveyed to ensure the accuracy, while the displacement estimation has an accuracy within plus or minus 1 m.

Fig. 3 shows the orthophotomap after the earthquake and photos of several locations. The easternmost margin of the affected area is bounded by the irrigation channel. Arrows in Fig. 3(a) indicate locations and orientations of photos shown in Fig. 3(b)–(j). Concrete panels were



Fig. 3. (a) Orthophotomaps after the EQ (Courtesy by JICA, November 4, 2018). (b)–(j) Photos at locations in and around the flowslide area.



placed on the eastern side surface of the channel, while soil was exposed unlined on the bottom and western sides (Fig. 3(b)). In one southern breached channel section, a box culvert and a sluice gate were heavily damaged, which was most probably the cause of the extremely loud sound heard by the residents. Fig. 3(c) demonstrates the overview of inundation area. There were two major flow paths from the channel that created a cliff as high as several meters (Fig. 3(d)). In this area, as shown in Fig. 3(e), three large blocks were identified, with dimensions of the largest block as 80-m-long and 42-m-wide, that moved about 50 m downwards, which most possibly triggered the irrigation channel failure. Meanwhile, head scarps were formed along the western side of the channel (Fig. 3(f)).

Structures including roads, houses, fences, channel, trees, and footpaths between rice fields were mapped on the two orthophotomaps before and after the earthquake to obtain pre- and post-earthquake locations. Corresponding points were connected to identify the direction and magnitude of ground displacement. The derived displacement vectors are presented in Fig. 4 together with topographic contours before the earthquake at 1-m intervals. Note that the number of mapped points added up to 280; all the points were used to evaluate the strain distribution in the area as described later in Fig. 5. However, in Fig. 4, only about half of them are presented to avoid unfavorable complication. The flowslide generally moved west-northwest, which was normal to the topographic contours. The largest flowslide displacement was in the northern half of the area, ranging between 320 m and 410 m (average 350 m), while smaller in the southern half. Fig. 3(g) illustrates the original main road pavement remained almost intact even after sliding down 360 m. The displacement decreased near the northern and southern margins of the flowslide area, which distorted the ground and ruined structures. Fig. 3(h) presents the main road pavement torn into pieces near the northern margin. The westernmost margin of the flowslide mass after the earthquake was clearly observed as a terrace 1–2 m higher than adjacent unaffected area (Fig. 3(i)).

The red solid line was drawn to inclusively cover all the vector origins in Fig. 4, representing a boundary before the earthquake between flowslide ground mass and ground that did not flow. The boundary moved west-northwest to the broken line. It is most likely that the ground between the two lines did not move significantly, and soil in the upstream side slid and covered the surface.

Fig. 5 presents a normal strain contours in the east–west direction that provides a clear view of the overall deformation characteristic. Strain is negative (tension) and extremely large in an originally narrow area between the irrigation channel and the large blocks translated downslope. Similarly, in the area of the upstream rice pads that immediately in the downslope side of the blocks (see Fig. 1(b)), large tensile strain ranging between 20% and 60% can be observed. In this area, all the structures, rice pads and trees that had been there were translated about

350 m and failed to survive the earthquake. By contrast, in the area between the upstream and downstream rice pads including the original road, the tensile strain is relatively smaller than surrounding areas or even positive (compression). Meanwhile, in the downstream rice pad area, large tensile strain is observed, which is also confirmed by surficial observation that many crack openings were filled with sand ejecta, with orientations mostly normal to the flowslide direction appeared (Fig. 5(b)). These observations suggest that tensile deformation in the flowslide direction generally prevailed in the flowslide area. However, the area of some 100 m width along with the original main road kept its integrity even after the deformation (Fig. 3(g)), while flowslide displacement of the area was somewhat smaller than the surrounding area. This might be because houses in this area pumped up ground water, which increased in thickness of the unsaturated stiff surface.

In areas outside the flowslide, there also exist clear signs of liquefaction-induced lateral spreading. Fig. 3(j) shows concrete wall cracks with a 15 cm-opening, while the house behind tilted about two degrees, which are typical structural damage commonly presented in areas of liquefaction-induced lateral spreading in past earthquakes. Such evidential incidents were observed in many locations including all those surveyed wells shown in Fig. 2(a), indicating that foundation soil of wider area in Sibalaya indeed liquefied. Similar observations were reported for Petobo and Jono Oge (GEER, 2019; Kiyota et al., 2020; Hazarika et al., 2020). On the other hand, on the east of the irrigation channel, any noticeable indication of soil liquefaction was not found in the field survey and UAV photos, indicating that the irrigation channel affected the liquefaction occurrence. Meanwhile, based on the report by GEER (2019), the irrigation channel provided water for agricultural activities and was unlined until it reached the northern edge of the Petobo slide. The unlined channel allowed water to infiltrate downhill towards the river, which contributed to a higher groundwater table and deposit saturations, while increasing liquefaction potential during earthquake shaking.

In this study, AW3D digital elevation maps with a 0.5 m resolution were used to analyze the pre- and post-earthquake topography of the area, which was developed by the Remote Sensing Technology Center of Japan (2019), and the maps were constructed using satellite imageries acquired by Geo-Eye-1 and WorldView-1, -2, -3 and -4 (Remote Sensing Technology Center of Japan). A sufficient number of good quality imageries are important to obtain a high accuracy map. After several trials, 33 imageries taken from October 2010 to May 2018, were used to construct the map before while nine imageries from October 2018 to July 2019 to map after the earthquake. Fig. 6 (a)–(c) depict elevation and change in height along the flowslide main stream (section A–A'), which was almost perpendicular to most contours. In all figures of Fig. 6, locations of the irrigation channel are set at  $d = 1340$  m. The slope angle shown in Fig. 6(b) before the earthquake



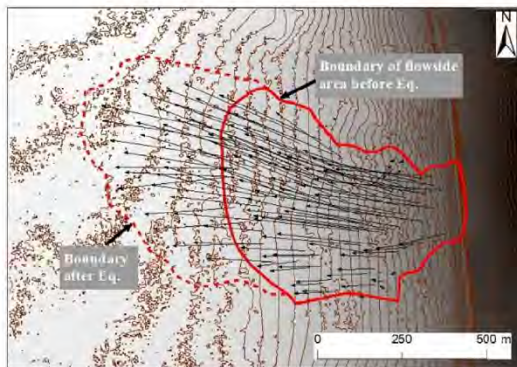
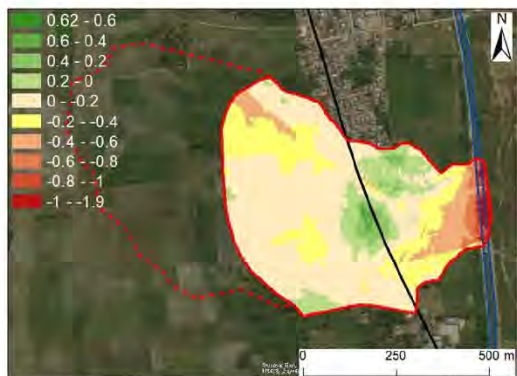


Fig. 4. Displacement vectors and contours before the earthquake.



(a) Normal strain in east-west direction  $\epsilon_x$



(b) Many significant cracks appeared in downslope area of the flowslide

Fig. 5. Contours of strain in east-west direction and aerial photo of downslope area.

was three degrees at around the irrigation channel and gradually decreased as going down the slope to approximately zero near the westernmost margin,  $d = 300$  m, where the flowslide finally reached. After the earthquake, the slope was particularly large at around  $d = 1250$  m corresponding to the side cliff of the large block created by

flooded water erosion and the adjacent soil flowslide. Change in height (subsidence) was large at the upstream side, decreased to zero at  $d = 800$  m, and turned into heaving until the flowslide margin ( $d = 300$  m), as indicated in Fig. 6(c).

Fig. 6(d)–(f) compare vertical sections of the main-stream (A-A') and the sub stream (B-B'), as well as two sections outside the flowslide area (C-C' and D-D'), in which all the sections were chosen to be parallel to each other. The topography of all these sections before the earthquake were quite similar although deformations were significantly different. Differences in conditions other than topography including soil stratification, mechanical properties of soil and ground water table, should be the reasons for the different deformations between the sections.

Fig. 7 represents change in height in the flowslide and surrounding areas. The area of the flowslide represented by the polygon in red in Fig. 4 is  $534,700 \text{ m}^2$ , consisting of  $339,200 \text{ m}^2$  subsiding area and  $195,500 \text{ m}^2$  heaving area. The total volume of subsidence and heaving are  $609,900 \text{ m}^3$  and  $745,900 \text{ m}^3$ , respectively. Consequently, the average subsidence over the entire flowslide is  $0.25 \text{ m}$ , while that of the area outside the flowslide is also estimated to be  $0.013 \text{ m}$ , with the subsidence in the area in the east of irrigation channel being generally very small.

#### 4. Identification of liquefied layers

To better understand the underlying mechanism of the extraordinary long distance flowslide, the liquefied layer detection is crucial, which most probably has triggered the event. One common geotechnical practice to identify the liquefied layer depth is to conduct penetration test. About one month after the earthquake, JICA (Japan International Cooperation Agency, 2019) excavated a boring hole to conduct standard penetration tests near the original main road. Sand layers contained gravels and had SPT-N values that are generally high enough to be judged non-liquefiable, high-accuracy liquefied layer identification was challenging. In addition to the triggering factor of the liquefaction, the consequence that the extremely large flow distance is another major subject of interest in this study. Liquefied layer might have been highly disturbed and mixed with immediately above and below soil layers during sliding. Therefore, we decided to excavate relatively large trenches in the flowslide area to expose soil layers including liquefied and non-liquefied layers. It was expected that direct observations on the trench walls helped us to identify the liquefied layer and to provide detailed insight into the mechanism of the unprecedented phenomenon. These trenches also allowed us to obtain soil samples from arbitrary layers for laboratory tests.

Totally seven trenches were excavated in the flowslide as indicated in Fig. 8. Tree trenches, #1 to #3, were excavated in the area where ground surface originally existed upstream side before is resting on the underlying original layers after the earthquake. In this area, shallower soil



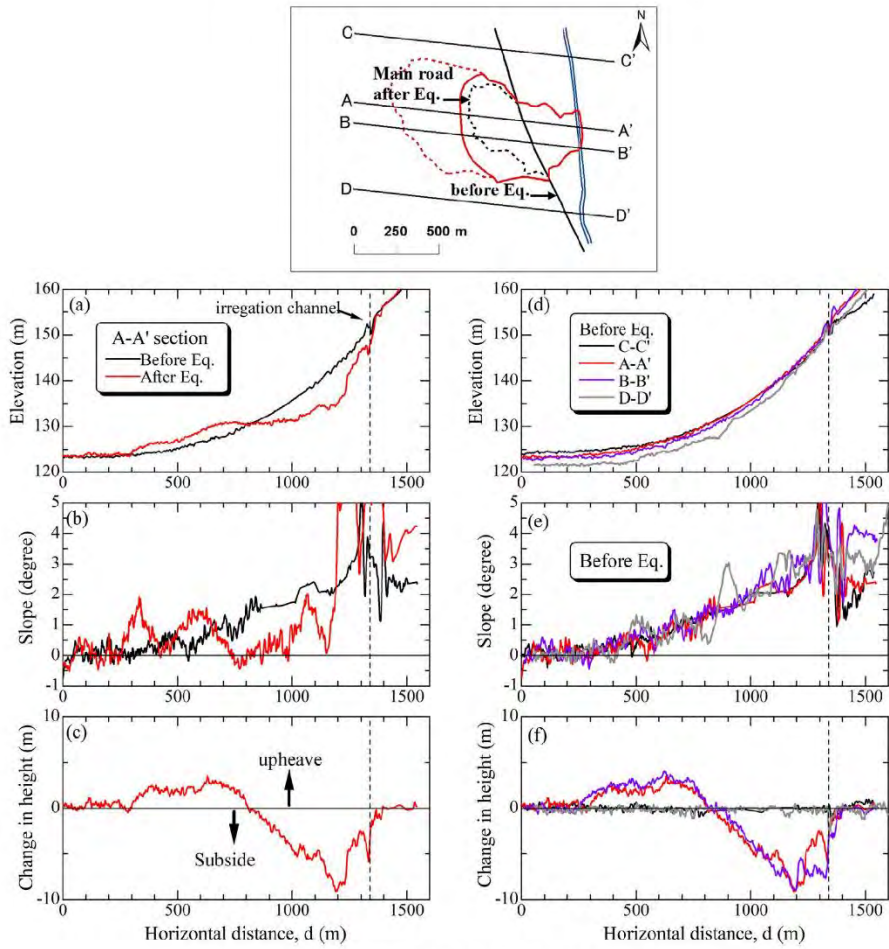


Fig. 6. Height of ground surface in sections parallel to the flowslide.

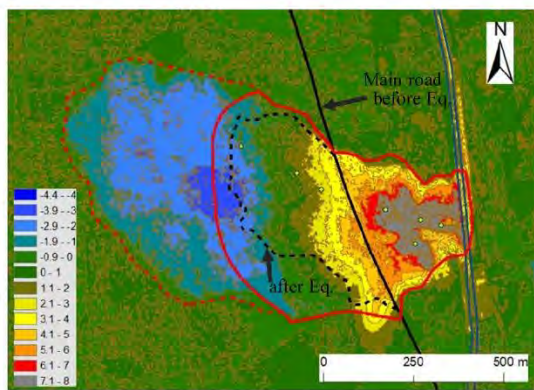


Fig. 7. Contours of change in elevation (in meter).

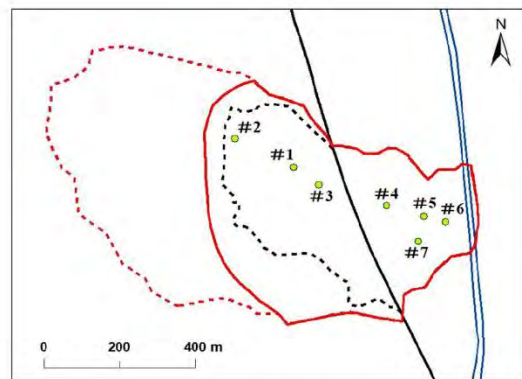


Fig. 8. Locations of excavated trench.

was expected to be highly disturbed and mixed with immediately above and below soil layers. Large trenches, with dimensions approximately being 20-m-long and 5-m-wide, were excavated more than 5 m deep until encountering a non-liquefied layer. While for the trench locations from #4 to #7, where most of the original shallower soil layers had left, eroded by the following flooding and flood sediments deposited on the surface, smaller trenches were excavated until a non-liquefied original soil layer was encountered. The observations of all the trenches are described below, with an exception of trench #7 of which location was apart from the mainstream of flowslide.

4.1. Trench #1

Fig. 9(a) shows an UAV photo of the trench #1, whose ground surface had been in the upstream rice pad, approximately 150 m downslope of the irrigation channel and 200 m upstream of the original main road. A 17-m-long and 5-m-wide area was excavated with the longitudinal axis parallel to the flowslide direction. White lines perpendicular to the flow direction are cracks filled with ejecta from liquefied layers formed by the tensile deformation (See Fig. 7). Meanwhile, smaller cracks parallel to the flow direction are also observed. Fig. 9(b) and (c) present the east and the south walls of the trench, respectively. Considering stability, all the walls of the trenches in this report were cut at a slope angle of 75-degree or less (approx-

mately 1H:3V slope). The east wall cut a crack while there exist ejecta at around the south-east corner. Fig. 9(d) illustrates sketches of the walls. The ground surface was covered with a paddy soil containing stalks and roots of rice overlaying a thin silt layer. These layers were mostly intact, but a difference was noted with respect to the south east corner of the trench. A gravelly sand layer underlying these surface layers was configured by several sand and sandy gravel layers of 10–30 cm thick, with a few thin silty sand layers with thicknesses of the order of ten cm sandwiched in between. The surface of this layer drooping towards the south-east corner suggests that this layer was liquefied and was squeezed near the corner. A thin stiff silty clay layer, which was separating two gravelly sand layers, was found to remain intact except for the corner. The lower gravelly sand layer was mostly uniform with only a few thin interlayers included near to its bottom. It has been observed in all the exposed walls that the typical configuration of non-liquefied gravelly sand layer was a stack of sand and sandy gravel layers every 10–30 cm thick, with thin silty sand layers having thicknesses of the order of ten centimeters sandwiched in between. This fact suggests that both the upper and lower gravelly sand layers liquefied, but due to the flowslide, only the lower gravelly sand layer highly sheared. Stratifications and thin interlayers in this layer were disappeared during long distance flow deformation. The sandy silt layer at the bottom of the trench contained thin interlayers of silt and fine sand (of

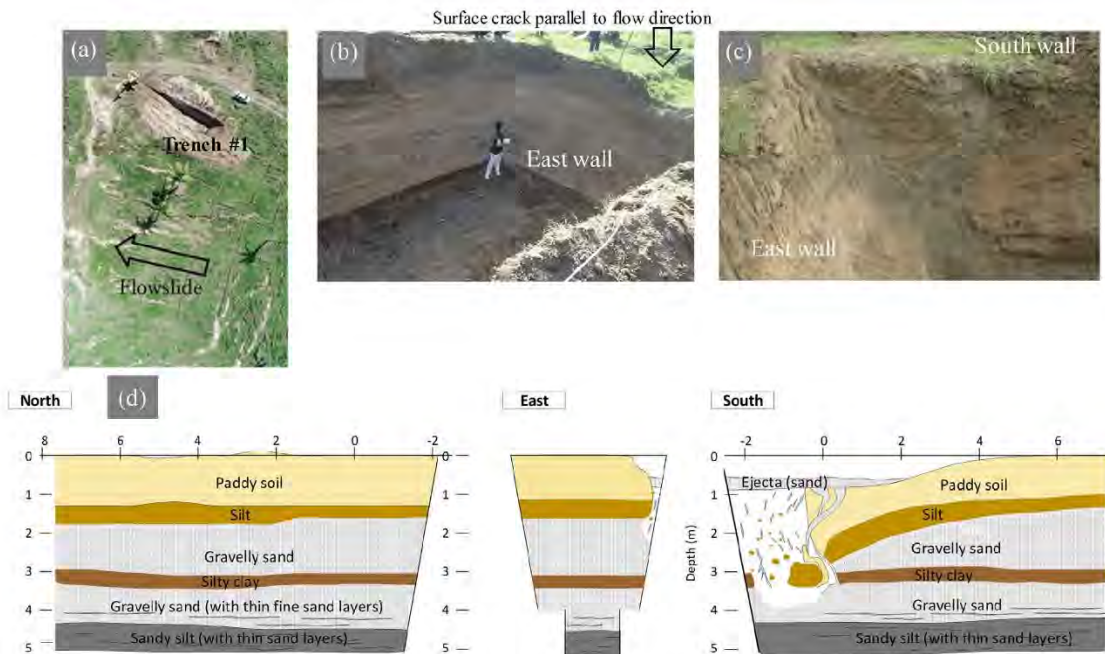


Fig. 9. Trench #1 and its walls. (a) Aerial photo (b) North and west walls in the trench (c) South-east corner in the trench (d) Sketches indicating stratification of soil layer exposed on the walls.



the order of one cm thick) with its surface being level and flat. Furthermore, the soil at the south-east corner is highly disturbed, a part of the silty clay layer was distorted and sand dikes extended from lower sandy gravel layer to the surface while many small fragments of fractured silt layer were contained.

#### 4.2. Trench #3

Fig. 10(a) shows an UAV photo of the trench #3 located at 80 m upstream from the trench #1. The ground surface had been the upstream rice pad, located approximately 70 m downslope of the irrigation channel. This trench had dimensions of 15-m-long and 5-m-wide, with the longitudinal axis parallel to the flowslide direction. Fig. 10(c) presents sketches of the north and the south walls, indicating that the overall figure of the soil stratification is similar to that of trench #1. There were three gravelly sand layers below the surface paddy soil separated by thin silt layers. The gravelly sand layer at the greatest depth was largely uniform and did not have any laminar and interlayers, while the other two gravelly sand layers at shallower depths had. Moreover, the silt and fine sand layer at a depth from 3.5 m and 4 m from the surface seemed intact. Thus, it can

be claimed that the liquefied and largely deformed layer is the lower gravelly sand layer.

It should be noted in the north wall sketch that a part of the shallower layers fell into the underlying lower gravelly sand layer, which is a typical deformation pattern that can be observed in the trap-door-experiment (e.g. Stone and Wood, 1992). The soil mass clearly defined by the two conjugate slip surfaces behaved as a block, suggesting that the upper and middle gravelly sand layer did not liquefy. The block located immediately below the white band appeared on the ground surface (Fig. 10(a)), which is described as a tensile crack filled with ejecta.

#### 4.3. Trench #2

Fig. 11(a) illustrates an UAV photo of the trench #2, which was located at 175 m downstream from the trench #1. The surface of the ground had been a soccer field, 20 m upslope from the original main road. This was the largest trench with dimensions of 20-m-long and 5-m-wide while the longitudinal axis approximately normal to the flowslide direction. It can be seen in Fig. 11(b) that a slip line (shear zone) passed through and divided this area into two blocks. Referring a house and a torn-off fence shown

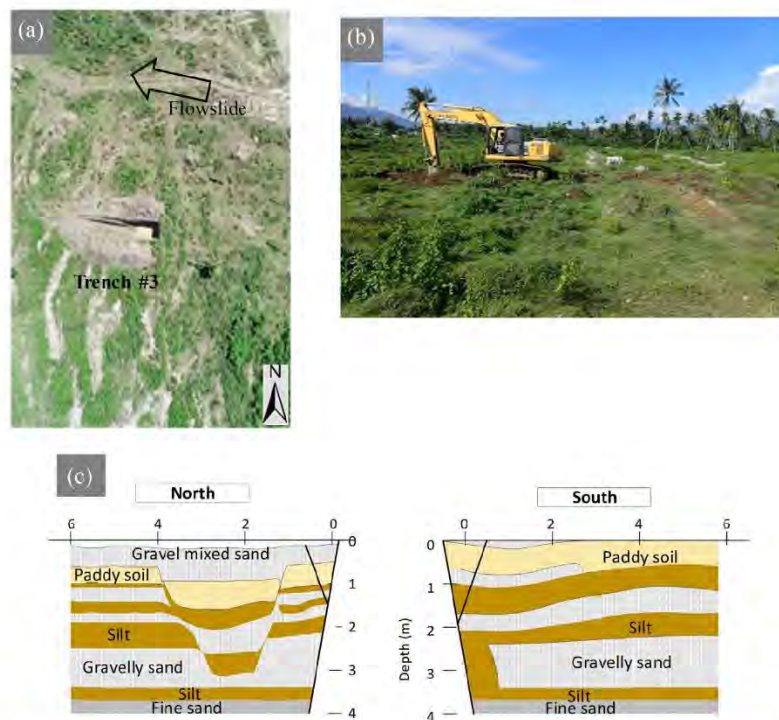


Fig. 10. Trench #3. (a) Aerial photo (b) Site of the trench just before the excavation initiated (c) Sketches indicating stratification of soil layer exposed on the walls.

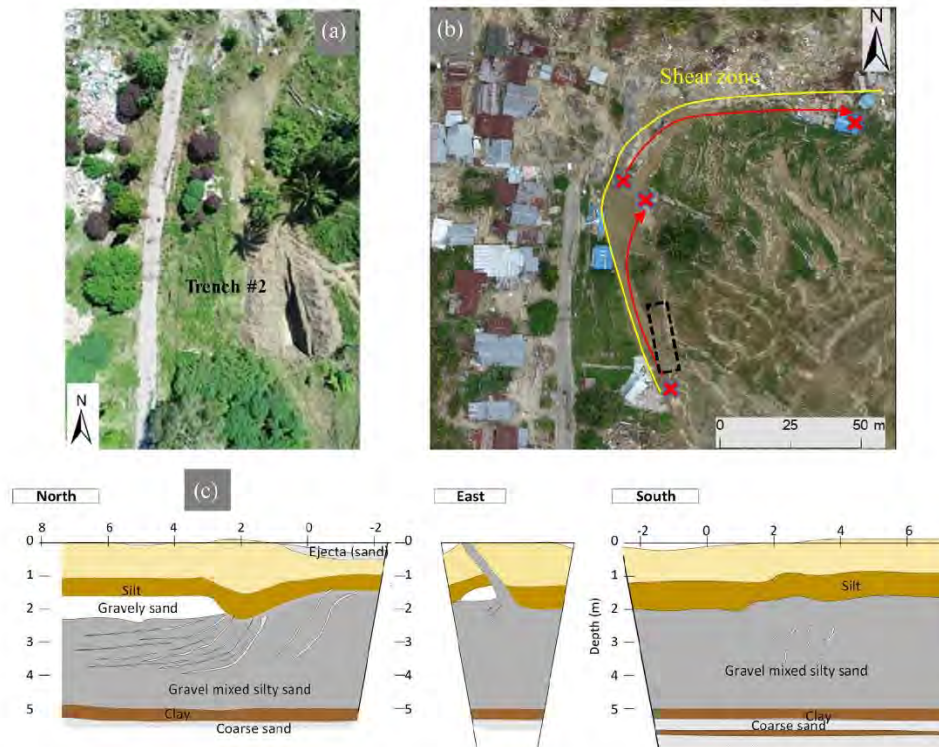


Fig. 11. Trench #2. (a) Aerial photo of the trench #2 (b) Orthophotomap of the wider area around the trench after the earthquake (c) Sketches indicating stratification of soil layer exposed on the walls.

by red crosses in the figure, the movement of the east side block relative to the west side block is estimated to be 55 m. The trench #2 was excavated on the shear zone between the two blocks. Fig. 11(c) demonstrates sketches of the north, east and south walls. A surface layer with silt layer underneath was similar to those in the trenches #1 and #3, while with a difference that a single thick sandy gravel layer was found below the surface layers, which was highly disturbed with apparently higher fines content in contrast to the trenches #1 and #3. Many clay fragments and dikes of clean fine sand with several centimeters width randomly existed, indicating that the layer was highly disturbed. It can be assumed that this layer was consisted of multiple sandy gravel layers, which were separated with thin silt layers but mixed altogether due to the extremely large shear deformation during the flow sliding. Thin interlayers of silt or fine sand remained only in a clay and a coarse sand layers at the bottom of the trench.

#### 4.4. Trench #4

Trenches #4 to #7 were excavated at upstream side in the flowslide and in the inundation flow path. Soil stratifications appeared on the trench walls were much simpler as

compared to those in the downstream trenches. Fig. 12 shows a photo and a sketch of trench #4. At the ground surface, clean uniform coarse sand loosely deposited to the depth of 1.7 m. The color and grain size distribution of the sand were different from any layers in the downstream trenches #1, #2 and #3. In this layer, a relatively new plastic bag and garbage were found, indicating that it was a fluvial deposit brought by the flooding water from the irrigation channel. From 1.7 to 3 m below the ground surface, there was a highly disturbed layer without any thin interlayers included, whose soil was gravely sand with many small clay and silt fragments being heterogeneously mixed, and was most likely liquefied and highly sheared as the overlying surface layers slid downslope. A silt layer at 3 m deep observed as undisturbed, which contained thin interlayers of fine sand remained (several mm in thick).

#### 4.5. Trench #5

Although trench #5 located only 30 m upstream from #4, the width of the inundation flow path at this location was approximately 2.5 times narrower than that at #4, suggesting that flow rate of the flooding water was considerably higher than #4. Fig. 13 indicates photos and a



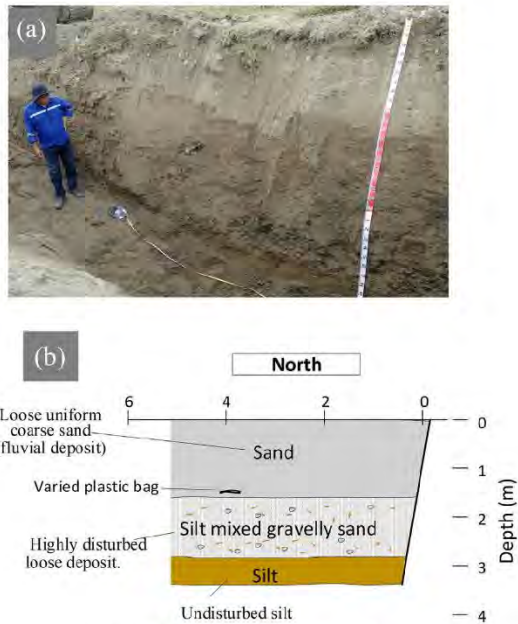


Fig. 12. Photo and sketch of trench #4.

sketch of the trench. The trench was excavated with the longitudinal direction parallel to the flow path. Clean uniform coarse sand, which is considered to be fluvial sand loosely deposited, and an undisturbed silt layer were appeared at a depth of 2 m. A possible scenario of deposit formations at trenches #4 and #5 is that the gravelly sand layers liquefied during the earthquake, while the overlying soils slid down to the slope and liquefied layer been exposed. During the flooding event triggered by the irrigation channel failure, the liquefied gravelly sand was fully flushed by the flooding water at #5, but only the surface of the liquefied sand was eroded at #4 because flooding water spread out and flow rate decreased at #4. Thereafter, the flow rate has slowed down and uniform coarse sand loosely deposited on the surface at both #4 and #5.

4.6. Trench #6

Trench #6 was excavated at 105 m upstream from #5 and 120 m downstream from the irrigation channel on the side of a cliff of one of the large soil blocks and at the flow path edge. Fig. 14 depicts photos of the trench and sketches of the walls. The cliff of the block was 5 m high from the flow path bed and consisted of layers of gravelly sand, silt and silty clay, with all of their thicknesses in a range 10–80 cm. The west wall (Fig. 14(b)) is the cliff of the block. It is reasonable to consider that the gravelly sand layer below the silty clay layer liquefied and sheared, while the overlying soil block slid down approximately 30 m. Soil mass originally existed slid approximately 350 m down to



Fig. 13. Photos and sketch of trench #5.

the slope, which highly disturbed the gravelly sand layer in the south and north wall. The fluvial coarse sand was deposited at the surface while its depth increasing with respect to increase in distance from the cliff.

Ground water was not encountered in all the trenches, which is consistent to the observation that water table in the wells dropped 12 m after the earthquake.

5. Flowslide mechanism

Fig. 15 depicts the cross-section A-A' along with the main stream of the flowslide passing through most trenches excavated in this study, together with depths of identified liquefied layers in each trench. The broken line represents a possible slip surface or a shear zone, along which large

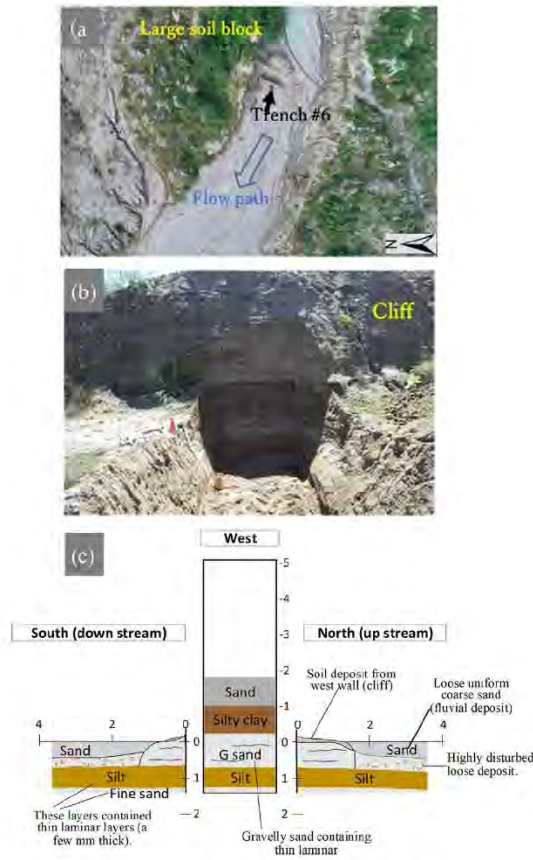


Fig. 14. Photos and sketch of trench #6.

shear deformation is considered to have occurred, and soils above the line slid downslope while that underneath remained.

The flowslide is the consequence of the shear resistance of the zone degrading significantly or being completely lost against the sliding deformation. A soil mass in the flowslide

near the westernmost region, which was indicated by the shaded zone in the figure, was chosen as an example. The shear resistance mobilized along the base of the mass,  $\tau_r$ , can be estimated simply based on the energy conservation as follows:

$$\tau_r = \frac{M_s g}{l \cdot L} \Delta S \approx 2 \text{ kPa} \quad (1)$$

where  $M_s$  and  $l$  denote the mass and base length of the soil mass, respectively,  $L$  is flowslide distance,  $g$  is the gravitational acceleration, and  $\Delta S$  is change in height of the gravity center of the mass. It is noteworthy that the earth thrust acting on the right-hand side boundary of the soil block was regarded as negligible because the boundary height was much smaller than the base length  $L$ . Several tensile cracks appeared on the ground surface and tensile strains in this area, as shown in Fig. 5, also supports the premise of Eq. (1), that the thrust was not significant as a driving force. In Eq. (1), energy consumption along with several cracks in the soil mass was neglected for simplicity. The estimated  $\tau_r$  can be even smaller if the internal energy dissipation along the cracks is considered; thus, the  $\tau_r$  is the upper bound of the shear resistance. It can be claimed that the shear resistance mobilized on the mass base was 2 kPa or less.

A hypothesis previously presented by Field et al. (1982), Fiegel and Kutter (1994) and Kokusho (1999) to explain the large ground deformation is the formation of water interlayers. In this hypothesis, a water interlayer with practically zero shear strength was formed shortly after shaking which is covered by an overlying less permeable layer. They conducted centrifuge and 1 g shaking table tests to demonstrate the occurrence of delayed ground deformation after shaking, while the soil above the water interlayer slid downslope. This is quite similar to the Sibalaya case in the deformation timing, where the ground started to flow after the earthquake shaking ceased; this was eye-witnessed by multiple residents. In contrast, several potential arguments exist against this hypothesis as follows:

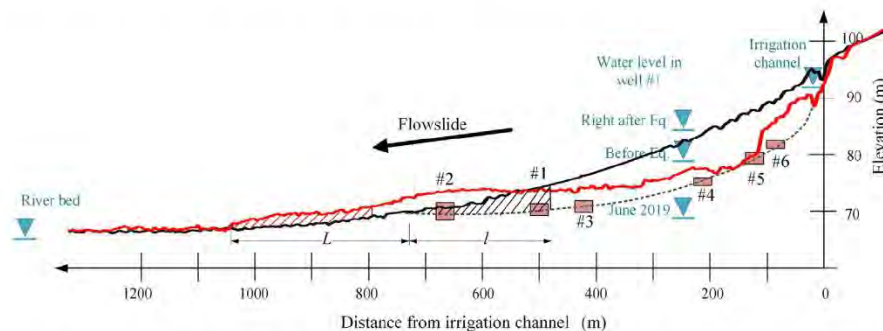


Fig. 15. Cross section of A-A section before and after the earthquake together with highly sheared depths detected in trenches.



- For a soil mass to slide on a water interlayer, the layer should incline even though the shear strength is completely lost in the layer and the ground surface is inclined. The liquefied and highly sheared layer identified in trench #1, #2 and #3 were at almost the same elevation and presumed slip surface, or a water interlayer is practically level.
- The water interlayer should be smooth and continuous over the flowslide area. However, as shown in Fig. 10, the soil blocks dropped into the liquefied layer were present, which made the water interlayer discontinuous and obstructed the soil sliding deformation above the layer as *shear keys*, as illustrated in Fig. 16. The existence of many similar tensile cracks suggested the existence of similar shear key blocks.
- In the trenches it was observed that gravelly sand layers, which were verified to have been liquefied, contained many small silt fragments, while seam layers may have disappeared. This fact suggests that the layers were highly sheared, which could be impossible if shallower layers slid down on the water interlayer without any disturbance of the underlying liquefied layer.

Therefore, the Sibalaya flowslide cannot be fully explained by the hypothesis of the water interlayer alone.

Another possible explanation for the main cause of the flowslide is attributable to the mechanical property of the liquefied soil. If the sand is highly contractive and demonstrated a typical flow type response with a peak strength followed by zero residual strength, an infinitely large strain could be generated. Based on the results of undrained shear tests, Kokusho (2015) claimed that clean sand always exhibits a dilative response and flow-type failure is less likely to occur. However, the presence of low/non-plastic fines mixed with clean sands changes the volume change characteristics significantly. Kokusho conducted undrained monotonic torsional shear tests on loose sand specimens with parametrically increasing non-plastic fines. The soil response changed from dilative to contractive as the fines content increased, and sand with 20% fines exhibited perfect flow with almost zero residual strength. Fig. 17 indicates the grain size distribution of soil obtained from a gravelly sand layer in trench #1, where the sand contained

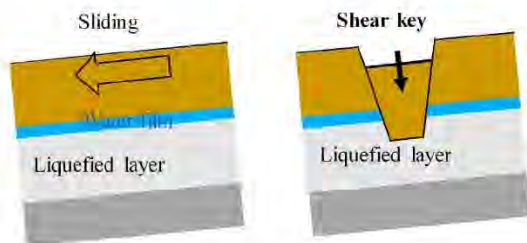


Fig. 16. Schematic illustrations of shear key effects of a part of sliding soil block submerged into an underlying liquefied layer.

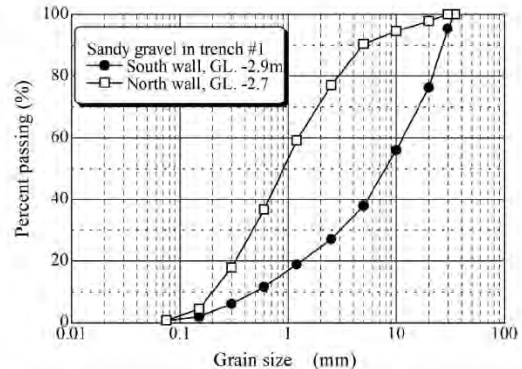


Fig. 17. Grain size distribution of soils obtained from highly sheared layer in trench #1.

small amount of silt as well as gravel. The fines in the soil was confirmed with laboratory testing to be non-plastic.

## 6. Summary

In this study, to better understand the fundamental mechanisms, extensive site investigations were conducted at Sibalaya, where an extraordinary long distance flowslide occurred during the 2018 Sulawesi Earthquake. Valuable verbal evidences were collected from many interviewees regarding time sequence of the event. In situ tests including the excavation of eight large trenches were greatly helpful in identifying the liquefied and largely sheared layers. Analysis of topography change using satellite images and UAV photos were also invaluable in obtaining an overview of the event. The following major findings were drawn:

- The sequence of events including the main shaking followed by a sudden drop, initiation timing of the massive ground flow and extremely loud sound, flooding, as well as the water level change in a well were confirmed.
- Water leakage from the unlined irrigation channel is regarded to have risen the ground water level in this area, thereby increasing the liquefaction potential.
- Soil in both the inside and outside the flowslide affected area was liquefied, except for that in the area east to the irrigation channel.
- Along with a main stream of the flowslide, tensile deformation prevailed in the ground surface with an exception in the area around the main road.
- Investigating the mechanism of the long distance flowslide is still ongoing. Shear resistance mobilized on the base of flowslide soil mass was roughly estimated to be 2 kPa or less. Although the water interlayer may contributed to some extent, the Sibalaya flowslide cannot be fully explained by the hypothesis of the water interlayer alone.

- Continued large shear deformation of the liquefied sand layer was indicated, which is not a common behavior of sand. This could be possible only if the almost zero-residual strength of the sand was reached and persisted while the sand experienced an extremely large strain. Further study on the mechanical properties of sand in flowslide areas is necessary.

### Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the members of the JICA Domestic Technical Support Committee, in particular, Prof. Kenji Ishihara, Prof. Takaji Kokusho, Prof. Susumu Yasuda, Prof. Ikuo Towhata, Dr. Takashi Kiyota, Prof. Hemanta Hazarika and Dr. Kimio Takeya, for their valuable comments and suggestions. This work was partly supported by the Ehime University President Special Research grant.

### References

- Bartlett, S.F., Youd, T.L., 1995. Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread. *J. Geotech. Eng. ASCE* 121 (4), 316–329.
- Esri, Inc., 2019. <<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>> (accessed 01.10.2019).
- Fiegel, G.L., Kutter, B.L., 1994. Liquefaction mechanism for layered soils. *J. Geotech. Eng. ASCE* 120 (4), 737–755.
- Field, M.E., Gardner, J.V., Jennings, A.E., Edwards, B.D., 1982. Earthquake-induced sediment failures on a 0.25° slope, Klamath River delta, California. *Geology* 10, 542–546.
- GEER (Geotechnical Extreme Events Reconnaissance), 2019. The 28 September 2018 M7.5 Palu-Donggala, Indonesia Earthquake, Version 1.0. <[http://learningfromearthquakes.org/2018-09-28-palu-indonesia/images/2018\\_09\\_28\\_palu\\_indonesia/pdfs/GEER\\_Palu\\_Version\\_1.pdf](http://learningfromearthquakes.org/2018-09-28-palu-indonesia/images/2018_09_28_palu_indonesia/pdfs/GEER_Palu_Version_1.pdf)> (accessed 30.09.2019).
- JICA, 2019. JICA Domestic Technical Support Committee Meeting
- Kiyota, Takashi, Furuichi, Hisashi, Hidayat, Risqi Faris, Tada, Naoto, Nawir, Hasbullah, 2020. Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia. *Soils Found.* 60 (3), 722–735 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038080620336209>. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.03.015>.
- Kokusho, T., 1999. Formation of water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE* 125 (10), 817–826.
- Kokusho, T., 2015. Liquefaction Research by Laboratory Tests versus In Situ Behavior. In: Proc. 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand, pp. 786–819.
- Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R., Emoto, K., 1986. Observation of permanent ground displacements induced by soil liquefaction. *Peox. Jpn. Soc. Civ. Eng.* 376/III-6, 211–220 (in Japanese).
- Hazarika, H., Pasha, S.M.K., Pohit, D., Masyhur, I., Arsyad, A., Nurdin K., 2020. Large distance flowslide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia. *Soils and Found. Japanese Geotech. Soc.* (Submitted).
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11 (2), 167–194.
- Remote Sensing Technology center of Japan. <https://www.aw3d.jp/en/about/> (accessed 12.08.2019).
- Stone, K.J.L., Wood, D.M., 1992. Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand. *Soils Found. Japanese Geotech. Soc.* 32 (4), 43–57.
- Youd, T.L., Hansen, C.M., Bartlett, S.F., 2002. Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE* 128 (12), 1007–1017.



## 8-7 東畑委員の提供論文 補足 地震前後に観測される地下水異常について

Nalodo のように土塊が緩斜面を長距離流動した現象は、動画で見る限り、その運動が著しく滑らかで滑走と呼んでもよい。このような滑走を可能にするためには、相当量の水が下層から供給され、基盤の地層と流動する表層との間の摩擦を消滅させるほどであった、と考えられる。現在までのところ、この水の供給源をはっきり特定するに至っていないが、液状化層からの排水、扇状地被圧地下水層からの噴出、そして断層あるいは地球地殻からの噴出が考えられてきた。過去に Palu 周辺で発生した地震では、Nalodo 的な地盤流動は人々の記憶に残っていない。しかし 1968 年と 2005 年の地震で温泉が生じたことは Palu 博物館の展示にも明示されており、2018 年にも同様のことが起こった。このような温泉出現に代表される地下水異常と地震との関係について、以下に補足してみたい。

文献調査から得られる温泉と地下水の異常現象には、表 8-5 のようなものがある。ただしこれがすべてではなく、特に地下水位の上昇や下降は、多くの地震で報告例がある。表 8-5 のように、大地震に際して地下水の異常は珍しくなく、これを地震予知に利用する試みも行われてきた。また松代群発地震や海原地震のレス斜面のように、地下水位の上昇が斜面を決定的に不安定化したと思われる例も存在する。したがって、Palu の南方で温泉が出現したこと、Nalodo 跡地にも温かい水が噴出したことは決して前例のない現象ではなく、災害原因の可能性に関係があるかもしれない現象として、留意すべきである。

2018 年の Palu の地震で、震動中・震動直後に水が噴出したことは、深部の断層からの水の噴出としては早すぎるのではないかと、との感想があるかもしれない。しかしこれは見方を変えると、発震時には、断層の中で深部から地表近くまで、もう高い水圧が浸透済みであった、そのような危険な状態が生じたからこそ地震が起きた、との見方もありうる。ただし Palu 湾北部の震源から断層南端まで 100 キロ以上にわたって水圧が行きわたっていたのか、という疑問はあると思う。

表 8-5 地震に伴う地下水異常の事例

| 番号 | 地震と地点                       | 状況  | 出典  |
|----|-----------------------------|---|---|
| 1  | 南海地震と道後温泉の湧出停止と再開；数か月単位の減少  | 684 年白鳳地震、1707 年宝永地震、1854 年安政南海地震、1946 年南海地震が確実視  | 高橋治郎 (2014)地震と道後温泉、愛媛大学教育学部紀要 61: 83-86.                        |
| 2  | 北丹後地震直後から丹後半島で温泉湧出開始        | 北丹後地震 1927 Mw=7.0 記述から判断すると、小さな湧出が数十か所に生じたようである。  | 渡邊久吉、佐藤戈止さとうほこと (1928) 丹後地震と其地変 (其三), 地学雑誌 11:662-668.          |
| 3  | 箱根の温泉湧出と地震                  | 1994 年の微弱な地震 (M=4.8 現地の震度 4) に続き、箱根湯本温泉の温度が 10-20 度 C 程度上昇  | 大山正雄、棚田俊収、伊東博 (1999) 箱根の地震による温泉湧出の変化、神奈川県温泉地学研究所報告 29(1):65-70. |
| 4  | 関東地震で熱海の間欠泉が活発化             | 地震で突如噴出回数が増え (毎時 1 回程度)、1 年を費やして衰弱した。近隣の伊豆や相模では地下水位上昇と低下が分布し、これは地震前と地震発生時の地殻応力の状態 (圧縮場と伸張場) に対応する、とされた。 | 川辺岩夫 (1991) 地震に伴う地下水・地球化学現象、地震第 2 輯, 44 巻特集号: 341-364.          |
| 5  | 華北の 3 地震に先立ち地下水位昇降 (図 8-87) | 水位の昇降が応力場と整合する 4 象限分布   | 川辺 (1991) が引用、原典は調学才 (1982) 我国大震前地下水異常特征及其物理机制、地震地質, 4: 35-     |

|    |   |  |   |
|----|---|--|---|
|    |   |  | 49.   |
| 6  | 1995年兵庫県南部地震後の淡路島の地下水湧出                     | 地震後6か月目からのデータ<br>毎秒1リットル以下の湧出増加  | 徳永英二,山本博,鈴木啓助(1996)<br>兵庫県南部地震により湧出した<br>淡路島の地下水, 地学雑誌<br>105(4): 526-531.  |
| 7  | 1995年兵庫県南部地震、六甲山北鹿の観測坑道で湧水増加                | 地震前は0.65リットル毎秒程度、地震後に6.5リットル毎秒となり、一週間続いた。  | 藤森邦夫,山本剛靖,大塚成昭,石井紘(1995) 六甲高雄観測室における地殻変動と地下水の観測-1995年兵庫県南部地震に関連した変化-,京都大学防災研究所年報 38(B-1): 287-296.  |
| 8  | 松代群発地震                                      | 深部から上昇してきた地下水によって誘発された群発地震であり、湧水も大量であった。牧内はじめ3か所で斜面崩壊を起こした。報告書本文参照。  |   |
| 9  | 1920年中国海原地震、レス斜面の地震崩壊                       | M=8程度の大地震に先立ち数日前に、井戸水の水位が15m程度上昇した。  | 王兰民(2020)黄土地层大规模地震液化滑移的机理与风险评估岩土工程学报 42:11-19 が引用。原典：国家地震局兰州地震研究所,宁夏回族自治区地震队(1980) 1920年海原大地震,北京:地震出版(图8-88).   |
| 10 | 1959年 Hebgen Lake 地震 Mw=7.2 の後、地下水噴出        | Waag (1985) : 大量の水の噴出<br>Swenson (1965) : 気温より暖かい水噴出<br>Wood (1985) : 地震後、時間経過して湧水。震央から30km離れたLupine Lakeで起きた20万立方メートルの泥流は増加した湧水が原因で、地震後二日経過してから発生。Clayton 銀鉱山では、地震の3時間後に大量の湧水 | Waag CJ (1985) USGS Open-File Report 85-290, pp. 593-611.<br>Swenson FA (1964) USGS Professional Paper 435-K, The Hebgen Lake, Montana, earthquake of August 17, 1959, pp. 159-165.<br>Wood SH (1985) USGS Open-File Report, 85-290, pp. 573-592. |
| 11 | 1983年 Borah Peak 地震 Mw=6.9                  | 湧水の起きたのは地震後数時間から数日後  | Witkind et al., (1962) Bulletin of the Seismological Society of America, 52(2): 163-180.<br>Wood & Steedman, (1992) 10WCEE 3: 1337-1341.  |
| 12 | 1909年にPaluの南方(Sibalayaより南方)で発生した地震で新しい温泉が湧出 | Gempa bumi ini memunculkan banyak mataair panas baru: この地震は多くの新しい温泉を生み出した。   | Mudrik R. Daryono (2016) Paleoseismology Tropis Indonesia (dengan Studi Kasus di Sesar Sumatra, Sesar Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang) Disertasi Program Doktor. Institut Teknologi Bandung (バンドン工科大学博士論文) IV. 7. 4 節.                         |

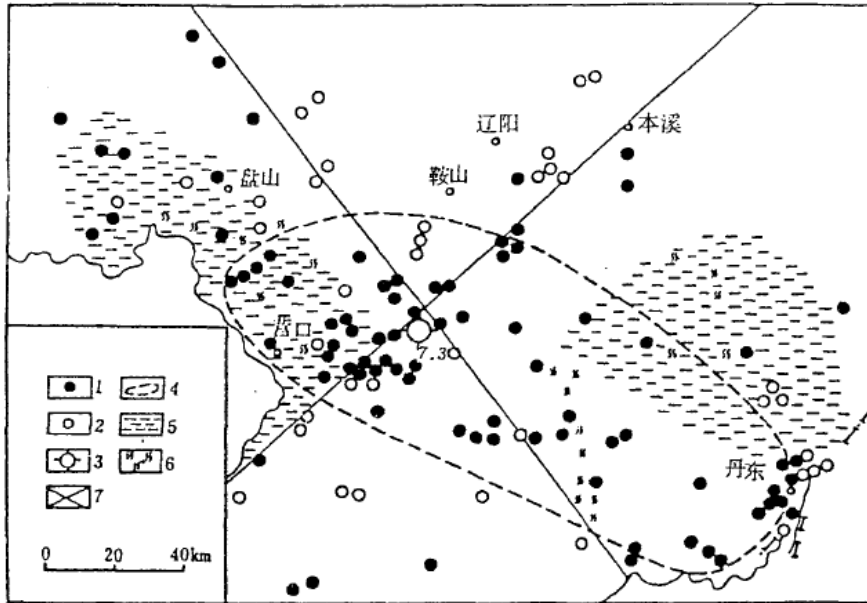
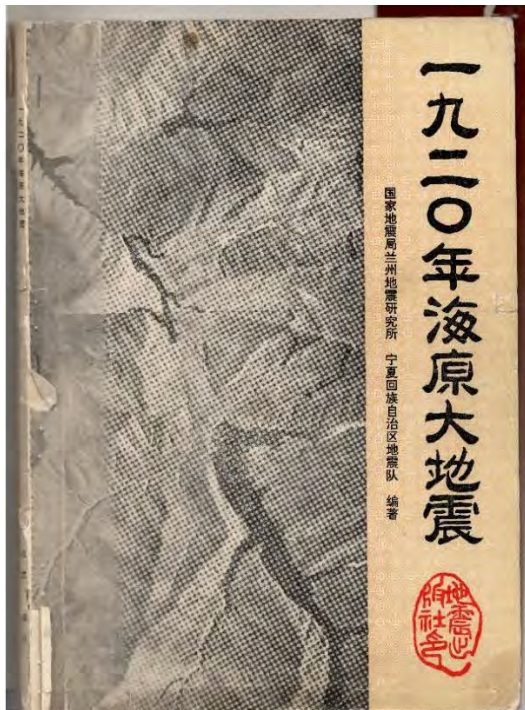


図 8-87 中国における 1975 年海城地震 (M=7.3) に先立つ地下水変動四象限分布(1: 地下水上昇、2: 低下、3: 震央、4: 地下水位上昇地域、5: 霧発生、6: 臭気発生、7: 象限境界 (川辺(1991)による加筆、原典は洞学才(1982) 我国大震前地下水異常特征及其物理机制、地震地質, 4: 35-49)



1. 海原大地震の前兆異常

海原大地震の前兆異常現象是十分丰富和显著的，其异常的范围非常广泛，种类也极为繁多。这些前兆异常现象表现于各个方面，其中最突出的有地下水、动物、地声、地光、气象等一些方面。

(1) 震前地下水位的变化

关于海原大震之前地下水位的变化情况，谢家荣等在1921年考察时就已发现，他们曾提及，位于极震区的隆德县“大震前，井水忽涨，震后复原”<sup>(\*)</sup>，该县的“中区、南区于大地震前数点钟，井水曾涨数尺或一丈不等”。由于当时对地震前兆尚没有什么认识，因而对震前地下水位的变化也不能理解。谢家荣等人对了解到的事实半信半疑，在报告中说：“是否确实，或纯系附会，亦颇难断定。”但是他们“登报列之，以备将来之研究”。现在看来，尽管当时他们还未认识，却为我们提供了海原大震前地下水变化的可贵资料。

实际上，海原大震时，还有不少有关地下水变化的记载，而且有人已经初步认识到这是地震的前兆表现。如固原县志记载道：“向居平原之人，家有井绳十丈，震前忽强半而能汲水，人以为水旺，其实地震之预兆也。”1961年，固原地区政协主席夏禹勳先生也来信反映，“固原县杨郎镇东面有一淤池，1920年大震前，池内水溢出池外”。

以上几例震前地下水位的变化都发生在极震区的东端，极震区西部也有类似的情况。1956年，康哲民同志在靖远县考察时曾访问到，该县哈思山区三角城银子村有口深约4米的水井，海原大震前几天，井水突然溢到井口，且泛起白沫，地震后水位复原，白沫也随之消失。

可见，海原大震之前，极震区内的地下水位有明显的变化，而且变化范围广、幅度大，从极震区东端的固原、隆德到极震区西部的靖远，都能见到这种现象。地下水位的变化之所以能引起人们的注意，首先是因为变化突然，而且幅度很大，在西北干旱缺水的地区，极易引起人们的注意。其次，水位大幅度上升的时节正值冬季，按正常的地下水位动态变化，水位本应逐渐下降，然而当时却一反常态，水位大幅度上升，这就必然给人们以深刻的印象。

由此可以看出海原大地震之前地下水位的异常特征，一是水位以上升为主，而且上升幅度剧烈；二是已知的水位变化地点处在极震区内和其两端。据估计，地下水位上升的范围决

\* 据谢家荣“民国九年十二月甘肃地震报告”。

-61-

図 8-88 1920 年中国海原地震に先行して井戸の水位が上昇したとの聞き取り調査結果 (国家地震局兰州地震研究所宁夏回族自治区地震队;王蘭民教授提供、赤い下線も同教授による)

その他

Danny Hilman Natawidjaja, Mudrik R. Daryono et al. (2021) The 2018 Mw7.5 Palu ‘supershear’ earthquake ruptures geological fault’s multisegment separated by large bends: results from integrating field measurements, LiDAR, swath bathymetry and seismic-reflection data, Geophysical Journal International,

224(2): 985-1002.

Palu 南方の谷 (Jono Oge など Nalodo が発生した地域) には正断層が埋没しており、更新世に滑動したものは考えられるが、完新世に入ってから、ズレの跡が見られない、との記述がある。しかし、その根拠となるデータは示されていない。トレンチ掘削によって断層の延長となる地表付近で水の噴出跡が発見されれば、と思おうが、そのような情報は無い。

図 8-89 は、Paku-Koro 断層陸上部の概要図である。河谷の南端に来ると、それまで谷の西縁を走っていた断層が東へ乗り移っている。断層は左横ずれなので、乗り移り部の北側は、断層のずれに際して南北方向に圧縮される。これは地殻の水が急速に排出される可能性につながっている。ただしここから Nalodo の現場までは距離が 30km 程度あり、どこまで影響があるかは定かではない。またこの乗り移り部の近傍では Nalodo が起こらなかったことは、不可解である。

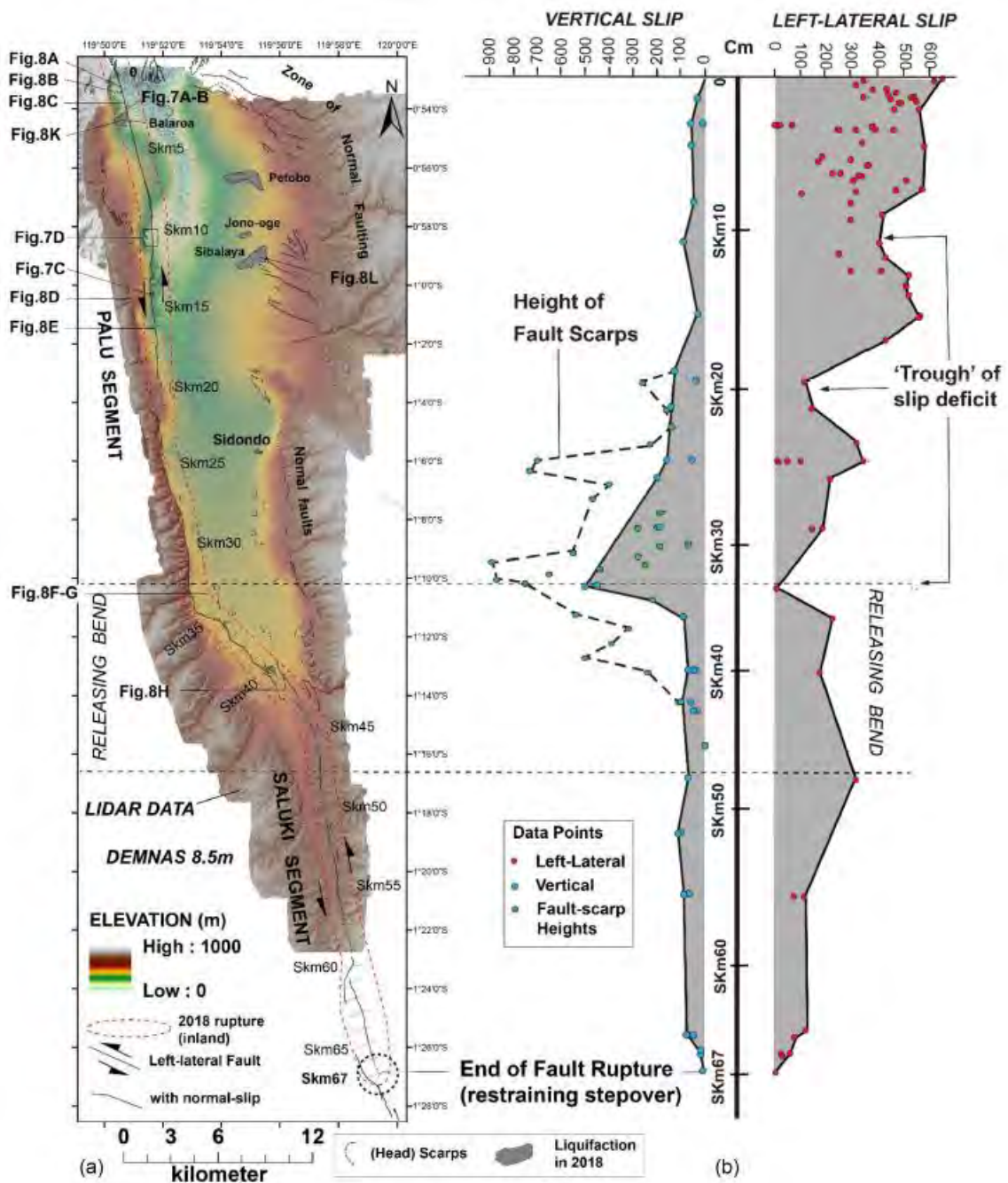


図 8-89 Palu 河谷南方の Palu-Koro 断層位置図 (Natawidjaja et al., 2021)



ARTICLE IN PRESS

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Soils and Foundations xxx (xxxx) xxx.

[www.elsevier.com/locate/sandf](http://www.elsevier.com/locate/sandf)

Geo-Disaster Report

## Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia

Hemanta Hazarika<sup>a,\*</sup>, Divyesh Rohit<sup>a</sup>, Siavash Manafi Khajeh Pasha<sup>b</sup>, Tsubasa Maeda<sup>a</sup>  
Irsyam Masyhur<sup>c</sup>, Ardy Arsyad<sup>d</sup>, Sukiman Nurdin<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan

<sup>b</sup> IMAGEi Consultant, Tokyo, Japan

<sup>c</sup> Faculty of Civil and Environmental Engineering, Bandung Institute of Technology, Bandung, Indonesia

<sup>d</sup> Department of Civil Engineering, Hasanuddin University, South Sulawesi, Indonesia

<sup>e</sup> Department of Civil Engineering, Tadulako University, Central Sulawesi, Indonesia

Received 27 January 2020; received in revised form 23 September 2020; accepted 8 October 2020

### Abstract

There was a shallow earthquake in the Central Sulawesi province of Sulawesi island of Indonesia with a moment magnitude ( $M_w$ ) 7.5 on 28th September 2018 at 18:02:44 local time. The event was preceded by major foreshocks and followed by aftershocks of significant magnitude. The epicenter of the main shock was in the Donggala regency of Minahasa peninsula of Central Sulawesi, approximately 70 km from the provincial capital of Palu. The earthquake was caused by the tectonic movement of the left lateral Palu- Koro fault within the Molucca Sea microplate, triggering major geotechnical failure and structural damage in Palu city and Sigi regency. Thousands of people died or are still unaccounted for, and countless others were injured. Balaroa, Petobo, Jono-Oge and Sibalaya were the worst hit mainly due to large-scale flow-slides and mud flows. It was the first time that such large-scale flow failures were triggered by an earthquake, and that the failure of very gentle sloping ground swept away whole localities. The objective of this research was to provide insight into the scale of ground failure and other infrastructural damage caused by the event, especially in Jono-Oge area, where the flow distance was longest. The authors performed preliminary and detailed surveys in the area twice by conducting Portable Dynamics Cone Penetration Test (PDCPT), collecting disturbed and undisturbed samples and using aerial drone (UAV) photography. The findings of the reconnaissance survey are described here along with subsequent data interpretation. Finally, the mechanism of the flow-slides is discussed.

© 2020 Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of The Japanese Geotechnical Society. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

**Keywords:** Flow-slide; Large distance flow; Liquefaction; Water film; Dynamic cone penetration test; Drone survey

### 1. Introduction

Being situated at the juncture of highly active Australian, Pacific, Sunda and Philippine Sea plates, the Sulawesi Island in Eastern Indonesia is not new to seismic events of significant magnitude. On September 28, 2018,

the region was struck by a large earthquake of moment magnitude  $M_w$  7.5 at 18:02:44 local time, which triggered devastating large-scale flow failures and a tsunami. The epicenter of earthquake was located at 0.256°S (latitude) and 119.846°E (longitude) in the Donggala regency of Minahasa peninsula, about 70 km north of the provincial capital of Palu with a hypo-central depth of 20 km (USGS, 2018). The earthquake had a peak intensity of 8.5 on the MMI scale, as observed in Palu region. The event was preceded by a major foreshock of magnitude

Peer review under responsibility of The Japanese Geotechnical Society.

\* Corresponding author.

E-mail address: [hazarika@civil.kyushu-u.ac.jp](mailto:hazarika@civil.kyushu-u.ac.jp) (H. Hazarika).

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.007>

0038-0806/© 2020 Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of The Japanese Geotechnical Society.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Please cite this article as: H. Hazarika, D. Rohit, S. M. K. Pasha et al., Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia, *Soils and Foundations*, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.007>



Mw 6.1 just hours before the main shock and followed by multiple aftershocks of magnitude  $M_w > 5.5$  for more than a week. The tremors of the main shock were felt as far away the Eastern Kalimantan region of Borneo Islands as well as in Tawau district in Malaysia. The extensive damage to the transportation systems, bridges, earth structures and residential buildings in some areas of Palu city, Sigi and Donggala regency of Central Sulawesi was due to the widespread large-scale flow failures (Mason et al., 2019). Along with destruction to infrastructure, thousands of lives were lost, many more were injured and hundreds were reported missing (Mikami et al., 2019; Omira et al., 2019). Balaroa, Petobo, Jono-Oge and Sibalaya were the worst hit mainly due to large-scale flow-slides and mud flows. Never before have such large-scale flow failures been triggered by an earthquake. That these failures occurred on very gentle sloping ground, sweeping away localities along with it, came as a complete surprise to one and all.

The long-distance flow failures are thought to have resulted from a combination of many factors, including the liquefaction of the sandy layer, the formation of water film due to the existence of a less-permeable cap layer, the presence of a confined aquifer, and the geology typical of the affected areas (Kiyota et al., 2020). The reconnaissance survey was designed to determine the role of these factors in the disaster. Perishable data was collected to supplement knowledge of earthquake induced geo-disasters, in the expectation that this would ultimately lead to improved procedures for the characterization and mitigation of geo-hazard risks. In this paper, the focus is on the results of the reconnaissance survey of the events of this extreme geo-disaster in the wake of the 2018 Sulawesi earthquake during November 2 to 4, 2018 and June 26 to July 4, 2019. The approach adopted was similar to the traditional reconnaissance methods used to collect earthquake records, field testing on geotechnical and geological ground conditions, and advanced aerial imaging using unmanned aerial vehicles (UAV).

The field reconnaissance of earthquake-induced liquefaction and associated ground failures contributes significantly towards the knowledge and advancing understanding of the behavior and the mechanics of liquefied ground. The careful documentation and assessment of observations from many liquefied and non-liquified sites during past extreme events have provided us with a valuable database of case histories (Andrus and Stokoe, 2000; Cetin et al., 2004; Moss et al., 2006, 2011; Boulanger et al., 2012; Ohsumi et al., 2016), lateral spreading (Bardet et al., 2002; Youd et al., 2002; Cubrinovski et al., 2012) and post liquefaction ground subsidence (Cetin et al., 2009; Juang et al., 2013; Valverde-Palacios et al., 2014). However, acquiring reliable, good quality, documented liquefaction reconnaissance data from sites right after an earthquake can be extremely challenging, since strong ground motion tends to occur over a very large geographical area. On the other hand, recent advances in computer simulations and unmanned aerial vehicles (UAV)

provide an excellent opportunity to access the remote areas that have suffered earthquake induced damage to collect perishable surface geotechnical data for analysis.

Our research team visited sites in Jono Oge village in Palu to assess the damage caused by the large scale flow failure triggered by the earthquake and to observe the sub-soil conditions. The village of Jono Oge was selected in this survey because it had the largest magnitude of ground displacement due to the flow-slides among the all other sites in Palu city.

The reconnaissance survey methods included visual site inspection, collecting disturbed and undisturbed soil samples, performing portable dynamic cone penetration tests (PDCPT) for in-situ soil strength assessment and conducting aerial survey using drone to obtain an overall high-resolution top view of the site with terrain information. The team also investigated the soil profiles in the trenches excavated (Okamura et al., 2020; JICA, 2019) in the failed zones at Jono Oge village as well as in some other areas, such as Lolu and Sibalaya. The objective of the survey was to collect perishable field data and evaluate the probable causes and mechanism, which triggered such large-scale ground movement in such gently sloped ground.

## 2. Geological and seismological information of site

### 2.1. Event characteristics

With multiple active strike slip faults and subduction zones in the region, Sulawesi tends to be a complex seismically active zone. The province was struck by a powerful earthquake of magnitude  $M_w$  7.5 on 28 September 2018 with strong foreshocks and aftershocks. The map of Central Sulawesi area shown in Fig. 1 indicates the locations of the foreshocks, the main shock and aftershocks of the 2018, Sulawesi earthquake. The data for the event history is considered from September 28, 2018 to October 08, 2018. It can be seen from the magnitude of the foreshocks and the aftershocks indicated in Fig. 1 that a lot of energy was accumulated across the Palu-Koro fault. There was a foreshock of magnitude Mw 6.1 approximately 3 h before the main event of magnitude Mw 7.5 and the aftershocks which followed the event for days were of significant magnitude, most of them greater than Mw 5.

The event caused large scale liquefaction and lateral flow failures across the villages of Jono-Oge, Sibalaya, Petobo and Balaroa, with the largest flow failure observed in Jono-Oge (Bradley et al., 2019; Watkinson and Hall, 2019; Cummins, 2019). Fig. 2a, shows the epicenter along with the locations of large-scale flow failures along with the sinistral Palu-Koro Fault (PKF), which caused the earthquake. Fig. 2b, depicts the intensity contours of Palu city along with the liquefaction susceptibility map for the September 28, Sulawesi Earthquake. The map indicates that the event had maximum intensity in Palu valley with the highest liquefaction susceptibility despite being almost 70 km from the epicenter. Fig. 2c & d are the satellite



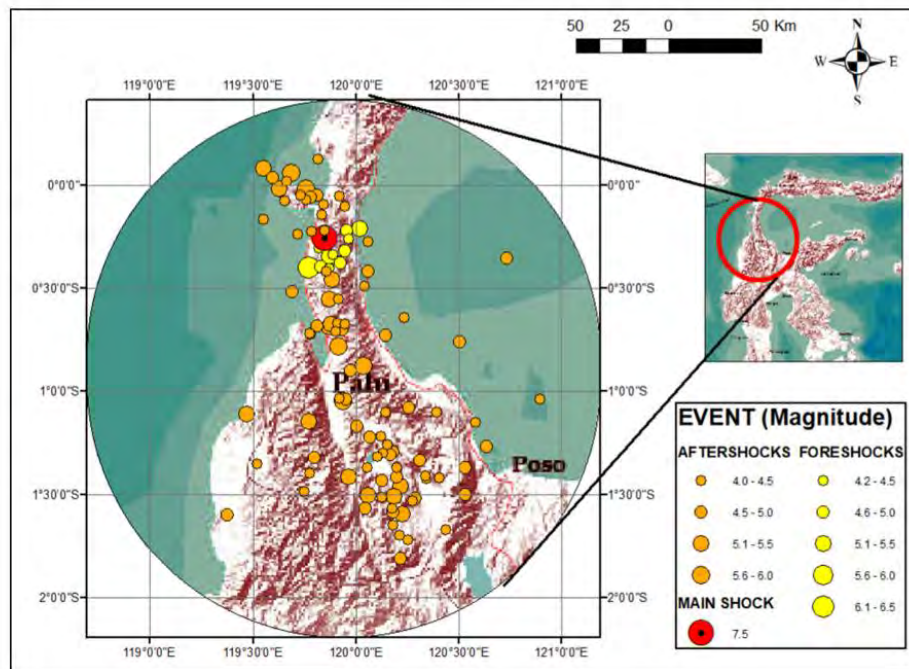


Fig. 1. Location of foreshocks, mainshock, and aftershocks with varying magnitude.

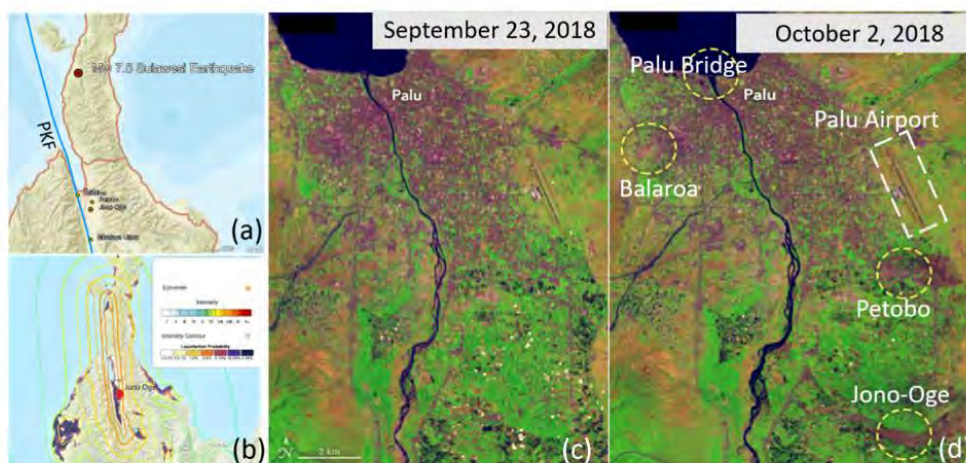


Fig. 2. Intensity Map and ground failures associated with Mw 7.5 Palu earthquake (a) Epicenter of The 2018 Sulawesi earthquake along locations of flow failure and alignment of Palu-Koro fault (b) Intensity contour with liquefaction probability map of Palu city (USGS, 2018), (c) Landsat 8 image taken on September 23, 2018 and (d) Landsat 8 image taken on October 2, 2018 (showing the sites with major flow failure damages; USGS, 2018).

images acquired on September 23, 2018 and October 2, 2018 respectively by Operational Land Imager (OLI) on Landsat 8 satellite (USGS, 2018) in false color bands (6-5-2) to make it easy to differentiate between the urban areas (purple-gray), vegetation (green), and over-turned soil

(brown and tan). On observing both Fig. 2c & d, the mud flow and debris can be easily identified which occurred due to liquefaction induced flow failure. Furthermore, the images in Fig. 2c & d indicate that there was no notable damage to Palu airport, which is located near the flow

Please cite this article as: H. Hazarika, D. Rohit, S. M. K. Pasha et al., Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia, *Soils and Foundations*, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.007>



failure site of Petobo. This may be due to ground improvement measures implemented during the construction of the airport.

## 2.2. Site characteristics

The Central Sulawesi province is straddled by the seismically active left lateral Palu -Koro fault (PKF). On September 28, due to the 2018 Sulawesi earthquake, several meters of horizontal crustal displacement were observed across the PKF, confirmed through satellite image analysis (Heidarzadeh et al., 2019). All the large-scale flow-slides sites were found to lie across or near the fault zone.

In this research, the site reconnaissance activities were focused on the area of interest (Jono Oge village), where the maximum displacement of soil mass of distances up to 1 km was observed. Jono Oge is located in Palu region in Central Sulawesi province of Sulawesi island, which is one of the largest islands of Indonesia. Because it covers such a vast area across both sides of equator and inside the area of the ring of fire, the tectonic activities of Indonesia are complex, with all the tectonic activities represented, including subduction, collision, uplift, strike-slip faulting and volcanic activities (Hall, 2014).

Being the most active fault in the Sulawesi region, PKF has an average slip rate of 40 mm/year, and has an extension rate of ~11–14 mm/year, which is quite complex for a simple strike-slip fault (Socquet et al., 2006). The region is overlain by sedimentary and volcanic deposits of Miocene – Quaternary period, which have undergone low grade thermal metamorphism (van Leeuwen et al., 2016). The Palu valley extends 7 km in width and is flanked by N-S aligned, sharp triangular slopes about 60 m in height and short alluvial fans to the West, and gentle steps faults to the East (Thein et al., 2015). Hosting an active strike – slip fault, the region has experienced multiple large devastating earthquakes in the past. The historic seismicity of the PKF region shows that the fault activity is concentrated at shallow depths with major earthquakes of magnitude  $M_w \geq 6.5$  during years 1900–2018 with a hypocentral depth of less than 50 km, (Socquet et al., 2006), as shown in Fig. 3(a) and (b).

## 2.3. Geology and tectonic characteristics

The basement rock in the region where the Palu city is located (near the neck) and connects western part of central Sulawesi to north arm are formed by several metamorphic complex covered by magmatic intrusion with different composition varied from gabbro and diorite to granite and volcanic sedimentation (Watkinson et al., 2011). The bedrock geology map of Palu is shown in Fig. 4. The Palu Basin is overlain with Quaternary sediments (Fig. 5), which are very young in age. Flood deposits from irrigation channel in the slide areas and alluvial flood constitute clay, silt, and sand. Surficial sediments are formed by young alluvium fan deposits in low relief hills which extend up the

west and east sides of the valley. Foothills and mountains which surrounded the Palu valley constitute tertiary granite and granodiorite rock and pre-tertiary sedimentary and metamorphic rock. A past study on the sedimentary deposits of Ariana region confirmed that the young sedimentary deposits are susceptible to liquefaction, with a shallow ground water table and under 0.2 g ground motion acceleration (El May et al., 2009). While the event in Palu reflects all the above criteria, a more detailed site-specific study was required to confirm the details of the slope failure triggered by the 2018 earthquakes.

## 2.4. Ground motion characteristics

The very high rupture velocity of the 2018 Palu earthquake contributed to the large intensity of ground motion, and led to it being categorized as a super-shear event (Socquet et al., 2019). Ground motion data of earthquake was recorded at the JICA-BMGK station in Palu, which is approximately 80 km from the epicenter and on the west side of earthquake induced landslide area at Balaroa (Fig. 6). The time history of acceleration for two horizontal components E-W and N-S and vertical component U-D of ground motion is shown in Fig. 7, using the data provided in Kiyota et al. (2020). The peak ground acceleration (PGA) values of the E-W, N-S and U-Components were 0.28 g, 0.21 g, and 0.34 g respectively.

The response spectra shown in Fig. 7d display near-fault motion features likely to have been caused by forward directivity of rupture propagation. Furthermore, the wide range frequency content of ground motion increased the risk of geotechnical failure at various places. However, the response spectral values at the Palu station were reported to be less than those proposed by the Indonesian seismic design code, except for the period range of 2.5–3.5 s (Goda et al., 2019).

## 3. Earthquake induced flow-slides in Palu region

### 3.1. Geotechnical site investigations

The 2018 Sulawesi earthquake triggered four large scale flow-slides (Balaroa, Petobo, Jono Oge and Sibalaya) which are located in the vicinity of Palu city (Fig. 8). The slide areas are all located along the edges of Palu valley, where the new alluvial fans meet the old alluvial fan deposits of Palu river. The landslide in Balaroa (northwest side of Palu valley) was on gentle ground with average slope of 4% and partially or fully damaged approximately 2,900 residential buildings. The other three flow-slides in Petobo, Jono Oge and Sibalaya were in the east side of Palu valley within the 25 km of Palu city. According to reports and the damage mapping provided by Copernicus Emergency Management Service, flow-slides damaged or destroyed more than 300 buildings in Jono-Oge and 3,000 buildings in Petobo. More than 140 buildings in Sibalaya were damaged.



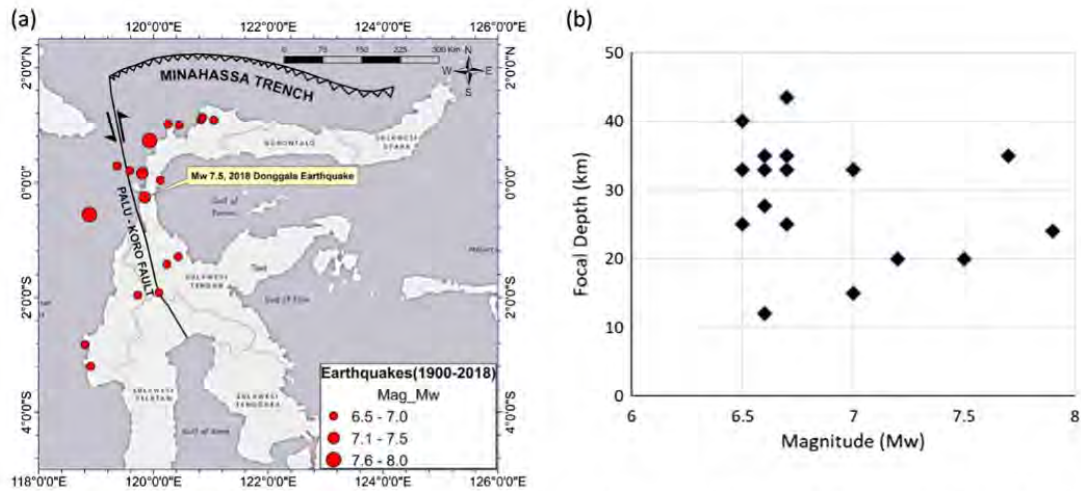


Fig. 3. Distribution and magnitude of PKF (1900–2018) (a) Earthquakes across the Sulawesi island ( $M_w \geq 6.5$ ) (b) Hypocentral depth (km) for the same events (USGS, 2018, Socquet et al., 2006).

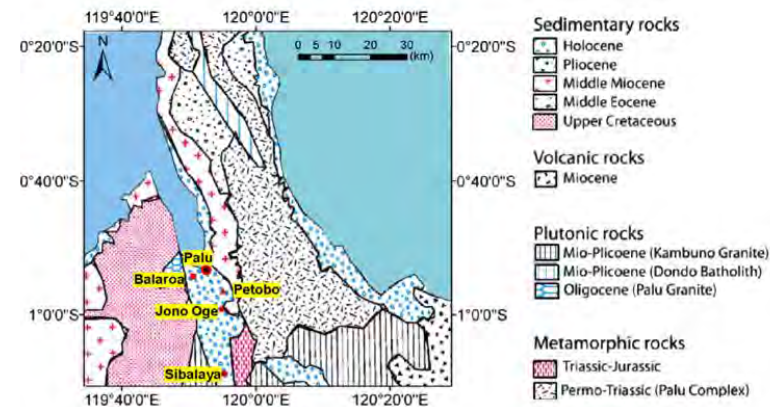


Fig. 4. Geologic map of the Palu area (modified from Watkinson et al., 2011).

In this study, we used a combination of satellite imagery, aerial imagery, field surveys including collecting soil samples from the sites and conducting in-situ testing using Portable Cone Penetrometer, to investigate the mechanism of massive flow-slides. The discussion in the following subsections is mainly focused on the mechanism and patterns of mass movements in the Jono-Oge area, which was the largest flow failure (in terms of area and volume) in the region after the event.

### 3.2. Flow-slide at Jono-Oge

As shown in Fig. 9a and b, the flow-slide in Jono Oge started from the crown next to irrigation channel in eastern edge of Palu valley to the toe deposits on the western side of failure zone. The slide spread over 1.5 km<sup>2</sup> of area with

maximum displacement of 2 km. The slide swept away the residential buildings as well as the connecting roads between the north and south of Jono Oge with huge deposition of residuals on top of the sliding surface. It should be noted that the over 90% of the area where the flow-slide occurred was agriculture farms. A high ground water level and underground water in the surficial sandy layers due the presence of irrigation channel likely exacerbated the ground conditions, and contributed significantly to the large scale flow-slide, which extended over a number of kilometers.

#### 3.2.1. Satellite and drone imagery

We used Unmanned aerial vehicle (UAV) to collect the digital images of the flow-slide. Since no UAV imagery data of the pre-earthquake morphological features was avail-

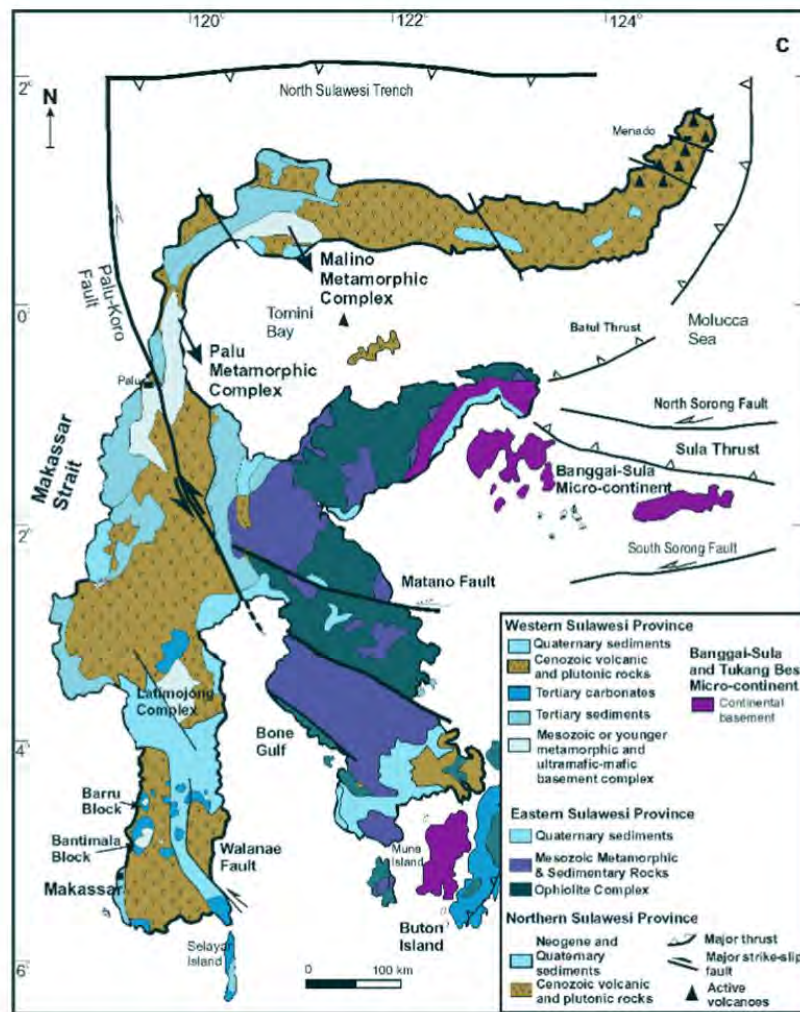


Fig. 5. Structures and geographical features of central Sulawesi region, Indonesia (Maulana et al., 2016).

able, the locations of structures and satellite imagery was used to identify those features. The post-earthquake displacements and changes in the morphological features of the area were clearly identified by this combination of information. The area was categorized into our different zones I, II, III and IV, as shown in Fig. 10.

Zone (I): The lands enclosed by Zone (I) are mainly rice and tomato fields with a few numbers of residential buildings. Being the crown (head scrap) of the flow-slide region, Zone (I) extends from northeast side of the failure zone along the western boundary of the irrigation channel to the southeast side, where the failure zone intersects with the channel. The breach of the channel and the destruction of the water gate resulted in the discharge of a huge volume of water, resulting in the scouring of the neighboring fail-

ure bed, as shown in Fig. 11. The subsequent mudflow carried the soil residuals all the way down to the Palu river [Fig. 11]. The flow-slide in zone (II) resulted in the development of extensional cracks, and the rotation and transmission of individual blocks of surficial soils (Fig. 12a). The maximum displacement of soils in this zone varies between 2 and 50 m.

1- Zone (II): The flow-slide began in this zone, and then scouring, erosion and lateral displacement followed. After the onset of liquefaction in the sandy and sandy-silty layers below the ground surface, the top surficial layers started moving in the southwest direction of the failure zone. It carried the soil blocks and residuals along with the runoff and deposited them in





Fig. 6. JICA-BMGK strong motion station (JICA Report, 2019).

Zone (III) (see below). Since the mudflow that resulted from the breached channel disturbed the tracing of the transition, the exact direction of soil movement remains largely unknown. Also, the erosion caused by the flood from the breached channel disturbed the surface morphology in this region, as seen in Fig. 12b. The severely eroded areas are devoid of any vegetation, while the surrounding areas are still vegetated. In order to map the displacement in this region, the movement of several structures on the less disturbed blocks was evaluated. The maximum displacement in this region varied from 300 to 1,300 m. An example of large-scale movement of structures on a soil block is shown in Fig. 12c, where a residential building (with blue roof) was transported by about 480 m from its original location on the eastside of failure zone.

- 2- Zone (III): The deposits of the flow-slide area were collected in this zone as well as the residuals of the rubble and trees which were transported from Zone (II). The transportation distance of soil deposits from zone (III) to zone (IV) due to the mudflow (yellow colored highlighted area in Fig. 10) is not clear. Some of the structures were carried by 1,200 m from the west of the flow-slide region. The mudflow resulted in the pile-up of runouts deposits a few meters in depth in this region (Fig. 12d).

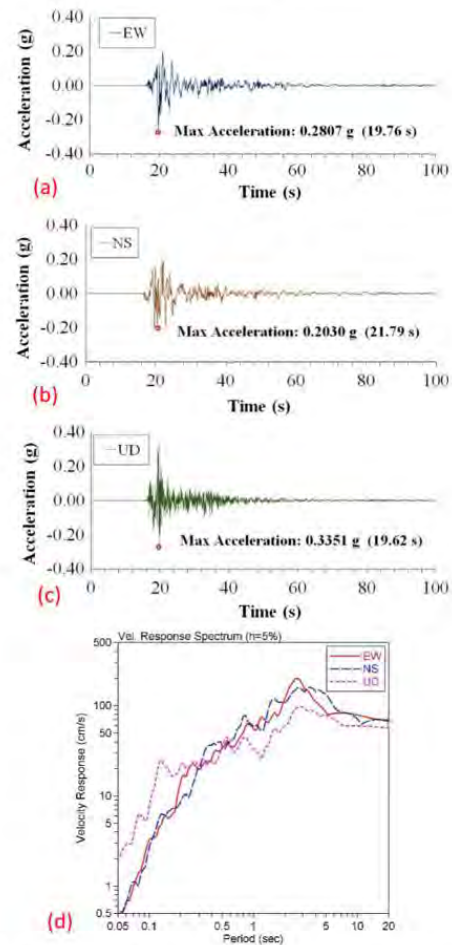


Fig. 7. Time history of motions at strong ground motion station near Balaroa (a) E-W (b) N-S (c) U-D components and (d) Velocity responses (Adopted and modified from the data in JICA Report, 2019).

- 3- Zone (IV): As explained above, the flow-slide in Zone (II) breached the walls of the irrigation channel, resulting in the flow of flood water through Zone (I) and Zone (II) until it joined the stream in the north and traveled the same path to Palu river.

### 3.2.2. In-situ tests

In-situ tests using the Portable Dynamic Cone Penetrometer Tests (called hereafter PDCPT) were performed to clarify the mechanism and progression of long-distance flow-slide at Jono Oge. Soil samples were also collected from the flow-slide sites for testing. The PDCPT equipment specifications and test procedures used in this research are in accordance with the Japanese Geotechnical Society Standard (2016). These field tests, together with laboratory

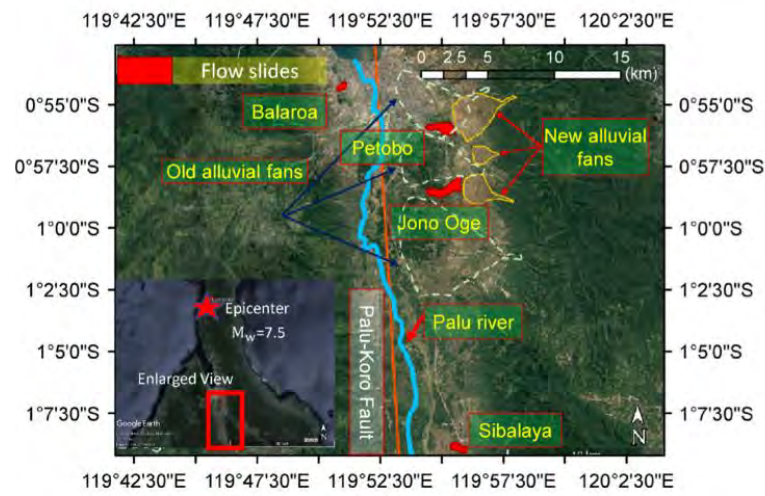


Fig. 8. Locations and extent of flowslides in different areas of Palu valley.

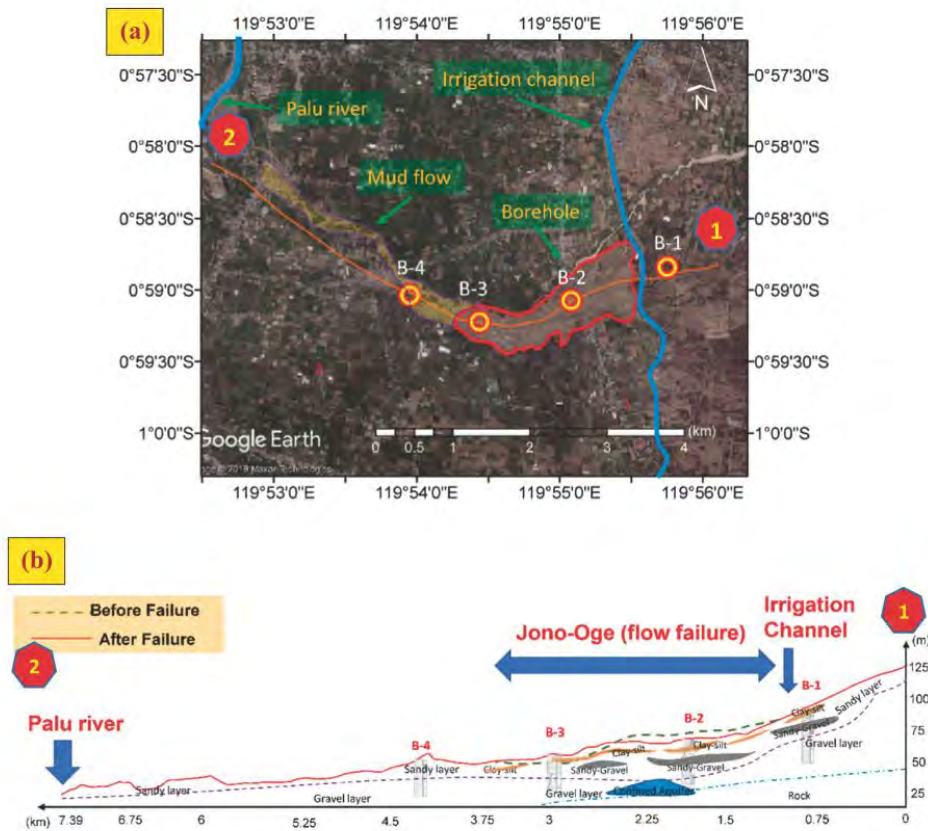


Fig. 9. Satellite imagery and ground profile (a) Flow slide after earthquake (c) Cross section at profile 1–2 (Not to scale).

Please cite this article as: H. Hazarika, D. Rohit, S. M. K. Pasha et al., Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia, *Soils and Foundations*, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.007>



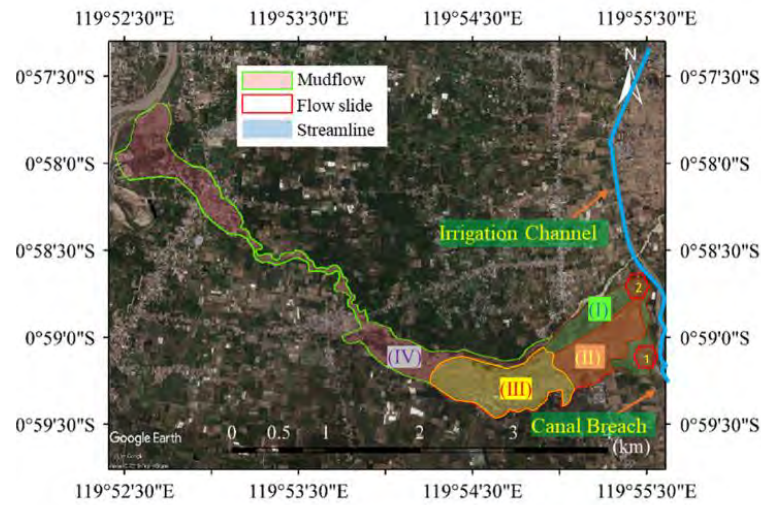


Fig. 10. Divided zones based on ground displacement in flowslide area.



Fig. 11. UAV imagery of channel breaching and water gate destruction in Jono Oge (Location No. 1 of Fig. 10).

testing of the collected soil samples and visual observation of site condition, were expected to provide valuable information on the subsurface properties.

Fig. 13 shows the locations of the sites where soil samples were collected and PDCPT were conducted. As can be seen from the figure, the locations for the PDCPTs (PDCPT1, PDCPT4, PDCPT5, PDCPT6, PDCPT8) were selected such to ensure various locations with different characteristics were included: within the flow-slide zones

(zones (I) and (II)) and outside of the flow-slide zone in North-South (alongside the damaged main access road connecting North to south of Jono-Oge ) and in the South-North-East directions.

*3.2.2.1. Results from the tests conducted outside the flow-slide zone.* A PDCPT1 was conducted outside the failure zone on the margin far from the extensional cracks. Since the original stratification of ground is well preserved



Fig 12. (continued)

outside of flow-slide area, the result of PDCPT1 was used as a benchmark for evaluating the results of the PDCPT tests within failure zones (II) and (I).

Fig. 14a shows the aerial view of the PDCPT1 location and the resulting N-values, which varied with depth. The test was conducted on an agriculture farm (with paddy fields and a tomato farm). The clear decrease in the N value in the soil layers below 3.5 m is an indication of loose liquefiable layers. The very high ground water level (which

was higher than the water level at the time of testing G. W. L = 2.3 m) also contributes to and increased risk of liquefaction in shallow underground layers.

In order to identify the soil profile of PDCPT1, an image of an extensional crack with depth of around 2.5 m in a nearby cliff is shown in Fig. 14b. The soil stratification is clearly visible and less disturbed due to the downhill flow-slide. The surface layer is composed of 10–20 cm of organic soil followed by 30–40 cm of clay and silty clay



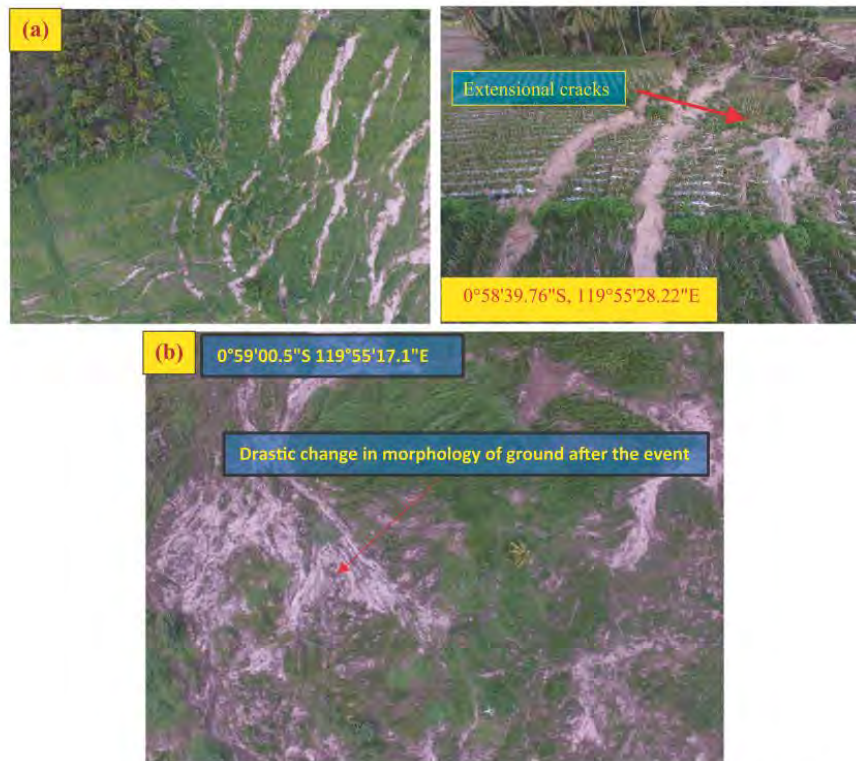


Fig. 12. Aerial imagery of damage within the failure Zones (a) extensional cracks in Zone (I) (b) flowslide and erosion of ground due to the mudflow Zone (II) (c) displacement of blue house in zone (II) (d) long distance transition of residential buildings after flowslide and mudflow (e) intersection of mudflow and stream.



Fig. 13. Locations of the PDCPT and collected soil samples at Jono-Oge.

layer. The underlying silty sand layer, which is between 10 and 20 cm in thickness, is sandwiched between the upper clayey layer and the lower clay silt layer, which is between 10 and 20 cm in thickness. Below the silty layer, there were

several layers of sandy and gravelly sand layers which appeared to be affected by liquefaction in the underlying layers. As described in Kokusho (1999), it is possible that the presence of these low permeable layers at the top allowed the formation of a water film between them and the underlying gravelly sand layers. Some soil samples were collected from the exposed parts of extensional cracks, and the basic physical properties of soils in the stratified layers were determined.

3.2.2.2. Results from the tests conducted within the flow-slide zone. As shown in Fig. 13, the PDCPT 4, 5, 6, 8 were conducted alongside the damaged road that connects the North and South of flow-slide region. The locations and results of PDCPT 4, 5, 6 and 8 are shown in Fig. 15a–d. PDCPT4 was conducted beside the collapsed bridge in the North of Jono-Oge (Fig. 15a). PDCPT5 was conducted within the flow-slide Zone (I) (the tension zone), where there were many soil blocks which had been dragged along and had rafted together in failure area (Zone (II)) (the compression zone) (Fig. 15b). PDCPT6 was conducted in zone (II), where the flow-slide apparently started (Fig. 15c).



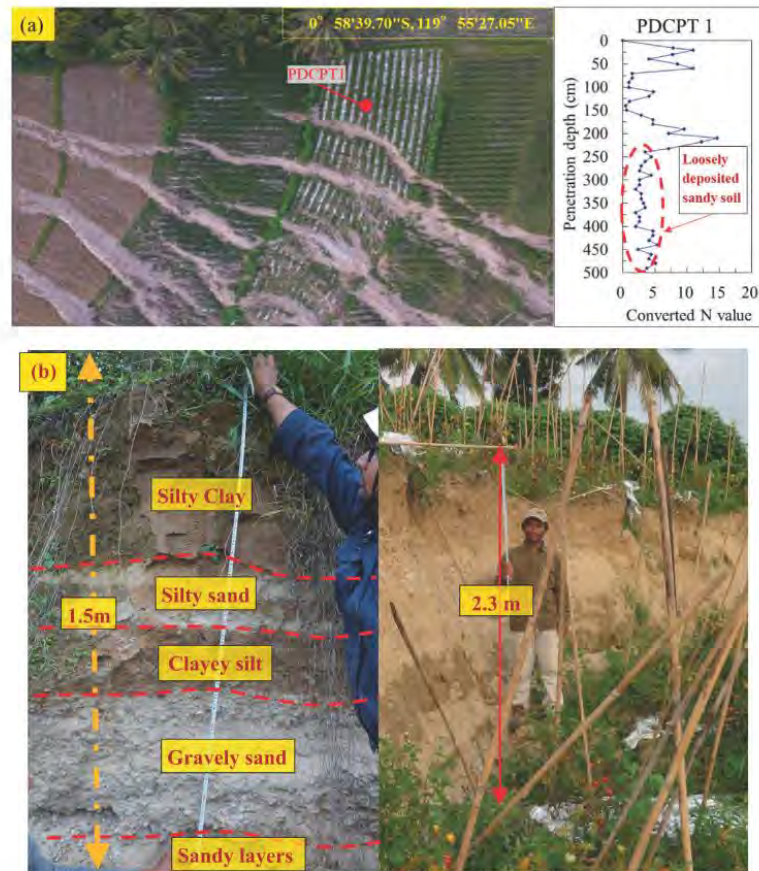


Fig. 14. PDCPT conducted within Zone (I) (a) Location and (b) test result at PDCPT1 (c) Profile of exposed soil layers at cliff created by extensional cracks.

PDCPT8 was conducted a few meters from the red building (Fig. 15d) which defied the ground movement and remained in its original position. Even though the building sustained considerable damage, rendering it uninhabitable, it did not experience displacement like the other structures in the flow-slide zone. This structure may have been able to resist the flow slide because of the massive raft foundation elaborated in Kiyota et al. (2020).

The N values obtained from all the PDCPTs for depths less than 5 m ranged between 5 and 10. These values indicate that the soils could be categorized as loose to very loose (USACE, 1994). These N values correspond to the critical  $N_{cr}$  values for soils categorized as potentially liquefiable at this range of depths (Koizumi, 1966). The soils appear to be loosely deposited sand and silty sand layers which were transported from the upstream of the flow-slide region. However, the resultant N-values from PDCPT 8 are greater than 10 beyond the depth of 3.5 m. That is,

the N-values for PDCPT 8, which was conducted close the red house, were higher than for the other tests. A trend similar to PDCPT 8 was observed in the tests conducted by Kiyota et al. (2020) in the same vicinity. The out of trend peak in the results for in PDCPT 5 was attributed to the presence of a gravelly layer at 2.5 m, which appears to have been liquefied. According to historical records, the liquefaction of gravelly soils is rare. However, some cases of liquefaction in gravelly soils were observed in past earthquakes, such as during the 1995 Hyogoken Nambu earthquake, Japan, as well as during the 1983 Borah Peak earthquake in the United States, where extensive liquefaction took place in fluvial sandy gravel layers (Kokusho et al., 2004). It should be noted, however, that the lateral displacement and flow-slide in these earthquakes was between only a few meters and tens of meters. In the 2018 Sulawesi earthquake, the displacement of soil blocks was between a few meters to hundreds of meters. This



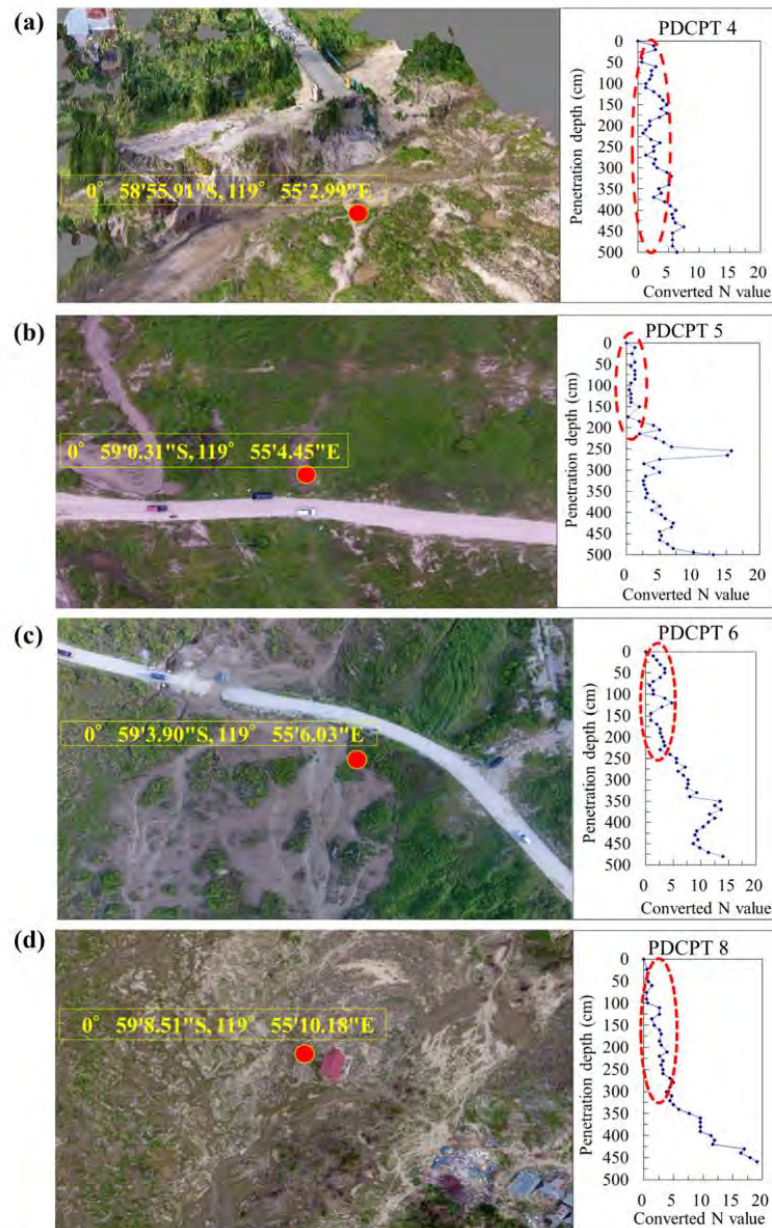


Fig. 15. Aerial imagery of locations of PDCPT and  $N_{SPT}$  versus depth values (a) PDCPT4 (b) PDCPT5 (c) PDCPT6 (d) PDCPT8.

was remarkable considering the very gentle slope of the ground and that this area had no recorded history of liquefaction induced flow-slides.

### 3.2.3. Gradation of soil samples

Soil samples were collected from locations near the PDCPT tests in the failure zone as shown in Fig. 13 and

were tested to determine the grain size distribution. The grain size distribution of soil samples S1, S3 and S5 are shown in Fig. 16. The soil in sample S1 can be classified as a uniform sand with traces of silt, while the soils in samples S3 and S5 can be classified as non-plastic silt (Japanese Geotechnical Society Standard, 2016). As seen in Fig. 16, soil sample S1 is the most liquefiable among the samples,

Please cite this article as: H. Hazarika, D. Rohit, S. M. K. Pasha et al., Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia, *Soils and Foundations*, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.007>



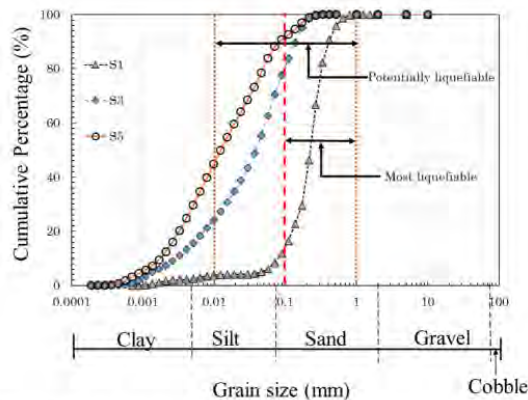


Fig. 16. Gradation of soil samples S1, S3 and S5 collected from the site.

whereas the soils in samples S3 and S5 are potentially liquefiable soils, according to the soil classifications proposed by Tsuchida (1970). These soils were either transported by the flow slide, by the succeeding mudflow or deposited as residual soils. According to the handbook of Port and Harbor Research Institute of Japan (PHRI, 1997), the gradation of these soil samples indicates they are potentially liquefiable.

### 3.3. Probable mechanism of failure

According to interviews with eyewitnesses and video recordings of the flow-slides in the aftermath of the earthquake, flow failure started a minute after the earthquake had stopped first at the eastern side of Zone II. The flow-slide transported the soil blocks, houses and trees down the slope towards the Palu river at a relatively slow rate and deposited the residuals in Zone III. After the initial movement of ground in Zone II, the structure of the surrounding ground also failed, and it began flowing into the primary zone. The materials were carried distances of between a few tens of meters (Zone I) to around 1.5 km (Zone II) due to the flow-slide. Also, the breach of the irrigation channel resulted in mudflow into the area already affected by flow-slide. Interestingly, during the field investigations, the authors found that the surficial soil, which had been transported long distances by the flow-slide, behaved like a jelly after overnight rainfall and could not bear the static vertical load of an average human being. This is evidence of the very low static resistance of the displaced soil, and that the soil dilated under axial stress in saturated or partially saturated conditions.

The mechanism of the long-distance flow failure at Jono Oge is not yet clearly understood at this stage. There have been many theories and assumptions proposed by various researchers. Besides the complicated nature of the various factors involved in triggering the flow-slide, the resultant mudflow changed the morphology of the area through ero-

sion, and removed the traces of flow-slides, making it difficult to propose a concrete hypothesis regarding the possible mechanism of failure. Kiyota et al. (2020) have proposed a hypothesis based on the assumption that the artisan pressure from the underlying confined aquifer triggered the flow-slide by reducing the effective stress along with the shear strength of the overlying ground surface. While the authors could not validate the presence of any such aquifer in their research, the JICA (2019) report substantiated the existence of a confined aquifer at a depth of about 30 m through borehole tests, which is assumed to exist at a shallow depth. Also, it was observed from trenches excavated in the flow-slide zone that the sub-soil lithology was highly stratified with alternating layers of sand, sandy clay, silt, gravel, and organic soils, which reduced the effective permeability of the surface layers. The low permeability of the surface layers is thought to have inhibited the dissipation of excess water pressure despite the upwards pressure, which exceeded the critical hydraulic gradient from the confined aquifer.

Similar case of flow failure have been reported in the past in Lower San Fernando dam during the 1971 San Fernando earthquake, where failure occurred approximately 1 min after the ground ceased shaking (Seed, 1987). Kokusho (2003) summarized earthquake-triggered time-delayed flow failure cases, including the submarine landslide at Valdez as a result of the 1964 Alaskan earthquake. While the inertia force due to the earthquake is considered the biggest factor in such failures, there are many other contributing factors. For example, in the 1964 Niigata earthquake, the ground lithology based on bore-logs was found to be stratified with silty sub-layers sandwiched between loose sandy layers (Kishida, 1966). Furthermore, Kokusho and Fujita (2002) investigated the large lateral displacement of about 4 m following the 1964 Niigata earthquake in liquefied areas, despite the very gentle slope of the ground surface (less than 1%) and concluded that it was initiated by water-films of ultra-low shear resistance which appeared beneath low permeable silt seams sandwiched in clean sand deposits. In the case of Jono Oge, the presence of low permeable cap layers and underlying highly liquefiable sand and silty sand layers could be a factor in the failure of the ground. It may therefore be reasonable to suggest that an analogy can be drawn between this time earthquake and the 1964 Niigata earthquake. It is acknowledged that there has been no report of such a long-distance flow failure in the literature as that seen at Jono Oge.

A series of model tests conducted by previous researchers (Kokusho, 1999, 2016; Kokusho and Kojima, 2002), have revealed that liquefaction at a site with sandwiched lithology results in the liquified soil being trapped below the low permeability cap layer. This creates a thin inter-layer of water, referred to as a "water film". The resulting inhibition of excess pore water pressure dissipation and presence of the water-film reduces the residual shear strength of the sandy soil layer to below the initial static



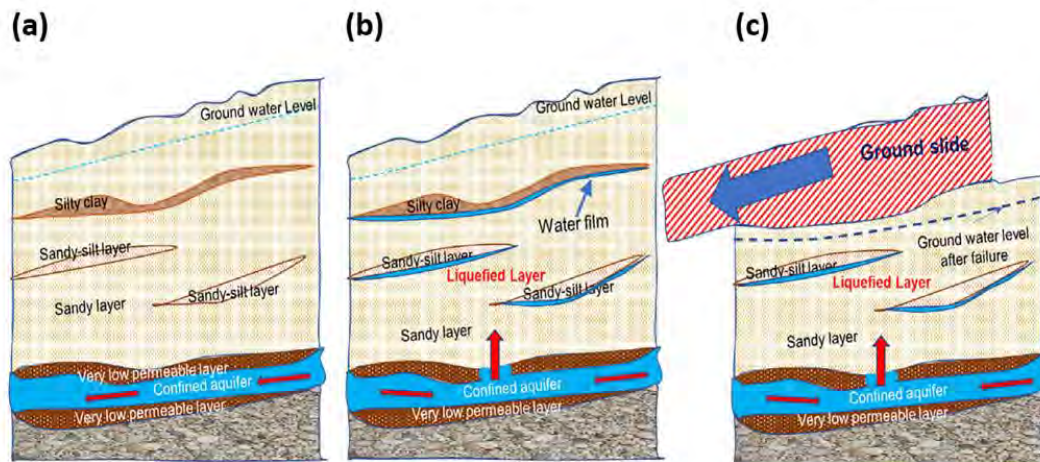


Fig. 17. The mechanism of flow slide and development of water film under low permeable layers (a) before the earthquake (b) immediately after initiation of liquefaction (c) after the earthquake.

shear stress. Consequently, even on a very gentle slope, lateral flow takes place due to the action of gravitational force until equilibrium is achieved. Note that the results of common laboratory tests have shown that such capping layers may not be continuous and that they do not necessarily spread horizontally across the whole failure zone.

The authors believe that complex factors were involved in the triggering of the large-scale flow-slide at Jono-Oge on a very gentle sloping ground, which continued even after the seismic ground motion ceased. The combined effects of typical geology and the terrain, the formation of a water film due to liquefaction of the sandy layer overlain by capping layer, and the existence of underlying artesian aquifer may all have played a role in the long-distance flow-slide at Jono-Oge (Fig. 17a–c). The presence of a confined aquifer at a shallow depth and water springs in the Balaroa and Petobo flow-slide zone, which was confirmed by Kiyota et al. (2020), may also have contributed to the flow-slide.

#### 4. Conclusions and recommendations

This paper presents a preliminary report on the geotechnical damage brought by the 2018 Sulawesi earthquake based on the results of a reconnaissance survey and subsequent data analyses and their interpretations. Much of the damage to infrastructures was caused by liquefaction induced long distance flow-slides in Balaroa, Petobo, Jono-Oge and Sibalaya areas of Palu city.

The focus of this report was on the Jono-Oge area, where the flow-slide was the longest. The authors collected information using a number of different surveying methods, including the use of a GPS device, cameras, and UAV. Furthermore, the ground condition in the affected

areas was investigated by in-situ testing, including PDCP tests and soil sampling (both disturbed and undisturbed).

The image data collected by UAV and satellite images were used to evaluate the large-scale displacements at flow-slide area and explain the mechanism of failure. Based on the information gathered in this research, the following conclusions could be drawn:

- The geological morphology of central Sulawesi as well as magnitude and scale of extreme event caused by an earthquake at the Palu-Koro fault were found contributed to the severity of the geotechnical failures, such as liquefaction the induced flow-slides and the distance of the flow-slides.
- Considering the geological features of Sulawesi region, it can be concluded that all major flow-slides in the Palu valley occurred at locations where a new alluvial fan meets an old alluvial fan.
- The presence of low permeable layers (silt and clay) over loosely deposited sandy and sandy gravel layers suggests the complex mechanism of the long-distance flow-slide at Jono-Oge can be explained by the interlayer water film theory. Furthermore, it is assumed that damage to the underlying artesian aquifer during the earthquake may also have contributed to the development of the water film and the liquefaction induced flow-slide in the layers with very low mobilized shear resistance (nearly zero).
- Further research, including geophysical tests as well as laboratory tests and physical modeling, is required to determine the actual mechanism of such flow failures, and to suggest preventive measures against future geohazard risks in areas with similar geological features.



### Acknowledgement

The authors would like to express their sincere gratitude to the members of the JICA domestic committee for technical support to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia. Particular thanks is extended to Prof. Kenji Ishihara, Prof. Takaji Kokusho, Prof. Susumu Yasuda, Prof. Ikuo Towhata, Prof. Mitsu Okamura, Dr. Takashi Kiyota and Dr. Kimio Takeya for their valuable comments and suggestions. The authors also would like to acknowledge JICA for the partial support provided in the initial phase of the investigation. Special thanks go also to Dr. Naoto Tada, JICA Indonesia, for his encouragement and timely support during the investigation. Last but not least, we are grateful to Ms. Ode Wa Sumartini, a graduate student at Kyushu University and the students of Tadulako University, Palu, for their help and support during the field investigations.

### References

- Andrus II, R.D., Stokoe II, K.H., 2000. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 126 (11), 1015–1025.
- Bardet, J.-P., Tobita, T., Mace, N., Hu, J., 2002. Regional modeling of liquefaction-induced ground deformation. *Earthquake Spectra* 18 (1), 19–46.
- Boulanger, R.W., Wilson, D.W., Idriss, I.M., 2012. Examination and reevaluation of spt-based liquefaction triggering case histories. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 138 (8), 898–909.
- Bradley, K., Mallick, R., Andikagumi, H., Hubbard, J., Meilianda, E., Switzer, A., Du, N., Brocard, G., Alfian, D., Benazir, B., Feng, G., Yun, S., Majewski, J., Wei, S., Hill, E.M., 2019. Earthquake-triggered 2018 Palu valley landslides enabled by wet rice cultivation. *Nat. Geosci.* 12, 935–939.
- Cetin, K.O., Bilge, H.T., Wu, J., Kammerer, A.M., Seed, R.B., 2009. Probabilistic model for the assessment of cyclically induced reconsolidation (volumetric) settlements. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 135 (3), 387–398.
- Cetin, K.O., Seed, R.B., Kiureghian, A.D., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E., Moss, R.E.S., 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 130 (12), 1314–1340.
- Cubrinovski, M., Robinson, K., Taylor, M., Hughes, M., Orense, R., 2012. Lateral spreading and its impacts in urban areas in the 2010–2011 Christchurch earthquakes. *N. Z. J. Geol. Geophys.* 55 (3), 255–269.
- Cummins, P.R., 2019. Irrigation and the Palu landslides. *Nat. Geosci.* 12, 881–882.
- El May, M., Kacem, J., Dlala, M., 2009. Liquefaction susceptibility mapping using geotechnical laboratory tests. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 6 (2), 299–308.
- Goda, K., Mori, N., Yasuda, T., Prasetyo, A., Muhammad, A., Tsujio, D., 2019. Cascading geological hazards and risks of the 2018 Sulawesi Indonesia earthquake and sensitivity analysis of tsunami inundation simulations. *Front. Earth Sci.* 7 (261).
- Hall, R., 2014. Indonesian tectonics: subduction, extension, provenance and more. Indonesian Petroleum Association, Proceedings of the 38th Annual Convention, IPA14-G-360, August, 1–43.
- Heidarzadeh, M., Muhari, A., Wijanarto, A.B., 2019. Insights on the source of the 28 september 2018 Sulawesi tsunami, Indonesia based on spectral analyses and numerical simulations. *Pure Appl. Geophys.* 176 (1), 25–43. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2065-9>.
- Japanese Geotechnical Society Standard, 2016. Method for portable dynamic cone penetration test (JGS 1433-2012).
- JICA, 2019. Report of the technical committee on The 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia, Japan International Corporation Agency (JICA).
- Japanese Geotechnical Society Standard, 2016. Method of classification of geomaterials for engineering purposes (JGS 0051-2009).
- Juang, C.H., Ching, J., Wang, L., Khoshnevisan, S., Ku, C.-S., 2013. Simplified procedure for estimation of liquefaction-induced settlement and site-specific probabilistic settlement exceedance curve using cone penetration test (CPT). *Can. Geotech. J.* 50 (10), 1055–1066.
- Kishida, H., 1966. Damage to reinforced concrete buildings in Niigata City with special reference to foundation engineering. *Soils and Foundations* 6 (1), 71–88.
- Kiyota, T., Furuichi, H., Hidayat, R.F., Tada, N., Nawir, H., 2020. Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia. *Soils Foundat.* <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.03.015>.
- Koizumi, Y., 1966. Changes in density of sand subsoil caused by the Niigata earthquake. *Soils Found.* 6 (2), 38–44.
- Kokusho, T., 1999. Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 125 (10), 817–826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:10(817)).
- Kokusho, T., Fujita, K., 2002. Site investigation for involvement of water films in lateral flow in liquefied ground. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 128 (11), 917–925.
- Kokusho, T., 2003. Current state of research on flow failure considering void redistribution in liquefied deposits. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 23, 585–603.
- Kokusho, T., 2016. Major advances in liquefaction research by laboratory tests compared with in situ behavior. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 91, 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.07.024>.
- Kokusho, T., Hara, T., Hiraoka, R., 2004. Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 130 (6), 621–629. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:6\(621\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(621)).
- Kokusho, T., Kojima, T., 2002. Mechanism for postliquefaction water film generation in layered sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 128 (2), 129–137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:2(129)).
- Mason, B., Gallant, A., Hutabarat, D., Montgomery, J., Reed, A., Wartman, J., Irsyam, M., Prakoso, W., Djarwadi, D., Harnanto, D., Alatas, I., Rahardjo, P., Simatupang, P., Kawanda, A., Hanifa, R., 2019. Geotechnical reconnaissance: The 28 September 2018 M7.5 Palu-Donggala, Indonesia earthquake. GEER Association Report No. GEER-061. <https://doi.org/10.18118/G63376>.
- Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M., Takabatake, T., Nakamura, R., Nishida, Y., Achiari, H., Rusli, Marzuki, A.G., Marzuki, M.F.H., Stolle, J., Krautwald, C., Robertson, I., Aránguiz, R., Ohira, K., 2019. Field survey of the 2018 Sulawesi tsunami: inundation and run-up heights and damage to coastal communities. *Pure Appl. Geophys.* (June). <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02258-5>.
- Moss, R.E., Seed, R.B., Kayen, R.E., Stewart, J.P., Kiureghian, A.D., Cetin, K.O., 2006. CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 132 (8), 1032–1051.
- Maulana, Adi., Imai, Akira., Watanabe, Koichiro., Yonezu, Kotaro., Nakano, Takanori., Boyce, Adrian., Page, Laurence., Anders, Schersten., 2016. Origin and geodynamic setting of Late Cenozoic granitoids in Sulawesi, Indonesia. *J. Asian Earth Sci.* 124, 102–125. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2016.04.018>.
- Moss, R.E.S., Kayen, R.E., Tong, L.Y., Liu, S.Y., Cai, G.J., Wu, J., 2011. Retesting of liquefaction and nonliquefaction case histories from the 1976 Tangshan earthquake. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 137 (4), 334–343.
- Ohsumi, T., Hazarika, H., Hara, T., Kuribayashi, K., Kuroda, S., Takezawa, K., Furuichi, H., 2016. Analysis of coastal structure damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake - field

Please cite this article as: H. Hazarika, D. Rohit, S. M. K. Pasha et al., Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia, *Soils and Foundations*, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.007>



- investigation and numerical simulation. *Japanese Geotechn. Soc. Special Publ.* 2 (73), 2498–2503.
- Okamura, M., Ono, K., Minaka, U.S., Arsyad, A., Nurdin, S., 2020. Large scale flow slide in Sibalaya - A consequence of the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia. *Soils and Foundations* 60 (4), 1050–1063.
- Omira, R., Dogan, G.G., Hidayat, R., Husrin, S., Prasetya, G., Annunziato, A., Proietti, C., Probst, P., Paparo, M.A., Wronna, M., Zaytsev, A., Pronon, P., Giniyatullin, A., Putra, P.S., Hartanto, D., Ginanjar, G., Kongko, W., Pelinovsky, E., Yalciner, A.C., 2019. The September 28th, 2018, tsunami In Palu-Sulawesi, Indonesia: a post-event field survey. *Pure Appl. Geophys.* 176 (4), 1379–1395. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02145-z>.
- Port Harbour Research Institute of Japan, 1997. *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*. A.A Balkema, Rotterdam.
- Seed, H.B., 1987. Design problems in soil liquefaction. *J. Geotech. Eng. ASCE* 113 (8827–8845).
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., Ambrosius, B., Spakman, W., 2006. Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 111 (8), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005JB003963>.
- Socquet, A., Hollingsworth, J., Pathier, E., Bouchon, M., 2019. Evidence of supershear during the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake from space geodesy. *Nat. Geosci.* 12 (3), 192–199.
- Thein, P.S., Pramumijoyo, S., Brotopuspito, K.S., Kiyono, J., Wilopo, W., Furukawa, A., Setianto, A., Putra, R.R., 2015. Estimation of s-wave velocity structure for sedimentary layered media using microtremor array measurements in Palu city, Indonesia. *Procedia Environ. Sci.* 28 (Sustain 2014), 595–605. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.070>.
- Tsuhida, H., 1970. Prediction and countermeasure against liquefaction in sand deposits. In: *The Seminar of the Port and Harbour Research Institute, Yokosuka: Ministry of Transport, Japan, January*, pp. 3.1–3.33.
- U.S. Army Corps of Engineering, 1994. *Design of sheet pile walls, Engineer Manual, EM 1110-2-2504*, U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington D.C., USA.
- U.S. Geological Survey, 2018. M 7.5 - 70km N of Palu, Indonesia. Retrieved March 22, 2019, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/map>.
- Valverde-Palacios, I., Vidal, F., Valverde-Espinosa, I., Martín-Morales, M., 2014. Simplified empirical method for predicting earthquake-induced settlements and its application to a large area in Spain. *Eng. Geol.*, 18158–18170.
- van Leeuwen, T., Allen, C.M., Elburg, M., Massonne, H.J., Palin, J.M., Hennig, J., 2016. The Palu metamorphic complex, NW Sulawesi, Indonesia: origin and evolution of a young metamorphic terrane with links to Gondwana and Sundaland. *J. Asian Earth Sci.* 115, 133–152. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.09.025>.
- Watkinson, I.M., Hall, R., Cottam, M.A., Wilson, M.E.J., 2011. Ductile flow in the metamorphic rocks of central Sulawesi. *The SE Asian Gateway: History and Tectonics of the Australia-Asia Collision*. Geological Society of London.
- Watkinson, I.M., Hall, R., 2019. Impact of communal irrigation on the 2018 Palu earthquake-triggered landslides. *Nature Geosciences*. 12, 940–947.
- Youd, T.L., Hansen, C.M., Bartlett, S.F., 2002. Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 128 (12), 1007–1017.

## おわりに

本技術協力では、地域の災害リスク低減のための強靱化計画を準備、実行するために、今次災害発生の要因を分析し、津波、Nalodo、地震、洪水、土砂災害等の複数の災害を対象としたハザードの評価を行った。しかし、被災直後に実施した調査により今回発生した内陸部の液状化地すべりが、世界的に類をみない大規模な液状化による災害（Nalodo）であったため、発生メカニズム、ハザード評価、ならびに対策方針について、専門的知見から意見を頂くことを目的に、石原研而名誉教授（東京大学）を委員長とした日本の学識経験者からなる「インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト 液状化地すべり（内陸部）に関する国内支援委員会」が設立され、Nalodo の発生要因やメカニズムについて、委員の方々による活発な議論をいただいた。また、インドネシア国国家防災庁 総合防災政策アドバイザー多田直人氏をはじめとする多くの専門家に調査団を主導いただき、協議に参加いただいた。その結果、この Nalodo という現象が極めて複雑な故、その発生要因やメカニズムに関する理論を一つに絞り切ることは困難であるとの結論に至った。しかしながら、Nalodo が発生した地形地質の特徴、地震動特性、地盤流動のトリガー、流動層の残留強度低下要因、灌漑水路の影響等については、一定の共通の見解を導き出すことができ、その見解を基にして、ハザードマップの精緻化や、防災・減災策の概略計画について提言することができた。

今後、より精度の高いハザード評価・分析（ハザードエリアの設定）を実施するためには、液状化層の分布・過剰間隙水圧の発生場所の特定など、さらなる学術的な検討が必要と考えられる。また、地域の主要産業である農業の再建のためには、適切な灌漑水路の整備等の対策工を実施するとともに、地下水位のモニタリングを継続しながら、農地利用の行政管理等を条件に土地利用の制限やハザードレベルを再検討し、今後定期的に更新される空間計画策定に反映されることが期待される。

一方、世界的にも稀な災害である Nalodo に関する発生メカニズム及びその対策に関する研究活動は、世界銀行（WB）支援による Nalodo 研究センターを中心に継続される見込みである。Nalodo 研究センターには、Nalodo に関する学術的研究の更なる進展に資するよう、以下の内容を提言したい。

- 今回の地震で、実際に被害を受けたパル市及びシギ県の各地区（Balarooa、Petobo、Lolu、Jono Oge、Sibalaya）のみならず、その周辺地区の地形・地質調査、土地利用調査（表層地盤調査）、地下水調査・解析等を継続的に実施することで、地域の地形・地質、土地利用、地下水の特徴を詳細に把握し、将来の Nalodo 発生の可能性をより明確にする。
- 被害を受けた各地区及びその周辺については、実施すべき対策工及びその効果を明確にするための、パイロット事業、地質調査、モニタリング調査（地下水位等）等を

実施し、対策工の効果検証を確実に実施する。

- 更には、インドネシア全土で Nalodo 及び液状化災害に関する危険地区を抽出し（危険度評価手法を設定）、それらの地域での危険度評価及び効果的な対策工等について、研究を推進する。

APPENDIX III-3

液状化地すべり（内陸部）  
に関する国内支援委員会  
技術検討書  
【電子ファイルのみ】



APPENDIX III-4

インドネシア国中部スラウェシ州  
パル第四橋再建計画準備調査  
概略設計報告書  
(先行公開版)

インドネシア国  
公共事業・国民住宅省 道路総局

インドネシア国  
中部スラウェシ州パル第四橋再建計画  
準備調査

概略設計報告書  
(先行公開版)

令和元年 5 月  
(2019年)

独立行政法人  
国際協力機構 (JICA)

株式会社 オリエンタルコンサルタンツグローバル  
八千代エンジニアリング株式会社

|        |
|--------|
| 社基     |
| JR     |
| 20-005 |

インドネシア国  
公共事業・国民住宅省 道路総局

インドネシア国  
中部スラウェシ州パル第四橋再建計画  
準備調査

概略設計報告書  
(先行公開版)

令和元年 5 月  
(2019年)

独立行政法人  
国際協力機構 (JICA)

株式会社 オリエンタルコンサルタンツグローバル  
八千代エンジニアリング株式会社

本件は緊急性がある事業であり、制限がある中で概略設計を行っており、詳細設計により変更が生じています。

入札に参加を検討されている方は、最終的には入札図書を必ずご確認ください。



## 目 次

|                                       | ページ  |
|---------------------------------------|------|
| 目 次                                   |      |
| 図表リスト                                 |      |
| 略語集                                   |      |
| 要 約                                   |      |
| 1. プロジェクトの背景・経緯                       |      |
| 1-1 当該セクターの現状と課題.....                 | 1-1  |
| 1-1-1 現状と課題.....                      | 1-1  |
| 1-1-2 開発計画.....                       | 1-4  |
| 1-1-3 社会経済状況.....                     | 1-7  |
| 1-2 無償資金協力の背景・経緯及び概要.....             | 1-10 |
| 1-2-1 背景・経緯.....                      | 1-10 |
| 1-2-2 要請内容の合意.....                    | 1-12 |
| 1-2-3 事業実施の必要性.....                   | 1-12 |
| 1-3 我が国の援助動向.....                     | 1-12 |
| 1-3-1 概要.....                         | 1-12 |
| 1-3-2 我が国および JICA の協力方針と本事業の位置づけ..... | 1-13 |
| 1-3-3 我が国の道路セクターへの援助実績.....           | 1-13 |
| 1-4 他ドナーの援助動向.....                    | 1-16 |
| 1-4-1 世界銀行.....                       | 1-17 |
| 1-4-2 アジア開発銀行.....                    | 1-19 |
| 2. プロジェクトを取り巻く状況                      |      |
| 2-1 プロジェクトの実施体制.....                  | 2-1  |
| 2-1-1 組織・人員.....                      | 2-1  |
| 2-1-2 財政・予算.....                      | 2-2  |
| 2-1-3 技術水準.....                       | 2-5  |
| 2-1-4 既存施設.....                       | 2-6  |
| 2-2 プロジェクトサイト及び周辺の状況.....             | 2-7  |
| 2-2-1 関連インフラの整備状況.....                | 2-7  |
| 2-2-2 自然条件.....                       | 2-10 |
| 2-2-3 環境社会配慮.....                     | 2-28 |
| 2-3 その他.....                          | 2-78 |
| 3. プロジェクトの内容                          |      |
| 3-1 プロジェクトの概要.....                    | 3-1  |
| 3-2 協力対象事業の概略設計.....                  | 3-1  |

|       |                                     |      |
|-------|-------------------------------------|------|
| 3-2-1 | 設計方針.....                           | 3-1  |
| 3-2-2 | 基本計画.....                           | 3-2  |
| 3-2-3 | 概略設計図.....                          | 3-27 |
| 3-2-4 | 施工計画.....                           | 3-35 |
| 3-3   | 相手国側分担事業の概要.....                    | 3-43 |
| 3-4   | プロジェクトの運営・維持管理計画.....               | 3-44 |
| 3-4-1 | 運営・維持管理体制.....                      | 3-44 |
| 3-4-2 | 維持管理方法.....                         | 3-44 |
| 3-5   | プロジェクトの概略事業費.....                   | 3-45 |
| 3-5-1 | 協力対象事業の概略事業費.....                   | 3-45 |
| 3-5-2 | 運営・維持管理費.....                       | 3-45 |
| 4.    | プロジェクトの評価                           |      |
| 4-1   | 事業実施のための前提条件.....                   | 4-1  |
| 4-2   | プロジェクト全体計画達成のために必要な相手方投入（負担）事項..... | 4-1  |
| 4-3   | 外部条件.....                           | 4-1  |
| 4-4   | プロジェクトの評価.....                      | 4-2  |
| 4-4-1 | 妥当性.....                            | 4-2  |
| 4-4-2 | 有効性.....                            | 4-4  |

付録 環境チェックリスト（橋梁）

## 図リスト

|          | ページ  |
|----------|--|
| 図 1-1-1  | スラウェシ州の道路地図：2018（赤ライン：国道、青ライン：県道） ..... 1-1          |
| 図 1-1-2  | 中部スラウェシ州のの道路地図：2017（赤ライン：国道、黄ライン：県道） ..... 1-3       |
| 図 1-1-3  | パル市内の道路地図：2018（赤ライン：国道、黄ライン：県道） ..... 1-4            |
| 図 1-1-4  | 第3次計画ビジョン（2015-2019） ..... 1-6                       |
| 図 1-1-5  | インドネシアの総人口及び総人口における労働人口割合推移（2010-2017） ..... 1-8     |
| 図 1-1-6  | パル市の総人口及び総人口における労働人口割合（2010-2017） ..... 1-8          |
| 図 1-1-7  | インドネシアの GDP 推移及び成長率（2009-2017） ..... 1-9             |
| 図 1-1-8  | Rp（対 US ドル）（2010-2017） ..... 1-9                     |
| 図 1-1-9  | インドネシアの輸出入推移（2010-2017） ..... 1-10                   |
| 図 1-1-10 | インドネシアの経常収支（2010-2017） ..... 1-10                    |
| 図 1-2-1  | パル地震発生位置（左）、プロジェクト対象地域（右） ..... 1-11                 |
| 図 1-2-2  | パル第四橋崩壊前（左）、崩壊後（右） ..... 1-11                        |
| 図 2-1-1  | Bina Marga 組織図 ..... 2-1                             |
| 図 2-1-2  | 橋梁局組織図 ..... 2-2                                     |
| 図 2-1-3  | 「イ」国歳入（2017-2019） ..... 2-3                          |
| 図 2-1-4  | 「イ」国歳出（2017-2019） ..... 2-3                          |
| 図 2-1-5  | 「イ」国インフラ予算（2017-2019） ..... 2-4                      |
| 図 2-1-6  | 中部スラウェシ州インフラ予算 ..... 2-4                             |
| 図 2-1-7  | 対象地域の橋梁整備状況 ..... 2-6                                |
| 図 2-1-8  | ひび割れ、亀裂が生じた橋梁：B5（左）、B9（右） ..... 2-7                  |
| 図 2-1-9  | パル第一橋：B1（左）、パル第二橋：B2（中央）、パル第三橋：B3（右） ..... 2-7       |
| 図 2-2-1  | 対象地域の道路整備状況 ..... 2-8                                |
| 図 2-2-2  | 対象地域の道路整備状況 ..... 2-9                                |
| 図 2-2-3  | 橋梁建設地域周辺の受電点（左：パル第四橋左岸側）、（右：パル第四橋右岸側） ... 2-10       |
| 図 2-2-4  | パル川下流（Parome 地点）と上流（Bangga Atas 地点）の月間降雨量 ..... 2-10 |
| 図 2-2-5  | 2017年5月-6月の観測潮位 ..... 2-11                           |
| 図 2-2-6  | 計画高水流量配分図 ..... 2-11                                 |
| 図 2-2-7  | 中部スラウェシ、及びパル市の地形図 ..... 2-13                         |
| 図 2-2-8  | 中部スラウェシ、及びパル市の地質図 ..... 2-14                         |
| 図 2-2-9  | 地形測量結果 ..... 2-15                                    |
| 図 2-2-10 | ボーリング調査位置 ..... 2-16                                 |
| 図 2-2-11 | ボーリング調査状況 ..... 2-16                                 |
| 図 2-2-12 | ボーリング柱状図 ..... 2-18                                  |
| 図 2-2-13 | 層別の N 値深度分布 ..... 2-20                               |
| 図 2-2-14 | 沈下検討断面位置 ..... 2-22                                  |
| 図 2-2-15 | 沈下検討モデル ..... 2-23                                   |
| 図 2-2-16 | 台形帯状荷重による地盤内鉛直応力影響値 ..... 2-25                       |

|          |  |      |
|----------|--|------|
| 図 2-2-17 | Clay①の e-logP 曲線 (ボーリング GA.02、GL-23-24m) .....               | 2-26 |
| 図 2-2-18 | Clay②の e-logP 曲線 (ボーリング GA.05、GL-42-43m) .....               | 2-27 |
| 図 2-2-19 | 事業概要 (2019 年 4 月 1 日現在) .....                                | 2-28 |
| 図 2-2-20 | 中部スラウェシ州の森林区分図 .....   | 2-34 |
| 図 2-2-21 | パル市の Baiya Subdistrict のサンゴ礁とマングローブの分布 .....                 | 2-34 |
| 図 2-2-22 | パル市の Pantoloan Boya Subdistrict のサンゴ礁とマングローブの分布 .....        | 2-35 |
| 図 2-2-23 | パル市の West Besusu (Besusu Barat) Subdistrict のマングローブの分布 ..... | 2-35 |
| 図 2-2-24 | ドンガラ県の保護・保全対象区域 .....  | 2-36 |
| 図 2-2-25 | UPL-UKL の審査手続きフロー .....                                      | 2-46 |
| 図 2-2-26 | 事業の代替案 .....   | 2-51 |
| 図 2-2-27 | 現地状況 .....   | 2-63 |
| 図 2-2-28 | 用地取得のモニタリングフォーム例 .....                                       | 2-77 |
| 図 2-3-1  | 「イ」国の入札スケジュール .....  | 2-79 |
| 図 2-3-2  | 「イ」国の契約調印スケジュール .....  | 2-81 |
| 図 3-1-1  | 落橋したパル第四橋 .....  | 3-1  |
| 図 3-2-1  | 比較案 1 .....  | 3-3  |
| 図 3-2-2  | 比較案 2 .....  | 3-4  |
| 図 3-2-3  | 比較案 3 .....  | 3-5  |
| 図 3-2-4  | 比較案 4 .....  | 3-6  |
| 図 3-2-5  | 標準横断構成 .....   | 3-8  |
| 図 3-2-6  | 河川内基礎根入れ深さ .....   | 3-11 |
| 図 3-2-7  | 基準径間長算定の流れ .....   | 3-12 |
| 図 3-2-8  | スラウェシ島の地震発生分布図 .....   | 3-14 |
| 図 3-2-9  | パル湾付近の断層 .....   | 3-15 |
| 図 3-2-10 | 橋梁形式選定フロー .....  | 3-17 |
| 図 3-2-11 | ボーリング柱状図 .....   | 3-21 |
| 図 3-2-12 | 下部工フーチング設置高さ .....   | 3-24 |
| 図 3-2-13 | 平面図 (1) .....  | 3-27 |
| 図 3-2-14 | 平面図 (2) .....  | 3-28 |
| 図 3-2-15 | 縦断図 (1) .....  | 3-29 |
| 図 3-2-16 | 縦断図 (2) .....  | 3-30 |
| 図 3-2-17 | 標準横断図 (1) .....  | 3-31 |
| 図 3-2-18 | 標準横断図 (2) .....  | 3-32 |
| 図 3-2-19 | 橋梁一般図 (1) .....  | 3-33 |
| 図 3-2-20 | 橋梁一般図 (2) .....  | 3-34 |
| 図 3-2-21 | 橋台・橋脚施工部 .....   | 3-35 |
| 図 3-2-22 | 上部工施工図 .....   | 3-36 |
| 図 3-2-23 | 施工工期 .....   | 3-36 |
| 図 3-2-24 | 資材調達先位置図 .....   | 3-41 |



## 表リスト

|          | ページ   |
|----------|---|
| 表 1-1-1  | 第 2 次スラウェシ州開発計画 (2010-2014) ..... 1-2   |
| 表 1-1-2  | 第 3 次国家開発計画 (2015-2019) ..... 1-2   |
| 表 1-1-3  | 第 2 次国家開発計画 (2010-2014) ..... 1-5   |
| 表 1-1-4  | 第 3 次国家開発計画 (2015-2019) ..... 1-7   |
| 表 1-3-1  | 道路セクターへの援助実績 ..... 1-13   |
| 表 1-4-1  | 世界銀行及びアジア開発銀行の「イ」国道路セクターへの援助実績 ..... 1-16   |
| 表 2-1-1  | 「イ」国で建設された特殊橋梁一覧 ..... 2-5  |
| 表 2-1-2  | 対象地域の橋梁一覧 ..... 2-6   |
| 表 2-2-1  | パル市内の気温 (月別) ..... 2-11   |
| 表 2-2-2  | パル川河口部の計画諸元の概要 ..... 2-12   |
| 表 2-2-3  | ボーリング調査 ..... 2-16  |
| 表 2-2-4  | 室内試験の項目と目的 ..... 2-17   |
| 表 2-2-5  | ボーリング調査および室内試験の実施基準 ..... 2-17  |
| 表 2-2-6  | パル川河口の地質層序 ..... 2-19   |
| 表 2-2-7  | ボーリング孔毎の N 値と粒度特性集計 ..... 2-21  |
| 表 2-2-8  | ボーリングの孔内水位 ..... 2-22   |
| 表 2-2-9  | 事業概要 ..... 2-28   |
| 表 2-2-10 | パル市の水質調査結果 ..... 2-29   |
| 表 2-2-11 | パル市の地下水調査結果 ..... 2-30  |
| 表 2-2-12 | 中部スラウェシ州の 4 観測地点のモニタリング結果 (2017 年) ..... 2-30   |
| 表 2-2-13 | パル市の気温・湿度 (2017 年) ..... 2-31   |
| 表 2-2-14 | パル市の気圧と風向・風速 (2017 年) ..... 2-31  |
| 表 2-2-15 | パル市の降雨量・降雨日・日照 (2017 年) ..... 2-32  |
| 表 2-2-16 | 中部スラウェシ州の固有種 (動植物) ..... 2-33   |
| 表 2-2-17 | 中部スラウェシ州の人口 ..... 2-36  |
| 表 2-2-18 | 自治体別の人口 ..... 2-37  |
| 表 2-2-19 | 中部スラウェシ州の人口の年齢構成 ..... 2-37   |
| 表 2-2-20 | パル市の地区ごとの人口と増加率 (2017 年) ..... 2-38   |
| 表 2-2-21 | パル市の地区ごとの性别人口と男女比 (2017 年) ..... 2-38   |
| 表 2-2-22 | パル市の人口の年齢構成 (2017 年) ..... 2-39   |
| 表 2-2-23 | パル市の地区別の被災者数 ..... 2-39   |
| 表 2-2-24 | 中部スラウェシ州において確認・認証されている「地理的に隔離された伝統的な<br>コミュニティ (Isolated Traditional Communities)」(2017 年) ..... 2-40 |
| 表 2-2-25 | 中部スラウェシ州の分野別就業者数(2017 年) ..... 2-41   |
| 表 2-2-26 | 最終学歴 (2017 年) ..... 2-41  |
| 表 2-2-27 | 自治体別学校数 ..... 2-42  |
| 表 2-2-28 | 中部スラウェシ州で確認された主な疾病 (2017 年) ..... 2-42  |

|          |   |      |
|----------|---|------|
| 表 2-2-29 | パル市で確認された主な疾病 (2017 年) .....  | 2-43 |
| 表 2-2-30 | 中部スラウェシ州の HIV 感染者数・AIDS 患者数・その他の性感染症患者数<br>(2017 年) .....           | 2-43 |
| 表 2-2-31 | 中部スラウェシ州の市・県別の医療機関数 (2017 年) .....                                  | 2-44 |
| 表 2-2-32 | パル市の地区別の医療機関数 (2017 年) .....  | 2-44 |
| 表 2-2-33 | 橋梁事業に関する AMDAL クライテリア .....   | 2-45 |
| 表 2-2-34 | UPL-UKL の審査過程 .....   | 2-46 |
| 表 2-2-35 | JICA ガイドラインのカテゴリ分類基準 .....  | 2-47 |
| 表 2-2-36 | GAP 分析 .....  | 2-47 |
| 表 2-2-37 | 事業の代替案及び比較検討 .....  | 2-51 |
| 表 2-2-38 | 類似事業で標準的に期待される活動及び直接的な影響 .....                                      | 2-52 |
| 表 2-2-39 | スコーピング .....  | 2-53 |
| 表 2-2-40 | 環境社会配慮調査の TOR .....   | 2-56 |
| 表 2-2-41 | 環境社会配慮調査結果及び予測結果 .....  | 2-57 |
| 表 2-2-42 | 環境社会配慮調査結果及び予測結果 .....  | 2-58 |
| 表 2-2-43 | これまでに実施された無償資金協力事業に関するステークホルダー協議 .....                              | 2-61 |
| 表 2-2-44 | 予定しているステークホルダー協議の内容(暫定) .....                                       | 2-62 |
| 表 2-2-45 | インドネシア国における公共事業のための用地取得に関する主な法制度 .....                              | 2-64 |
| 表 2-2-46 | Law No. 2, 2012 に基づく用地取得の手続きのステップ .....                             | 2-65 |
| 表 2-2-47 | インドネシア国の用地取得等の制度と JICA ガイドラインの方針とのギャップの<br>有無及びギャップがある場合の解消方針 ..... | 2-67 |
| 表 2-2-48 | 事業実施と用地取得のスケジュール案 .....   | 2-74 |
| 表 2-2-49 | インドネシア制度・JICA ガイドラインを踏まえたスケジュール及び今後の確認<br>事項 .....                  | 2-74 |
| 表 3-2-1  | 幾何構造基準 .....  | 3-7  |
| 表 3-2-2  | 路線比較表 .....   | 3-9  |
| 表 3-2-3  | 計画高水流量 .....  | 3-10 |
| 表 3-2-4  | 設計流速 .....  | 3-10 |
| 表 3-2-5  | 計画高水位 .....   | 3-10 |
| 表 3-2-6  | 材料の単位重量 .....   | 3-12 |
| 表 3-2-7  | マグニチュードによる地震の分類 .....   | 3-15 |
| 表 3-2-8  | 地震の規模とマグニチュードの関係 .....  | 3-15 |
| 表 3-2-9  | 橋梁計画の基本方針 .....   | 3-16 |
| 表 3-2-10 | 上部工形式と推奨適用径間 .....  | 3-18 |
| 表 3-2-11 | 支間割りの比較 .....   | 3-19 |
| 表 3-2-12 | 橋梁形式比較表 .....   | 3-20 |
| 表 3-2-13 | 基礎形式比較表 .....   | 3-22 |
| 表 3-2-14 | 杭種・杭径比較表 .....  | 3-23 |
| 表 3-2-15 | 橋台形式の選定 .....   | 3-25 |
| 表 3-2-16 | 橋脚形式の選定 .....   | 3-25 |

|          |                    |      |
|----------|--------------------|------|
| 表 3-2-17 | 橋梁デザインの選定 .....    | 3-26 |
| 表 3-2-18 | 施工監理計画（案） .....    | 3-38 |
| 表 3-2-19 | 品質管理計画（案） .....    | 3-39 |
| 表 3-2-20 | 出来形管理計画（案） .....   | 3-39 |
| 表 3-2-21 | 主要資材調達先リスト .....   | 3-40 |
| 表 3-2-22 | 主要機材調達先リスト .....   | 3-41 |
| 表 3-2-23 | 実施工程表（案） .....     | 3-43 |
| 表 3-5-1  | 概算事業費（日本側負担） ..... | 3-45 |
| 表 3-5-2  | 相手国側負担事項及び金額 ..... | 3-45 |
| 表 3-5-3  | 主な維持管理項目 .....     | 3-46 |
| 表 4-4-1  | 裨益人口 .....         | 4-3  |
| 表 4-4-2  | 本事業における定量的効果 ..... | 4-4  |

## 略語集

| 略語               | 英語  | 日本語             |
|------------------|---|-----------------|
| AASHTO           | American Association of State Highway and Transportation Officials      | 米国全州道路交通運輸行政官協会 |
| ADB              | Asia Development Bank   | アジア開発銀行         |
| Af               | Tropical Rainforest Climate   | 熱帯雨林気候          |
| AIDS             | Acquired Immunodeficiency Syndrome                                      | 後天性免疫不全症候群      |
| AMDAL            | Environmental Impact Assessment   | 環境影響評価制度        |
| APBN             | State Budget  | 国家歳入歳出          |
| ATR              | Ministry of Land and Spatial Planning                                   | 土地・空間計画省        |
| BAPPENAS         | National Development Planning Agency                                    | 国家開発企画庁         |
| BAPPEDA          | Agency for Regional Development   | 地域開発局           |
| BPJN             | National Road Implementation Center                                     | 国家道路実施局         |
| BPN              | National Land Agency  | 州土地局            |
| BWS              | River Basin Development Agency  | 河川流域開発局         |
| DGH              | Directorate General of Highways (Bina Marga)                            | 道路総局            |
| EA               | Executing Agency  | 実施機関            |
| EC               | Environmental Clearance   | 環境クリアランス        |
| EIA              | Environmental Impact Assessment   | 環境影響評価          |
| E/N              | Exchange of Notes   | 交換公文            |
| G/A              | Grant Agreement   | 贈与契約            |
| GDP              | Gross Domestic Product  | 国内総生産           |
| HHWL             | Highest High Water Level  | 最高潮位            |
| HIV              | Human Immunodeficiency Virus  | 人免疫不全ウイルス       |
| IA               | Implementing Agency   | 事業実施機関          |
| IEE              | Initial Environment Examination   | 初期環境調査          |
| IGES             | Institute for Global Environmental Strategies                           | 地球環境戦略研究機関      |
| IMF              | International Monetary Fund   | 国際通貨基金          |
| JETRO            | Japan External Trade Organization                                       | 日本貿易振興機構        |
| MHWS             | Mean High Water Spring  | 大潮平均高潮面         |
| MHWL             | Mean High Water Level   | 平均高潮位           |
| MLWL             | Mean Low Water Level  | 平均低潮位           |
| MLWS             | Mean Low Water Spring   | 大潮平均低潮面         |
| MOD              | Minutes of Discussions  | 協議議事録           |
| MSL              | Mean Sea Level  | 平均海水面           |
| Nirwasita Tantra | Informational Document of Regional Environmental Management Performance | 地域環境管理実績情報資料    |



| 略語      | 英語   | 日本語                  |
|---------|--|----------------------|
| PAPs    | Project Affected Persons   | 被影響住民                |
| PLN     | National Electricity Company   | インドネシア国有電力公社         |
| PQ      | Pre-Qualification  | 事前資格審査               |
| PU      | Ministry of Public Works and Housing                                       | 公共事業省                |
| SNI/BSN | Standard National of Indonesia   | インドネシア共和国基準          |
| SPPL    | Statement of Environmental Management and Monitoring                       | 環境管理及び環境モニタリング声明     |
| TOR     | Term of Reference  | 調査実行必要事項             |
| TPA     | Final Disposal Sites   | 最終処分場                |
| TPS3R   | Waste Processing Site 3R   | 3Rに基づく廃棄物処分法         |
| TPST    | Integrated Waste Management Site   | 総合型廃棄物処理プラント         |
| URTI    | Upper Respiratory Infection  | 上気道感染症               |
| UKL-UPL | Environmental Management Efforts Form and Environmental Monitoring Efforts | 環境管理及び環境モニタリングへの取り組み |

## 要 約

### (1) 国の概要

調査対象地域であるインドネシア共和国（以下、「イ」国）中部スラウェシ州パル市は、スラウェシ島中部に位置し、北部ゴロンタロ州、西部西スラウェシ州、南部南スラウェシ州に隣接している。パル市北部は湾に面しており、東西南部は Torompupu 山を代表とした山岳が市内を囲んでいる。

パル市は、年間を通して高温多雨で明確な乾季がない熱帯雨林気候に属している。2017年に河川流域開発局（以下、BWS-III）が実施した気象調査によると年間平均気温、湿度はそれぞれ 27.5℃、79.3%であった。また、BWS-III が同年度に実施した雨量観測調査によると降雨日数は年間 237 日間、年間降雨量は 862 mm と 1 回当たりの降雨量が少ない特徴がある。

パル市の総人口は、2010 年度で 336,352 人、2017 年度で 379,782 人となっている。この期間の人口増加率は 1.54% である。同期間「イ」国全体の人口増加率は 8.0% となっている。

「イ」国全体に比較して顕著ではないが、パル市においても同様の傾向がある為、今後も人口が増加していくことが想定される。

「イ」国は、1997 年 7 月のアジア通貨危機後、IMF との合意に基づき、経済構造改革を断行した。政治社会情勢及び金融の安定化を図り、個人消費の拡大を背景として 2005 年以降の経済成長率は、世界金融・経済危機の影響を受けた 2009 年を除き 5% 後半～6% 台という比較的高い成長率を達成した。2010 年には一人当たり名目 GDP が 3,000 ドルを突破している。

「イ」国は過去 10 年間の間、堅調な成長を継続して続けている一方で、経常収支が 2012 年頃から赤字に転じている。同時期にルピア安に転じていることが影響していると考えられる。輸出を促進して収支改善を図ることが課題である。

### (2) プロジェクトの背景、経緯及び概要

2018 年 9 月 28 日、パルーコロ断層深さ 10km の地点を震源に、マグニチュード 7.5 の地震が発生した。発生した地震によって、甚大な損失が生じた。地震の衝撃と地震に伴って発生した津波及び液状化現象による被害によって、パル市をはじめとする 4 都市で都市機能が麻痺した。パルでの被災状況を受け国家開発企画庁（National Development Planning Agency: 以下、BAPPENAS）は中部スラウェシ復興の為のマスタープラン策定を開始した。JICA と BAPPENAS は我が国側からの技術供与を通じて、中部スラウェシ復興を協力しながら実施することに合意した。

被災した建造物の再建と災害に対して強靱な都市づくりを計画することを目的に、中部スラウェシ復興プロジェクトが形成された。

発生した地震により、パル川河口に位置するパル第四橋が落橋・崩壊した。パル第四橋はその形状がユニークなことから、アイコン的な存在として地域住民に親しまれており、交通機能のみならず地域住民の市民活動の場としての役割も担っていた。地震によって崩壊したことで地域住民の心情を傷めただけでなく、パル第四橋によって確保されていた東西方向の交通確保が喫緊の課題となった。被災した地域住民及び都市機能にとって、重要な役割を担っていたパル第四橋を再建することは、早急に対応すべき課題である。その為、迅速性の求められる無償資金協力案件としてパル第四橋を再建することが決定された。

このような背景・経緯のもと、「イ」国政府は、以下の内容の無償資金協力を 2018 年 12 月に我が国に要請した。

- 要請年月：2018 年 12 月
- 要請金額：25 億円
- 要請内容：落橋したパル第四橋の再建

### (3) 調査結果の概要とプロジェクトの内容

本調査期間は、平成 31 年 1 月から令和元年 5 月までの 5 ヶ月間である。第一次現地調査として平成 31 年 1 月 10 日から 2 月 24 日、第二次調査として平成 31 年 3 月 5 日から同月 31 日、第三次調査として平成 31 年 4 月 10 日から同月 27 日、第四次調査として令和元年 5 月 14 日から同月 25 日に準備調査団員を派遣した。

「イ」国政府は、物流の改善、東西方向の交通容量拡大、及び道路ネットワーク強靱化等を目的として、パル第四橋の再建を日本政府に要請した。加えて、被災地の復興シンボルとして、早期の工事完了、及び景観配慮の要望が示されている。

関係機関との協議及び現地調査の結果、決定した設計概要を以下に示す。

#### 1) 橋梁設計

##### ① 設計基準

橋梁設計は、道路橋示方書／日本道路協会（以下、道示）に基づいて行うものとし、インドネシア基準／Standard National Indonesia（以下、SNI）にて設計照査を行う。以下に使用する基準類を記載する。

- 道路橋示方書・同解説（I～V）：日本道路協会
- Bridge Management System：Directorate General of Highways (DGH)
- SNI 12-2004 Perencanaan struktur beton untuk jembatan：Badan Standardisasi Nasional (BSN)
- SNI 1725-2016 Pembebanan untuk jembatan：Badan Standardisasi Nasional (BSN)
- SNI 2833-2016 Earthquake Map 2017：Badan Standardisasi Nasional (BSN)
- SNI 8460-2017 Persyaratan perancangan geoteknik：Badan Standardisasi Nasional (BSN)

##### ② 架橋位置

路線比較表を表 1 に示す。関係機関と協議の結果、第 1 案が採用されることになった。合同現地踏査を行って協議した結果、「イ」国側は移転交渉が困難であり、かつパル市の予算等を考慮すると第 1 案が環境社会配慮の観点から現実的であるとの結論に至った。

表 1 路線比較表

| 概略図           |  |  |  |
|---------------|--|--|--|
| 案名            | 第1案  | 第2案  | 第3案  |
| 概要            | 右岸側の住宅への影響を回避した案   | 右岸側の地滑り地帯を回避した案  | 空間計画を考慮してZRBの南側に道路を配置した案   |
| 橋長*           | 約260m  | 約260m  | 約260m  |
| アプローチ道路延長*    | 約170m (両側)   | 約170m (両側)   | 約170m (両側)   |
| アクセス道路延長*     | 約170m  | 約170m  | 約220m  |
| 影響家屋数*        | 約140m  | 約300m  | 約320m  |
| 既存橋への影響 (右岸側) | 0件   | 3件   | 3件、公共施設1件  |
| 評価            | <p>工事に支障があると判断された場合、既存橋アプローチ区間の擁壁を一部取り壊す必要がある。</p> <p>影響家屋数は0件であるが、右岸側アプローチ区間が地滑り地帯を通過するため、地質調査結果に基づいて対策工を講じる必要がある。加えて、既存橋のアプローチ区間の擁壁が工事に支障を与える可能性がある。</p> | <p>影響無し</p> <p>影響家屋数が3件発生するが、地滑り地帯の通過を回避し、工事中に既存橋アプローチ部の擁壁が干渉しないため、各案中最も優れる。</p> | <p>影響無し</p> <p>影響家屋3件に加えて、公共施設に干渉することから、各案中最も周辺地域に与える影響が大きい。</p> |

\* 推奨案を対象に実施される概略設計の結果により変更になる可能性が高い。

出典：JICA 調査団



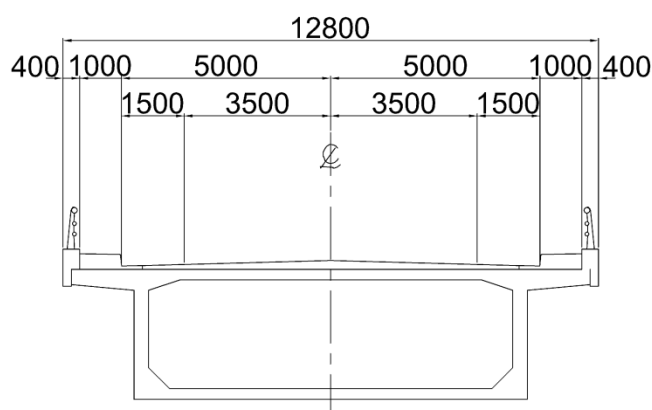
③ 上部工

関係機関と協議の結果、橋梁形式はPC箱桁橋を採用することで合意に至った。上部工形式概要を表2、橋梁断面図を図1に示す。

表2 上部工形式概要

| 項目     | 内容         |
|--------|------------|
| 橋梁形式   | PC箱桁橋（変断面） |
| 橋長（m）  | 260        |
| 径間数    | 3          |
| 支間長（m） | 75+110+75  |
| 幅員（m）  | 12.8       |

出典：JICA 調査団



出典：JICA 調査団（Technical Note）

図1 橋梁断面図

④ 下部工

上部工形式、及び地質調査結果（暫定）等に基づき、下部工形式を表3に示す構造とした。基礎工形式を含め、地質調査完了後、詳細設計において下部工形式を見直す必要がある。

表3 下部工形式

| 項目    | 内容            |
|-------|---------------|
| 基礎工形式 | 地質調査完了後比較検討する |
| 橋台形式  | 逆T字           |
| 橋脚形式  | 柱式、壁式         |

出典：JICA 調査団

2) 道路設計

① 設計基準

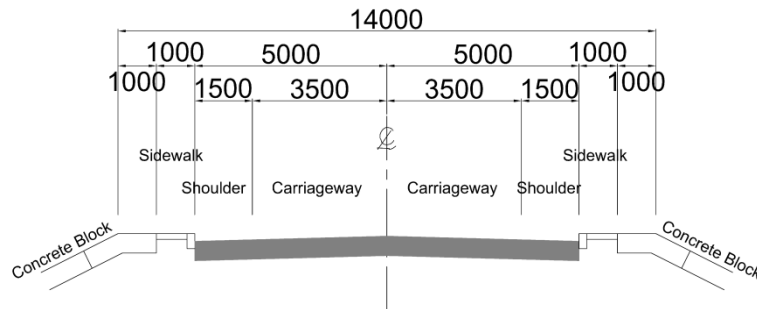
道路設計は、以下基準に準拠して実施する。

- Persyaratan teknis jalan dan kriteria perencanaan teknis jalan : Peraturan Menteri Pekerjaan Umum (Nomor: 19/PRT/M/2011)

- SNI T-14-2004 Geometri Jalan Perkotaan : Badan Standardisasi Nasional (BSN)
- Geometric Design of Highways and Streets (2018 7th Edition) : AASHTO

② 標準横断構成

関係機関と協議の結果、土工部の標準横断構成は図2に示す断面で合意に至った。パル第四橋、及びアプローチ道路は津波堤防の一部区間として計画されていることから、「イ」国道路基準を満足させたくて、津波堤防との整合性を図る必要がある。



出典：JICA 調査団 (Technical Note)

図2 標準横断構成

3) 資機材調達計画

① 工事用資材

PC ケーブルについては、日本もしくは第三国からの輸入となるが、その他のコンクリート、アスファルト材料等は「イ」国内での調達が可能である。主要材料調達先リストを表4に示す。

表4 主要資材調達先リスト

| 建設資材名        | 現地調達 | 日本調達 | 第三国調達 | 摘要     |
|--------------|------|------|-------|--------|
| 鋼材           | ○    |      |       |        |
| PC 鋼材        | ○    | ○    |       |        |
| 鉄筋 (D13~D32) | ○    |      |       |        |
| 鉄筋 (D36~D50) | △    | ○    |       | 現地では特注 |
| H形鋼          | ○    |      |       |        |
| セメント         | ○    |      |       |        |
| アスファルトコンクリート | ○    |      |       |        |
| 生コンクリート      | ○    |      |       |        |
| 砕石・砂         | ○    |      |       |        |
| 型枠材          | ○    |      |       |        |
| 鋼製型枠         | ○    |      |       |        |
| 支保工・足場工材     | ○    |      |       |        |
| ヒューム管        | ○    |      |       |        |

出典：JICA 調査団

② 工事用機械

本事業における汎用機械については、「イ」国内での現地調達を基本とする。主要機材の調達先リストを表5に示す。

表 5 主要機材調達先リスト

| 建設機械名                   | 現地調達 | 日本調達 | 第三国調達 | 摘要 |
|-------------------------|------|------|-------|----|
| ダンプトラック                 | ○    |      |       |    |
| バックホウ                   | ○    |      |       |    |
| ブルドーザ                   | ○    |      |       |    |
| トラッククレーン                | ○    |      |       |    |
| アスファルトフィニッシャ            | ○    |      |       |    |
| タイヤローラ                  | ○    |      |       |    |
| 振動ローラ                   | ○    |      |       |    |
| 大型ブレーカ                  | ○    |      |       |    |
| 発動発電機                   | ○    |      |       |    |
| クローラークレーン               | ○    |      |       |    |
| 杭打機<br>(リバース工法 φ1500mm) |      | ○    |       |    |
| バイプロハンマ                 | ○    |      |       |    |

出典：JICA 調査団

(4) プロジェクトの工期及び概略事業費

「イ」国政府から早期の工事完成を求められているため、右岸及び左岸から同時に施工を行う必要がある。施工工期については、現時点において 20 ヶ月を想定している。但し、詳細設計において変更される可能性がある。

本事業費総額は、25 億円で閣議決定されている。日本と「イ」国の負担区分に基づく双方の経費内訳を表 6 及び表 7 に示す。但し、この金額は交換公文上の供与限度額を示すものではない。加えて、現時点において環境調査が完了していないため、表 7 に示す負担費目及び金額は暫定とする。

表 6 概略事業費（日本側負担）

|               |
|---------------|
| 施工業者契約認証まで非公表 |
|---------------|

出典：JICA 調査団

表 7 概略事業費（「イ」国側負担）

| 負担事項  | 内容    | 負担金額（百万円） | 負担金額（IDR）     | 備考                    |
|-------|-------|-----------|---------------|-----------------------|
| 銀行手数料 |       | 2.00      | 300,000,000   |                       |
| 用地取得費 |       | 110.00    | 8,250,000,000 | 29,400 m <sup>2</sup> |
| 施設移設費 | 電柱・電線 | 5.00      | 750,000,000   |                       |
| 合計    |       | 117.00    | 9,300,000,000 |                       |

\*上記負担事項、及び金額は環境調査実施後に確定されるため、暫定とする。

出典：JICA 調査団

## (5) プロジェクトの評価

### 1) 妥当性

#### ① 「イ」国の上位計画との整合性

「イ」国は、2004年に策定した国家全体の長期開発計画に基づき、5年ごとの開発計画の策定及び実行をしている。現在は第3次計画期間中（2015-2019）である。調査対象地域であるスラウェシ州は、開発を5つの地方道路局ごとに進めている。スラウェシ州は北部の都市マナドから南部の都市マカサル間を接続する大スラウェシ回廊計画が実施されている。マナド-パル区間は既に開通しており、今後はパル-マカサル区間の開発が進められる予定である。

パル市内には東西方向に国道が整備されているが、市内を流れるパル川を横断する国道の本数は1本のみであることから、交通容量の拡大が課題となっている。本事業は東西方向の交通容量の拡大を目的としている。パル市内の東西方向の交通容量を強化することは、都市間移動の利便性を高めるため「イ」国の上位計画に合致している。

#### ② 我が国の援助方針・政策との整合性

我が国は、「イ」国の経済発展を援助する目的で質の高いインフラ整備を実施することを基本方針にしている。本事業は、2018年9月に発生した地震において崩落したパル第四橋の跡地に、日本の設計基準を用いてパル第四橋を再建するものである。パル第四橋は、パル市内の東西方向の交通確保において必要な橋梁であったが、現在は崩落したことで東西方向の交通確保が課題となっている。再建をすることで、パル第四橋が崩落する以前の様に東西方向の交通確保をすることが可能となる。続いて、耐震基準の整備・履行が不完全な「イ」国において、我が国が定める基準で耐震設計を行うことは、地震の頻発する「イ」国において質の高いインフラ整備を供給することに繋がる。したがって本事業は我が国の援助方針・政策と合致している。

#### ③ プロジェクトの緊急性

事業実施対象地域のパル市内においては、落橋したパル第四橋から南に約800mに位置するパル第三橋が東から西向き交通のみが通行可能となっている。同じく南に約1,600mに位置するパル第一橋は、西から東向き交通のみが通行可能となっており、相互交通が可能なのは南に約4,200mに位置するパル第二橋のみの状況である。その為、パル第四橋の落橋により東西方向の交通確保が喫緊の課題になっているうえ、沿岸部の交通が南に迂回を強いられている。

本事業を通じてパル市内の東西方向の交通を確保し、大スラウェシ回廊計画の実施の中で、都市間の道路ネットワークを高める重要な役割を担うとともに、物流が改善され経済復興及び発展に寄与することが期待される。

#### ④ 本邦技術導入

我が国と「イ」国はプレート境界に隣接し、人口密集地に活火山が存在している点で共通している。我が国においては、耐震基準を基にインフラ整備や集合住宅等が建設されているが、「イ」国の郊外では未だにレンガ造りの建物が多く、地震対策が十分であるとは言えない状況にある。また、「イ」国においては地震に対する研究者または専門家が少なく、耐震基準の整備・履行が十分になされていない。



我が国は、地震のみならず台風、洪水、土砂災害等の自然災害が多く、特に全世界においてマグニチュード6以上の20%が発生する地震大国である。我が国の橋梁については、1995年に発生した阪神・淡路大震災を受けて、基準類の見直しや落橋防止構造・装置の設置等、先の大震災からの教訓を活かした対策を講じている。

地震大国である我が国の基準において耐震設計を行うことは、同じく地震が多い「イ」国への技術移転に繋がり、今後の耐震基準整備の一助になると確信する。

#### ⑤ 事業の裨益対象

本事業の利用者（直接裨益人口）は、パル川を渡河し東西を繋ぐ道路であることから、広範囲に及ぶと推定されるものの、パル第四橋が建設されるパル市に限定すると約38万人となる。

表8 裨益人口

| 地区           | 人口      |         |
|--------------|---------|---------|
|              | 2016    | 2017    |
| Palu Barat   | 61,424  | 62,293  |
| Tatanga      | 39,369  | 39,997  |
| Ulujadi      | 27,319  | 27,763  |
| Palu Selatan | 69,492  | 70,571  |
| Palu Timur   | 70,378  | 71,452  |
| Mantikulore  | 62,822  | 63,804  |
| Palu Utara   | 22,834  | 23,196  |
| Tawaeli      | 20,382  | 20,706  |
| 合計           | 374,020 | 379,782 |

出典：JICA 調査団

#### 2) 有効性

本事業により期待される定量的な効果を表9に示す。

- パル第三橋（西向き交通）及びパル第一橋（東向き交通）への迂回が解消され、2車線対面通行が可能となる。
- 西向き交通の迂回距離が1.2km短縮され、東向き交通の迂回距離が1.8km短縮される。

表9 本事業における定量的効果

| 指標   | 基準値<br>(2019年実績値)      | 目標値(2024年)<br>【事業完成3年後】                    |
|--|------------------------|--|
| 車線数  | -                      | 2車線  |
| 通行方法   | -                      | 対面交通                                       |
| 移動距離短縮 (Palu-Donggala 道路<br>-Munif Rahman 道路) 注1 | 西向き 6.1km<br>東向き 6.8km | 西向き 4.9km (1.2km短縮)<br>東向き 4.9km (1.8km短縮) |

注1：2019年の経路は、パル第四橋が落橋して通行が出来ないため、西向きはパル第三橋、東向きはパル第一橋を通過することを想定した。

出典：JICA 調査団

① 定性的効果

➤ 地域住民の生活・安全性の向上

本事業を実施することで、道路ネットワークの強化、地域のアクセス性向上、物流の改善、津波発生時の避難場所確保等が成され、地域住民の生活及び安全性が向上する。

➤ 地域経済活動の促進

本事業を実施することにより、交通制限が解除され、交通・物流の円滑化が図られるとともに、人的・物的な交流が活性化することが期待されるとともに、復興のシンボルとなる橋梁が再建されることから、地域経済の発展および促進が期待される。

➤ 交通事故の低減

相互交通が可能となる「イ」国基準に則った 2 車線道路を建設することにより、安全かつ安定した道路インフラが確保され、交通事故の低減に寄与する。

➤ 維持管理費の低減

本邦基準及び技術を取り入れて耐震設計を行うことで災害に対する強靱性が図られ、大規模改修の費用逡減が可能になり、限られた予算の有効活用に繋がることを期待される。

以上より、本案件の妥当性は高く、有効性が見込まれると判断される。

# 1. プロジェクトの背景・経緯

## 1-1 当該セクターの現状と課題

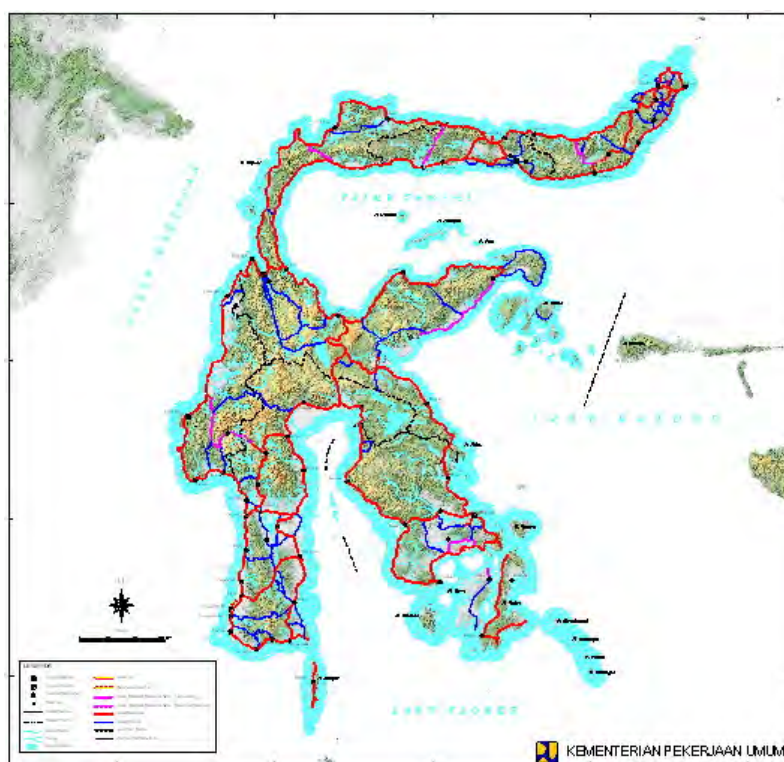
### 1-1-1 現状と課題

#### (1) 道路網（スラウェシ州）の整備状況と課題

図 1-1-1 にスラウェシ島の 2017 年時点の道路整備状況を示す。また、表 1-1-1 と表 1-1-2 に第 2 次及び第 3 次スラウェシ州開発計画における道路総局の目標値に対する達成値を示す。

インドネシア共和国（以下、「イ」国）では、2004 年に策定された国家全体の長期開発計画を基に 5 年ごとの開発計画を策定し、策定案の実行がなされている。現在は、第 3 次計画期間中（2015-2019）である。スラウェシ州は、国家開発計画の枠組みの中で開発計画を策定しており、計画・年次ごとに設定した目標値に対する達成値を記録している。スラウェシ州は、スラウェシ北部・ゴロンタロ州・スラウェシ中部・スラウェシ西部・スラウェシ南部・スラウェシ東南部に分割して、開発を地方道路局ごとに進めている。

スラウェシ州は、開発計画で設定している目標を達成できていない年度が多いことが課題として挙げられる。特に第 3 次計画においては、全ての項目で目標値を達成できていない。



出典：PU

図 1-1-1 スラウェシ州の道路地図：2018（赤ライン：国道、青ライン：県道）

1) 第2次国家開発計画 (2010-2014)

表 1-1-1 に「イ」国道路総局の第2次スラウェシ州開発計画結果を示す。2014年次において、計画目標値を殆どの項目で達成することが出来ていないが、2011年から2013年の期間では、計画目標値を概ね上回る結果になっている。

スラウェシ州の橋梁新設に着目すると、2012年度を除き計画目標値を達成することが出来ていないが、例年90%程度の達成率を記録している。

表 1-1-1 第2次スラウェシ州開発計画 (2010-2014)

| アウトプット              | 単位 | 2010 |        | 2011    |         | 2012   |        | 2013     |          | 2014     |          |
|---------------------|----|------|--------|---------|---------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|
|                     |    | 計画   | 達成     | 計画      | 達成      | 計画     | 達成     | 計画       | 達成       | 計画       | 達成       |
| 道路(定期点検)            | km | N/A  | 6,185  | 6,800   | 6,701   | 7,154  | 7,090  | 6,983    | 8,081    | 6,378    | 6,264    |
| 道路(補修)              | km | N/A  | 70.21  | 82.34   | 111.99  | 157.77 | 248.87 | 100.3    | 94.03    | 101.74   | 115.39   |
| 橋梁(定期補修)            | m  | N/A  | 15,699 | 51,232  | 53,469  | 67,053 | 67,135 | 57,704   | 70,389   | 70,196   | 69,229   |
| 橋梁(補修)              | m  | N/A  | 798.70 | 145.00  | 145.00  | 345.20 | 378.30 | 32.00    | 32.00    | 184.00   | 179.00   |
| 橋梁(架替)              | m  | N/A  | 393.63 | 372.50  | 372.50  | 862.00 | 921.68 | 1,773.00 | 1,823.15 | 1,600.50 | 1,388.11 |
| 道路拡幅                | km | N/A  | 540.71 | 380.37  | 362.04  | 444.84 | 480.88 | 594.04   | 530.10   | 625.12   | 535.32   |
| 道路拡張                | km | N/A  | 121.25 | 31.00   | 30.53   | 145.85 | 163.68 | 234.68   | 241.93   | 392.52   | 304.63   |
| 道路新設                | km | N/A  | N/A    | 4.00    | 2.38    | 0.76   | 0.14   | 10.43    | 12.93    | 19.56    | 22.76    |
| 橋梁新設                | m  |      | 670.63 | 2623.20 | 2470.50 | 720.83 | 937.37 | 833.62   | 740.95   | 890.44   | 719.60   |
| フライオーバー/アンダーパス/トンネル | m  | N/A  | N/A    | N/A     | N/A     | N/A    | N/A    | N/A      | N/A      | N/A      | N/A      |
| 高速道路                | km | N/A  | N/A    | N/A     | N/A     | N/A    | N/A    | N/A      | N/A      | 0.63     | 0.63     |

出典：Bina Marga

2) 第3次国家開発計画 (2015-2019)

表 1-1-2 に「イ」国道路総局の第3次スラウェシ州開発計画結果を示す。第3次計画においても、計画目標値を殆どの項目で達成することが出来ていない。

スラウェシ州の橋梁新設に着目しても、第3次計画期間において、計画目標値を達成することは各年度で出来ていない。

表 1-1-2 第3次国家開発計画 (2015-2019)

| アウトプット              | 単位 | 2015   |        | 2016   |        | 2017     |          | 2018   |          | 2019 |     |
|---------------------|----|--------|--------|--------|--------|----------|----------|--------|----------|------|-----|
|                     |    | 計画     | 達成     | 計画     | 達成     | 計画       | 達成       | 計画     | 達成       | 計画   | 達成  |
| 道路(定期点検)            | km | 6,754  | 6,640  | 8,483  | 8,268  | 8,127    | 8,076    | 8,240  | 8,097    | N/A  | N/A |
| 道路(補修)              | km | 150.00 | 150.00 | 84.35  | 80.25  | 98.06    | 94.98    | 124.47 | 107.95   | N/A  | N/A |
| 橋梁(定期点検)            | m  | 70,343 | 70,343 | 71,993 | 71,933 | 72,821   | 71,251   | 66,592 | 66,403   | N/A  | N/A |
| 橋梁(補修)              | m  | 867    | 867    | N/A    | N/A    | 1912.40  | 1912.40  | 10,327 | 10,203   | N/A  | N/A |
| 橋梁(架替)              | m  | 1,852  | 1,735  | 455.50 | 455.50 | 1,231.70 | 1,181.76 | 899.59 | 1,158.52 | N/A  | N/A |
| 道路拡幅                | km | N/A    | N/A    | 326.00 | 306.20 | N/A      | N/A      | 303.00 | 278.56   | N/A  | N/A |
| 道路拡張                | km | 632    | 612    | 314    | 296    | 4.80     | 4.58     | 1.30   | 1.30     | N/A  | N/A |
| 道路新設                | km | 26.01  | 23.00  | 20.83  | 19.51  | 21.60    | 17.60    | 389.31 | 240.30   | N/A  | N/A |
| 橋梁新設                | m  | 930.00 | 852.00 | 852.47 | 819.85 | 1,529.59 | 1,354.66 | 977.80 | 912.26   | N/A  | N/A |
| フライオーバー/アンダーパス/トンネル | m  | 770    | 594    | 1,249  | 1,249  | 995.22   | 874.21   | 200.01 | 200.01   | N/A  | N/A |
| 高速道路                | km | 3.47   | 2.08   | 3.50   | 3.50   | 7.53     | 7.53     | 9.34   | 8.34     | N/A  | N/A |

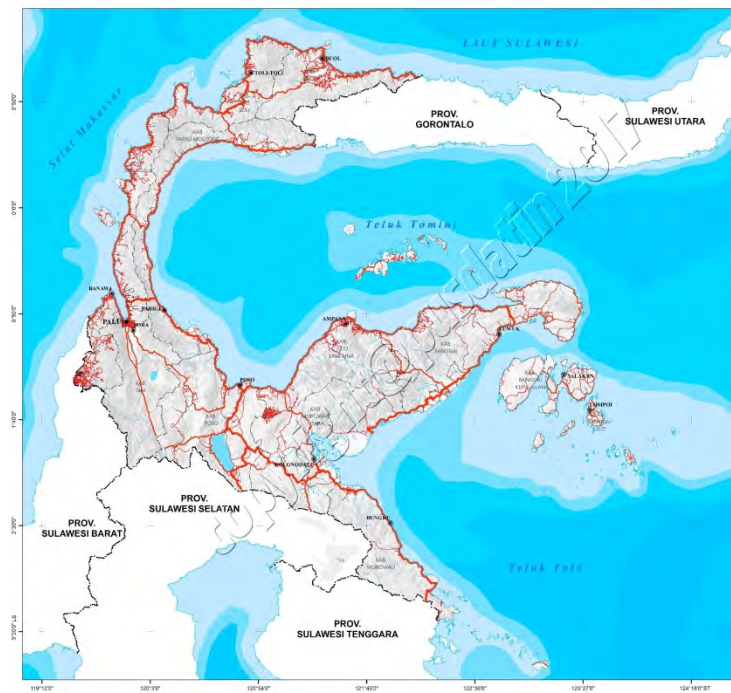
出典：Bina Marga



(2) 調査対象地域の道路網の整備状況と課題

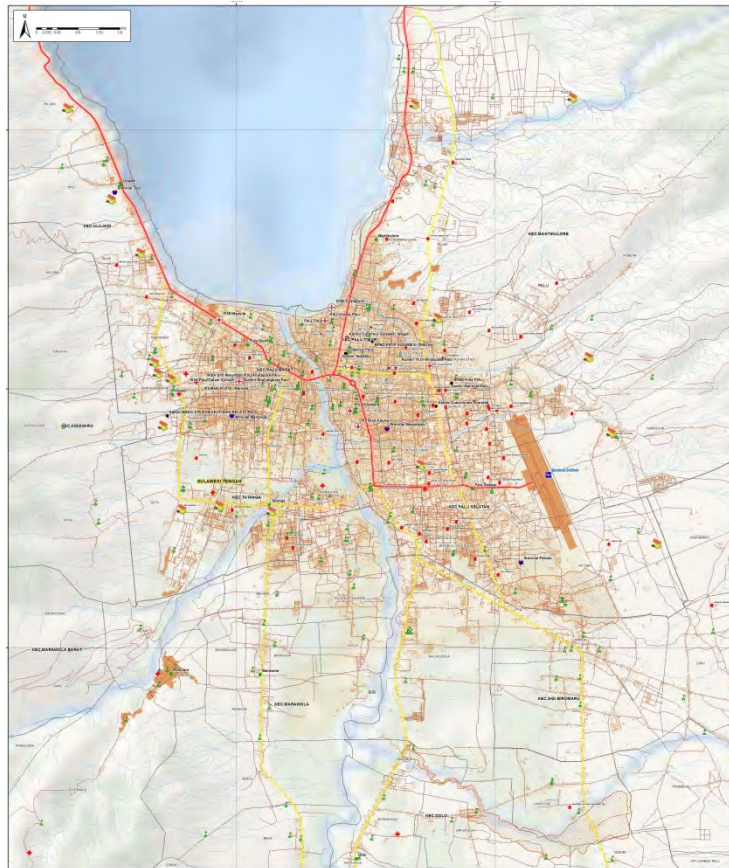
図 1-1-2 に 2017 年時の中部スラウェシ州の道路整備状況を示す。また、図 1-1-3 に本事業の対象地域である 2018 年時点でのパル市内の道路整備状況を示す。中部スラウェシ州の国道は、北部のゴロンタロ州・西・南・東南スラウェシ州と国道で接続している。一方で、各州を繋げる国道本数が少なく、道路ネットワークに課題が見られる。

パル市内には、東西方向を横断する国道と市内を環状に巡る県道が整備されている。国道は東西方向にしか整備されておらず、南スラウェシ州に向かう道路は県道のみとなっている。また、東西方向の国道が 1 本しか整備されていない為、パル川を横断する交通が集中し、慢性的な渋滞を引き起こしている。



出典：PU

図 1-1-2 中部スラウェシ州の道路地図：2017（赤ライン：国道、黄ライン：県道）



出典：BBPJN14

図 1-1-3 パル市内の道路地図：2018（赤ライン：国道、黄ライン：県道）

## 1-1-2 開発計画

### (1) 国家開発計画

「イ」国は、2004年に策定された国家の長期開発計画を基に5年ごとの開発計画を策定し、策定案が実行されている。現在は、第3次計画期間中（2015-2019）である。

#### 1) 第2次国家開発計画（2010-2014）

表 1-1-3 に第2次国家開発計画の達成度を示す。第2次計画の開発ビジョンとして、「繁栄し民主的で公正なインドネシア」を掲げている。開発ビジョンに基づき、8つのセクターに分類して開発が実行された。多くの項目において、計画に対する実績が大きく上回っている。その中でも新設道路の総延長は、計画が377kmに対して実績が1,268kmとなっており、336.4%と大きく計画値を上回っている。さらに、橋梁の新設は計画25,552mに対して実績が41,469mであり、162.3%の達成率を記録している。計画値に対して未達となった項目でも、高速道路整備を除き例年90%以上の達成度を記録している。

表 1-1-3 第 2 次国家開発計画 (2010-2014)

| No | アウトプット指標                        | 単位 | 計画      | 達成        | (%)   | 達成度 |
|----|---------------------------------|----|---------|-----------|-------|-----|
| 1  | 道路保全                            | Km | 168,999 | 168,165   | 99.5  | 未達成 |
|    | 道路総延長 (定期点検)                    | Km | 164,169 | 161,612   | 98.4  | 未達成 |
|    | 道路総延長 (補修)                      | Km | 4,830   | 6,553     | 135.7 | 達成  |
| 2  | 橋梁保全                            | M  | 855,664 | 1,299,670 | 151.9 | 達成  |
|    | 橋梁総延長 (定期点検)                    | M  | 753,969 | 1,199,996 | 159.2 | 達成  |
|    | 橋梁総延長 (補修)                      | M  | 86,172  | 79,823    | 92.6  | 未達成 |
|    | 橋梁総延長 (架け替え)                    | M  | 15,523  | 19,852    | 127.9 | 達成  |
| 3  | 拡幅                              | Km | 19,371  | 18,897    | 97.6  | 未達成 |
|    | 道路総延長 (再建)                      | Km | 8,226   | 8,362     | 101.6 | 達成  |
|    | 道路総延長 (拡幅)                      | Km | 11,145  | 10,535    | 94.5  | 未達成 |
| 4  | 道路総延長 (新設)                      | Km | 377     | 1,268     | 336.4 | 達成  |
| 5  | 橋梁総延長 (新設)                      | M  | 25,552  | 41,469    | 162.3 | 達成  |
| 6  | 新設総延長 (フライオーバー/<br>アンダーパス/トンネル) | M  | 15,979  | 20,959    | 131.2 | 達成  |
| 7  | 高速道路                            | Km | 59      | 46        | 77.2  | 未達成 |
| 8  | 地方道路 (新設/拡幅)                    | Km | 1,382   | 2,665     | 192.8 | 達成  |
|    | 地方道路 (新設/拡幅)                    | Km | 1,378   | 2,660     | 193.0 | 達成  |
|    | 地方橋梁 (新設)                       | Km | 4,114   | 4,341     | 105.5 | 達成  |

出典 : JICA 調査団

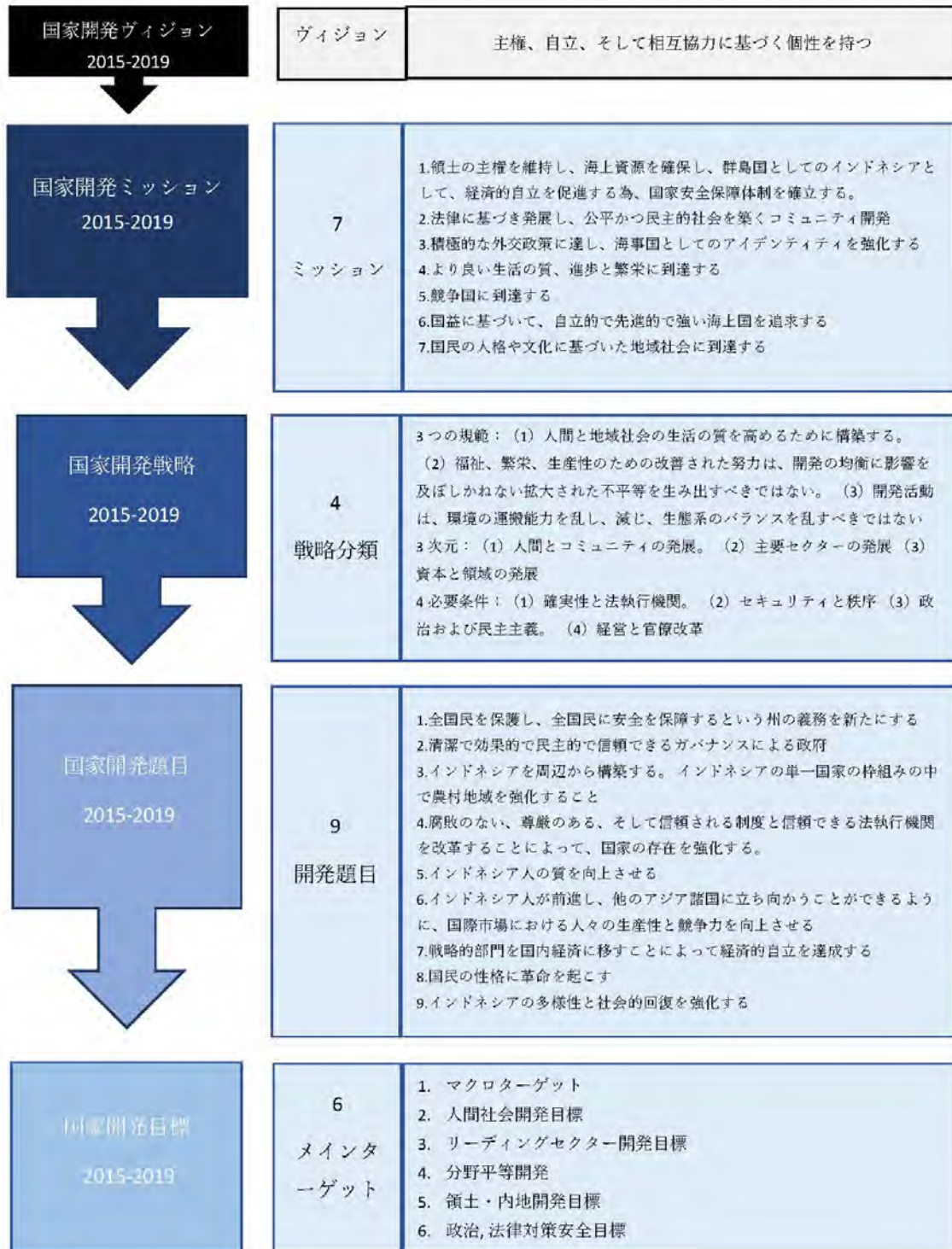
## 2) 第 3 次国家開発計画 (2015-2019)

道路総局は、2015 年から 2019 年の期間において、第 3 次国家開発計画の目標を策定している。開発目標には以下を設定し、計画を策定している。

- 7つのミッション
- 4つの戦略的グループ
- 9つの開発アジェンダ、
- 6つのメインターゲット

開発ビジョンとして、「主権、自立、そして相互協力に基づく個性を持つ」を掲げている。図 1-1-4 に第 3 次計画のビジョンを示す。





出典：Bina Marga

図 1-1-4 第 3 次計画ビジョン（2015-2019）

計画ビジョンに基づき、開発計画が実行され、第 3 次国家開発計画では 3 つの実行戦略を策定し、指標ごとにアウトプットを設定している。本事業の対象期間となる第 3 次国家開発計画の国家間接統強化戦略の代表的な例として、スマトラ～ジャワ回廊計画が実施されている。スマトラ島北部の都市バンダアチェから南部の都市ランブンを接続し、かつジャワ島西部の都市メラックから東部都市クタパンを接続する回廊計画である。



本事業実施対象地域となるスラウェシ島は、スラウェシ島北部の都市マナドから南部の都市マカサル間を接続する大スラウェシ回廊計画が実施されている。2012年から2016年の期間でマナドからパル区間が開通されており、今後はパルからマカサル区間の開発が進められる予定である。本事業実施対象地域であるパル市は、中部スラウェシ州に位置し、第3次国家開発計画の枠組みの中で、大スラウェシ回廊計画に包括された地域として開発が進められている。パル市内には東西方向に国道が整備されているが、市内を流れるパル川を横断する国道の本数は1本のみであることから、交通容量の拡大が課題となっている。本事業は、東西方向交通の道路ネットワークを強化することを目的の一つとして実施される。表 1-1-4 に第3次計画の概要を示す。

表 1-1-4 第3次国家開発計画（2015-2019）

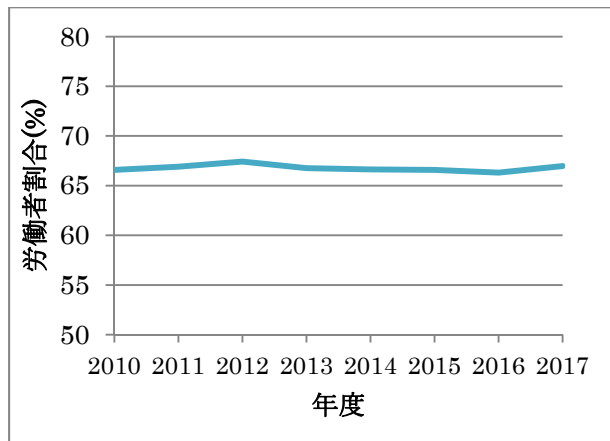
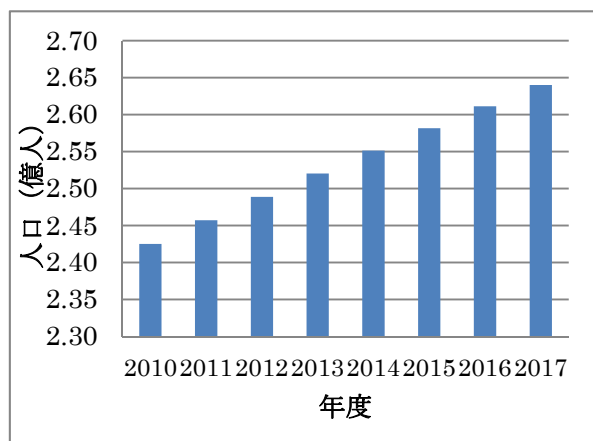
| 実行戦略                 | 業務指標                      | プログラム             | プログラム指標                | アウトプット   |
|----------------------|---------------------------|-------------------|------------------------|----------|
| 国家の競争力を高める為の国家間接続強化。 | 国土接続割合を2019年末までに77%を目指す。  | スマトラジャワ回廊の旅行時間短縮。 | 旅行時間を45km/hとする。        | 道路建設     |
|                      |                           |                   |                        | 高速道路建設   |
|                      |                           |                   |                        | 橋梁建設     |
|                      |                           |                   |                        | FO/UP 建設 |
|                      |                           |                   |                        | 拡幅       |
| 国道安定性を高める。           | 国道の安定性を2019年末までに98%まで高める。 | 国道使用を高める。         | 国道の交通量を1,33百万台/kmを目指す。 | 定期点検     |
|                      |                           |                   |                        | 定期調整     |
|                      |                           |                   |                        | 定期保全     |
|                      |                           |                   |                        | 補修（機微）   |
|                      |                           |                   |                        | 補修（大幅）   |
|                      |                           | 再建                |                        |          |
|                      |                           | 地方の道路付帯施設の強化。     | 道路の施設配備率100%を目指す。      | 地方道路取り扱い |

出典：Bina Marga

### 1-1-3 社会経済状況

#### (1) 総人口・労働人口割合

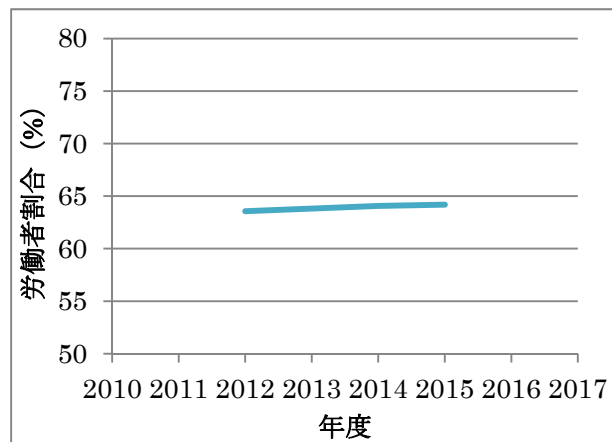
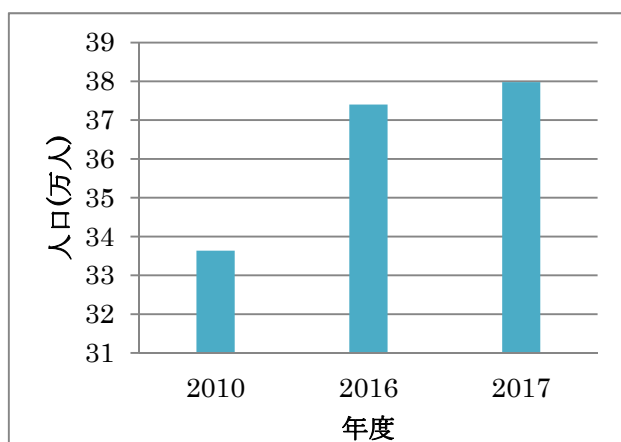
「イ」国の総人口、及び総人口における労働人口割合推移を図 1-1-5 に示す。「イ」国の総人口は、2010年では2億4千万人程であったが、2017年まで増加を続け、2017年では2億6千万人を超える人口にまで増加した。この期間の人口増加率は8%となっており、今後も「イ」国の人口は増加傾向を継続することが想定される。また、総人口における労働人口（15歳以上）の割合は、同期間において継続して65%を超える水準となっている。「イ」国の人口増加に伴い、労働人口も同様に増加傾向を継続することが想定される。



出典：Badan Pusat Statistik 2017

図 1-1-5 インドネシアの総人口及び総人口における労働人口割合推移（2010-2017）

パル市の総人口、及び総人口における労働人口割合を図 1-1-6 に示す。対象地域のパル市の総人口は、2010 年度で 336,352 人、2017 年度で 379,782 人となっている。この期間の人口増加率は、1.54% である。また、パル市の人口における労働人口割合は、2012 年から 2015 年までの調査結果では、継続して 65% の水準を保っている。対象地域においても、「イ」国全体に比較して顕著ではないが、同様の傾向がある為、パル市の総人口及び労働人口も今後も緩やかではあるものの増加傾向が継続されることが想定される。



出典：Badan Pusat Statistik 2017

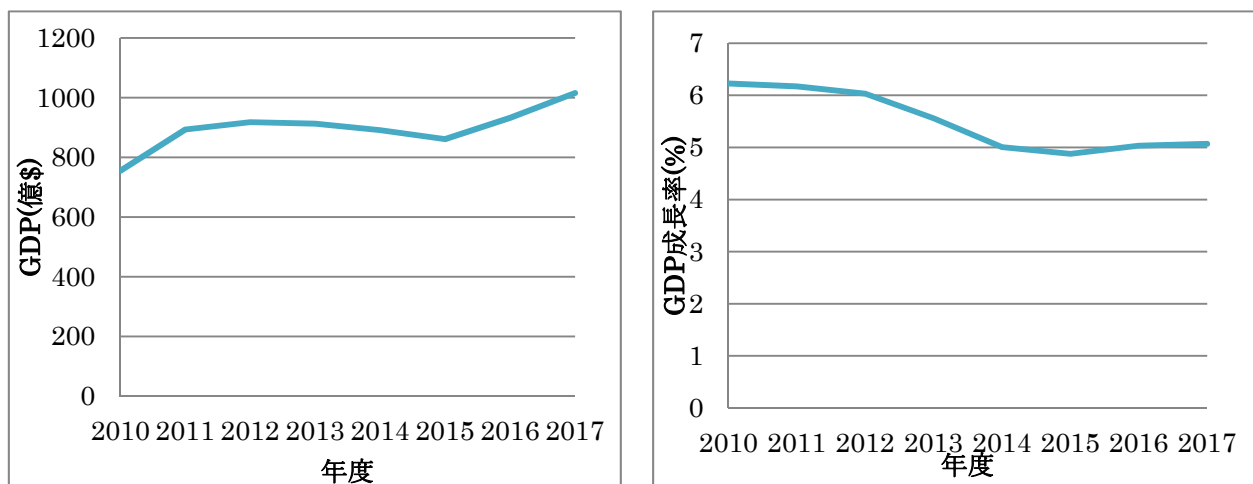
図 1-1-6 パル市の総人口及び総人口における労働人口割合（2010-2017）

## (2) 経済状況

1997 年 7 月のアジア通貨危機後、「イ」国政府は IMF との合意に基づき、銀行部門と企業部門を中心に経済構造改革を断行した。政治社会情勢及び金融の安定化を図り、個人消費の拡大を背景として 2005 年以降の経済成長率は、世界金融・経済危機の影響を受けた 2009 年を除き 5% 後半～6% 台という比較的高い成長率を達成した。2010 年には一人当たり名目 GDP が 3,000 ドルを突破した。「イ」国は過去 10 年間の間、堅調な成長を継続して続けている一方で、ルピア安の影響もあって経常収支が 2012 年頃から赤字に転じている。輸出を促進して収支改善をすることが課題である。

### 1) GDP 推移・成長率

「イ」国の 2010 年から 2017 年の GDP 推移及びその成長率を図 1-1-7 に示す。2010 年時点では 800 億ドル程度であったが、2017 年では約 1.25 倍の 1000 億ドルまで拡大している。GDP の拡大に併せて GDP 成長率も平均して 5%以上の成長率を継続している。

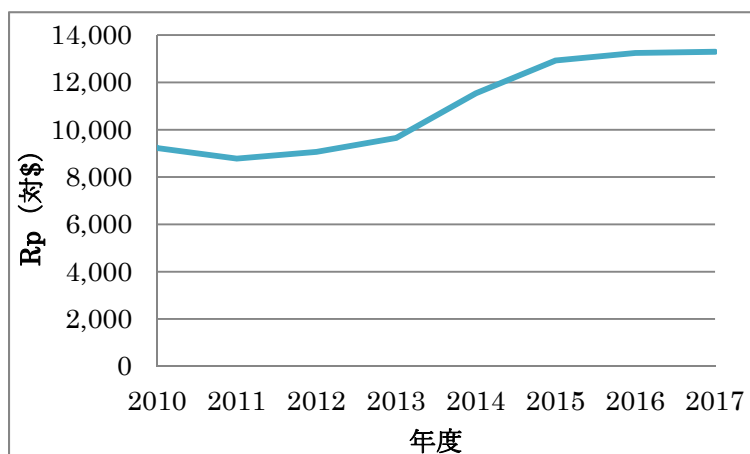


出典：2018 World Bank

図 1-1-7 インドネシアの GDP 推移及び成長率 (2009-2017)

### 2) 通貨レート (対 US\$)

図 1-1-8 にインドネシアに対する US ドルの為替レートを示す。インドネシアルピアは、US ドルに対して 2013 年頃からルピア安に転じている。その後もルピア安が継続し、2017 年 4 月時点において、1USD=Rp13,400 程度までルピア安が進んでいる。

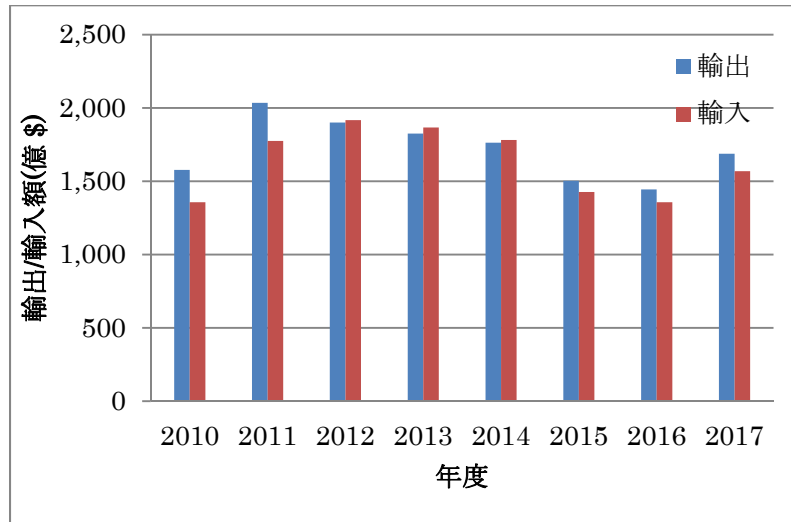


出典：2018 Indonesia Central bank

図 1-1-8 Rp (対 US ドル) (2010-2017)

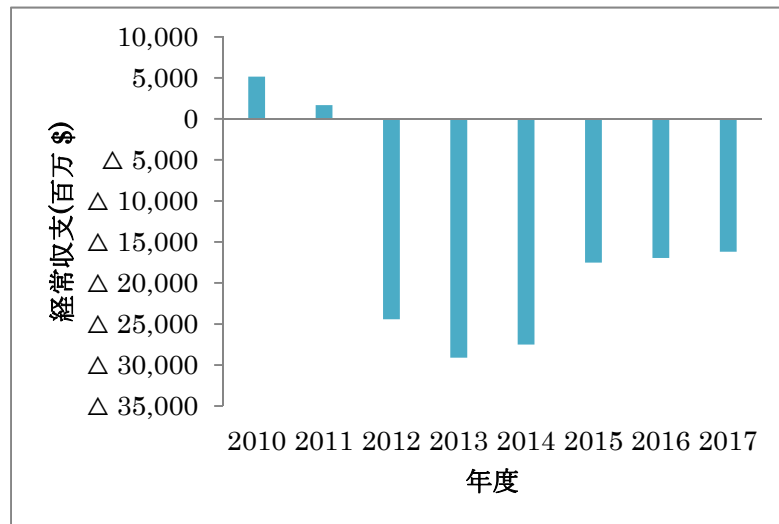
### 3) 貿易・経常収支

「イ」国の輸出入及び経常収支の 2010 年から 2017 年までの推移を図 1-1-9 及び 図 1-1-10 に示す。輸出入共に 1,500 億ドル程度である。輸出・輸入額を比較すると、輸出額がやや多い傾向にある。一方で、図 1-1-10 に示す様に 2012 年から経常収支は赤字を記録している。図 1-1-8 に示しているように、同時期にルピア安に転じていることから、ルピア安の影響が大きいことが原因であると考えられる。



出典：外務省（2018年）

図 1-1-9 インドネシアの輸出入推移（2010-2017）



出典：JETRO（2018年）

図 1-1-10 インドネシアの経常収支（2010-2017）

## 1-2 無償資金協力の背景・経緯及び概要

### 1-2-1 背景・経緯

2018年9月28日、パルーコロ断層深さ10kmの地点を震源に、マグニチュード7.5の地震が発生し、甚大な被害が生じた。地震の衝撃と地震に伴って発生した津波及び液状化による被害によって、パル市を初めとする4都市で都市機能が麻痺した。パルでの被災状況を受け、国家開発企画庁（National Development Planning Agency: 以下、BAPPENAS）は、中部スラウェシ復興の為のマスタープラン策定を開始した。JICAとBAPPENASは、我が国からの技術供与を通じて、中部スラウェシ復興を協力しながら実施することに合意した。

被災した建造物の再建と災害に対して強靱な都市づくりを計画することを目的に、中部スラウェシ復興プロジェクトが形成された。





出典：JICA 調査団

図 1-2-1 パル地震発生位置（左）、プロジェクト対象地域（右）

発生した地震により、パル川河口に位置するパル第四橋が落橋・崩壊した。パル第四橋はその形状がユニークなことから、アイコンックな存在として地域住民に親しまれており、交通機能のみならず地域住民の市民活動の場としての役割も担っていた。地震によって崩壊したことで地域住民の心情を傷めただけでなく、パル第四橋によって確保されていた東西方向の交通確保が課題となった。被災した地域住民及び都市機能にとって、重要な役割を担っていたパル第四橋を再建することは、早急に対応すべき課題である。その為、迅速性の求められる無償資金協力案件としてパル第四橋を再建することが決定された。

このような背景・経緯のもと、「イ」国政府は、以下の内容の無償資金協力を 2018 年 12 月に我が国に要請した。

- 要請年月：2018 年 12 月
- 要請金額：25 億円
- 要請内容：落橋したパル第四橋の再建



出典：Kompas.com

図 1-2-2 パル第四橋崩壊前（左）、崩壊後（右）

## 1-2-2 要請内容の合意

地震によって崩壊したパル第四橋の再建事業は、中部スラウェシ州パル第四橋架け替え事業として、「イ」国政府と事業実施の合意がなされ、M/D (Minutes of Discussion) の内容に基づいて、パル第四橋落橋跡地に新たな橋梁を新設することが決定した。新設する橋梁の架橋位置は、地滑りを起こした箇所を避ける為、崩壊したパル第四橋よりも上流側に建設することで決定している。また、テクニカル・ノートを以って、日本の道路橋示方書に基づいて橋梁設計を行い、「イ」国の設計基準の Standar National Indonesia (SNI) を用いて設計結果の照査を行うことで Bina Marga と合意している。

## 1-2-3 事業実施の必要性

スラウェシ州は、第3次国家開発計画の中で北部の都市マナドから南部の都市マカサルを接続する大スラウェシ回廊計画を実施している。2016年までにマナドから事業実施対象地域のパルまでの区間が開通しており、今後はパルからマカサル区間の開通に向けて計画が進められる予定である。

事業実施対象地域のパル市内においては、落橋したパル第四橋から南に約800mに位置するパル第三橋が東から西向き交通のみが通行可能となっている。同じく南に約1,600mに位置するパル第一橋は、西から東向き交通のみが通行可能となっており、相互交通が可能なのは南に約4,200mに位置するパル第二橋のみの状況である。その為、パル第四橋の落橋により東西方向の交通確保が喫緊の課題になっているうえ、沿岸部の交通が南に迂回を強いられている。

本事業を通じてパル市内の東西方向の交通を確保し、大スラウェシ回廊計画の実施の中で、都市間の道路ネットワークを高める重要な役割を担うとともに、物流が改善され経済復興及び発展に寄与することが期待される。

## 1-3 我が国の援助動向

### 1-3-1 概要

「イ」国は、急速な経済発展にインフラ整備が追い付いていないことが持続的な経済成長を遂げる上で大きな障害になっている。特に「イ」国の陸運・空港・港湾などの運輸交通分野におけるインフラ整備不足及び整備されている既存施設の質の低さが課題になっている。また、ジャワ島等の地域と地方の間に人口・産業・所得水準に大きな格差が生じており、持続的な経済成長と社会の安定を両立させるためには、国民の生活水準の向上を図ることが課題となっている。さらに、「イ」国では、地震・津波・火山・洪水・土砂災害等の自然災害が毎年の様に頻発し、その度に大きな被害が生じている。災害予防の観点から、防災を担う行政の能力強化や洪水対策、住宅耐震化に向けた制度構築等が課題となっている。

我が国は、上記課題を解決するため、「イ」国への援助基本方針として、大目標及び中目標を設定している。大目標として、「イ」国のバランスのとれた経済発展と国際的課題への対応能力向上への支援を設定している。我が国は「イ」国に対して、経済発展を援助する目的で、質の高いインフラ整備や安全で公正な社会の実現に向けた支援を実施している。また、アジア地域及び国際社会の課題への対応能力向上に向けた支援を実施している。さらに、中目標として、国際競争力の向上、均衡ある発展を通じた安全で公正な社会の実現、アジア地域及び国際社会の課題への対応能力向上を3つの重点分野として定め、支援を実施している。

### 1-3-2 我が国および JICA の協力方針と本事業の位置づけ

我が国は、「イ」国の経済発展を援助する目的で質の高いインフラ整備を実施することを基本方針にしている。本事業は、2018年9月に発生した地震において崩落したパル第四橋の跡地に、日本の設計基準を用いてパル第四橋を再建するものである。パル第四橋は、パル市内の東西方向の交通確保において必要な橋梁であったが、現在は崩落したことで東西方向の交通確保が課題となっている。再建をすることで、パル第四橋が崩落する以前のように東西方向の交通確保をすることが可能となる。中部スラウェシ州の道路整備計画の中においても、都市間を接続する国道が市内に整備されているが、現状東西方向を横断する国道は1本しかないため、東西方向の道路ネットワークを強化することは、都市間移動の利便性を高めるために重要である。続いて、耐震基準の整備・履行が不完全な「イ」国において、我が国が定める基準で耐震設計を行うことは、地震の頻発する「イ」国において質の高いインフラ整備を供給することに繋がる。

### 1-3-3 我が国の道路セクターへの援助実績

我が国が過去「イ」国道路セクターに対して行った援助実績一覧を表 1-3-1 に示す。

表 1-3-1 道路セクターへの援助実績

| 実施年度  | 案件名（無償資金協力）                      | 案件名（有償資金協力）  |
|-------|----------------------------------|--|
| 2002年 | 中央及び北スラウェシ州橋梁改修計画（詳細設計）          |  |
| 2003年 | 中央及び北スラウェシ州橋梁改修計画                |  |
| 2004年 |                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● タンジュンプリオク港アクセス道路建設計画（第一期）</li> <li>● ジャワ北幹線道路渋滞緩和計画</li> <li>● タンジュンプリオク港アクセス道路建設計画（第二期）</li> </ul> |
| 2005年 | 東ヌサトゥンガラ州橋梁建設計画                  |  |
| 2006年 | 西ヌサトゥンガラ州橋梁建設計画                  | アチェ復興計画  |
| 2008年 | ニアス島橋梁復旧計画（詳細設計）                 |  |
| 2009年 | 第二次西ヌサトゥンガラ州橋梁建設計画<br>ニアス島橋梁復旧計画 |  |
| 2011年 |                                  | バンドン市内有料道路計画   |
| 2012年 | 第三次西ヌサトゥンガラ州橋梁建設計画               |  |

出典：JICA ウェブサイト

#### (1) 無償資金協力

無償資金協力として、我が国が「イ」国道路セクターに対して行った支援事業の概要を以下に示す。

##### 1) 中央及び北スラウェシ州橋梁改修計画（詳細設計）

|       |   |
|-------|---|
| 実施年度  | 2002年   |
| 供与限度額 | 0.61億円  |
| 案件概要  | <p>中央スラウェシ州のブオル、バンガイ両県は橋梁の殆どが木橋で、破損が目立ち、雨期には河川の水位上昇による交通遮断を余儀なくされている。また、北スラウェシ州の2橋は、破損や老朽化により本来の基幹道路としての機能を失っている。</p> <p>本計画は、両州の16橋（中央：14、北：2）の改修を行い、地方の基本交通手段の確保、地域住民の日常生活の改善および全スラウェシ島の均衡ある発展を図るものである。</p> |

出典：JICA ウェブサイト

2) 中央及び北スラウェシ州橋梁改修計画

|       |   |
|-------|---|
| 実施年度  | 2003年   |
| 供与限度額 | 10.46億円<br>(平成15年度1.31億円、平成16年度6.75億円、平成17年度2.4億円)  |
| 案件概要  | <p>インドネシアのスラウェシ島は、ジャワ島やスマトラ島に比べて開発が遅れており、中でも中央スラウェシ州のブオル県、バンガイ県は州都パルから離れているため、道路等の整備が遅れており、現在使用している橋梁の殆どが4年から50年前に建設された木橋のため、近年の交通量の増加や老朽化による破損している。また、雨期によって河川の水位が上昇すると使用することが出来なくなり、他の地域と分断される等、住民の日常生活にも支障を来している。また、スラウェシ島縦断幹線道路上にある北スラウェシ州の2橋梁は、洪水による破損や老朽化により、重量制限などを行わざるを得ない状況にあり、本来の基幹道路としての機能を有していない。</p> <p>このような中、インドネシアでは持続的で公平な開発基盤強化を行「イ」国民福祉の向上、経済再建の促進を図ることを目的として、地域住民の生活レベルの改善、全スラウェシ島の均衡ある発展を図るため、これら橋梁の架け替え、および改修を緊急の課題としているが、厳しい財政状況のため困難な状況にある。</p> <p>このような状況の下、インドネシア政府は「中央および北スラウェシ州橋梁改修計画」を策定し、中央スラウェシ州における14橋梁の改修、北スラウェシ州における2橋の改修を行うために必要な資金につき、わが国政府に対し無償資金協力を要請してきたものである。</p> |

出典：JICA ウェブサイト

3) 東ヌサトゥンガラ州橋梁建設計画

|       |  |
|-------|--|
| 実施年度  | 2005年  |
| 供与限度額 | 9.38億円<br>(平成17年度1.73億円、平成18年度3.66億円、平成19年度3.21億円)   |
| 案件概要  | <p>インドネシア東部のティモール島に位置する東ヌサトゥンガラ州は、インドネシアで最も貧困な地域の一つであり、1人あたりの地域総生産が全国平均の3分の1以下に留まっている。同州の経済活動を向上させるためには、道路整備による人の交流や物流の改善が不可欠である。</p> <p>現在、州内には州都クバンから島中央部の山岳地域を経由し、東ティモール国境に至る中央回廊が東西方向を結ぶ唯一の幹線道路として整備されている。しかし、大型車の通行規制や雨季における土砂災害時の通行止めにより円滑な交通・物流が行えない状況となっている。そのため、中央回廊を補完する幹線道路として海岸沿いの州道の整備が進められているが、2橋梁が未整備のため雨季には河川の水位上昇で交通がストップし、地域が分断されるなど交通・物流から地域住民の日常生活まで支障をきたしている。</p> <p>このような状況の下、インドネシア政府は、幹線道路上の2橋梁(メヌ橋、ファトゥアットゥ橋)を新設するために必要な資金につき、わが国政府に対し無償資金協力を要請してきたものである。</p> |

出典：JICA ウェブサイト

4) 西ヌサトゥンガラ州橋梁建設計画

|       |  |
|-------|--|
| 実施年度  | 2006年  |
| 供与限度額 | 7.94億円<br>(平成18年度1.30億円、平成19年度3.86億円、平成20年度2.78億円)   |
| 案件概要  | <p>インドネシアでは、都市部と地方部の経済格差が拡大する弊害が生じたため、国家中期開発計画(2004～2009年)において貧困削減による地域格差の解消に取り組んでいる。インドネシア東部のロンボク島、スンバワ島に位置する西ヌサトゥンガラ州は、インドネシアで最も貧困な地域の一つであり、同州の経済活動を活性化させるためには、道路整備による人の交流や物流の改善が不可欠である。</p> <p>同州内の物流の安全性を強化するとともに、開発が遅れている南部地域の開発を促進するため、インドネシア政府は南岸沿いの幹線道路の整備に取り組んでいる。南岸沿いの幹線道路は2002年に暫定的に開通したが、一部の橋梁が未整備であるとともに、開通後に山岳区間において土砂崩れや路面浸食が発生したため、通年にわたる通行が不可能となっている。</p> <p>このような状況の下、インドネシア政府は、幹線道路の西側区間上の8橋梁の新設及び1橋梁の改修に必要な資金につき、我が国政府に対し無償資金協力を要請してきたものである。</p> |

出典：JICA ウェブサイト



5) ニアス島橋梁復旧計画（詳細設計）

|       |   |
|-------|---|
| 実施年度  | 2008年   |
| 供与限度額 | 0.33億円  |
| 案件概要  | インドネシアは、東南アジア地域で最大の人口と国土を有する我が国の伝統的な友好国であり、我が国にとって主要なエネルギー資源（石油、LPG等）供給国の一つである。我が国は、基礎生活、人作り、環境分野を中心に、同国の民主的で公正な発展を支援している。<br>インドネシアのスマトラ西沖に位置するニアス島は2004年12月の北スマトラ沖地震で大きな被害を受けた。特に主要橋梁は損傷したまま本格的な復旧ができず、落橋のおそれのある状態が続いているため、本事業により橋梁の復旧計画が実施された。 |

出典：JICA ウェブサイト

6) 第二次西ヌサトゥンガラ州橋梁建設計画

|       |  |
|-------|--|
| 実施年度  | 2009年  |
| 供与限度額 | 4.92億円   |
| 案件概要  | 本計画は、インドネシアで最も貧困な地域の一つであるインドネシア東部の西ヌサトゥンガラ州スンバワ島の南岸沿い幹線道路西側区間において4橋梁を新設するために必要な資金を供与するものである。 |

出典：JICA ウェブサイト

7) ニアス島橋梁復旧計画

|       |  |
|-------|--|
| 実施年度  | 2009年  |
| 供与限度額 | 15.22億円  |
| 案件概要  | 本計画は、2004年の北スマトラ沖地震などで大きな被害を受けたインドネシア西部のニアス島において橋長の大きい6橋梁の耐震補修・架け替えに必要な資金を供与するものである。 |

出典：JICA ウェブサイト

8) 第三次西ヌサトゥンガラ州橋梁建設計画

|       |   |
|-------|---|
| 実施年度  | 2012年   |
| 供与限度額 | 9.61億円  |
| 案件概要  | 本計画は、貧困率が全国平均を大きく上回る西ヌサトゥンガラ州の経済活動を向上させるため、同州スンバワ島内の環状幹線道路の南側（タタルルールニュック）区間上の10橋梁の整備を支援するものである。<br>また、対象の幹線道路は、我が国企業が参画する銅山開発のためのアクセス道路としても活用されることが期待されており、この計画は、我が国企業の活動環境整備、銅山開発促進に伴う地元経済の活性化、ひいては、我が国への資源の安定供給などにも資する官民連携案件として実施が決定されたものである。 |

出典：JICA ウェブサイト

(2) 有償資金協力

有償資金協力として、我が国が「イ」国道路セクターに対して行った支援事業の概要を示す。

1) タンジュンプリオク港アクセス道路建設計画（第一期）

|       |   |
|-------|---|
| 実施年度  | 2004年   |
| 供与限度額 | 263.06億円  |
| 案件概要  | ジャカルタ外環道からジャカルタ市北部のタンジュンプリオク港への道路を建設し、ジャカルタ近郊から同港への交通の改善を図るものである。 |

出典：JICA ウェブサイト

2) ジャワ北幹線道路渋滞緩和計画

|       |  |
|-------|--|
| 実施年度  | 2004年  |
| 供与限度額 | 42.87億円  |
| 案件概要  | ジャワ島北部を東西に走るジャワ北幹線道路およびその代替路線のうち、物流のボトルネックとなっている6地点を立体交差化し、道路の輸送容量の増強および混雑の緩和を図るものである。 |

出典：JICA ウェブサイト

3) タンジュンプリオク港アクセス道路建設計画（第二期）

|       |   |
|-------|---|
| 実施年度  | 2004年   |
| 供与限度額 | 266.20億円  |
| 案件概要  | ジャカルタ首都圏において、ジャカルタ外環道路とジャカルタ湾岸道路を結ぶタンジュンプリオク港アクセス道路を建設し、ジャカルタ近郊から同港への交通渋滞の緩和を図るものである。 |

出典：JICA ウェブサイト

4) アチェ復興計画

|       |   |
|-------|---|
| 実施年度  | 2006年   |
| 供与限度額 | 115.93億円  |
| 案件概要  | スマトラ沖大地震・津波災害の被災地であるナングル・アチェ・ダルサラム州の復興および平和構築支援のため、道路、排水路等を整備するものである。 |

出典：JICA ウェブサイト

5) バンドン市内有料道路計画

|       |  |
|-------|--|
| 実施年度  | 2011年                                      |
| 供与限度額 | 136.05億円                                   |
| 案件概要  | バンドン市内で新たに有料道路を建設し、深刻化する市内の渋滞緩和に寄与するものである。 |

出典：JICA ウェブサイト

1-4 他ドナーの援助動向

表 1-4-1 に他ドナーの援助実績として、世界銀行及びアジア開発銀行が過去「イ」国道路セクターに対して行った事業一覧を示す。

表 1-4-1 世界銀行及びアジア開発銀行の「イ」国道路セクターへの援助実績

| 実施年度  | 世界銀行  | アジア開発銀行   |
|-------|---|---|
| 1989年 | Highway Sector Project  |   |
| 1992年 | Kabupaten Roads Development Project (03)                              |   |
| 1993年 | Eastern Indonesia kabupaten Roads Project                             |   |
| 1994年 | ID-2nd Highway sector Investment Project<br>Kabupaten Road Project 05 |   |
| 1996年 | Strategic Urban Roads Infrastructure Project                          |   |
| 1998年 | Sumatra Region Roads Project  |   |
| 2002年 |   | Road Rehabilitation Sector II   |
| 2005年 |   | Road Rehabilitation II  |
| 2008年 |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Regional Roads Development Project</li> <li>Strengthening Environmental Practice for Road Network Development in Kalimantan</li> </ul> |
| 2011年 |   | Regional Roads Development Project  |
| 2012年 |   | Regional Roads Development II   |

### 1-4-1 世界銀行

以下に世界銀行が過去「イ」国道路セクターに対して行った援助実績及びその概要を示す。

#### 1) Highway Sector Project

|       |  |
|-------|--|
| 実施期間  | 1989年11月14日-1995年6月30日   |
| 供与限度額 | 350million USD   |
| 案件概要  | <p>本プロジェクトの主目的は、政府が道路サブセクターの全体的な効率改善を支援することである。このプロジェクトの目的は次のとおりである。</p> <p>A：高速道路の形成及び実施における品質向上<br/>B：道路利用に関する政策改善<br/>C：サブセクターに関与する機関の強化<br/>D：維持管理とリハビリ/改善作業による道路網品質の改善</p> <p>プロジェクトには以下が含まれる。</p> <p>I：政策声明および行動計画（PS&amp;AP）および支出計画の実施を支援するための技術的支援、研究および訓練<br/>II：合意手続きならびに経済的、技術的基準に基づいて選択された支出計画</p> <p>ローンは道路および橋梁維持管理プログラムに主に使用されるが、他にも交通安全訓練や技術援助にも使用されている。</p> |

出典：世界銀行ウェブサイト

#### 2) Kabupaten Roads Development Project (03)

|       |  |
|-------|--|
| 実施期間  | 1992年6月17日-1997年6月30日  |
| 供与限度額 | 499.2million USD   |
| 案件概要  | <p>第3次 Kabupaten 道路開発プロジェクトの主な目的は、9州（西ジャワ州、西カリマンタン州およびリアウを除くスマトラ島の全州）の73のKabupatens（地区）の主要経済センターへのアクセスを改善し、すべての機関の能力を高めることである。このプロジェクトには、次の要素に分類される。</p> <p>A：道路工事および維持管理可能部分の維持管理のための監修ならびに修復<br/>B：1992/93年から始まる3つの会計年度にわたる選択された道路計画のkabupatensの改善<br/>C：ワークショップや実験室でのアップグレード<br/>D：機器、予備部品および消耗品の提供<br/>E：全国規模の訓練プログラムの開発と実施を含む訓練<br/>F：計画、環境分析、道路工事の実施に関する全国的なシステムと手順を強化及び「イ」国政府中央機関がプロジェクトの実施の監視体制を強化する為の技術的支援と研究</p> |

出典：世界銀行ウェブサイト

#### 3) Eastern Indonesia kabupaten Roads Project

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 1993年3月23日-1999年12月31日  |
| 供与限度額 | 331.30million USD   |
| 案件概要  | <p>このプロジェクトの主な目的は、Kabupaten 道路の開発を管理するインドネシア政府機関の能力を強化し、持続可能な方法で東部インドネシアのKabupateにおける道路網の質と容量を改善することである。このプロジェクトは、インドネシアで最も貧しい州の1つであるスラウェシ、ヌサテンガラ、イリアンジャヤの農業に依存している主地域の農村経済の向上につながる。このプロジェクトには、次の要素を含んでいる。</p> <p>A：道路工事および維持管理可能な道路の維持管理<br/>B：ワークショップや実験室の質の向上<br/>C：機器、予備部品および消耗品の提供<br/>D：kabupaten 道路職員のための全国的な訓練プログラムの開発と実施<br/>E：計画、環境分析、道路工事技術の適応および普及</p> <p>プロジェクト実施および政府機関を支援するためのシステムおよび手順を強化するための技術支援および研究を行う。</p> |

出典：世界銀行ウェブサイト

4) ID-2<sup>nd</sup> Highway sector Investment Project

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 1994年3月10日-2001年12月31日  |
| 供与限度額 | 600million USD  |
| 案件概要  | <p>セカンドハイウェイセクター投資プロジェクトの目的は、国道および地方道路のサービス品質を向上させ、道路網の容量を拡大し、施設の能力をさらに強化することである。また道路交通の急成長に対応し、道路交通システムのコストを削減することである。プロジェクトの主な要素は次のとおりである。</p> <p>A：2,000 km の定期的な道路の維持、2,200 km の道路の改善、および 5,300 m の橋梁の更新<br/>         B：210 km の道路容量の拡大とアップグレード<br/>         C：人的資源の開発を含む、中央および地方レベルでの高速道路機関の制度的強化<br/>         D：道路利用者の料金、車両の重量と寸法、および道路交通の安全性に関する方針を策定するための通信省の強化</p> |

出典：世界銀行ウェブサイト

5) Kabupaten Road Project 05

|       |  |
|-------|--|
| 実施期間  | 1994年5月17日-1999年12月31日   |
| 供与限度額 | 206.8million USD   |
| 案件概要  | <p>このプロジェクトは、中央、東、南のカリマンタン、マルク、リアウに位置する農業依存人口の経済体制を改善し、国内のすべての機関を強化することを目的に実施された。このプロジェクトには、次の主要コンポーネントが含まれている。</p> <p>A：道路工事および維持管理道路<br/>         B：ワークショップや実験室でのアップグレードと装備<br/>         C：機器、予備部品および消耗品の提供<br/>         D：計画、環境分析、品質保証のためのシステムおよび手順強化及びプロジェクトの実施・監視における「イ」国政府機関を支援するための技術的支援および研究</p> |

出典：世界銀行ウェブサイト

6) Strategic Urban Roads Infrastructure Project

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 1996年6月25日-2003年5月31日   |
| 供与限度額 | 167.6million USD  |
| 案件概要  | <p>戦略的都市道路インフラプロジェクトの目的は次のとおりである。</p> <p>A：北ジャワ回廊内の都市部における国道の交通ボトルネックを減らす<br/>         B：都市部における国内道路網の利用増加に関連する環境的および社会的問題に取り組む<br/>         C：中央政府から地方政府への都市交通の計画、設計、建設、維持、管理および規制に対する責任を分権化する過程における、「イ」国政府の支援<br/>         D：都市の道路開発と管理に関与している中央および地方自治体機関の技術的および制度的能力を強化する<br/>         E：都市交通政策の策定、実施における「イ」国政府の支援</p> <p>このプロジェクトは、次の4つの要素で構成されている。</p> <p>I：都市管理と生活の質の向上<br/>         II：制度的および人的資源の開発<br/>         III：政府都市道路プログラム開発<br/>         IV：政策の明確化および実施</p> |

出典：世界銀行ウェブサイト



## 7) Sumatra Region Roads Project

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 1998年3月31日-2005年12月31日  |
| 供与限度額 | 369.3million USD  |
| 案件概要  | 北スマトラ地域道路プロジェクトは、北スマトラ地域の4州および隣接地域内の輸送効率とアクセス可能性の向上を目的としている。本プロジェクトは以下の要素を含んでいる。<br>A : Bappenas の輸送計画を支援し、地域や地方の自治の拡大の発展を誘導<br>B : 地域交通戦略を策定し、長期計画、実現可能性調査、その他調査の準備<br>C : プログラム分野における年間計画/プログラミングの改善<br>D : 道路網の維持管理、拡幅、および修復を含む、国道、地方道路、および Kabupaten 道路網の改善<br>E : 一貫した契約監視及び管理プロセスの設定と、品質と技術的効率の向上 |

出典：世界銀行ウェブサイト

### 1-4-2 アジア開発銀行

以下にアジア開発銀行が過去「イ」国の道路セクターに対して行った援助実績、及びその概要を示す。

#### 1) Road Rehabilitation Sector II

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 2002年11月15日-2008年2月14日  |
| 供与限度額 | 900,000 USD   |
| 案件概要  | 本プロジェクトの目的は、政府が次からなる戦略的道路改修改善プログラムの策定を支援することである。<br>カリマンタンとスマトラの国道網の優先度の高い区域の改修。<br>本プロジェクトは経済発展を促進し、選択された地域の貧困削減に貢献する。 |

出典：アジア開発銀行ウェブサイト

#### 2) Road Rehabilitation II

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 2005年9月29日-2010年10月18日  |
| 供与限度額 | 151 million USD   |
| 案件概要  | このプロジェクトは、1,266km に及ぶ劣化した道路網を修復し、スマトラ中央および東回廊とカリマンタン高速の21本の橋の架け替えを行う。補修された道路が早急に劣化せず持続可能な利益を確保するために、本プロジェクトは過負荷トラックによって引き起こされる舗装損傷を減らすことを目的としている。 |

出典：アジア開発銀行ウェブサイト

#### 3) Regional Roads Development Project

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 2008年3月28日-2011年9月1日  |
| 供与限度額 | 1.3 million USD   |
| 案件概要  | 北カリマンタンおよび南ジャワ回廊内のすべての国道の道路評価及び回廊内の道路区間の優先改良工事に関する実現可能性調査を行う。 |

出典：アジア開発銀行ウェブサイト

#### 4) Strengthening Environmental Practice for Road Network Development in Kalimantan

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 2008年9月9日-2010年11月6日  |
| 供与限度額 | 150,000 USD   |
| 案件概要  | ADB のインドネシア国別パートナーシップ戦略に基づき、インフラおよびインフラサービスの改善と地方分権の改善を直接支援する。カリマンタンの Heart of Borneo (HOB) 地域における道路網計画および道路整備の弱点に対処する。2009年から2010年に実施される予定の地方道路開発プロジェクトの下で特定された HOB の環境問題を支援する。カリマンタンの環境管理における制度的能力の強化を通して、インドネシアで進行中の道路セクターローンの下での環境能力構築プログラムを補完する。 |

出典：アジア開発銀行ウェブサイト

## 5) Regional Roads Development Project

|       |   |
|-------|---|
| 実施期間  | 2011年11月24日-2018年9月28日  |
| 供与限度額 | 180million USD  |
| 案件概要  | 本プロジェクトは、カリマンタン北部とジャワ島南部の戦略的な国道回廊を改善し、これら2つのインドネシア地域における経済成長を支援するものです。高速道路の修復、容量拡大、新設道路建設は、国内および地域間の接続性を強化し、市場へのアクセス、雇用機会および社会サービスを改善する。南部ジャワの全国道路網は不完全であり、南部ジャワ高速道路の一部の道路区間はまだ建設されていないため、交通網網羅率にギャップが生じている。ジャワ南部の道路インフラの改善は、この孤立した地域への経済成長と投資に対する既存の制約を取り除くために必要である。同様に、カリマンタン北部の発展途上地域の経済発展を支援するためには、道路網の改善が必要である。カリマンタンから国境までの道路接続の改善は、接続性向上と輸送コストの削減を目的とした2つの陸上輸送回廊を開発する。他の BIMP-EAGA プログラムを補完するブルネイインドネシアマレーシアフィリピン東 ASEAN 成長地域 (BIMP-EAGA) 輸送イニシアチブも支援する。税関、入国管理、検疫およびセキュリティのプロセスを改善することによって、貿易に対する非物理的障壁を軽減する。 |

出典：アジア開発銀行ウェブサイト

## 6) Regional Roads Development II

|       |  |
|-------|--|
| 実施期間  | 2012年8月8日-2016年9月30日   |
| 供与限度額 | 1.5million USD   |
| 案件概要  | 本プロジェクトは、東部西部カリマンタン州、西部中部東部ジャワ州で国内の接続性を強化し、戦略的に重要な道路箇所を修復することを目的としている。このプロジェクトは、現在主要な人口密集地と密接に関連していない地域の包括的開発をもたらし、基本的な社会福祉サービスへのアクセスを改善する。また地域の農業産業を刺激して輸出を押し上げることによって世界および国家の食料安全保障を改善する。本プロジェクトは、毎年6億人の道路利用者に直接恩恵を与え、生活水準の向上に役立つことが期待されている。 |

出典：アジア開発銀行ウェブサイト

## 2. プロジェクトを取り巻く状況

### 2-1 プロジェクトの実施体制

#### 2-1-1 組織・人員

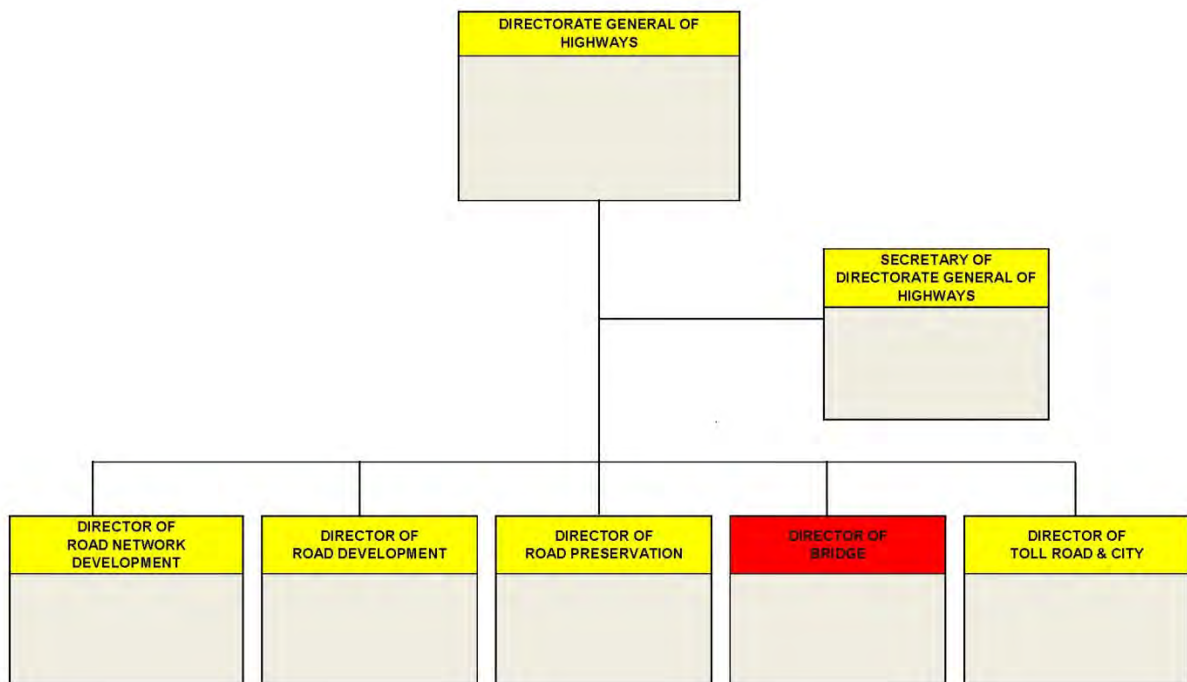
本事業の主管機関は、道路総局（以下、Bina Marga）である。事業実施部署は同局内の橋梁局である。以下に、Bina Marga 及び橋梁局の組織図、及び担当業務について示す。

##### (1) 道路総局（Directorate General of Highways / Direktorat Jenderal Bina Marga）

Bina Marga は、5つの部署に分割され、業務を実施している。それぞれの部署の名称は、道路網開発局、道路開発局、道路保全局、橋梁局、有料道路・都市局となっている。本事業で主管局となる橋梁局も同様に5つの課に分割して業務を実施している。それぞれの課の名称は、規定・ガイドライン策定課、計画・プログラミング課、橋梁技術課、特殊橋梁・トンネル技術課、検査・評価課である。

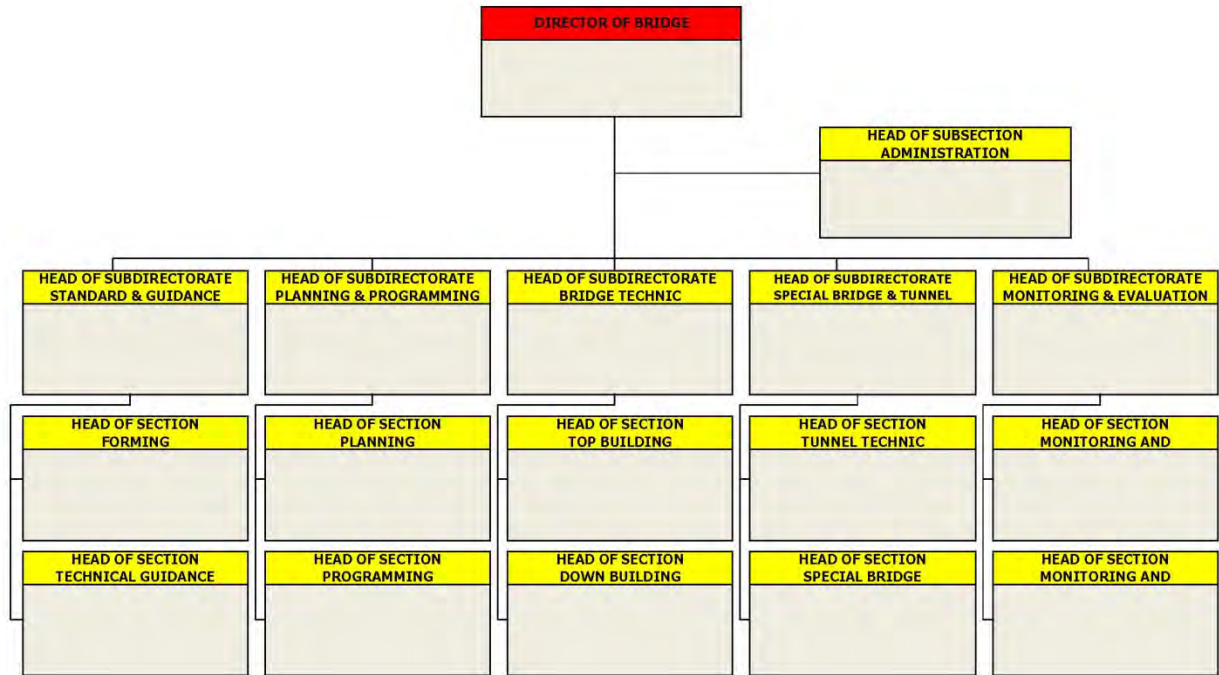
##### 1) 組織図

図 2-1-1 に Bina Marga 組織図、図 2-1-2 に橋梁局組織図をそれぞれ示す。



出典：Bina Marga

図 2-1-1 Bina Marga 組織図



出典：Bina Marga

図 2-1-2 橋梁局組織図

## 2) 業務

Bina Marga は、以下に示す業務を行う。Bina Marga は、事業策定・実施、開発規定策定及び事業の監督業務、事業終了後の評価・報告までを一括して実施している政府機関である。

- a： 法令を準拠した道路開発計画の作成
- b： 全国道路開発の実施
- c： 全国優先事業計画の強化及び実施
- d： 道路開発における規定・順序・クライテリアの策定
- e： 道路開発における技術支援及び監督
- f： 道路開発における評価と報告の実施
- g： PU より与えられたその他の機能の実施

出典：Bina Marga

### 2-1-2 財政・予算

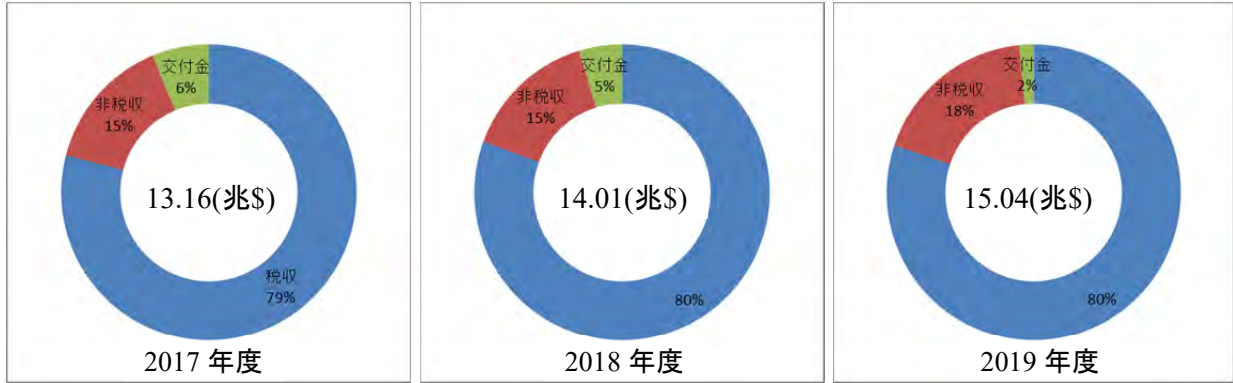
#### (1) 「イ」国国家予算

##### 1) 「イ」国国家予算

以下に 2017 年度から 2019 年度の「イ」国国家予算を示す。「イ」国歳入は税込・非税込及び交付金から成り立つ。過去 3 年間の「イ」国歳入は年々増加しており、2019 年度は 15.04 兆ドルと 2017 年度と比較して 14%程度増加している。歳入の割合は、税込が全体の 80%程度を占めている。「イ」国歳出は、中央政府支出及び地方交付支出から成り立つ。過去 3 年間の「イ」国歳出は歳

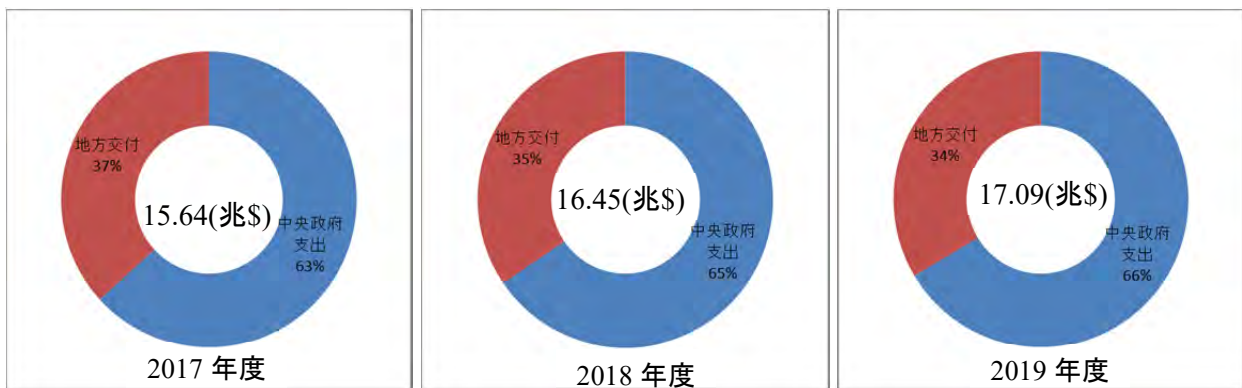


入と同様に年々増加しており、2019年度は17.09兆ドルと2017年度と比較して9%程度増加している。歳出の割合は、中央政府支出が60%以上を占めている。同期間において、歳出が歳入を常に上回っている。1-1-3章に示したとおり、「イ」国の経常収支は2013年頃から赤字を記録しており、「イ」国の借金は年々増加している。



出典：APBN2019 ウェブサイト

図 2-1-3 「イ」国歳入 (2017-2019)

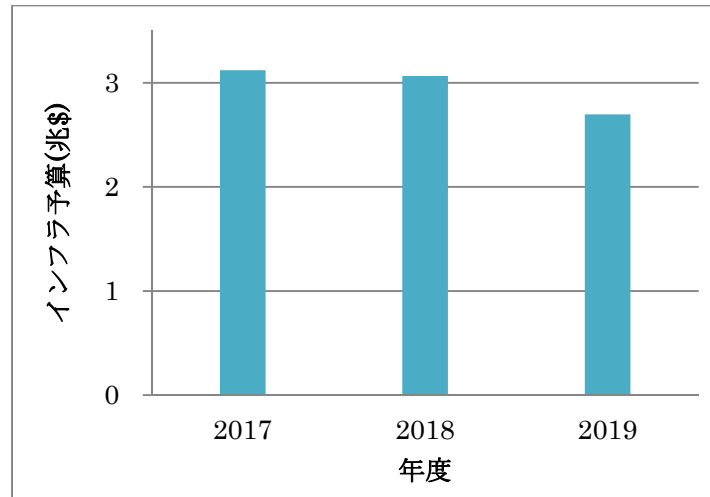


出典：APBN2019 ウェブサイト

図 2-1-4 「イ」国歳出 (2017-2019)

## 2) 「イ」国のインフラ予算

「イ」国のインフラ予算は、6つの分野（道路・橋梁・空港・鉄道・灌漑・建築）に利用される。過去3年間のインフラ予算は、およそ3兆ドル程度で推移している。「イ」国歳出のおよそ20%がインフラ整備に利用されている。図 2-1-5 に過去3年間の「イ」国インフラ予算の推移を示す。



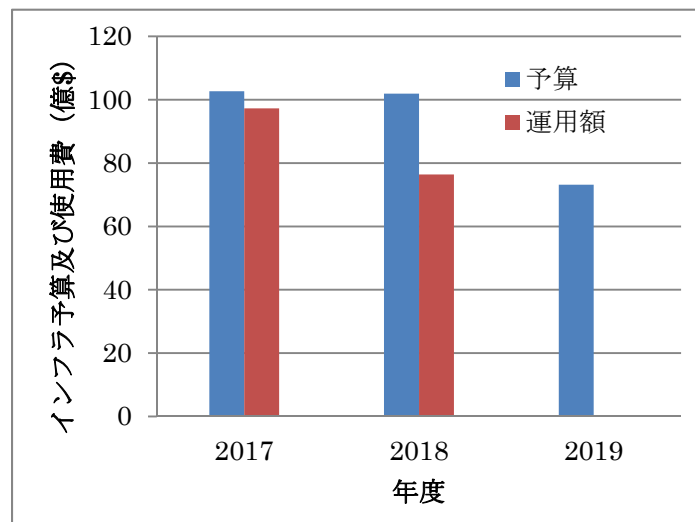
出典：APBN2019 ウェブサイト

図 2-1-5 「イ」国インフラ予算（2017-2019）

(2) 中部スラウェシ州のインフラ予算

中部スラウェシ州の道路局予算を図 2-1-6 に示す。2017 年度及び 2018 年度の予算は 100 億ドル程度であったが、実際には整備に用いられた運用額は予算よりも下回っている。第 3 次国家開発計画に基づいて実施している開発計画が、予定通り進んでいないことが考えられる。2018 年度に 20 億ドル強の予算が実際に運用されなかったことで、2019 年度の予算は前年に比べ、大幅に削減されている。

「イ」国インフラ予算に対して、中部スラウェシ州道路局が道路及び橋梁等の整備に活用出来る予算の割合は、2017-2019 年度の期間を通じて 0.3%未満である。「イ」国国家予算に対して、中部スラウェシ州の道路局が使用出来る割合は 1%にも満たないことが明らかになった。



出典：BPJN14

図 2-1-6 中部スラウェシ州インフラ予算

## 2-1-3 技術水準

### (1) 技術水準

Bina Marga 橋梁局が過去に建設した橋梁のリストを表 2-1-1 に示す。「イ」国の予算を活用して各種橋梁の建設が既に実施されている。橋梁建設において、設計は Bina Marga の地方局が行っている事例が多いが、一般企業が設計を行っている事例も存在する。また、施工は現地建設業者が主体となって事業に参画している。200m 程度のコンクリート箱桁橋、鋼構造アーチ橋、トラス橋、及び斜張橋等の建設実績が既に「イ」国では存在しており、技術水準が高いことが想定され、事業実施における支障はないと判断される。

表 2-1-1 「イ」国で建設された特殊橋梁一覧

| 名称               | 県               | 設計                                  | 施工  | 構造           | 橋長<br>(m) | 供用<br>開始年 |
|------------------|-----------------|-------------------------------------|---|--------------|-----------|-----------|
| Ogan 橋           | Palembang       | PT.sriwijaya<br>markmore<br>persada |   | コンクリート<br>箱桁 | 180       |           |
| Kedaung 橋        | Banten          | 州                                   | PT.Mawatindo Road<br>Construction         | 鋼アーチ         | 100       |           |
| 6 Ruas 橋         | Jakarta         | PT.Jakarta Toll<br>Road             |   | 鋼箱桁          | 60        |           |
| Tereng 橋         | 西 kutai         | 州                                   |   | 鋼アーチ         | 150       |           |
| Mahakam IV 橋     | Samarinda       | 州                                   | PT.PP                                     | 鋼アーチ         | 400       |           |
| Siak III 橋       | Pekanbaru       | 州                                   | PT.Rantau Bais Sawit/<br>PT.Waskita Karya | 鋼箱桁          | 120       | 2011      |
| Teluk Masjid 橋   | Siak            | 州                                   | PT.Waskita Karya                          | 鋼アーチ         | 250       | 2012      |
| Padamaran I 橋    | Rokan hilir     | 州                                   | PT. Waskita Karya                         | 斜張橋          | @ 112     | 2013      |
| Padamaran II 橋   | Rokan hilir     | 州                                   | PT. Waskita Karya                         | 斜張橋          | @ 112     | 2014      |
| Rumbal Jaya 橋    | Indragiri hilir | 州                                   | PT.Hutama Karya                           | 鋼トラス         | 150       | 2003      |
| Perawang 橋       | Kab Siak        | 州                                   | PT.Pembangun Perumahan                    | コンクリート<br>箱桁 | 180       | 2011      |
| Siak IV 橋        | pekanbaru       | 州                                   | PT.PP/PT.Waskita<br>Karya/PT.HK           | 斜張橋          | 155       | 2018      |
| Gugus 橋          | Tanjung pinang  | 州                                   | PT.Wijaya Karya                           | 鋼トラス         | 120       | 2013      |
| Kali kuto 橋      | Nganjuk         | PT.Jasa Marga<br>Semarang           | PT.Wiskita Karya                          | 鋼トラス         | 100       | 2018      |
| Tukad Bangkung 橋 | Badung          | 州                                   | PT.Isaka Karya/PT.HK                      | コンクリート<br>箱桁 | 120       | 2006      |
| Semuntai 橋       | Sanggau         | 州                                   | PT.Adhi Karya                             | 鋼トラス         | 100       | 2010      |
| Mahakam Ulu 橋    | Samrinda        | 州                                   | PT.Agrabudi Karya Marga                   | 鋼トラス         | 200       | 2008      |
| Martadipura 橋    | Kukar           | 州                                   | PT.Hutama Karya                           | 鋼トラス         | 200       | 2006      |
| Pela 橋           | Kukar           | 州                                   | PT.Hutama<br>Karya/PT.Bukaka              | 鋼箱桁          | 150       | 2009      |
| Anggana 橋        | Kukar           | 州                                   | PT.Global Daya<br>Manunggal               | 鋼トラス         | 105       | 2009      |
| Sei segah 橋      | Berau           | 州                                   | PT.Adhi Karya                             | 鋼トラス         | 100       | 1994      |
| Mahkota II 橋     | Samarinda       | 州                                   | PT.Agrabudi Karya Marga                   | 斜張橋          | 370       | 2016      |
| Talumolo II 橋    | Gorontaro       | 州                                   | PT.Waskita Karya/<br>PT.Sinar Karya       | コンクリート<br>箱桁 | 100       | 2006      |

出典：Bina Marga

## 2-1-4 既存施設

対象地域に敷設されている橋梁の概要を表 2-1-2 に示す。また、各橋梁の位置を図 2-1-7 に示す。

表 2-1-2 対象地域の橋梁一覧

| No. | 種別            | 橋長 (m) | 幅 (m) | スパン数 | 桁数 | 下部工 | 下部工<br>ピア | 下部工<br>基礎 | 建設年  |
|-----|---------------|--------|-------|------|----|-----|-----------|-----------|------|
| B1  | 鉄トラス          | 130.0  | 9.0   | 3    | 2  | T字型 | 壁式        | 杭基礎       | 不明   |
| B2  | 歩道橋           | 68.0   | 2.5   | 1    | 1  | 重力型 | 壁式        | 不明        | 不明   |
| B3  | PC            | 120.0  | 10.0  | 3    | 2  | T字型 | 壁式        | 不明        | 1976 |
| B4  | 鉄トラス          | 122.0  | 9.0   | 2    | 2  | T字型 | 壁式        | 杭基礎       | 不明   |
| B5  | RC            | 9.0    | 9.5   | 1    | 2  | 重力型 | 不明        | 不明        | 不明   |
| B6  | RC            | 16.0   | 17.0  | 1    | 3  | T字型 | 不明        | 不明        | 不明   |
| B7  | RC            | 12.0   | 15.0  | 1    | 4  | T字型 | 不明        | 不明        | 不明   |
| B8  | RC            | 26.0   | 15.0  | 1    | 4  | T字型 | 不明        | 杭基礎       | 不明   |
| B9  | RC            | 26.0   | 7.5   | 1    | 2  | T字型 | 不明        | 杭基礎       | 1997 |
| B10 | 鋼桁            | 30.0   | 7.0   | 1    | 2  | T字型 | 不明        | 不明        | 不明   |
| B11 | 鋼桁            | 31.0   | 6.5   | 1    | 2  | T字型 | 不明        | 布基礎       | 不明   |
| B12 | 鉄トラス          | 40.0   | 8.5   | 1    | 2  | T字型 | 不明        | 不明        | 不明   |
| B13 | PC            | 32.0   | 7.5   | 1    | 2  | T字型 | 不明        | 不明        | 2010 |
| B14 | RC            | 5.0    | 18.0  | 1    | 4  | 重力型 | 不明        | 不明        | 不明   |
| B15 | コンクリート<br>アーチ | 117.0  | 7.5   | 6    | 2  | 重力型 | 不明        | 不明        | 1972 |
| B16 | 鉄トラス          | 46.0   | 5.5   | 1    | 2  | T字型 | 不明        | 杭基礎       | 不明   |
| B17 | 鉄トラス          | 45.0   | 不明    | 不明   | 不明 | 不明  | 不明        | 不明        | 不明   |

出典：JICA 調査団



出典：JICA 調査団

図 2-1-7 対象地域の橋梁整備状況

対象地域に整備されている多くの橋梁は建設された年月が不明であったが、震災後現地踏査を実施したいくつかの橋梁にひび割れ、亀裂等の損傷が生じていることが明らかになった。ひび割れ、及び亀裂等が生じた橋梁を図 2-1-8 に示す。また、対象地域に整備されている代表的な橋梁の例として、パル川に整備されているパル第一橋から第三橋を図 2-1-9 に示す。





出典：JICA 調査団

図 2-1-8 ひび割れ、亀裂が生じた橋梁：B5（左）、B9（右）



出典：JICA 調査団

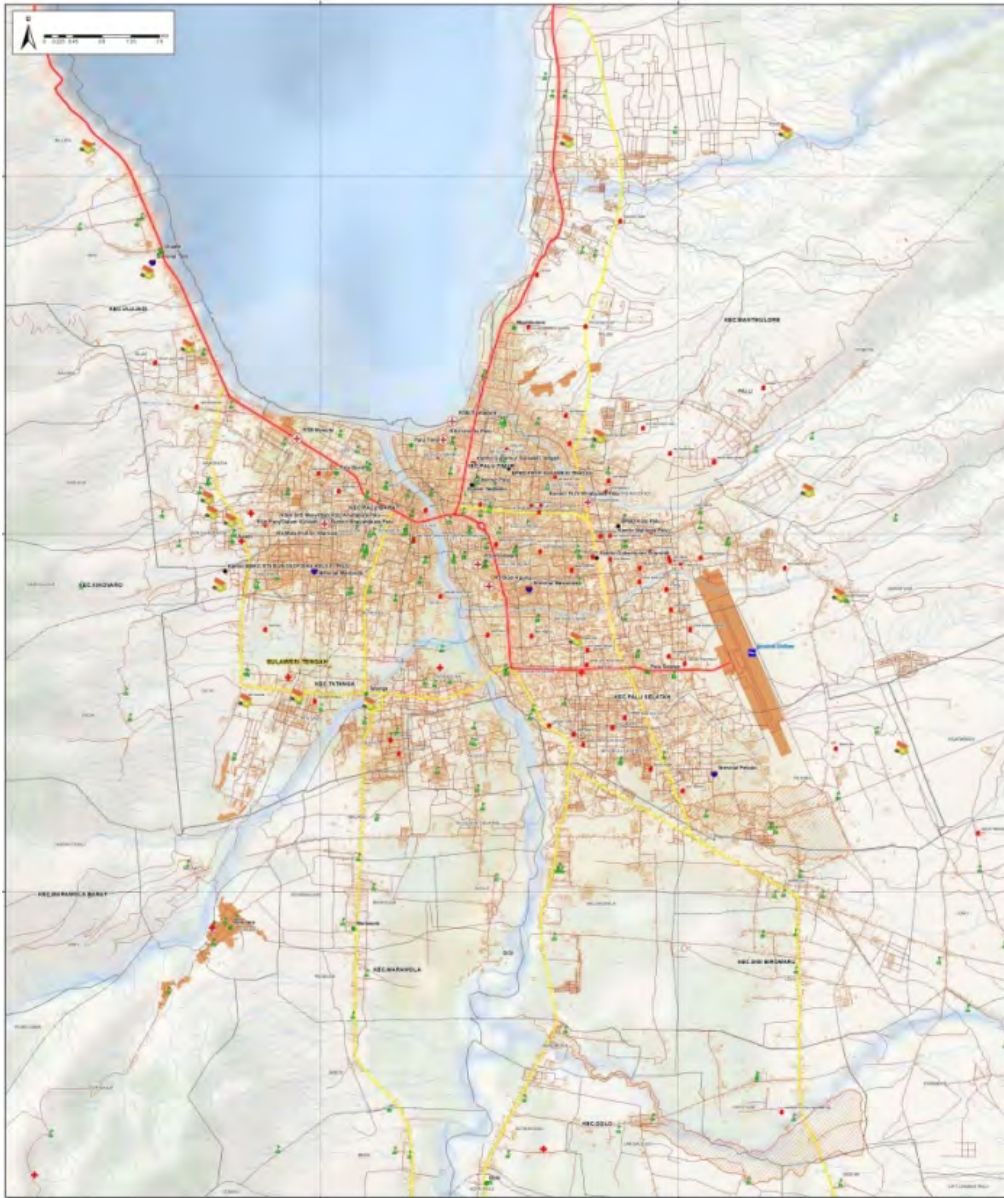
図 2-1-9 パル第一橋：B1（左）、パル第二橋：B2（中央）、パル第三橋：B3（右）

## 2-2 プロジェクトサイト及び周辺の状況

### 2-2-1 関連インフラの整備状況

#### (1) 道路

パル市内の道路整備状況を図 2-2-1 に示す。パル市内には、都市間を接続する国道がパル市内の東西方向に整備されている。また、市内を環状に巡り、南部スラウェシ地域に接続する県道も整備されている。図 2-2-2 にパル市内の現道の状況を示す。



出典：BPJN14

図 2-2-1 対象地域の道路整備状況





01 : W=7.0m



06 : W=11.5m



08 : W=7.0m



12 : W=11.9m



17 : W=6.0m



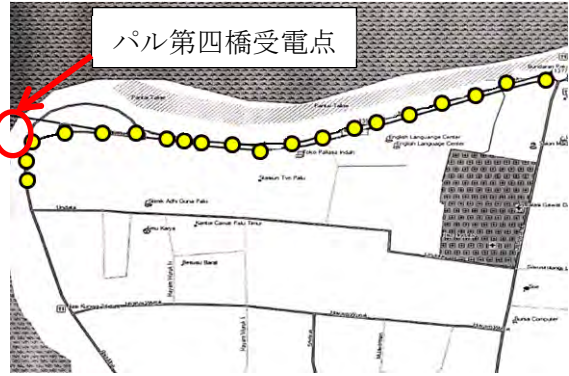
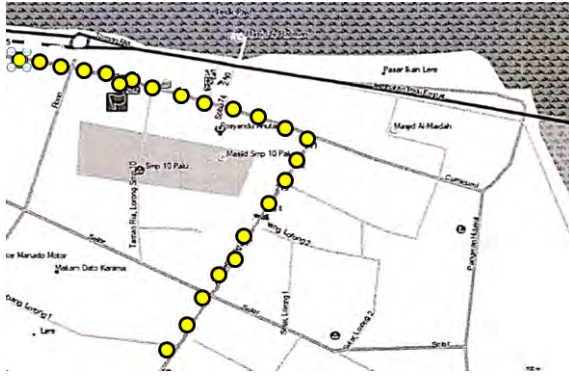
23 : 4 lanes

出典：JICA 調査団

図 2-2-2 対象地域の道路整備状況

## (2) 電力供給設備

パル第四橋周辺地域の電柱の位置を図 2-2-3 に示す。図 2-2-3 に示す様に、左岸・右岸側共に受電点となる電柱が整備されている。また、崩落したパル第四橋は同図に示すとおり、パル川右岸側から橋梁に設置されていた照明に電力を供給していた。電柱の管理は、パル市の PLN（インドネシア国有電力公社）が行っている。



出典：PLN（インドネシア国有電力公社）

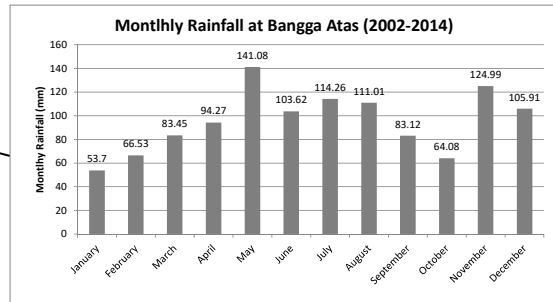
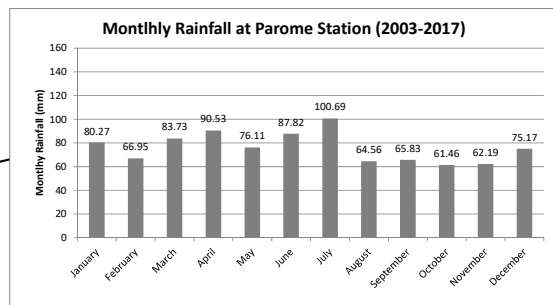
図 2-2-3 橋梁建設地域周辺の受電点（左：パル第四橋左岸側）、（右：パル第四橋右岸側）

## 2-2-2 自然条件

### 2-2-2-1 気象調査

#### (1) 気候

中央スラウェシ州の気候は年中降雨量が多く、気温の年較差が小さいケッペンの気候区分の熱帯雨林気候（Af）に属する。しかし、パル第四橋が位置するパル川の河口部では、山脈に囲まれている地形のため、降雨は比較的少ない（雨陰<sup>1</sup>）。パル市内の Parome 雨量観測地点（2003 年から 2017 年の観測期間）の年平均降雨量は約 1,000mm、平均月間降雨量は 60 から 100mm である。



出典：Balai Wilayah Sungai –Sulawesi III (BWS-III)の 2002 年から 2017 年降雨データ

図 2-2-4 パル川下流（Parome 地点）と上流（Bangga Atas 地点）の月間降雨量

気温に関しては、年間を通じた変動が少なく、10 月が最も気温が高く（平均気温：27.7℃、最高気温：32.1℃）、7 月が最も低くなっている（平均気温：25.7℃、最低気温：23.1℃）。

<sup>1</sup> 雨陰（rain shadow）とは、雨雲を含んだ風が山を越える際に、風上側で雨が降り、風下側は「陰」となって乾燥する現象である。



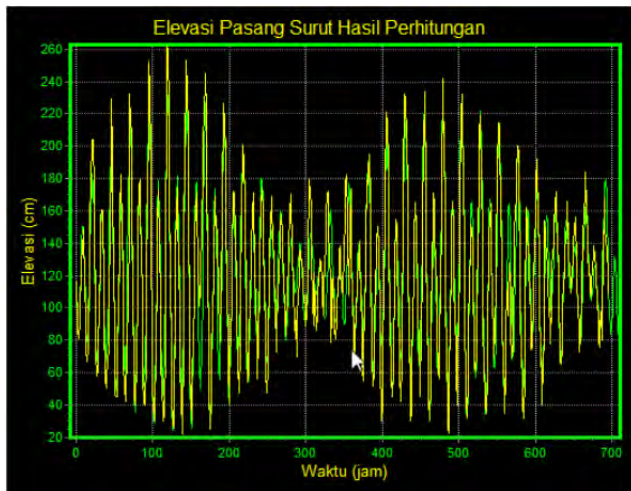
表 2-2-1 パル市内の気温（月別）

|           | 1月   | 2月   | 3月   | 4月   | 5月   | 6月   | 7月   | 8月   | 9月   | 10月  | 11月  | 12月  |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 平均気温 (°C) | 26.6 | 26.7 | 26.9 | 26.9 | 27.4 | 26.6 | 25.7 | 26.8 | 26.7 | 27.7 | 27.2 | 27.0 |
| 最低気温 (°C) | 22.9 | 23.0 | 23.1 | 23.1 | 23.8 | 23.1 | 22.0 | 22.8 | 22.5 | 23.3 | 23.1 | 23.2 |
| 最高気温 (°C) | 30.3 | 30.5 | 30.7 | 30.8 | 31.1 | 30.2 | 29.4 | 30.8 | 30.9 | 32.1 | 31.3 | 30.8 |

出典：climate-data.org (<https://en.climate-data.org/asia/indonesia/central-sulawesi/palu-3638/>)

(2) 潮位

潮位に関しては常時観測が行われていないが、河川管理者 BWS (Balai Wilayah Sungai of Sulawesi III) は 2017 年に「パル市域の河川境界と設計調査」のために一ヶ月間毎時の観測を実施した。



|            |                   | 標高      |
|------------|-------------------|---------|
| HHWL       | 高極潮位              | +2.338m |
| MHWS (HWL) | 大潮平均高潮面 (朔望平均満潮面) | +2.316m |
| MHWL       | 平均高潮位             | +1.766m |
| MSL        | 平均水面              | +1.199m |
| MLWL       | 平均低潮位             | +0.676m |
| MLWS       | 大潮平均低潮面           | +0.279m |

出典：BWS (2017)、「パル市域の河川境界と設計調査」報告書

図 2-2-5 2017 年 5 月-6 月の観測潮位

2-2-2-2 水理・水門調査

(1) パル川の河川計画に係る既往調査

上流域の急峻な地形、多い降雨量や森林から農地への土地利用の転換に伴う流出形態の変化によって、パル川の上中流域で近年洪水、鉄砲水による被害が生じている。他方、下流域では上流域や支川から運ばれる土砂が堆積することによる河床上昇に伴い流下能力が低下している。洪水災害および土砂堆積に対応するため、BWS は近年以下の 2 つの調査を実施した。

「パル川流域管理計画と設計調査 (2010)」

2010 年に実施された本調査の目的は、1) パル川流域内の洪水および土砂発生・堆積の要因の特定、2) 河川管理および土砂管理における概念および基本原則の検討、3) 洪水、土砂堆積を防止するための対策の計画検討であった。本調査では河川に係るデータの収集・測量、既存インフラ施設の現況評価を含

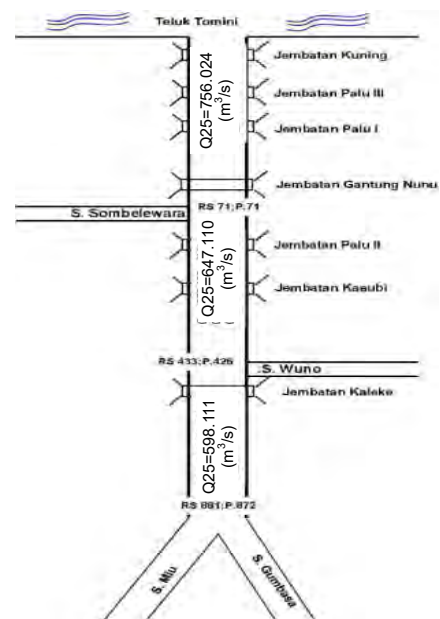


図 2-2-6 計画高水流量配分図

むパル川の特性分析、短期および長期的に実施するべき対策の立案、利害関係者間の対立を最小限に抑えるための調整の在り方に係る検討が実施された。本調査は2017年の「パル市域の河川境界と設計調査」によってレビューされた。

### 「パル市域の河川境界と設計調査（2017）」

本調査は河川用地・境界の特定、および2010年の「パル川流域管理計画と設計調査」の各条件のレビューを目的に実施された。本調査が対象とする計画規模は  $W=1/25$  (流域平均雨量 56.558mm/日) であり、下流で算定される流量は  $756.024\text{m}^3/\text{s}$  に相当する (図 2-2-6 および表 2-2-1 を参照)。河口部では河道拡幅が予定されておらず、計画堤防高に関する記載がない。

#### (2) パル川河口部の計画諸元

現在 JICA 調査団によって  $W=1/25$  を上回る 2016 年洪水を対象に遊水地の整備等の流域対策を含む洪水被害軽減対策が検討されている。

下流域の河道計画については、既に住宅等の資産が河道沿いに連たんしているため、河道拡幅が困難であり、パル川の計画高水流量が  $800\sim 1,000\text{m}^3/\text{s}$  となるように中上流域の流域対策の規模が検討されている。

2019 年 4 月時点における河口部の河川計画諸元を表 2-2-2 に示す。

表 2-2-2 パル川河口部の計画諸元の概要

|        | 概要  |
|--------|---|
| 計画高水流量 | $800\text{ m}^3/\text{s}\sim 1,000\text{ m}^3/\text{s}$                                 |
| HWL    | +2.316m (朔望平均満潮位)<br>* $W=1/25$ で計算される河川水位 : +1.230m、流速 : 1.21m/s                       |
| 計画堤防高  | N/A   |
| 計画河床   | パル第四橋付近 (河口より約 100m 上流)<br>計画河床高 : -1.910m (2017 年時点の平均河床高 : -0.980m)<br>勾配 : $i=1/900$ |
| 川幅     | 現況見合い (2017 年調査では河道拡幅は想定されていない)   |

注 : 計画堤防高や河道幅等の値は現在 JICA 調査団によって検討されている津波堤防、治水対策によって今後改訂される。

出典 : BWS (2017)、「パル市域の河川境界と設計調査」報告書

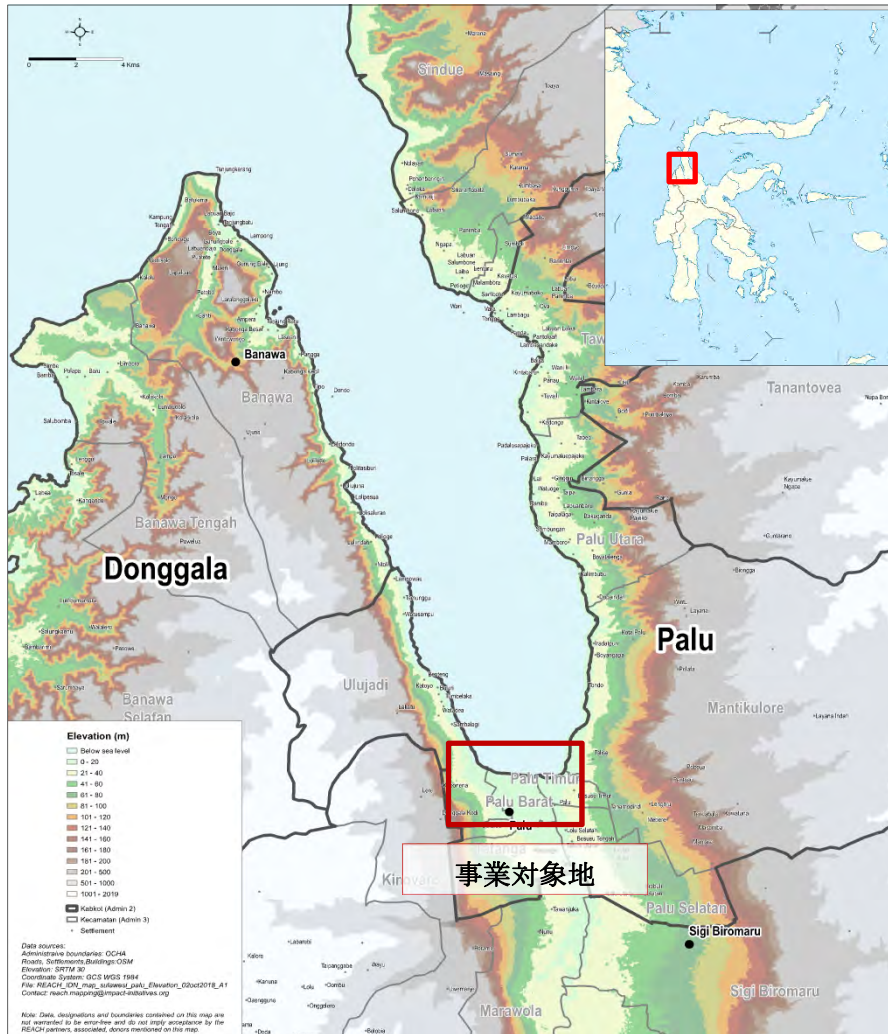
#### 2-2-2-3 地質調査

##### (1) 地形概要

インドネシア東部にあるスラウェシ島は、南半島、ミナハッサ半島 (北部)、東半島と南東半島という四つ大きな半島で構成され、北東部のトミニ湾、南東部のトロ湾、南部のボネ湾で隔てられている。スラウェシ島の地形は山脈が卓越し、活火山が多く存在する。南スラウェシ北部にあるランテマリオ山は、この地域の最も高い地点となる (頂点 : 3,440m)。スラウェシ島は、2,500m 以上の山が多く存在する。したがって、スラウェシ島は平野部が少なく、山脈や湾および海によって隔てられ、海岸線に沿って平野部が点在している特徴がある。平野部は、スラウェシ島総面積の約 10% にも満たない。

本事業は、中央スラウェシ州の州都であるパル市、パル川の河口部周辺を対象地としている。事業対象地の標高は、平均海面から5m未満となる。スラウェシの季節は大きく二つに区分され、5月から10月の乾季と11月から4月の雨季があり、1月と2月に豪雨となることがある。中央スラウェシの山岳地帯では、年間降水量は2,500mmを超える一方、パル市とその周辺の低地では、降雨量が少なくなっている（年間1,600mm未満）。パル市は、山脈に囲まれて窪地内に位置するため、気候の特徴として乾燥していることが挙げられ、年間降水量は約600mmとなる。

スラウェシ島は赤道が通過しているため、低地の気温は21℃～35℃、年間平均気温は27℃であり、高地では15℃～30℃となっている。



出典：https://reliefweb.int/

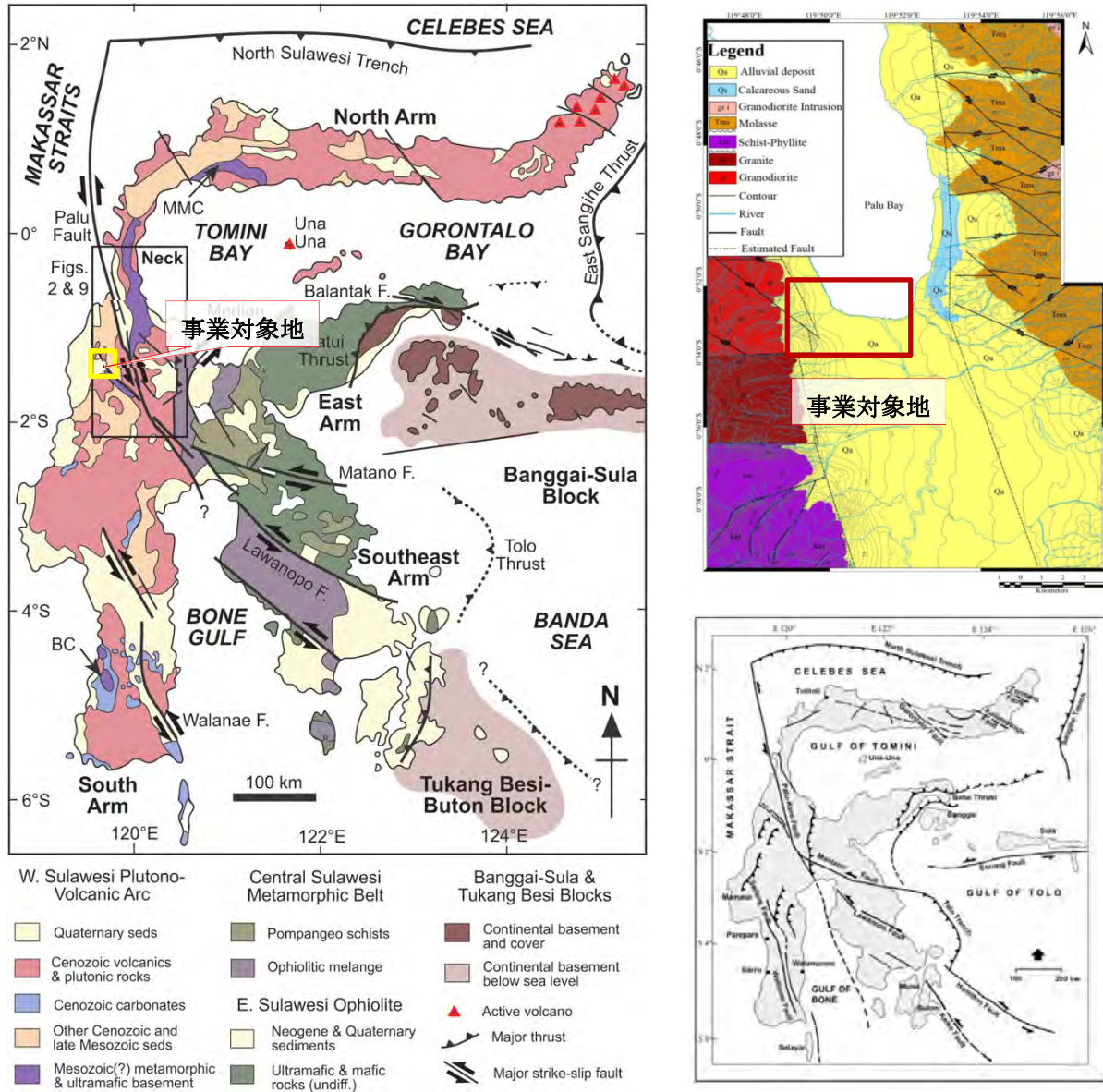
図 2-2-7 中部スラウェシ、及びパル市の地形図

## (2) 地質概要

インドネシア東部のスラウェシ島は、ユーラシア、インド、オーストラリア、及び太平洋プレートの合流点で在り、今も活発な沈下と衝突が起きている複雑な地域である。パルーコロ断層に沿った新第三紀運動の進化は、東西圧縮による左巻き状の横ずれ、垂直運動による新第三系花崗岩の放射状拡大、及び横方向変位等を構造岩石学に基づいて確認された。現在、南北拡張／東西圧縮が続いている。



パル窪地の土質は主に粘土質、シルト質、砂質の沖積堆積物で構成され、東側及び西側境界は、砂利砂の崩積層くさびで形成される。西側境界の砂利は、片岩系の花崗岩破片である一方、東側の砂利は片岩、火成岩および堆積岩からなる。



出典 : <https://sp.lyellcollection.org/content/355/1/157/tab-figures-data>

図 2-2-8 中部スラウェシ、及びパル市の地質図

西側の断層崖北部の地盤は花崗岩と花崗閃緑岩からなり、南部は片岩フィライト質系となる。東側の断層崖は頁岩、砂岩、礫岩などの浅い海底など堆積物からなる。

### (3) 地形測量・地質調査結果

#### 1) 地形測量結果

地形調査は、3月21日から4月4日にかけて現地再委託によって、JICA 調査団監理の下実施した。結果を図 2-2-9 に示す。

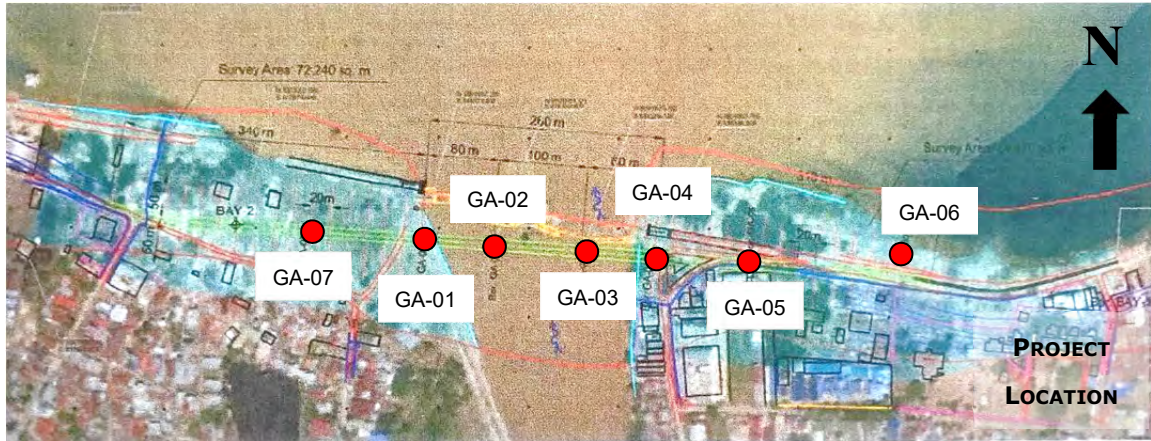




2) 地質調査結果

(a) 調査位置と調査方法

橋梁及びアプローチ道路の地盤設計に資するため、ボーリング調査及び SPT テストを JICA 調査団監理の下、現地再委託により実施した。ボーリング調査位置を図 2-2-10、調査数量を表 2-2-3 に示す。



出典：JICA 調査団

図 2-2-10 ボーリング調査位置

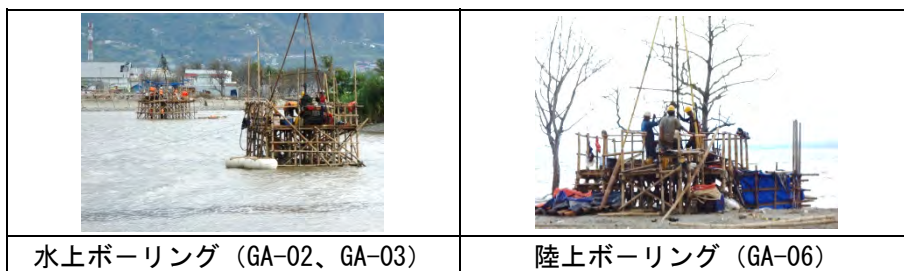
表 2-2-3 ボーリング調査

| No. | Bore Hole<br>ID# | Depth<br>(m) | SPT<br>(unit) | Co-ordinate in UTM 50 South |              | EGM-08    | Remark          |
|-----|------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|-----------|-----------------|
|     |                  |              |               | Easting                     | Northing     | Elevation |                 |
|     |                  |              |               | E (m)                       | N (m)        | Z (m)     |                 |
| 1   | GA-01            | 66.00        | 65            | 818,079.45                  | 9,901,987.76 | 2.42      | Left bank       |
| 2   | GA-02            | 66.38        | 58            | 818,159.73                  | 9,901,981.71 | 0.97      | River-bed       |
| 3   | GA-03            | 67.40        | 59            | 818,259.57                  | 9,901,974.20 | 0.57      | River-bed       |
| 4   | GA-04            | 69.45        | 69            | 818,338.72                  | 9,901,968.25 | 2.72      | Right bank      |
| 5   | GA-05            | 68.30        | 59            | 818,438.36                  | 9,901,960.12 | 2.52      | Right bank side |
| 6   | GA-06            | 65.45        | 55            | 818,616.83                  | 9,901,971.53 | 2.54      | Right bank side |
| 7   | GA-07            | 66.40        | 56            | 817,959.56                  | 9,901,994.73 | 2.08      | Left bank side  |

出典：JICA 調査団

ボーリング調査は、安定した支持層確認までの調査を実施し、SPT テストは乱れの少ない試料採取箇所を除いて 1m毎に実施した。

ボーリング調査は陸上で 5 本、水上で 2 本を行った。調査状況を図 2-2-11 に示す。



出典：JICA 調査団

図 2-2-11 ボーリング調査状況

室内土質試験は、ボーリングサンプルを用いて実施した（表 2-2-4 参照）。

表 2-2-4 室内試験の項目と目的

| Soil Test                   | purpose  |
|-----------------------------|--|
| Moisture content            | Verification of physical characteristics                           |
| Specific Gravity            |  |
| Bulk Density                |  |
| Sieve                       |  |
| Atterberg's Limits          |  |
| Direct Shear                | Confirmation of strength characteristics and liquefaction strength |
| Unconfined Compression Test |  |
| Triaxial UU                 |  |
| Triaxial CU                 |  |
| Consolidation Test          |  |

出典：JICA 調査団

ボーリング調査および室内土質試験の実施方法は、表 2-2-5 に示した。

表 2-2-5 ボーリング調査および室内試験の実施基準

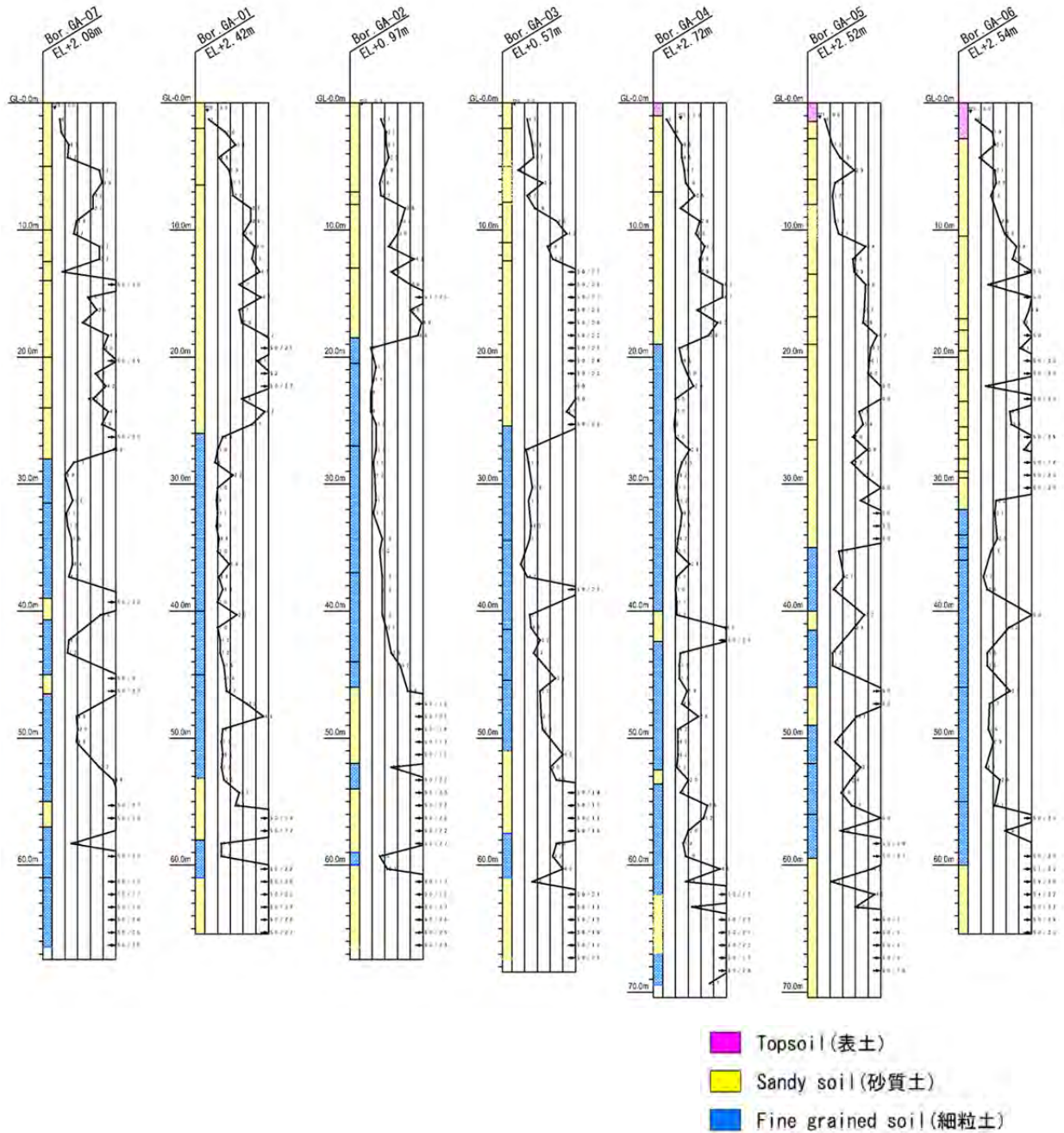
| ASTM Ref.   | TYPE OF INVESTIGATION WORKS  |
|---|--|
| <b>GENERAL</b>  |  |
| D420  | Standard guide for investigating and sampling soil and rock  |
| <b>EXPLORATORY BORING, CLASSIFICATION, LOGGING AND SAMPLING</b> |  |
| D1587   | Standard practice for thin-walled tube sampling of soils   |
| D2113   | Standard practice for diamond core drilling for site investigation   |
| D2487   | Standard classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)   |
| D2488   | Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedure)  |
| D4220   | Standard practice for preserving and transporting soil samples   |
| <b>IN-SITU TESTING</b>  |  |
| D6089   | Standard method for groundwater level measurement  |
| D1586   | Standard test method for penetration test and split-barrel sampling of soils   |
| <b>LABORATORY TESTING</b>                                       |  |
| D422  | Standard test method for particle-size analysis  |
| D854  | Standard test method for specific gravity of soils   |
| D698  | Test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbs/ft <sup>3</sup> (600 kN-m/m <sup>3</sup> )) |
| D2166   | Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil  |
| D2216   | Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock   |
| D2217   | Standard practice for wet preparation of soil samples for particle size analysis and determination of soil constants                           |
| D2435   | Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils   |
| D2850   | Standard test method for unconsolidated un-drained compressive strength of cohesive soils in triaxial compression                              |
| D4318   | Standard test method for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils  |
| D4643   | Standard test method for determination of water (moisture) content of soil by the microwave oven method  |

出典：JICA 調査団



(b) ボーリング調査結果

ボーリング調査の結果は、図 2-2-12 に示した。土質は、表土、砂質土、細粒土に分類される。1m 毎に実施した SPT 試験の結果を併記した。



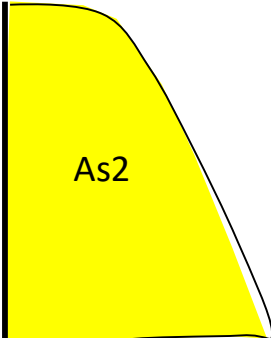
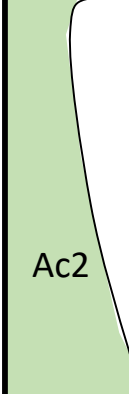
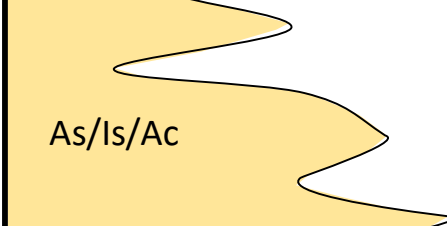

出典：JICA 調査団

図 2-2-12 ボーリング柱状図

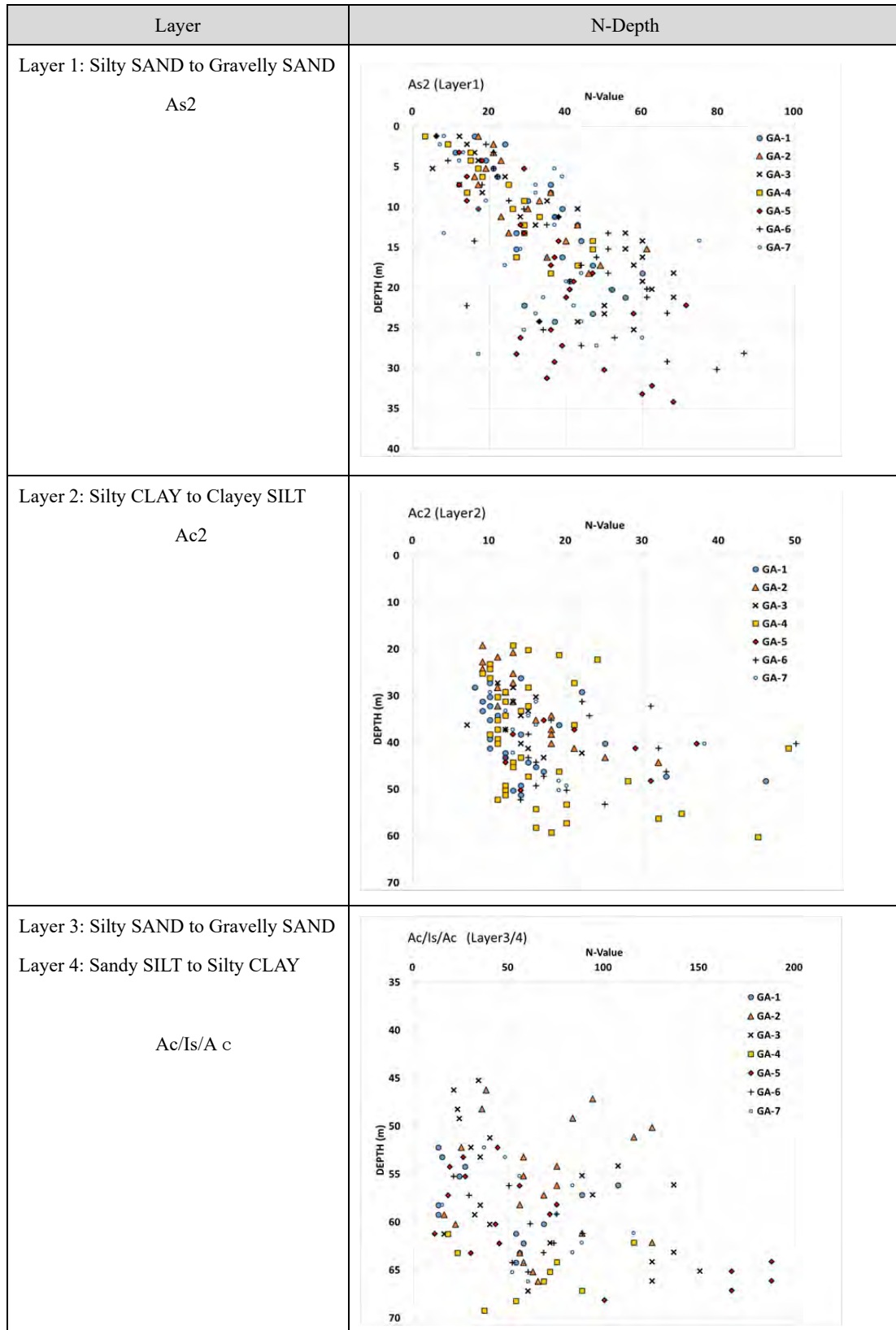
Palu 川河口の土質構成と層序は、表 2-2-6 のとおりまとめられる。図 2-2-13 は層別の N 値—深度分布図、表 2-2-7 はボーリング孔毎に N 値と粒度特性を集計した。



表 2-2-6 パル川河口の地質層序

| Stratum   | Overview  | Columnar   |
|---|---|--|
| <p>▪ <b>Layer 1: Silty SAND to Gravelly SAND</b></p> <p style="text-align: center;"><b>As2</b></p>      | <p>Layer 1 mostly consist grayish brown to dark gray Silty SAND to Gravelly SAND and yellowish brown sand with consistency loose up to very dense. Mostly the SPT value of this layer is 3 up to &gt;50, and the thickness of this layer is about 19 meters up to 35 meters.</p>  |    |
| <p>▪ <b>Layer 2: Silty CLAY to Clayey SILT</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Ac2</b></p>        | <p>Layer 2 mostly consist dark gray Silty CLAY to Clayey SILT insertion gray Sandy GRAVEL, and Clayey SAND to Silty SAND with low to high plasticity and consistency medium stiff up to hard. Mostly the SPT value of this layer is 8 up to &gt;50, and the thickness of this layer is about 21 meters up to 42 meters.</p> |   |
| <p>▪ <b>Layer 3: Silty SAND to Gravelly SAND</b></p> <p style="text-align: center;"><b>As/Is/Ac</b></p> | <p>Layer 3 mostly consist gray Silty SAND to Gravelly SAND with consistency very stiff up to dense. Mostly the SPT value of this layer is 15 up to &gt;50, and the thickness of this layer is about 1 meters up to 12 meters.</p>   |  |
| <p>▪ <b>Layer 4: Sandy SILT to Silty CLAY</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Ac</b></p>          | <p>Layer 4 mostly consist gray Sandy SILT to Silty CLAY with consistency hard. Mostly the SPT value of this layer is up to &gt;50, and the thickness of this layer is about 1 meter up to 4.5 meters.</p>   |  |

出典：JICA 調査団



出典：JICA 調査団

図 2-2-13 層別の N 値深度分布

表 2-2-7 ボーリング孔毎の N 値と粒度特性集計

| ボーリング                 | 土質毎の N 値集計と粒度特性 |       |       |       |       |           |       |          |           |      |                  |             |
|-----------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|----------|-----------|------|------------------|-------------|
| GA-01<br>Depth 66.00m | 35 GA-01        |       |       |       |       |           |       |          |           |      |                  |             |
|                       |                 | N av  | N med | N max | N min | N count a | std   | Av-STD/2 | Gravel av | Sand | Silt and Clay av |             |
|                       | As2             | 35.0  | 36.5  | 60.0  | 11.0  | 24        | 12.4  | 28.76    | 17.0      | 76.8 | 6.2              |             |
|                       | Ac2             | 13.1  | 12.0  | 25.0  | 8.0   | 24        | 4.2   | 11.05    | 0.0       | 6.7  | 93.3             |             |
|                       | As              | 51.5  | 53.6  | 107.1 | 13.0  | 11        | 28.7  | 37.11    | 0.2       | 75.1 | 24.7             |             |
|                       | Ac              | 40.6  | 40.6  | 68.2  | 13.0  | 2         | 27.6  | 26.8     |           |      |                  |             |
| Is                    | 30.7            | 33.0  | 46.0  | 13.0  | 3     | 13.6      | 23.9  | 0.0      | 37.5      | 62.5 |                  |             |
| GA-02<br>Depth 66.38m | 31 GA-02        |       |       |       |       |           |       |          |           |      |                  |             |
|                       |                 | N av  | N med | N max | N min | N count a | std   | Av-STD/2 | Gravel av | Sand | Silt and Clay av | wet density |
|                       | As2             | 30.0  | 25.0  | 61.2  | 16.0  | 17        | 12.4  | 23.8     | 17.8      | 69.2 | 13.0             |             |
|                       | Ac2             | 15.3  | 13.0  | 32.0  | 9.0   | 20        | 5.8   | 12.4     | 0.0       | 8.4  | 91.7             | 1.74        |
|                       | As              | 72.0  | 65.2  | 125.0 | 22.0  | 18        | 29.1  | 57.4     | 0.0       | 81.9 | 18.1             |             |
|                       | Ac              | 20.5  | 20.5  | 25.0  | 16.0  | 2         | 4.5   | 18.3     | 0.0       | 10.4 | 89.6             |             |
| Is                    | 66.3            | 66.3  | 75.0  | 57.7  | 3     | 8.7       | 62.0  | 0.0      | 40.0      | 60.0 | 1.94             |             |
| GA-03<br>Depth 67.40m | 40 GA-03        |       |       |       |       |           |       |          |           |      |                  |             |
|                       |                 | N av  | N med | N max | N min | N count a | std   | Av-STD/2 | Gravel av | Sand | Silt and Clay av | wet density |
|                       | As2             | 40.2  | 43.0  | 68.2  | 5.0   | 25        | 20.2  | 30.1     | 19.0      | 68.7 | 12.4             |             |
|                       | Ac2             | 13.4  | 14.0  | 17.0  | 7.0   | 11        | 2.6   | 12.1     | 0.0       | 14.2 | 85.8             | 1.685       |
|                       | As              | 77.7  | 65.7  | 150.0 | 16.0  | 16        | 44.8  | 55.3     | 0.8       | 81.4 | 17.8             |             |
|                       | Ac              | 53.6  | 35.0  | 93.8  | 32.0  | 3         | 28.4  | 39.4     | 0.0       | 13.3 | 86.7             |             |
| Is                    | 25.5            | 23.5  | 34.0  | 21.0  | 7     | 5.0       | 23.0  | 0.0      | 29.2      | 70.8 | 1.87             |             |
| GA-04<br>Depth 69.45m | 27 GA-4         |       |       |       |       |           |       |          |           |      |                  |             |
|                       |                 | N av  | N med | N max | N min | N count a | std   | Av-STD/2 | Gravel av | Sand | Silt and Clay av |             |
|                       | As2             | 27.0  | 27.0  | 47.0  | 9.0   | 17        | 11.3  | 21.4     | 16.0      | 72.7 | 11.3             |             |
|                       | Ac2             | 14.6  | 13.0  | 32.0  | 9.0   | 36        | 4.8   | 12.2     | 0.0       | 7.3  | 92.7             |             |
|                       | As              | 62.4  | 68.2  | 115.4 | 18.0  | 9         | 28.9  | 48.0     | 0.0       | 47.5 | 52.5             |             |
|                       | Ac              | 45.3  | 45.3  | 53.6  | 37.0  | 2         | 8.3   | 41.1     | 0.0       | 13.1 | 86.9             |             |
| Is                    | 26.3            | 28.0  | 35.0  | 16.0  | 3     | 7.8       | 22.4  | 0.0      | 24.9      | 75.1 |                  |             |
| GA-05<br>Depth 68.30m | #N/A GA-5       |       |       |       |       |           |       |          |           |      |                  |             |
|                       |                 | N av  | N med | N max | N min | N count a | std   | Av-STD/2 | Gravel av | Sand | Silt and Clay av | wet density |
|                       | As2             | 36.6  | 36.5  | 71.4  | 12.0  | 30        | 15.9  | 28.6     | 22.1      | 65.5 | 12.4             |             |
|                       | Ac2             | 14.8  | 13.5  | 21.0  | 12.0  | 6         | 3.2   | 13.2     | 3.5       | 11.3 | 85.2             | 1.74        |
|                       | As              | 104.1 | 100.0 | 187.5 | 11.0  | 9         | 69.2  | 69.5     | 6.3       | 92.9 | 0.8              |             |
|                       | Ac              | 19.0  | 19.0  | 19.0  | 19.0  | 1         | 0.0   | 19.0     | 0.0       | 8.1  | 91.9             |             |
| Is                    | 43.8            | 40.5  | 75.0  | 18.0  | 13    | 17.9      | 34.8  | 16.8     | 37.1      | 46.1 | 1.74             |             |
| GA-06<br>Depth 65.45m | #N/A GA-6       |       |       |       |       |           |       |          |           |      |                  |             |
|                       |                 | N av  | N med | N max | N min | N count a | std   | Av-STD/2 | Gravel av | Sand | Silt and Clay av | wet density |
|                       | As2             | 39.5  | 38.0  | 86.7  | 6.0   | 29        | 20.7  | 29.1     | 7.2       | 84.0 | 8.8              |             |
|                       | Ac2             | 20.6  | 18.0  | 33.0  | 12.0  | 15        | 6.6   | 17.3     | 0.0       | 6.6  | 93.4             |             |
|                       | As              | 60.6  | 61.2  | 88.5  | 21.0  | 8         | 19.5  | 50.9     | 0.0       | 63.7 | 36.3             |             |
|                       | Ac              | 29.0  | 29.0  | 29.0  | 29.0  | 1         | 0.0   | 29.0     | 0.0       | 6.6  | 93.4             |             |
| Is                    | 58.3            | 50.0  | 75.0  | 50.0  | 3     | 11.8      | 52.4  | 0.0      | 48.8      | 51.2 |                  |             |
| GA-07<br>Depth 66.40m | 32 GA-7         |       |       |       |       |           |       |          |           |      |                  |             |
|                       |                 | N av  | N med | N max | N min | N count a | std   | Av-STD/2 | Gravel av | Sand | Silt and Clay av | wet density |
|                       | As2             | 32.2  | 33.0  | 75.0  | 7.0   | 28        | 15.9  | 24.2     | 11.1      | 75.7 | 13.2             |             |
|                       | Ac2             | 14.5  | 13.0  | 20.0  | 10.0  | 12        | 3.3   | 12.9     | 0.0       | 6.8  | 93.2             |             |
|                       | As              | 96.9  | 55.6  | 300.0 | 16.0  | 6         | 103.4 | 45.2     | 48.7      | 48.5 | 2.8              |             |
|                       | Ac              | 50.4  | 55.9  | 75.0  | 15.0  | 5         | 22.1  | 39.4     | 0.0       | 4.6  | 95.5             |             |
| Is                    | 71.1            | 70.5  | 115.4 | 37.0  | 8     | 24.2      | 59.0  | 0.0      | 25.0      | 75.0 |                  |             |

出典：JICA 調査団

ボーリングは海岸線から 50~100m離れた palu 川河口で実施しており、地下水位は GL-2m より浅い位置に分布する。

表 2-2-8 ボーリングの孔内水位

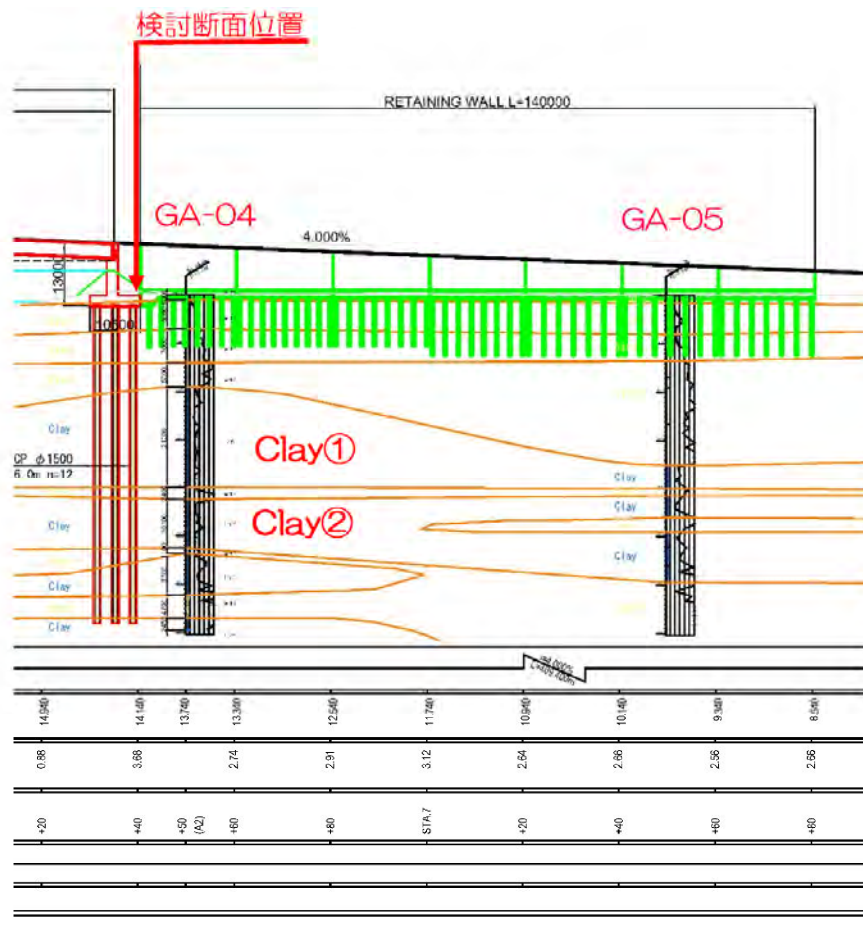
| No. | Borehole ID# | Ground Water Level (GL- m) |
|-----|--------------|----------------------------|
| 1   | GA-01        | 0.52                       |
| 2   | GA-02        | 0.00 ( on river)           |
| 3   | GA-03        | 0.00 (on river)            |
| 4   | GA-04        | 1.1                        |
| 5   | GA-05        | 1.5                        |
| 6   | GA-06        | 0.6                        |
| 7   | GA-07        | 0.3                        |

出典：JICA 調査団

(c) 橋梁背面盛土の概略沈下検討

① 検討断面位置

検討断面位置は、盛土高、粘性土層厚が最も大きい東側橋台背面盛土とする。



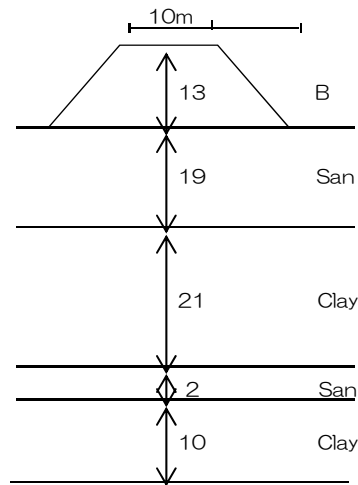
出典：JICA 調査団

図 2-2-14 沈下検討断面位置



② 検討モデル

主要な圧密対象層として、Clay①、Clay②を対象とする。



出典：JICA 調査団

図 2-2-15 沈下検討モデル

③ 検討結果

Clay①の圧密沈下量

道路幅  $a$ 、法面幅  $b$  の台形帯状盛土における深さ  $z$  の位置の鉛直有効応力の影響値は、図 2-2-16 より以下のとおりである。

$$a = 26, b = 5, z = 29$$

$$\frac{a}{z} = 0.9, \frac{b}{z} = 0.2, I = 0.3 \text{ (左右対称盛土と仮定して } I = 0.6 \text{)}$$

したがって、深さ  $Z$  の位置における増加鉛直有効応力は以下の通りである。

$$\Delta\rho = I \cdot \delta_E = I \cdot H_E \cdot \gamma_E = 0.6 \times 13 \times 20 = 156 \text{ kN/m}^2$$

$\Delta e$  法における圧密沈下量は以下の通りである。

$$P_0 = 18 \times 19 + 17 \times 10 = 512 \text{ kN/m}^2$$

$$P_0 + \Delta P = 512 + 156 = 668 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta e = 0.05, \quad e_0 = 0.92$$

$$S = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H = \frac{0.05}{1 + 0.92} \times 21 = 0.55 \text{ m}$$

Clay②の圧密沈下量

Clay①と同様に求める。

$$a = 26, b = 5, z = 47$$

$$\frac{a}{z} = 0.55 \quad \frac{b}{z} = 0.11 \quad I = 0.2 \text{ (左右対称盛土と仮定して } I = 0.4 \text{)} \Delta\rho = I \cdot \delta_E = I \cdot H_E \cdot \gamma_E =$$

$$0.4 \times 13 \times 20 = 104 \text{ kN/m}^2$$

$$P_o = 18 \times 19 + 17 \times 21 + 18 \times 2 + 17 \times 5 = 820 \text{ kN/m}^2$$

$$P_o + \Delta P = 820 + 104 = 924 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta e = 0.03, \quad e_o = 0.88$$

$$S = \frac{\Delta e}{1 + e_o} H = \frac{0.03}{1 + 0.88} \times 10 = 0.16 \text{ m}$$

Clay①+Clay②の圧密沈下量

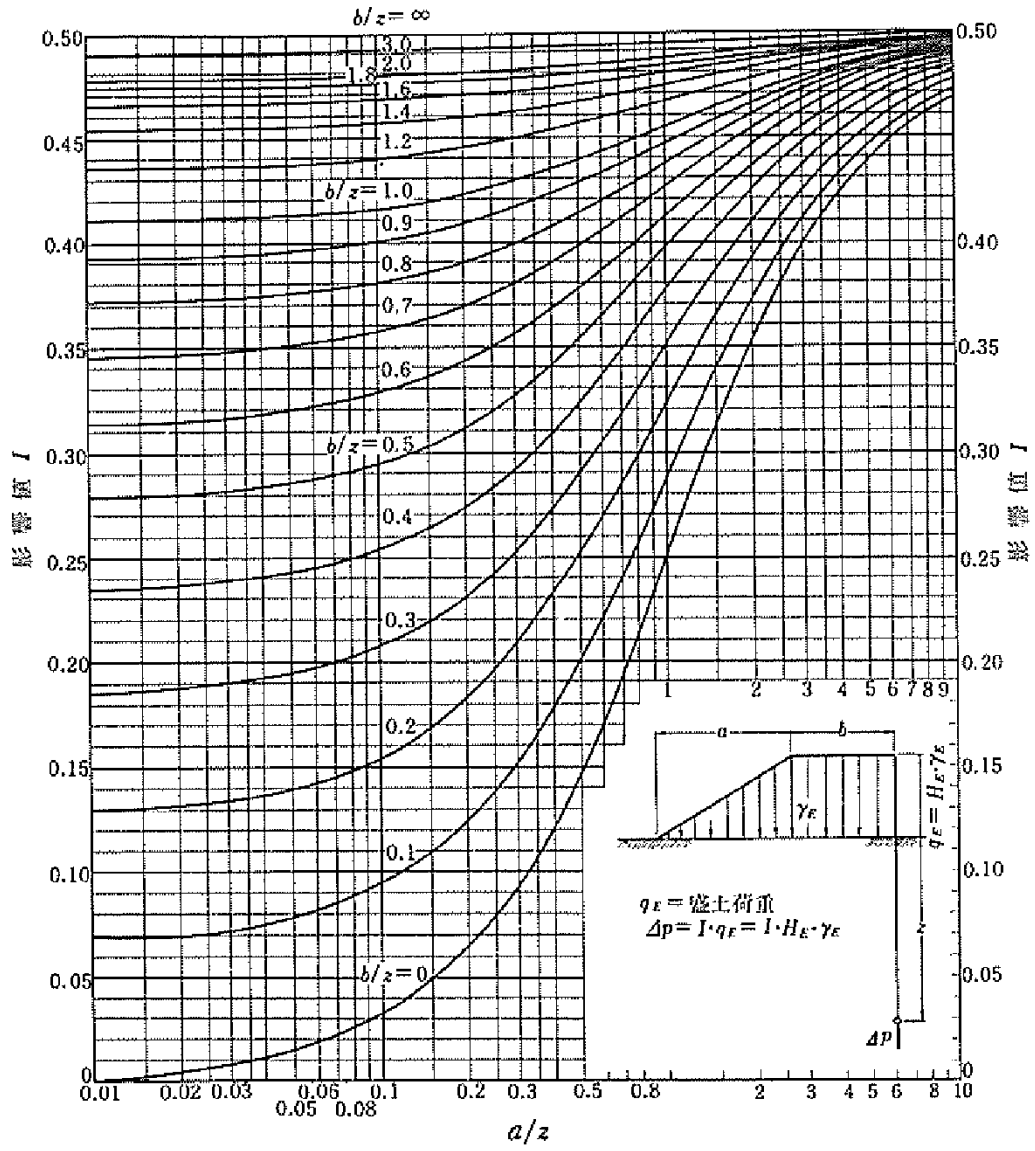
$$S = 0.55 + 0.16 = 0.71 \text{ m}$$

Clay①の圧密沈下時間

$$t = \frac{\left(\frac{H}{2}\right)^2}{c_v} T_v = \frac{\left(\frac{2100}{2}\right)^2}{0.05} \cdot 0.848 = 18700000 \text{ 分} = 12985 \text{ 日} = 35 \text{ 年}$$

T<sub>v</sub>:時間係数 (90%圧密時)

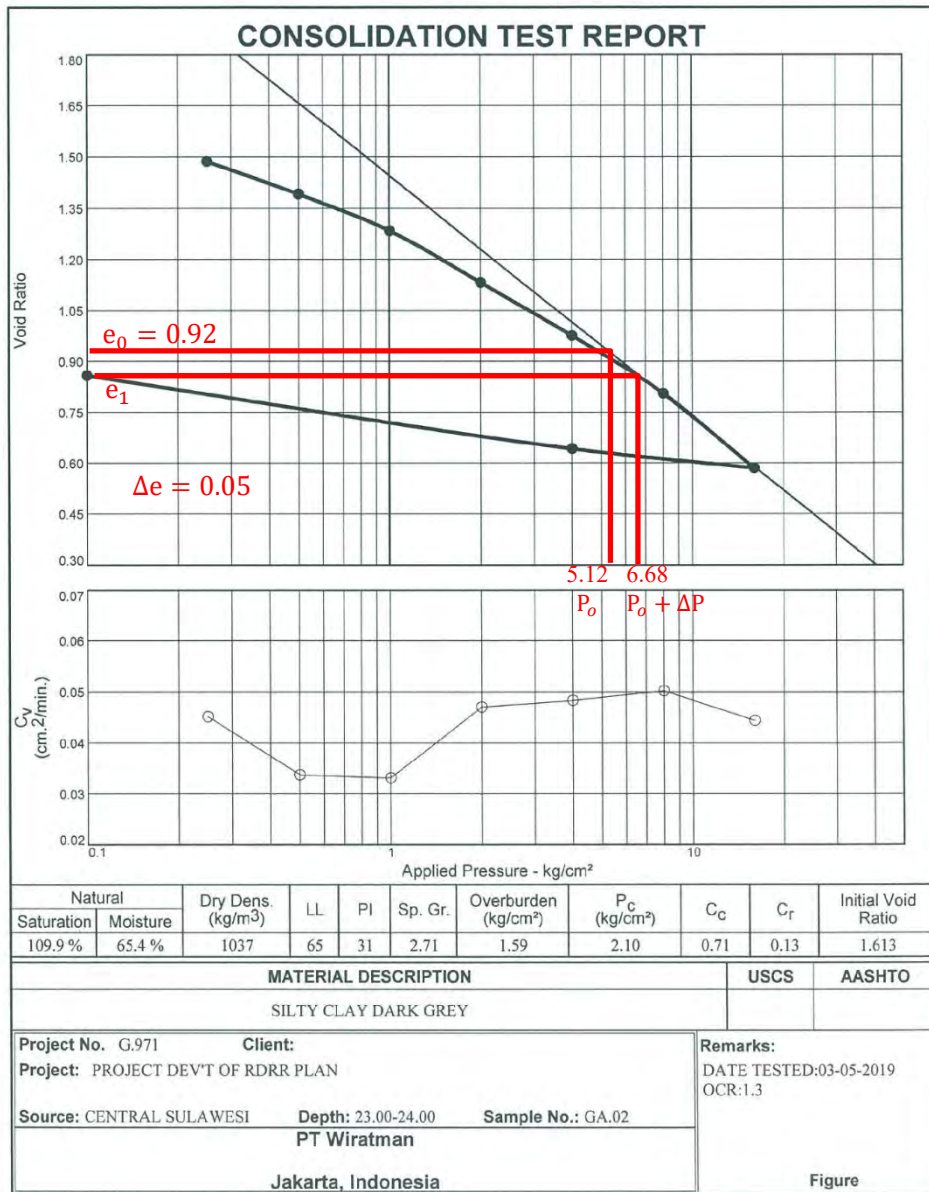
以上より、総沈下量は約 70cm で圧密期間は約 35 年である。



出典：道路土工 軟弱地盤対策工指針（平成 24 年度版）、p.122

図 2-2-16 台形帯状荷重による地盤内鉛直応力影響値

Clay①



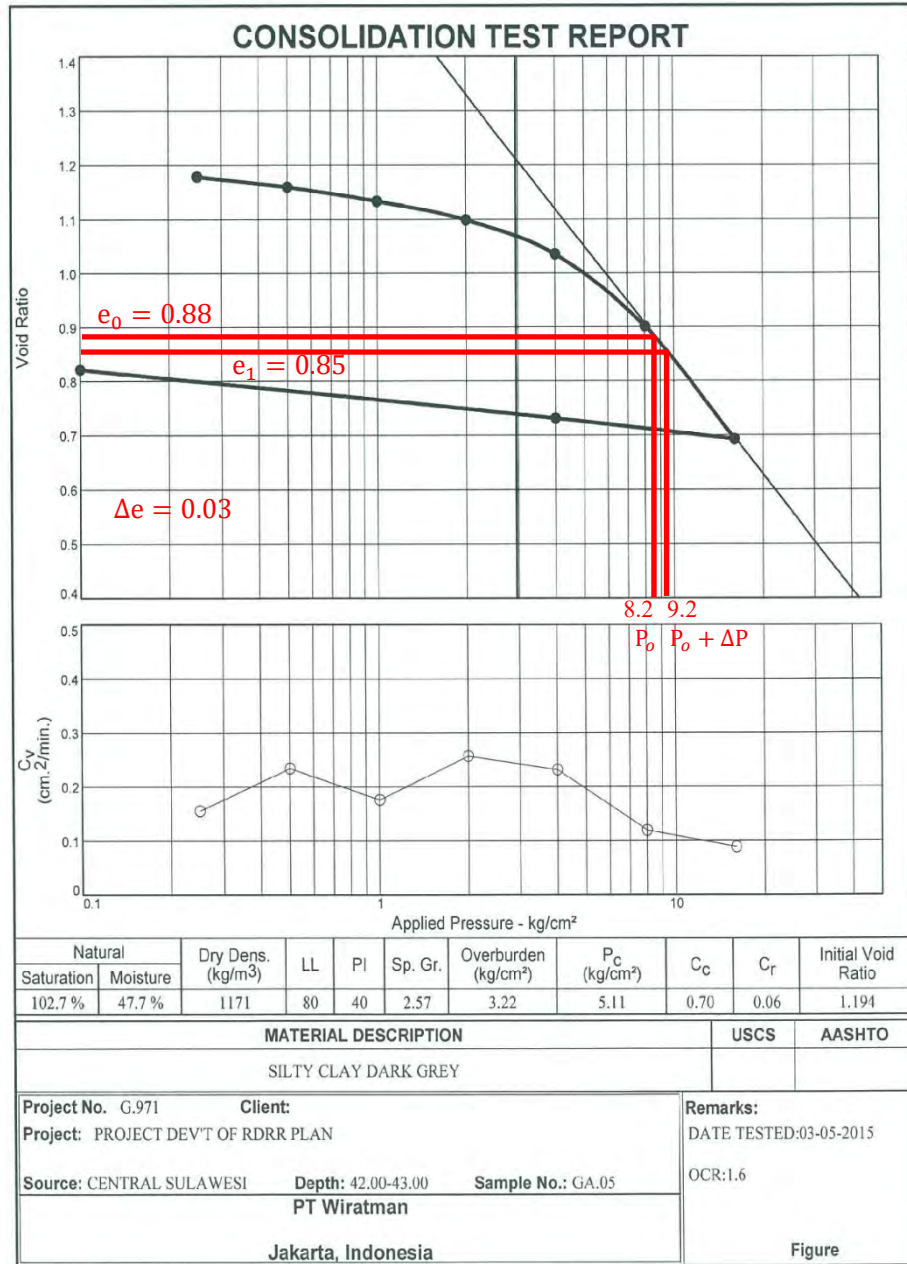
Tested By: DD \_\_\_\_\_ Checked By: SH \_\_\_\_\_

出典 : JICA 調査団

図 2-2-17 Clay①の e-logP 曲線 (ボーリング GA.02、GL-23-24m)



Clay②



Tested By: DD \_\_\_\_\_ Checked By: SH \_\_\_\_\_

出典：JICA 調査団

図 2-2-18 Clay②の e-logP 曲線 (ボーリング GA.05、GL-42-43m)

## 2-2-3 環境社会配慮

### 2-2-3-1 環境影響評価

#### (1) 環境社会影響を与える事業コンポーネントの概要

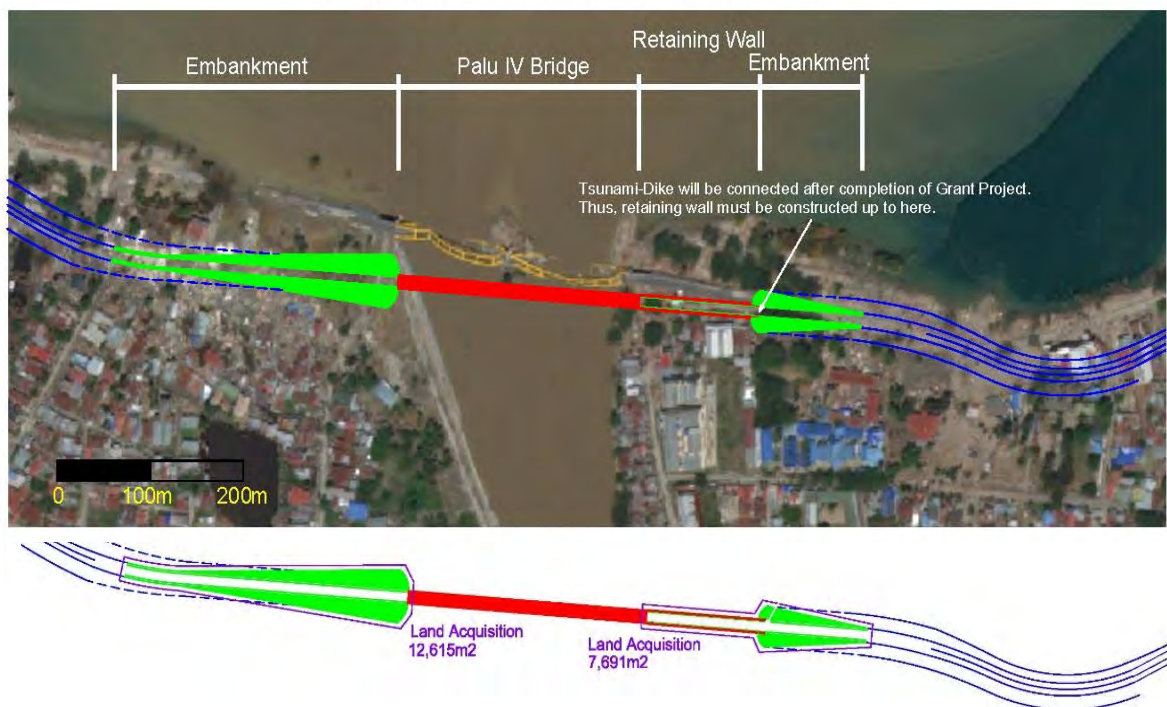
事業の概要を表 2-2-9 及び図 2-2-19 に示す。本事業は、地震で被災したパル第四橋を上流側の隣接地に再建するものである。橋梁延長は約 260m である。橋梁は、右岸では Jalan Rajamoili (ラジャモイリ道路)、左岸では Jalan Cumi Cumi (チュミチュミ道路) の 2 つの既存道路に接道する。左岸の用地取得面積を削減するため擁壁延長をより長くした場合の事業費も検討されている。詳細設計は 2019 年の 5 月から 7 月の 3 か月で実施され、技術的な課題が解決される予定である。

表 2-2-9 事業概要

|               |  |
|---------------|--|
| * 道路          | (2車線+歩道)、対面通行  |
| * 橋梁          | 延長約260m、幅員約14m   |
| * 築堤+擁壁       | 延長約250m、右岸はJalan Rajamoiliに接道、左岸はJalan Cumi Cumiに接道  |
| * 必要な用地面積     | 右岸：約7,700m <sup>2</sup> (約3,000m <sup>2</sup> の既存道路を含む)<br>左岸：約12,620m <sup>2</sup><br>合計：約20,320 m <sup>2</sup> |
| * 立地          | 右岸：Besusu Barat村<br>左岸：Lere村   |
| * 事業実施機関 (EA) | Ministry of Public Works and Housing   |

出典：JICA 調査団

Alternative 1 - Left Bank: Embankment



出典：JICA 調査団

図 2-2-19 事業概要 (2019 年 4 月 1 日現在)

(2) ベースとなる環境社会の状況（事業を実施する地域の概況・現況）

1) 公害

(a) 大気環境

パル市及び中部スラウェシ州における大気観測データは入手できなかった。また、騒音、振動、悪臭に関する観測データも入手できなかった。

(b) 水質

表流水

パル市では、2018年4月24日に市内の3か所で水質観測を実施した。

1. River water, Kampung Lere Village, West Palu Subdistrict（パル川河口左岸）
2. River water under Bridge I Palu（パルI橋下（河口から上流に約1.6km））
3. Palu River water, Tatanga Village（左岸支流 河口から約5km）

表 2-2-10 パル市の水質調査結果

| No                | Parameters                        | Unit       | Standard by Water Class |          |          |          | パル川<br>Lere | パル川<br>パルI橋 | パル川<br>Tatanga |
|-------------------|-----------------------------------|------------|-------------------------|----------|----------|----------|-------------|-------------|----------------|
|                   |                                   |            | I                       | II       | III      | IV       |             |             |                |
| <b>Physical</b>   |                                   |            |                         |          |          |          |             |             |                |
| 1                 | Temperature                       | °C         | Devisi 3                | Devisi 3 | Devisi 3 | Devisi 3 | 30/27       | 30/29       | 30/29          |
| 2                 | Turbidity                         | NTU        | -                       | -        | -        | -        | 1.35        | 78.9        | 78.9           |
| 3                 | Dissolved Solid                   | mg/L       | 1.000                   | 1.000    | 1.000    | 2.000    | 151         | 135         | 135            |
| 4                 | Suspended Solid                   | mg/L       | 50                      | 50       | 400      | 400      | 355         | 372         | 372            |
| 5                 | DHL                               | µS         | -                       | -        | -        | -        | 109         | 98          | 98             |
| <b>Chemical</b>   |                                   |            |                         |          |          |          |             |             |                |
| 1                 | Iron, Fe                          | mg/L       | 0.3                     | -        | -        | -        | <b>0.36</b> | 0.10        | 0.10           |
| 2                 | BOD                               | mg/L       | 2                       | 3        | 6        | 12       | <b>8.45</b> | <b>8.0</b>  | <b>8.0</b>     |
| 3                 | COD                               | mg/L       | 10                      | 25       | 50       | 100      | < 25        | < 25        | < 25           |
| 4                 | DO                                | mg/L       | 6                       | 4        | 3        | 0        | 3.25        | 3.15        | 3.15           |
| 5                 | Chloride                          | mg/L       | -                       | 600      | -        | -        | 6.5         | 10.3        | 10.3           |
| 6                 | Manganese                         | mg/L       | 0.1                     | -        | -        | -        | 0.01        | <b>0.24</b> | 0.24           |
| 7                 | Oils and Grease                   | mg/L       | 1.000                   | 1.000    | 1.000    | -        | Nihil       | Nihil       | Nihil          |
| 8                 | Nitrate, NO <sub>3</sub> -N       | mg/L       | 10                      | 10       | 20       | 20       | 0.19        | 0.24        | 0.24           |
| 9                 | Nitrite, NO <sub>2</sub> -N       | mg/L       | 0.06                    | 0.06     | 0.06     | -        | < 0.003     | < 0.003     | < 0.003        |
| 10                | pH                                | -          | 6-9                     | 6-9      | 6-9      | 5-9      | 6.65        | 5.98        | 5.98           |
| 11                | Free Ammonium, NH <sub>3</sub> -N | mg/L       | 0.5                     | -        | -        | -        | 0.13        | 0.11        | 0.11           |
| 12                | Zinc, Zn                          | mg/L       | 0.05                    | 0.05     | 0.05     | 2        | < 0.01      | < 0.01      | < 0.01         |
| 13                | Cyanide, CN <sup>#</sup>          | mg/L       | 0.02                    | 0.02     | 0.02     | -        | < 0.002     | <b>0.09</b> | <b>0.09</b>    |
| 14                | Sulfide, H <sub>2</sub> S         | mg/L       | 400                     | -        | -        | -        | 27.0        | 17.5        | 17.5           |
| 15                | Mercury, Hg <sup>#</sup>          | mg/L       | 0.03                    | 0.03     | 0.03     | 1        | < 0.01      | < 0.01      | < 0.01         |
| 16                | Surfactants, MBAS                 | ug/L       | 200                     | 200      | 200      | -        | < 0.01      | < 0.01      | < 0.01         |
| 17                | Organic Matter                    | mg/L       | -                       | -        | -        | -        | 3.35        | 8.25        | 8.25           |
| <b>Biological</b> |                                   |            |                         |          |          |          |             |             |                |
| 1                 | E. Coli                           | MPN/100 ml | 1000                    | 5000     | 10000    | 10000    | 139         | 39          | 39             |
| 2                 | Coliform                          | MPN/100 ml | 100                     | 1000     | 2000     | 2000     | 139         | 39          | 39             |

出典：Environmental Agency of Palu City

地下水

パル市では次表に示す2か所で地下水の水質観測が行われた。

表 2-2-11 パル市の地下水調査結果

| No                | Parameters                  | Unit       | Water Class |           |           |           | Lagarutu Road | TPA Kawatuna |
|-------------------|-----------------------------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------|--------------|
|                   |                             |            | I           | II        | III       | IV        |               |              |
| <b>Physical</b>   |                             |            |             |           |           |           |               |              |
| 1                 | Odor                        | -          | -           | -         | -         | -         | No odor       | No odor      |
| 2                 | Taste                       | -          | -           | -         | -         | -         | No taste      | No taste     |
| 3                 | Temperature                 | °C         | Deviasi 3   | Deviasi 3 | Deviasi 3 | Deviasi 3 | 28/30         | 27/29        |
| 4                 | Colour                      | TCU        | -           | -         | -         | -         | < 5           | < 5          |
| 5                 | Turbidity                   | NTU        | -           | -         | -         | -         | 0.59          | 0.81         |
| 6                 | Dissolved Solid             | mg/L       | 1.000       | 1.000     | 1.000     | 2.000     | 322           | 499          |
| 7                 | Suspended Solid             | mg/L       | 50          | 50        | 400       | 400       | 120           | 98           |
| <b>Chemical</b>   |                             |            |             |           |           |           |               |              |
| 1                 | Iron, Fe                    | mg/L       | 0.3         | -         | -         | -         | 0.04          | < 0.01       |
| 2                 | BOD                         | mg/L       | 2           | 3         | 6         | 12        | 0.09          | 0.10         |
| 3                 | COD                         | mg/L       | 10          | 25        | 50        | 100       | < 0.01        | < 0.01       |
| 4                 | DO                          | mg/L       | 6           | 4         | 3         | 0         | 190.50        | 217,98       |
| 5                 | Chloride                    | mg/L       | -           | 600       | -         | -         | 4.98          | 6.51         |
| 6                 | Manganese                   | mg/L       | 0.1         | -         | -         | -         | < 0.01        | < 0.01       |
| 7                 | Oils and Grease             | mg/L       | 1.000       | 1.000     | 1.000     | -         | Nihil         | Nihil        |
| 8                 | Nitrate, NO <sub>3</sub> -N | mg/L       | 10          | 10        | 20        | 20        | < 0.01        | 1.13         |
| 9                 | Nitrite, NO <sub>2</sub> -N | mg/L       | 0.06        | 0.06      | 0.06      | -         | < 0.003       | < 0.003      |
| 10                | pH                          | -          | 6-9         | 6-9       | 6-9       | 5-9       | 6.64          | 6.75         |
| 11                | Surfactants, MBAS           | ug/L       | 200         | 200       | 200       | -         | < 0.01        | < 0.01       |
| 12                | Organic Matter              | mg/L       | -           | -         | -         | -         | 2.5           | 1.99         |
| <b>Biological</b> |                             |            |             |           |           |           |               |              |
| 1                 | E. Coli                     | MPN/100 ml | 1000        | 5000      | 10000     | 10000     | 95            | 76           |
| 2                 | Coliform                    | MPN/100 ml | 100         | 1000      | 2000      | 2000      | 95            | 76           |

出典：Environmental Agency of Palu City

2) 自然環境

(a) 気象

中部スラウェシ州には4か所の気象観測地点が設置されている。2017年の観測結果を次表に示す。

表 2-2-12 中部スラウェシ州の4観測地点のモニタリング結果（2017年）

| Information                                   | Palu City | Poso Regency | Tolitoli Regency | Luwuk Regency |
|---|-----------|--------------|------------------|---------------|
| Annual Maximum Temperature (°C)               | 33.8      | 32.8         | 32.0             | 32.2          |
| Annual Minimum Temperature (°C)               | 23.5      | 22.7         | 22.3             | 23.9          |
| Annual Average Temperature (°C)               | 27.5      | 27.7         | 27.0             | 28.0          |
| Annual Average Humidity (percent)             | 79.3      | 83.6         | 83.4             | 77.2          |
| Annual Average Atmospheric Pressure (mb)      | 1,008.2   | 1,009.3      | 1,010.2          | 1,011.1       |
| Annual Average Wind Velocity (knot)           | 4.5       | 2.3          | 2.0              | 3.4           |
| Annual Average Precipitation (mm)             | 717       | 1,696        | 2,178            | 1,346         |
| Annual Average Duration of Sunshine (percent) | 59.0      | 54.8         | 57.4             | -             |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018



パル市の気温と湿度の状況を次表に示す。最低気温は1月の21.9℃で、最高気温は4月の33.8℃であった。湿度は1年を通じて70%以上と高い。

表 2-2-13 パル市の気温・湿度 (2017 年)

| Month     | Temperature (°C) |         |         | Humidity (%) |
|-----------|------------------|---------|---------|--------------|
|           | Minimum          | Maximum | Average |              |
| January   | 21.9             | 32.3    | 27.0    | 79.4         |
| February  | 23.9             | 32.7    | 27.4    | 78.8         |
| March     | 23.8             | 32.9    | 27.3    | 78.2         |
| April     | 24.2             | 33.8    | 28.1    | 75.5         |
| May       | 24.6             | 33.5    | 28.0    | 80.1         |
| June      | 23.7             | 30.9    | 26.7    | 84.0         |
| July      | 23.5             | 31.7    | 26.8    | 82.6         |
| August    | 23.7             | 31.8    | 26.9    | 82.3         |
| September | 23.6             | 32.8    | 27.4    | 80.1         |
| October   | 24.0             | 32.9    | 27.9    | 78.8         |
| November  | 24.4             | 33.1    | 28.2    | 77.1         |
| December  | 24.2             | 33.2    | 28.3    | 74.9         |

出典：Palu City in Figures 2018

パル市の気圧は1年を通じて約1,000mbと安定しており、風は北～北西、すなわち海からの風が卓越している。

表 2-2-14 パル市の気圧と風向・風速 (2017 年)

| Month     | Air Pressure (mb) | Wind Velocity (knots) | The Most of Wind Direction |
|-----------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| January   | 1,010.9           | 4                     | North                      |
| February  | 1,011.4           | 5                     | North                      |
| March     | 1,011.5           | 5                     | North                      |
| April     | 1,010.4           | 5                     | NorthWest                  |
| May       | 1,011.0           | 5                     | NorthWest                  |
| June      | 978.1             | 4                     | NorthWest                  |
| July      | 1,012.0           | 4                     | NorthWest                  |
| August    | 1,011.3           | 4                     | NorthWest                  |
| September | 1,011.5           | 4                     | NorthWest                  |
| October   | 1,010.4           | 5                     | NorthWest                  |
| November  | 1,009.3           | 5                     | NorthWest                  |
| December  | 1,011.1           | 4                     | NorthWest                  |

出典：Palu City in Figures 2018

パル市の降雨日数の合計は年間237日と多いが、降雨量は年間862mmで、1回当たりの降雨量が少ない。

表 2-2-15 パル市の降雨量・降雨日・日照（2017 年）

| Month     | The Number of Rain (Day) | Rain fall (mm) | Length of Daylight (%) |
|-----------|--------------------------|----------------|------------------------|
| January   | 11                       | 44             | 61                     |
| February  | 19                       | 52             | 49                     |
| March     | 22                       | 43             | 56                     |
| April     | 18                       | 37             | 62                     |
| May       | 16                       | 72             | 64                     |
| June      | 22                       | 166            | 50                     |
| July      | 23                       | 95             | 58                     |
| August    | 23                       | 121            | 54                     |
| September | 24                       | 86             | 64                     |
| October   | 25                       | 85             | 67                     |
| November  | 20                       | 36             | 65                     |
| December  | 14                       | 25             | 59                     |
| Total     | 237                      | 862            |                        |

出典：Palu City in Figures 2018

(b) 地形・地質

事業実施区域周辺の地形・地質については、「2-2-2-3 地質調査」に示すとおりである。

(c) 水文

パル市及び中部スラウェシ州での水文の既存情報は得られなかった。

(d) 土地利用

中部スラウェシ州、パル市、及びシギ県については、土地利用に関する情報は得られなかった。

(e) 動植物

中部スラウェシ州にしか生息・生育・繁殖しない固有の動植物種を表 2-2-16 に示す。

表 2-2-16 中部スラウェシ州の固有種（動植物）

| No.      | Name                             | No. | Name                          |
|----------|----------------------------------|-----|-------------------------------|
| 植物       |                                  | 哺乳類 |                               |
| 低地森林     |                                  |     |                               |
| 1        | <i>Mussaendopsis beccariana</i>  | 1   | <i>Anoa quarlesi</i>          |
| 2        | <i>Strychnos axillaris,</i>      | 2   | <i>Anoa depressicornis</i>    |
| 3        | <i>Celtis sp.,</i>               | 3   | <i>Babyrousa babyrusa</i>     |
| 4        | <i>Pterospermum subpeltatum,</i> | 4   | <i>Sus celebensis</i>         |
| 5        | <i>Canangium odoratum,</i>       | 5   | <i>Macaca tonkeana</i>        |
| 6        | <i>Durio zibenthinus</i>         | 6   | <i>Phalanger ursinus</i>      |
| 低標高の山地森林 |                                  | 7   | <i>Phalanger celebensis</i>   |
| 7        | <i>Castanopsis argentea</i>      | 8   | <i>Tarsius spectrum</i>       |
| 8        | <i>Lithocarpus spp.,</i>         | 9   | <i>Cervus timorensis</i>      |
| 9        | <i>Dacrydium falcifolia,</i>     | 鳥類  |                               |
| 10       | <i>Phyllocladus hypophyllus,</i> | 10  | <i>Tanygnatus sumatrana</i>   |
| 11       | <i>Tristania sp.,</i>            | 11  | <i>Loriculus exilis</i>       |
| 12       | <i>Calophyllum spp.,</i>         | 12  | <i>Trichoglossus platurus</i> |
| 13       | <i>Garcinia spp.,</i>            | 13  | <i>Cacatua sulphurea</i>      |
| 高原森林     |                                  | 14  | <i>Buceros rhinoceros</i>     |
| 14       | <i>Podocarpus neriifolia</i>     | 15  | <i>Aceros cassidix</i>        |
| 15       | <i>Podocarpus imbricatus</i>     | 16  | <i>Anhinga rufa</i>           |
| 16       | <i>Nepthenes sp.</i>             | 17  | <i>Rallus platen</i>          |
| 草本       |                                  | 18  | <i>Scolopax celebensis</i>    |
| 17       | <i>Orthosiphon aristatus,</i>    | 19  | <i>Tyto inexpectata</i>       |
| 18       | <i>Curcuma longa,</i>            | 20  | <i>Geomalia heinrichi</i>     |
| 19       | <i>Pangium edule</i>             | 21  | <i>Macrocephalon maleo</i>    |
|          |                                  | 爬虫類 |                               |
|          |                                  | 22  | <i>Phyton reticulatus</i>     |
|          |                                  | 23  | <i>Ophiophagus Hannah</i>     |
|          |                                  | 24  | <i>Elaphe erythrura</i>       |
|          |                                  | 昆虫  |                               |
|          |                                  | 25  | <i>Papilio blumei</i>         |
|          |                                  | 26  | <i>Graphium androcles</i>     |
|          |                                  | 27  | <i>Appies spp</i>             |

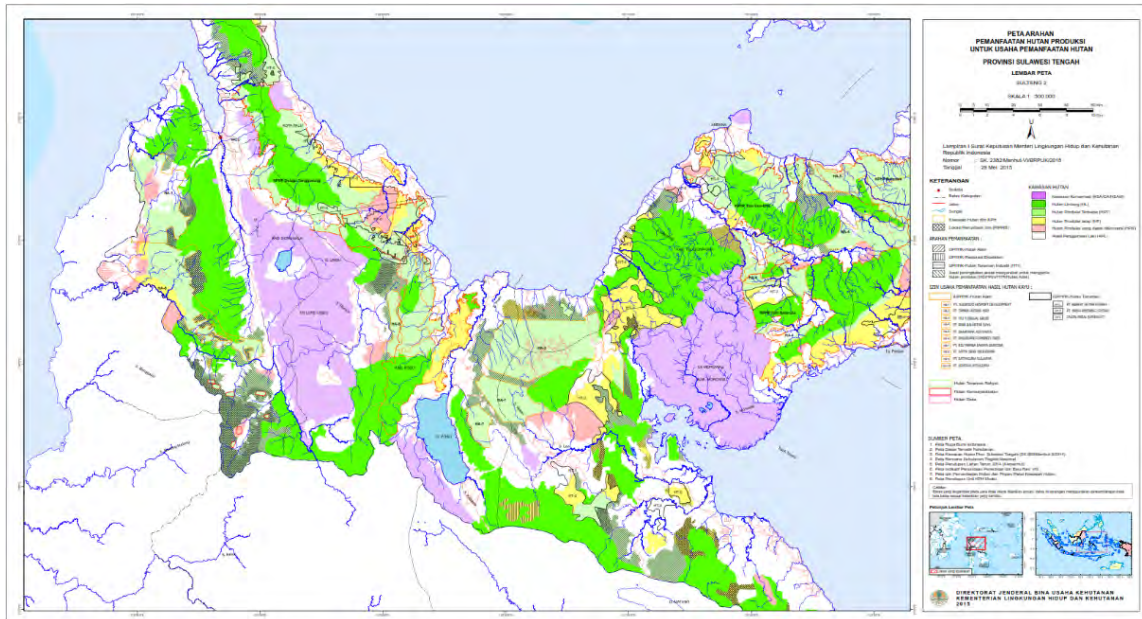
出典：Under survey

(f) 保護対象区域

Regulation of Environment and Forestry Ministry Number SK.2383/Menhut-VI/BRPUK/2015 に基づいて、保護森林（Protected Forest）と利用森林（Utilization Forest）図が作成されている。インドネシアでは、森林は以下の 5 種類に区分されている。

- Conservation Forest：保全林
- Protected Forest：保護林
- Limited Production Forest：限定的な生産林

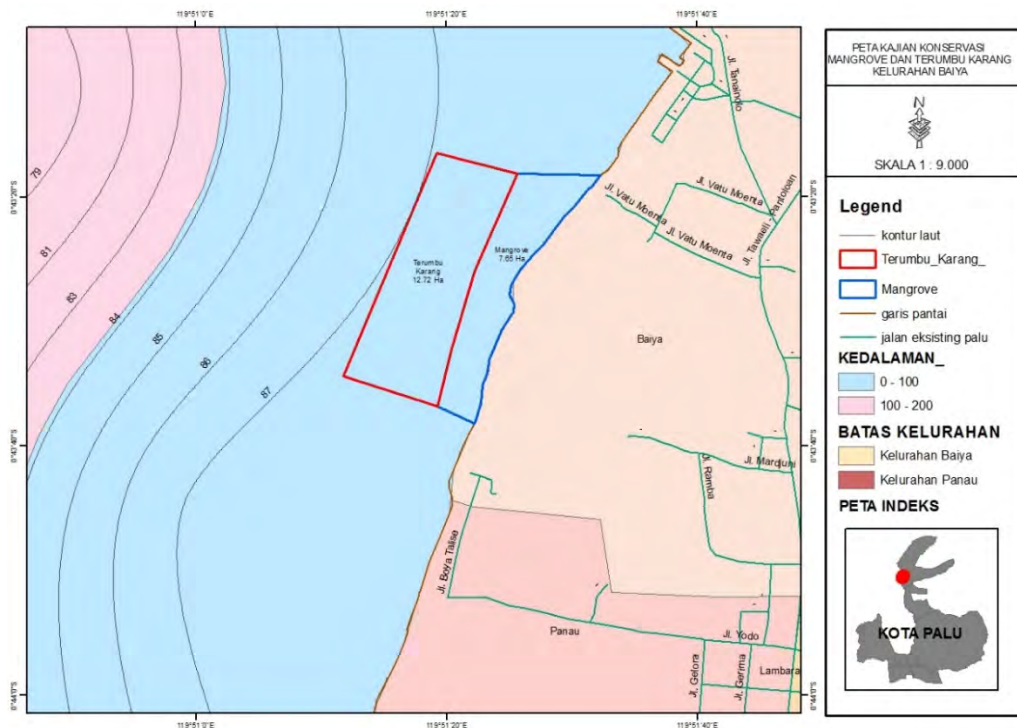
- Production Forest : 生産林
- Conversion Forest : 農地等への転用が可能な森林



出典 : [http://appgis.dephut.go.id/appgis/Arahan\\_Pemanfaatan\\_2015/Sulteng.pdf](http://appgis.dephut.go.id/appgis/Arahan_Pemanfaatan_2015/Sulteng.pdf) (アクセス日 : 2019年1月11日)

図 2-2-20 中部スラウェシ州の森林区分図

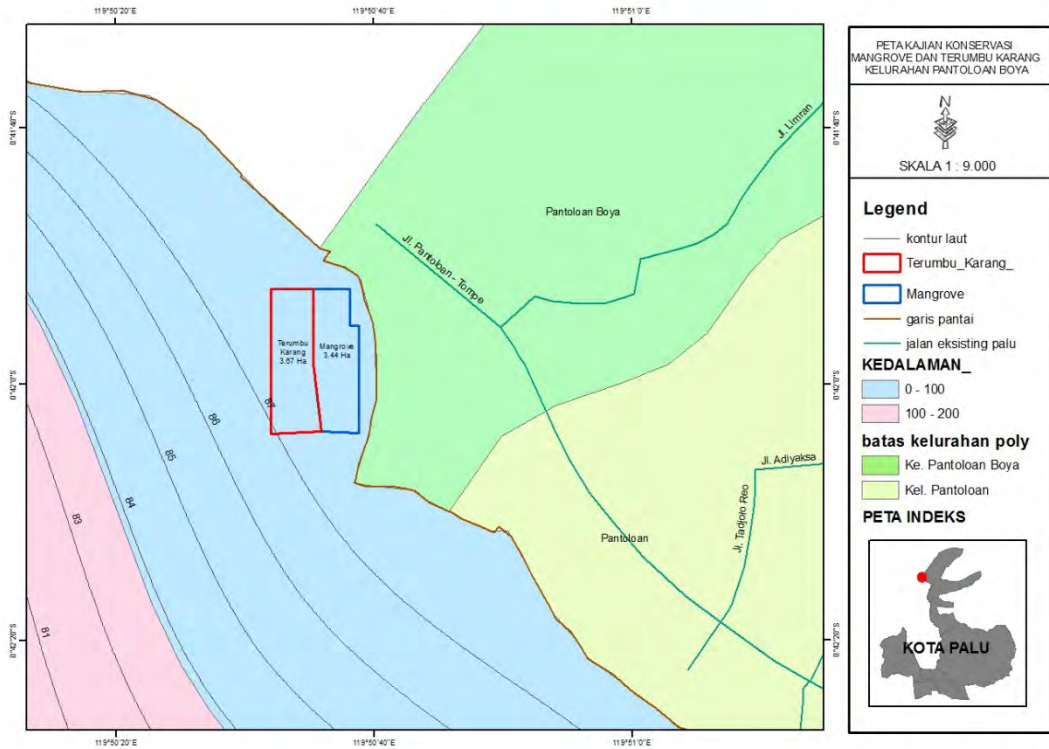
州による森林区分に加えて、パル市では、市内のサンゴ礁とマングローブの分布を図化している。



出典 : Under survey

図 2-2-21 パル市の Baiya Subdistrict のサンゴ礁とマングローブの分布





出典：Under survey

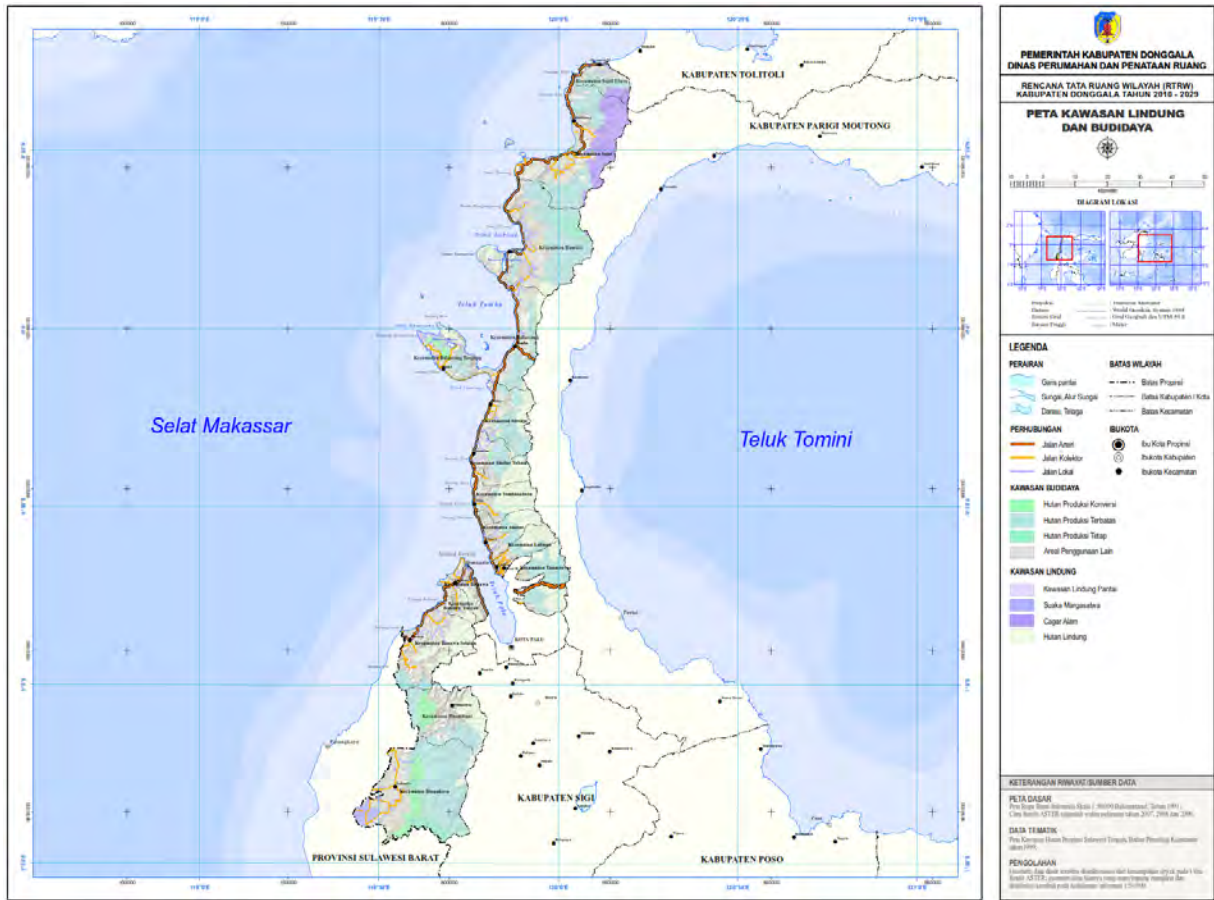
図 2-2-22 パル市の Pantoloan Boya Subdistrict のサンゴ礁とマングローブの分布



出典：Under survey

図 2-2-23 パル市の West Besusu (Besusu Barat) Subdistrict のマングローブの分布

パル湾を含むドンガラ県の保護・保全対象区域を図 2-2-24 に示す。



出典：Under survey

図 2-2-24 ドンガラ県の保護・保全対象区域

### 3) 社会環境

#### (a) 人口

中部スラウェシ州の人口は 2017 年に約 297 万人で、2000 年からの人口増加率は 1.65%であった (表 2-2-17)。

表 2-2-17 中部スラウェシ州の人口

| センサス実施年 | 性別        |           | 合計 (人)    | 増加率 (%) |             |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|
|         | 男性 (人)    | 女性 (人)    |           |         |             |
| 1971    | 467,166   | 446,496   | 913,662   | 2.83    | (1961-1971) |
| 1980    | 655,285   | 624,350   | 1,289,635 | 3.87    | (1971-1980) |
| 1990    | 877,039   | 834,288   | 1,711,327 | 2.87    | (1980-1990) |
| 2000    | 1,113,212 | 1,062,781 | 2,175,993 | 2.52    | (1990-2000) |
| 2010    | 1,350,844 | 1,284,165 | 2,635,009 | 1.95    | (2000-2010) |
| 2017    | 1,514,457 | 1,451,868 | 2,966,325 | 1.65    | (2000-2017) |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018

自治体別の人口を表 2-2-18 に示す。

表 2-2-18 自治体別の人口

| 県/市               | 人口 (千人) |       |       | 年間増加率 (%) |           |
|-------------------|---------|-------|-------|-----------|-----------|
|                   | 2010    | 2016  | 2017  | 2010-2017 | 2016-2017 |
| Palu City         | 338.0   | 374.0 | 379.8 | 1.68      | 1.54      |
| Donggala          | 278.6   | 296.4 | 299.2 | 1.02      | 0.94      |
| Sigi              | 215.8   | 232.2 | 234.6 | 1.20      | 1.04      |
| Parigi Moutong    | 415.3   | 465.9 | 474.3 | 1.92      | 1.82      |
| Banggai           | 325.1   | 360.0 | 365.6 | 1.69      | 1.55      |
| Tolitoli          | 212.1   | 228.5 | 231.0 | 1.23      | 1.09      |
| Poso              | 210.2   | 240.8 | 246.0 | 2.27      | 2.15      |
| Tojo Una-Una      | 138.3   | 149.2 | 150.8 | 1.20      | 1.04      |
| Buol              | 133.0   | 152.3 | 155.6 | 2.26      | 2.16      |
| Banggai Kepulauan | 109.8   | 116.0 | 116.8 | 0.89      | 0.69      |
| Morowali Utara    | 104.6   | 120.3 | 123.0 | 2.34      | 2.21      |
| Morowali          | 102.7   | 115.2 | 117.3 | 1.92      | 1.85      |
| Banggai Laut      | 62.5    | 70.9  | 72.3  | 2.10      | 1.99      |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018

中部スラウェシ州の年齢層別人口構成は表 2-2-19 に示すとおりで、0-4 歳が最も多い。

表 2-2-19 中部スラウェシ州の人口の年齢構成

| 年齢層   | 性別 (人)    |           |           |
|-------|-----------|-----------|-----------|
|       | 男性        | 女性        | 合計        |
| 0-4   | 159,585   | 153,237   | 312,822   |
| 5-9   | 144,721   | 136,236   | 280,957   |
| 10-14 | 142,423   | 135,127   | 277,550   |
| 15-19 | 140,886   | 135,094   | 275,980   |
| 20-24 | 128,639   | 124,913   | 253,552   |
| 25-29 | 125,817   | 122,396   | 248,213   |
| 30-34 | 125,904   | 123,553   | 249,457   |
| 35-39 | 121,329   | 116,214   | 237,543   |
| 40-44 | 107,796   | 102,176   | 209,972   |
| 45-49 | 88,8694   | 83,230    | 171,924   |
| 50-54 | 70,857    | 65,886    | 136,743   |
| 55-59 | 54,973    | 50,279    | 105,252   |
| 60-64 | 39,298    | 36,283    | 75,581    |
| 65+   | 63,535    | 67,244    | 130,779   |
| 合計    | 1,514,457 | 1,451,868 | 2,966,325 |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018

パル市の地区別の人口及び増加率を表 2-2-20 に示す。

表 2-2-20 パル市の地区ごとの人口と増加率 (2017 年)

| Districts<br>(地区) | 人口             |                |                | 増加率 (%)     |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------|
|                   | 2010 (人)       | 2016 (人)       | 2017 (人)       |             |
| Palu Barat        | 98,739         | 61,424         | 62,293         | 1.41        |
| Tatanga           | -              | 39,369         | 39,997         | 1.60        |
| Ulujadi           | -              | 27,319         | 27,763         | 1.63        |
| Palu Selatan      | 122,752        | 69,492         | 70,571         | 1.55        |
| Palu Timur        | 75,967         | 70,378         | 71,452         | 1.53        |
| Mantikulore       | -              | 62,822         | 63,804         | 1.56        |
| Palu Utara        | 39,074         | 22,834         | 23,196         | 1.59        |
| Tawacli           | -              | 20,382         | 20,706         | 1.59        |
| <b>Palu City</b>  | <b>336,352</b> | <b>374,020</b> | <b>379,782</b> | <b>1.54</b> |

出典：Palu City in Figures 2018

2017 年の地区ごとの性別人口と男女比を表 2-2-21 に示す。Palu Timur District を除き、男女ほぼ同数か、男性がやや多い。

表 2-2-21 パル市の地区ごとの性別人口と男女比 (2017 年)

| Districts        | 性別             |                |                | 男女比<br>(男性/女性) |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | 男性 (人)         | 女性 (人)         | 合計 (人)         |                |
| Palu Barat       | 31,194         | 31,099         | 61,293         | 100            |
| Tatanga          | 20,265         | 19,732         | 39,997         | 103            |
| Ulujadi          | 13,970         | 13,793         | 27,763         | 101            |
| Palu Selatan     | 35,583         | 34,988         | 70,571         | 102            |
| Palu Timur       | 35,409         | 36,043         | 71,452         | 98             |
| Mantikulore      | 32,332         | 31,472         | 63,804         | 103            |
| Palu Utara       | 11,608         | 11,588         | 23,196         | 100            |
| Tawacli          | 10,519         | 10,187         | 20,706         | 103            |
| <b>Palu City</b> | <b>190,880</b> | <b>188,902</b> | <b>379,782</b> | <b>101</b>     |

出典：Palu City in Figures 2018

パル市の人口の年齢構成は表 2-2-22 に示す通りで、15-24 歳の層が多い。



表 2-2-22 パル市の人口の年齢構成（2017 年）

| 年齢層          | 性別             |                |                |
|--------------|----------------|----------------|----------------|
|              | 男性（人）          | 女性（人）          | 合計（人）          |
| 0-4          | 17,239         | 16,657         | 33,896         |
| 5-9          | 15,277         | 14,388         | 29,665         |
| 10-14        | 15,253         | 14,627         | 29,880         |
| 15-19        | 20,719         | 21,718         | 42,437         |
| 20-24        | 23,655         | 22,850         | 46,505         |
| 25-29        | 16,791         | 15,926         | 32,717         |
| 30-34        | 15,341         | 14,784         | 30,125         |
| 35-39        | 14,049         | 14,692         | 28,741         |
| 40-44        | 13,869         | 14,286         | 28,155         |
| 45-49        | 12,200         | 11,835         | 24,035         |
| 50-54        | 9,679          | 9,018          | 18,697         |
| 55-59        | 6,951          | 6,712          | 13,663         |
| 60-64        | 4,559          | 4,544          | 9,103          |
| 65+          | 5,298          | 6,865          | 12,163         |
| <b>Total</b> | <b>190,880</b> | <b>188,902</b> | <b>379,782</b> |

出典：Palu City in Figures 2018

(b) 識字率

中部スラウェシ州の識字率に関する情報は得られなかった。なお、世界銀行の統計によると、2016 年のインドネシア全体の成人識字率は 95.377%である。

(c) 今回の地震の被災者数

パル市の地区別の死者・行方不明者数は表 2-2-23 に示すとおりである。

表 2-2-23 パル市の地区別の被災者数

| Districts    | 合計           | 死者           | 行方不明者      |
|--------------|--------------|--------------|------------|
| Mantikulore  | 319          | 255          | 64         |
| Palu Selatan | 581          | 427          | 154        |
| Tatanga      | 110          | 65           | 45         |
| Tawacli      | 155          | 149          | 6          |
| Palu Timur   | 306          | 279          | 27         |
| Palu Utara   | 69           | 54           | 15         |
| Palu Barat   | 943          | 780          | 163        |
| Ulujadi      | 180          | 122          | 58         |
| <b>Total</b> | <b>2,663</b> | <b>2,131</b> | <b>532</b> |

出典：Bappeda of Palu City 2018

(d) 先住民族

中部スラウェシ州において確認・認証されている「地理的に隔離された伝統的なコミュニティ (Isolated Traditional Communities)」は、表 2-2-24 に示すとおりである。パル市にはこれらのコミュニティは位置していない。

これらのコミュニティは多くが Kaili 族で、中部スラウェシ州の各地にそれぞれ異なる名称で分布している。なお、インドネシア全体では、1000 を超える隔離・伝統コミュニティが存在する。

表 2-2-24 中部スラウェシ州において確認・認証されている「地理的に隔離された伝統的なコミュニティ (Isolated Traditional Communities)」(2017 年)

| No  | 県                 | コミュニティ名  | 人口     |
|-----|-------------------|--|--------|
| 1.  | Banggai Kepulauan | 1.Sea-sea, 2Bajo   | 1,155- |
| 2.  | Banggai           | 1.Loingang (saluam),2. Wana,3Balantak/Masama   | 5,858- |
| 3.  | Morowali          | 1.Wana(Taa)  | 1,1960 |
| 4.  | Poso              | 1.Wana   | 470    |
| 5   | Donggala          | 1.Tolare/Da'a, 2.Kori Rai, 3,Unde,5.Tajio, 6.Pendau, 7.Ado,8.Tado, 9.Uma, 10.Tara, 11.Ledo, 12.Lauje, 13.Kaili | 5,795  |
| 6.  | Tolitoli          | 1.Lauje, 2.Pandau, 3.Dondo, 4.Pandau and Dondo, 5.Lanje, 6.Hanje,7.Bajo  | 17,810 |
| 7   | Parigi Moutong    | 1.Lauje, 2.Tara, 3.Pendau  | 11,885 |
| 8   | Tojo Una-Una      | 1.Wana   | 5,785  |
| 9   | Sigi              | 1.Da'a   | 14,790 |
| 10. | Banggai Laut      | 1.Banggai, 2.Banggai Bajo  | 4,860  |
| 11. | Morowali Utara    |  | 5,160  |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018

パル市については上表に記載がないが、聞き取り調査から以下の情報が得られた。

- パル市市民の民族はカイリ族 (Kaili tribe) である。
- 市内の 46 の村 (village) にはそれぞれ伝統的な意思決定機関 (customary institution) が存在する。
- 伝統的な意思決定機関の構成員は全員が伝統社会 (traditional societies) の構成員である。
  - ✓ パル市の46か村全てに伝統的な意思決定機関が存在することから、1機関あたりのステークホルダー数を13人と仮定すると、市内の慣習的ステークホルダーの人数は約600人 (13人×46村=598人) となる。
- 伝統社会 (traditional societies) は、伝統的指導者 (traditional leaders、Tokoh Adat)、慣習的ステークホルダー (customary stakeholders)、及び慣習実践者 (customary performers、Pelaku Adat) から構成される。
  - ✓ 伝統的指導者は、先住長老 (Indigenous Elders、Tetua Adat) と呼ばれ、伝統的な意思決定機関の構成員の中の年長者である。また、伝統的な意思決定機関 1 つに対し最大の先住長老の人数は5人である。ただし、伝統的な意思決定機関全てに先住長老が存在するとは限らず、意思決定機関それぞれで人数が異なる。
  - ✓ 慣習実践者は、伝統的な儀式を行うことができる者である。
  - ✓ 伝統的な意思決定機関に所属する慣習的ステークホルダーの人数は様々である。パル市において慣習的ステークホルダーの人数は以下の通りとの情報が得られた：Balaroo 33人、Duyu 17人、Donggala koin 31人、Kabonena 15人、Silae 14人、Tipo 23人、Buluri 9人、Watusampu 27人。

(e) 生計及び地域経済

中部スラウェシ州の分野別就業者数は表 2-2-25 に示すとおりで、農林漁業が一番多く、次いで商業・レストラン・ホテルが多い。また、分野によって就業者の性別の比率は大きく異なるが、就業者数の合計は男女ともほぼ同数である。

表 2-2-25 中部スラウェシ州の分野別就業者数(2017 年)

| 産業分野   | 就業者数    |         |         |
|--|---------|---------|---------|
|  | 男性      | 女性      | 合計      |
| Agriculture, Forestry, Hunting, and Fisheries          | 444,092 | 164,654 | 608,746 |
| Mining and Quarrying                                   | 26,071  | 4,420   | 30,491  |
| Manufacturing Industry                                 | 50,233  | 36,763  | 86,986  |
| Municipal electricity, gas and water                   | 2,424   | 559     | 2,983   |
| Constructions  | 82,334  | 1,184   | 83,518  |
| Retail, Restaurants, and Hotels                        | 83,491  | 134,511 | 218,002 |
| Transportation, warehousing and communication          | 43,393  | 1,520   | 44,913  |
| Finance, Insurance, Real Estate, and Business Services | 14,273  | 6,632   | 20,905  |
| Personal and social services                           | 139,771 | 137,899 | 277,670 |

(f) 学校・教育

中部スラウェシ州の最終学歴に関する統計を表 2-2-26 に示す。パル市では高等学校終了者が最も多いが、その他の県では小学校修了者が最多である。

表 2-2-26 最終学歴 (2017 年)

| 県/市               | 最終学歴 (%)    |       |       |       |            |                  |                         |            |
|-------------------|-------------|-------|-------|-------|------------|------------------|-------------------------|------------|
|                   | 小学校を卒業していない | 小学校   | 中学校   | 高等学校  | 職業<br>高等学校 | ディプロマ<br>(1年・2年) | アカデミー/<br>ディプロマ<br>(3年) | 学士<br>(4年) |
| Palu City         | 10.79       | 19.86 | 17.20 | 30.50 | 6.16       | 1.31             | 2.56                    | 11.62      |
| Sigi              | 16.19       | 37.32 | 17.09 | 19.15 | 3.15       | 0.26             | 0.88                    | 5.96       |
| Donggala          | 20.72       | 40.88 | 16.26 | 15.41 | 2.30       | 0.48             | 0.42                    | 3.53       |
| Parigi Moutong    | 25.05       | 38.76 | 18.64 | 12.87 | 1.75       | 0.05             | 0.51                    | 2.37       |
| Tojo Una-Una      | 23.41       | 36.04 | 16.15 | 15.31 | 3.29       | 0.58             | 1.23                    | 3.99       |
| Tolitoli          | 19.27       | 34.69 | 18.26 | 14.74 | 3.88       | 0.53             | 1.08                    | 7.55       |
| Buol              | 18.47       | 35.39 | 19.11 | 15.51 | 3.27       | 0.91             | 1.71                    | 5.63       |
| Banggai Kepulauan | 17.93       | 38.91 | 16.68 | 16.84 | 2.61       | 0.45             | 0.84                    | 5.74       |
| Morowali          | 16.65       | 31.22 | 18.65 | 19.99 | 2.12       | 0.45             | 2.46                    | 8.46       |
| Banggai           | 16.13       | 39.19 | 18.08 | 16.49 | 3.57       | 0.76             | 1.14                    | 4.64       |
| Morowali Utara    | 14.88       | 26.89 | 17.34 | 19.95 | 3.65       | 0.85             | 1.05                    | 5.39       |
| Poso              | 14.18       | 34.79 | 19.21 | 19.83 | 3.61       | 0.75             | 1.14                    | 6.49       |
| Banggai Laut      | 13.64       | 40.96 | 18.71 | 16.10 | 1.65       | 0.42             | 1.57                    | 6.95       |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018

パル市、シギ県、ドンガラ県の学校数は表 2-2-27 に示す。

表 2-2-27 自治体別学校数

| No. | 区分  | 学校数  |      |          |
|-----|---|------|------|----------|
|     |   | Palu | Sigi | Donggala |
| 1   | Kindergarten                                    | 149  | 216  | N.A.     |
| 2   | Elementary school (6 years (1-6))               | 168  | 272  | 353      |
| 3   | Junior high school (3 years (7-9))              | 47   | 93   | 95       |
| 4   | Senior high school (3 years (10-12))            | 26   | 32   | 19       |
| 5   | Vocational senior high school (3 years (10-12)) | 27   | 12   | 13       |

出典：JICA 調査団

(g) 文化遺産・自然遺産

パル市を含む中部スラウェシ州の文化遺産・自然遺産としては、洞窟、巨石遺跡、王墓、モスク及び教会、伝統的家屋、城跡などがある。詳細については調査中である。

(h) 廃棄物及び廃棄物管理

パル市で 2017 年に発生した廃棄物は 279,574m<sup>3</sup>であった。この廃棄物を収集するため、市は 64 の廃棄物コンテナ、8 か所の廃棄物処理施設、Kawatuma 最終処分場 (TPA) を所有している。廃棄物処理施設では、廃棄物の減量、再利用、リサイクル (TPS3R) が行われている。

(i) 保健・衛生

主な疾病

中部スラウェシ州で確認された疾病を、患者数の多い順に並べると表 2-2-28 のとおりである。上気道感染症、胃炎、及び、高血圧の患者が、他の疾病患者に比べ極めて多い。

表 2-2-28 中部スラウェシ州で確認された主な疾病 (2017 年)

| No | 主な疾病  | 患者数     |
|----|---|---------|
| 1  | 上気道感染症 Upper respiratory infection/URTI                                   | 244,805 |
| 2  | 胃炎 Gastritis/stomach inflammation   | 173,026 |
| 3  | 高血圧 Hypertension/high blood pressure                                      | 109,765 |
| 4  | 胃腸炎・下痢 Gastroenteritis/diarrhea/stomach flu                               | 39,896  |
| 5  | アレルギー性皮膚疾患 Allergic skin diseases   | 39,320  |
| 6  | 上気道のその他の疾患 Other diseases on upper respiratory                            | 19,089  |
| 7  | 低血圧 Hypotension/low blood pressure  | 18,646  |
| 8  | インフルエンザ Influenza   | 17,361  |
| 9  | 神経系障害とその他の神経疾患<br>Nervous system disorder and other neurological diseases | 13,180  |
| 10 | 慢性関節リウマチ Rheumatoid arthritis   | 12,235  |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018

パル市で確認された疾病を、患者数の多い順に並べると表 2-2-29 のとおりである。州全体の傾向と同じく、上部気道感染症と胃炎が上位を占めた。



表 2-2-29 パル市で確認された主な疾病（2017 年）

| No | 主な疾病  | 患者数    |
|----|---|--------|
| 1  | 上部気道感染症 Upper Respiratory Tract Infection             | 43,507 |
| 2  | 胃炎 Gastritis  | 18,206 |
| 3  | 上部気道のその他の疾患 Other diseases of the respiratory tract   | 17,953 |
| 4  | 筋肉・関節の病気 Diseases of the muscular system/organ binder | 14,986 |
| 5  | アレルギー性皮膚疾患 Allergic skin disease                      | 10,540 |
| 6  | 高血圧 High blood pressure (hypertension)                | 10,253 |
| 7  | 神経系障害とその他の神経疾患 Nervous system diseases and disorders  | 9,408  |
| 8  | 歯髄および根尖組織の病気 Diseases of pulp and periapical tissues  | 7,382  |
| 9  | 下痢 Diarrhea   | 6,451  |
| 10 | 扁桃炎 Tonsillitis                                       | 6,204  |

出典：Palu City in Figures 2018

### HIV を含む性感染症

中部スラウェシ州の HIV 感染者数、AIDS 患者数、その他の性感染症患者数を表 2-2-30 に示す。

表 2-2-30 中部スラウェシ州の HIV 感染者数・AIDS 患者数・その他の性感染症患者数（2017 年）

| Regency/City      | HIV 感染者 | AIDS 患者 | その他の性感染症患者 |
|-------------------|---------|---------|------------|
| Palu City         | 121     | 18      | 61         |
| Sigi              | 25      | 3       | 1          |
| Donggala          | 9       | 3       | 4          |
| Banggai Kepulauan | -       | -       | -          |
| Banggai           | 37      | 26      | -          |
| Morowali          | 8       | -       | -          |
| Poso              | 23      | 21      | 125        |
| Tolitoli          | 7       | -       | 6          |
| Buol              | 7       | -       | 12         |
| Parigi Moutong    | 7       | 13      | 66         |
| Tojo Una-Una      | 9       | 2       | -          |
| Banggai Laut      | 2       | 2       | 1          |
| Morowali Utara    | 5       | 5       | -          |
| 合計                | 266     | 93      | 276        |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018

### 医療機関

中部スラウェシ州の市・県別の医療機関数を表 2-2-31 に示す。州内に 32 件の病院がある。このうち、パル市に位置する Undata Regional Public Hospital と Madani Regional Public Hospital は州が所有している病院である。

表 2-2-31 中部スラウェシ州の市・県別の医療機関数（2017 年）

| 市・県               | 病院<br>Hospital | 産院<br>Maternity Hospital | 保健所<br>Public Health Center | 児童保健センター<br>Child Health Center |
|-------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Palu City         | 14             | 4                        | 13                          | 223                             |
| Sigi              | 1              | -                        | 19                          | 363                             |
| Donggala          | 2              | -                        | 15                          | 442                             |
| Banggai Kepulauan | 1              | -                        | 13                          | 173                             |
| Banggai           | 2              | -                        | 26                          | 388                             |
| Morowali          | 1              | -                        | 9                           | 153                             |
| Poso              | 2              | -                        | 21                          | 280                             |
| Tolitoli          | 1              | -                        | 14                          | 260                             |
| Buol              | 1              | -                        | 11                          | 160                             |
| Parigi Moutong    | 3              | 1                        | 23                          | 452                             |
| Tojo Una-Una      | 2              | -                        | 13                          | 196                             |
| Banggai Laut      | 1              | -                        | 5                           | 89                              |
| Morowali Utara    | 1              | -                        | 12                          | 167                             |
| 合計                | 32             | 93                       | 194                         | 3,346                           |

出典：Central Sulawesi Province in Figures 2018

パル市の地区別の医療機関数を表 2-2-32 に示す。市内に 9 件の病院がある。

表 2-2-32 パル市の地区別の医療機関数（2017 年）

| District     | 病院<br>Hospital | 産院<br>Maternity Hospital | 保健所<br>Public Health Center | 児童保健センター<br>Child Health Center |
|--------------|----------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Palu Barat   | 2              | 1                        | 1                           | 28                              |
| Tatanga      | -              | -                        | 2                           | 24                              |
| Ulujadi      | -              | -                        | 1                           | 28                              |
| Palu Selatan | 3              | 1                        | 3                           | 32                              |
| Palu Timur   | 2              | 2                        | 1                           | 32                              |
| Mantikulore  | 1              | -                        | 2                           | 37                              |
| Palu Utara   | 1              | -                        | 2                           | 37                              |
| Tawaeli      | -              | -                        | 2                           | 23                              |
| 合計           | 9              | 4                        | 13                          | 224                             |

出典：Palu City in Figures 2018

### (3) 環境社会配慮に関する制度・組織

#### 1) インドネシアの法制度

インドネシアの公共事業は、環境・森林省が所管する環境影響評価制度（AMDAL（Analisis Mengenai Dampak Lingkungan））による審査を受ける。同制度に関する主な法令は以下のものである。

#### **Law No. 32 of 2009 on Protection and Management of Environment**

本法は環境管理について定めており、影響評価については、影響の程度に応じて、AMDAL、UKL-UPL（Formulir Upaya Pengelolaan Lingkungan Hidup dan Upaya Pemantauan Lingkungan Hidup）あるいは SPPL（Surat Pernyataan Kesanggupan Pengelolaan dan Pemantauan Lingkungan Hidup）の報告書作成・承認が必要となる。

無償資金協力事業対象事業は延長約 260m の橋梁である。橋梁は延長が 500m を超える場合 AMDAL の対象となることから、本事業の実施に当たっては UKL-UPL 報告書の作成・承認が必要である。下表に橋梁事業に関する AMDAL クライテリアを示す。

表 2-2-33 橋梁事業に関する AMDAL クライテリア

| No.                      | Criteria for AMDAL   |
|--------------------------|--|
| I. Field of Public Works |  |
| 8.                       | a. Development <i>Underpass, tunnel, flyover</i> , with a length of $\geq 2$ km<br>b. Bridge construction, with a length of $\geq 500$ m |

出典: Law No. 32 of 2009 on Protection and Management of Environment

#### Ministry of Environment Regulation No. 5 of 2012

AMDAL（環境影響評価書）の審査が必要な事業内容・規模と審査手続きを定めている。

#### Ministry of Environment Regulation No. 8 of 2013

AMDAL、UKL-UPL、SPPL それぞれの報告書に含めるべき内容を定めている。

### 2) 組織

#### (a) 計画段階

本事業はパル市市道の事業であるため、パル市環境部が審査機関となる。

事業実施機関 Implementing Agency (IA) が UKL-UPL を作成し、パル市環境部が審査を行い環境承認 (Environmental Clearance) を発行する。

#### (b) 工事段階

IA は UKL-UPL に記載された影響緩和策及びモニタリング計画を実施する。モニタリング結果は IA からインドネシア政府及び JICA に報告される。

#### (c) 運営段階

工事段階と同様、IA は UKL-UPL に記載された影響緩和策及びモニタリング計画を実施する。モニタリング結果は IA からインドネシア政府及び JICA に報告される。

### 3) UPL-UKL の審査過程

UPL-UKL の審査過程を表 2-2-34 に示す。2019 年 3 月 18 日に行ったパル市環境部ヒアリングによると、MOE Regulation No. 08/2013 が定める通り、UKL-UPL の審査には最短で 14 営業日が必要とする。

今後、UKL-UPL 審査過程と、JICA ガイドラインが求めるパブリック・コンサルテーション、及び、JICA 向け IEE 報告書の提出タイミングの統合について、IA (Provincial Balai Bina Marga at Palu (道路局中部スラウェシ支部) が想定される)、及び、パル市 UKL-UPL 事務局との協議が必要である。

表 2-2-34 UPL-UKL の審査過程

| Steps | Action  |
|-------|---|
| 1     | The Implementation Agency (IA, expected to be Provincial Balai Bina Marga at Palu) will prepare UKL-UPL and submit the report to the Palu City UKL-UPL Secretariat. |
| 2     | The Palu City UKL-UPL Secretariat will check if the format of the report is according to the requirement.   |
| 3     | When confirmed, Palu City Mayor will publish that the City received the report.   |
| 4     | The Palu City UKL-UPL Secretariat will conduct technical review of the contents of the report within 14 working days after the publish by the Mayor.                |
| 5     | When it is found that the report passes the technical review, the Mayor will issue the Environmental Clearance (EC).  |
| 6     | The Mayor will publish a notice on the review results of the UKL-UPL. The report and the review results will be made available for public review.                   |

出典：IGES, 2018

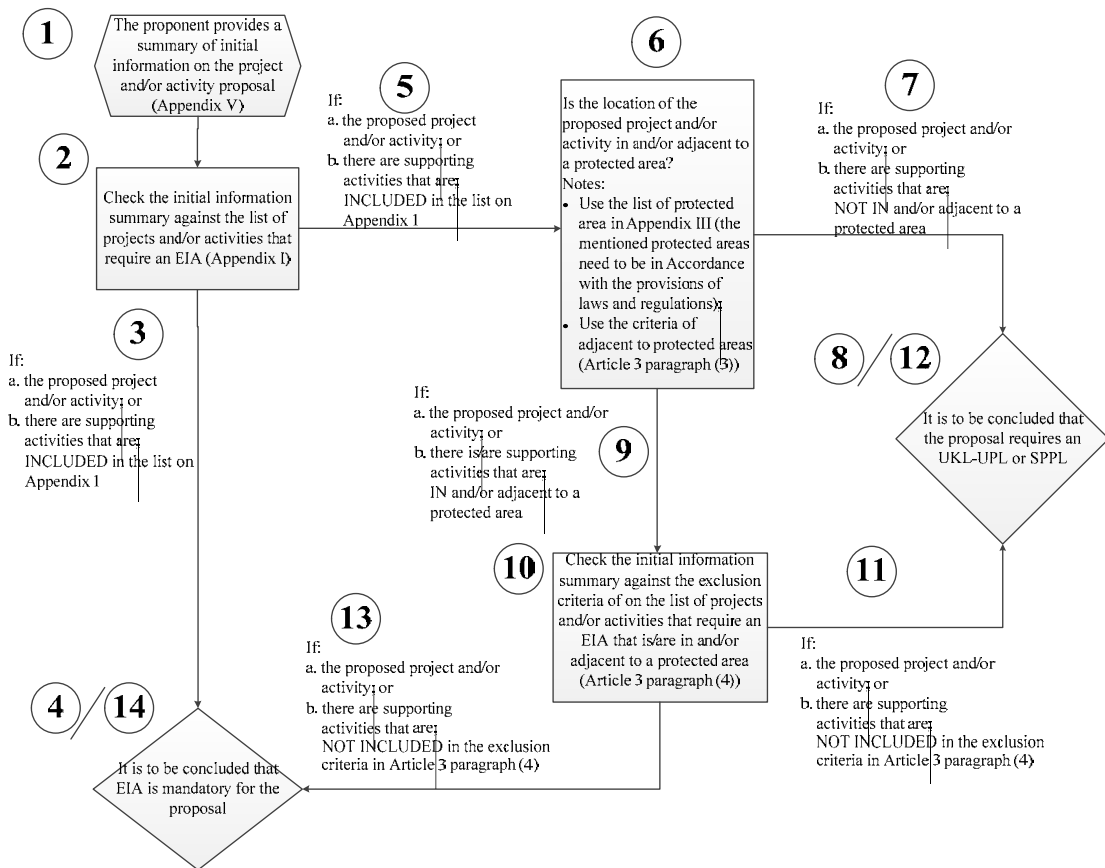


図 2-2-25 UPL-UKL の審査手続きフロー

4) JICA ガイドライン

JICA ガイドラインは事業による環境・社会への影響の程度に応じたカテゴリ区分を行っている。(表 2-2-35) JICA ガイドライン別紙 3 は、道路及び橋梁分野の事業を「重大な負の影響が発生する可能性がある事業分野」として挙げているが、本事業は地震によって破壊されたオリジナルのパル第四橋の復旧事業であること、住民の移転を伴わないことから、カテゴリ B 相当と想定される。



表 2-2-35 JICA ガイドラインのカテゴリ分類基準

| Category   | Categorization Criteria   |
|------------|---|
| Category A | <ul style="list-style-type: none"> <li>Proposed projects are classified as Category A if they are likely to have significant adverse impacts on the environment and society.</li> <li>Projects with complicated or unprecedented impacts that are difficult to assess, or projects with a wide range of impacts or irreversible impacts, are also classified as Category A.</li> <li>These impacts may affect an area broader than the sites or facilities subject to physical construction.</li> <li>Category A, in principle, includes projects in sensitive sectors, projects that have characteristics that are liable to cause adverse environmental impacts, and projects located in or near sensitive areas.</li> </ul>  |
| Category B | <ul style="list-style-type: none"> <li>The project may have adverse impacts on the environment or society, but these impacts are less significant than those of Category A projects.</li> <li>These impacts are site-specific; few, if any, of them are irreversible; in most cases, they can be mitigated more readily than Category A projects.</li> <li>Responsibilities of the project proponents include the planning and monitoring of necessary Environmental and Social Consideration (ESC) activities.</li> <li>ESC procedures such as Strategic Environmental Assessment for Master Plan projects and stakeholder participation may be required, depending on the scale and nature of the adverse impacts.</li> </ul> |

出典：JICA Guideline 2010

## 5) GAP 分析

JICA ガイドラインとインドネシアにおける環境影響評価制度の主な相違点及びその解消方針を表 2-2-36 に示す。

表 2-2-36 GAP 分析

| 目的                        | JICA Guideline  | インドネシア制度<br>Law No. 32 of 2009 等  | 2つの制度のギャップ及び<br>本事業における方針  |
|---------------------------|---|---|--|
| Underlying Principles     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Environmental impacts that may be caused by projects must be assessed and examined in the earliest possible planning stage.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Public works in Indonesia shall be planned, designed and implemented in accordance with the regulations on EIA issued by Ministry of Environment and Forestry.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>No gap.</li> <li>The Project will be subject to UKL-UPL review process.</li> </ul>  |
|                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alternatives or mitigation measures to avoid or minimize adverse impacts must be examined and incorporated into the project plan. JICA Guidelines Appendix 1, 1.1</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mitigation measures to avoid or minimize adverse impacts must be proposed by the Implementing Agency in both AMDAL and UKL-UPL, and incorporated into the Project Plan.</li> <li>Alternative study is not required, but the conformity of the Project with the official Spatial Plan must be explained.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alternative study is not required.</li> <li>JICA Mission Team will incorporate alternative plans of the Project that were studied during the preparatory design stage, and the reasons of selection of preferred plan in the Report.</li> </ul> |
| Information dissemination | <ul style="list-style-type: none"> <li>EIA reports (which may be referred to differently in different systems) must be written in the official language or in a language widely used in the country in which the project is to be implemented.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>AMDAL and UKL-UPL will be written in Bahasa Indonesia.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>No gap.</li> <li>The same contents will be provided in English for JICA review.</li> </ul>  |
|                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>When explaining projects to local residents, written materials must be provided in a language and form understandable to them;</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>When explaining projects to local residents, written materials will be provided in Bahasa Indonesia.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>No gap.</li> <li>Further discussion with IA and Palu City is desirable for the Project to check if materials in local Kaili language must be considered.</li> </ul>   |
|                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>EIA reports are required to be made available to the local</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>AMDAL-related documents are available for public throughout</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>No gap</li> <li>UKL-UPL will be made</li> </ul>   |

| 目的                              | JICA Guideline  | インドネシア制度<br>Law No. 32 of 2009 等   | 2つの制度のギャップ及び<br>本事業における方針   |
|---------------------------------|---|--|---|
|                                 | <p>residents of the country in which the project is to be implemented. The EIA reports are required to be available at all times for perusal by project stakeholders such as local residents and copying must be permitted; Appendix 2 Forewords</p>  | <p>the review process, starting from the first step (announcement of the project by the project owner) to the final step (announcement of issuing the environmental clearance).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UKL-UPL-related documents are available for public at two stages; the first after the official receive of UKL-UPL by the reviewing agency, and the second after the announcement of issuing the environmental clearance</li> </ul>  | <p>available to the local residents.</p>  |
| Social Acceptability            | <ul style="list-style-type: none"> <li>For projects with a potentially large environmental impact, sufficient consultations with local stakeholders, such as local residents, must be conducted via disclosure of information at an early stage, at which time alternatives for project plans may be examined.</li> <li>The outcome of such consultations must be incorporated into the contents of project plans. Appendix 1, 5.1</li> <li>In preparing EIA reports, consultations with stakeholders, such as local residents, must take place after sufficient information has been disclosed. Records of such consultations must be prepared;</li> <li>Consultations with relevant stakeholders, such as local residents, should take place if necessary throughout the preparation and implementation stages of a project.</li> <li>Holding consultations is highly desirable, especially when the items to be considered in the EIA are being selected, and when the draft report is being prepared. Appendix 2 Forewords</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>In the project subject to AMDAL process, the project owner must hold a public consultation before the submission of draft TOR of AMDAL to the reviewing agency. Besides the public consultation, general public may submit opinions during 10 working days after the announcement of the project by the project owner.</li> <li>After receiving the draft AMDAL from the project owner, the reviewing agency invites public opinion for 10 working days. AMDAL technical secretary will instruct the project owner for revision when necessary.</li> <li>AMDAL committee will hold public hearing during the review process.</li> <li>For the project subject to UKL-UPL, which is considered to cause smaller environmental impact, no public consultation is mandated.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>For the project subject to UKL-UPL, no public consultation is mandated.</li> <li>At least two public consultations (called socialization in local system) will be held for the Project, one at early stage of the IEE study, and one after the environmental assessment is drafted.</li> </ul> |
| Scope of Impacts to Be Assessed | <ul style="list-style-type: none"> <li>The impacts to be assessed with regard to environmental and social considerations include impacts on human health and safety, as well as on the natural environment, that are transmitted through air, water, soil, waste, accidents, water usage, climate change, ecosystems, fauna and flora, including trans-boundary or global scale impacts.</li> <li>These also include social impacts, including migration of population and involuntary resettlement, local economy such as employment and livelihood, utilization of land and local resources, social</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>The impacts to be assessed in AMDAL and UKL-UPL include impacts on pollution, natural environment, and social and economic environment.</li> <li>The impacts to be assessed, however, are selected from the project activities. No such standard check list of environmental items is available.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>No standard check list of environmental items is available.</li> <li>In the impact scoping stage of the Project, the standard list of impacts will be referred to identify potential impacts.</li> </ul>   |

| 目的                                | JICA Guideline   | インドネシア制度<br>Law No. 32 of 2009 等   | 2つの制度のギャップ及び<br>本事業における方針   |
|-----------------------------------|--|--|---|
|                                   | <p>institutions such as social capital and local decision-making institutions, existing social infrastructures and services, vulnerable social groups such as poor and indigenous peoples, equality of benefits and losses and equality in the development process, gender, children's rights, cultural heritage, local conflicts of interest, infectious diseases such as HIV/AIDS, and working conditions including occupational safety. Appendix 1, 3.1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● In addition to the direct and immediate impacts of projects, their derivative, secondary, and cumulative impacts as well as the impacts of projects that are indivisible from the project are also to be examined and assessed to a reasonable extent. It is also desirable that the impacts that can occur at any time throughout the project cycle should be considered throughout the life cycle of the project. Appendix 1. 3.2</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● No clear requirement of examination and assessment of derivative, secondary, and cumulative impacts as well as the impacts of projects that are indivisible from the project.</li> </ul>  | <p>2つの制度のギャップ及び本事業における方針</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Derivative, secondary, and cumulative impacts as well as the impacts of projects that are indivisible from the Project will be examined and assessed to a reasonable extent.</li> <li>● The impacts that can occur throughout the life cycle of the Project will also be examined and assessed to a reasonable extent.</li> </ul> |
| Monitoring and resolving problems | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Project proponents etc. should make efforts to make the results of the monitoring process available to local project stakeholders. Appendix 1, 8.3</li> <li>● When third parties point out, in concrete terms, that environmental and social considerations are not being fully undertaken, forums for discussion and examination of countermeasures are established based on sufficient information disclosure, including stakeholders' participation in relevant projects. Project proponents etc. should make efforts to reach an agreement on procedures to be adopted with a view to resolving problems. Appendix 1, 8.4.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>● In Construction Stage, EMP and EMOP prepared as a part of AMDAL or UKL-UPL will be implemented, and periodic monitoring will be conducted. Monitoring result will be report to the concerned authorities in Indonesia and JICA, according to the reporting method to be stipulated in AMDAL or UKL-UPL.</li> <li>● Unforeseen environmental problems and issues raised by surrounding communities or others during the construction stage can be handled by the grievance redress mechanism to be established according to ESMF.</li> <li>● In Operation Stage, monitoring and reporting will be implemented in accordance with EMOP and grievance will be handled in the grievance redress mechanism to be established.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● No gap</li> <li>● Environmental Management Plan and Monitoring Plan for the Project will be reviewed and approved by Palu City. The Plans will be made available to general public.</li> <li>● The IA will be responsible to implement, monitor and report the EMP and EMOP throughout the Construction and Operation Stage.</li> </ul>                        |
| Ecosystem and Biota               | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Projects must not involve significant conversion or significant degradation of critical natural habitats and critical forests. Appendix 1. 6.1.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● No specific description on the limitation of project impacts.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● In the draft Environmental and Social Management Framework (ESMF), it is declared that to be financed, the sub-projects will need to be Category B or C under the JICA Guidelines 2010.</li> <li>● No gap.</li> </ul>  |

| 目的                 | JICA Guideline  | インドネシア制度<br>Law No. 32 of 2009 等  | 2つの制度のギャップ及び<br>本事業における方針   |
|--------------------|---|---|---|
| Indigenous Peoples | <ul style="list-style-type: none"> <li>Any adverse impacts that a project may have on indigenous peoples are to be avoided when feasible by exploring all viable alternatives. When, after such an examination, avoidance is proved unfeasible, effective measures must be taken to minimize impacts and to compensate indigenous peoples for their losses. Appendix 1, 8.1.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>No specific description on the limitation of project impacts.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>In the draft Environmental and Social Management Framework (ESMF), it is declared that to be financed, the sub-projects will need to be Category B or C under the JICA Guidelines 2010.</li> <li>Projects to be called Category B or C will not affect Sensitive Areas nationally-designated protected areas (areas for ethnic minorities or indigenous peoples designated by national governments) nor areas inhabited by ethnic minorities, indigenous peoples, or nomadic peoples with traditional ways of life, and other areas with special social value.</li> <li>No gap.</li> </ul> |

出典：JICA 調査団

#### (4) 事業の代替案及び比較検討

調査の初期段階では、インドネシア側と日本側それぞれから、パル第一橋の下流側への代替橋の建設、被災した既存橋梁の修復、歩道橋としてのパル第四橋の再建など、複数のアイデアが無償資金協力事業の対象として提案された。

ジャカルタ及びパルにおいて詳細な協議を行った後、2019年2月18日に、パル第四橋を歩車道橋として再建する案が最優先案として選択された。

その後、表 2-2-37 及び図 2-2-26 に示すとおり、橋梁位置の3案及び事業を行わないケースの計4つの代替案が検討された。最終的に、2019年3月26日に行った SATGAS、Balai Bina Marga、及び JICA 調査団の3者の現地協議により、既存構造物への影響が少ない代替案1が最適案に選定された。

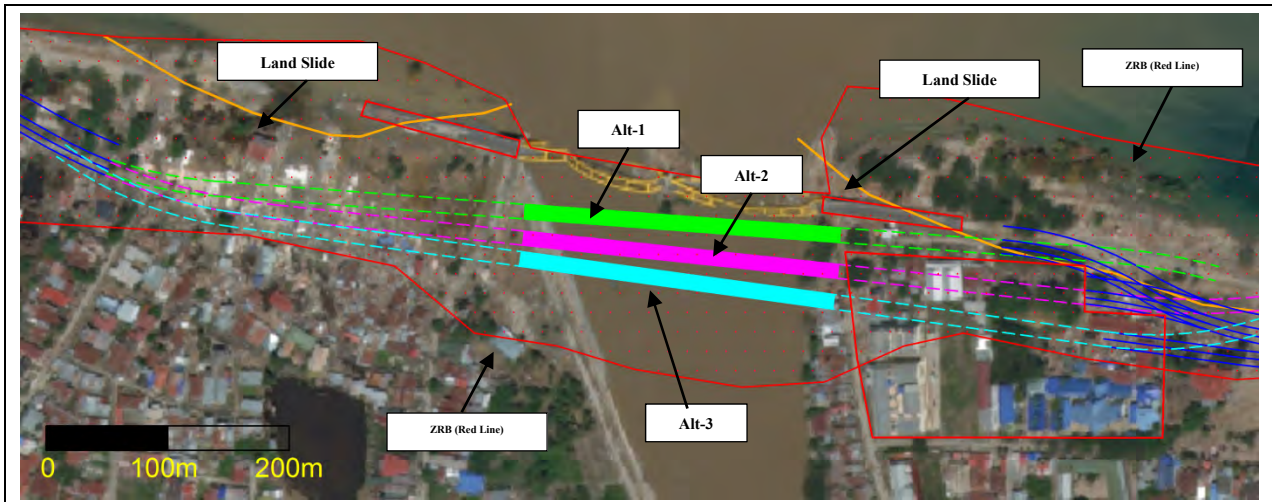
今後概略設計が4月末までに行われ、ステークホルダーによる概略設計の承認後、2019年5月～7月の間に詳細計画策定調査が行われる予定である。



表 2-2-37 事業の代替案及び比較検討

| 代替案          | 事業を行わない<br>ケース   | 代替案 1                                  | 代替案 2                     | 代替案 3                         |
|--------------|--|--|---------------------------|-------------------------------|
| 概要           | 崩壊したパル第四橋の再建を行わない。   | 右岸の建物を避ける。                             | 右岸のアクセス道路以外は、地滑り地域を避ける。   | 空間計画における ZRB 境界 (内陸寄り) に配置する。 |
| 橋梁延長*        | -  | 約 260m                                 | 約 260m                    | 約 260m                        |
| アプローチ道路延長*   | 0m   | 約 170m<br>(右岸・左岸とも)                    | 約 170m<br>(右岸・左岸とも)       | 約 170m<br>(右岸・左岸とも)           |
| 取付道路延長*      | 左岸   | 約 170m                                 | 約 170m                    | 約 220m                        |
|              | 右岸   | 約 140m                                 | 約 300m                    | 約 320m                        |
| 建築物への影響*     | nil (0)  | nil (0)                                | 建物 3 件                    | 建物 3 件<br>公共施設 1 件            |
| オリジナルの橋梁への影響 | 影響なし   | 影響なし                                   | 影響なし                      | 影響なし                          |
| 推奨点・マイナス点    | 用地取得の必要がない。ダンプトラック、ケミカルタンカー、コンテナトレーラー等、パル市を通過するためにパルIV橋を使用していた大型輸送車両は、市に位置する他の橋梁を使用する。 | 右岸で利用できる用地に限られるが、既存構造物や被災橋梁への影響が発生しない。 | 建物 (住宅・フットサルコート) への影響がある。 | 公共施設 (警察署) への影響がある。           |
|              | ×  | ◎ 推奨                                   | ○                         | △                             |

出典：JICA 調査団



出典：JICA 調査団

図 2-2-26 事業の代替案

(5) スコーピング

1) 類似事業で標準的に期待される活動及び直接的な影響

類似の橋梁事業で標準的に期待される活動及び直接的な影響を表 2-2-38 に示す。

表 2-2-38 類似事業で標準的に期待される活動及び直接的な影響

| Phase  | Project components and activities   |   | Typical impacts from project components and activities  |
|--|---|---|---|
| Planning phase   | Demarcation of work area  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Notification of the Project and restriction of land use</li> <li>• Land acquisition</li> <li>• Staking and construction of border fence</li> <li>• Lease contract of land parcel(s) for stock yard, site office, etc.</li> <li>• Decision of trees to be felled</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Notification of unavailability and relocation of existing land use and trespassing (vendor shack, utilities (electric poles, underground utilities, utilities attached to the existing bridge structure), road and foot path, foot path to the river, etc.)</li> <li>• Notification of loss of private properties</li> <li>• Temporary ban of use of the land parcel(s) selected for stock yard, etc.</li> </ul> |
| Construction phase   | Preparation   |   |   |
|  | Set up of stock yard  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Set up of concrete yard</li> <li>• Set up of asphalt plant</li> <li>• Storage of oils and chemicals</li> <li>• Machine repair, re-fuelling</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risk of oil and chemical spill (soil contamination)</li> <li>• Generation of water demand for the concrete plant</li> <li>• Storage of asphalt materials</li> <li>• Concrete and asphalt may be procured from the market</li> </ul>  |
|  |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Storage of other materials and tools</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risk of robbery (crime)</li> </ul>   |
|  | Set up of office  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existence of engineers and office staff</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Water demand</li> <li>• Generation of waste water</li> <li>• Generation of sewer</li> <li>• Generation of wastes</li> </ul>  |
| Set up of work area  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existence of work crew</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Water demand</li> <li>• Generation of waste water</li> <li>• Generation of sewer</li> <li>• Generation of wastes</li> </ul>  |   |
|  | Removal works (existing road, bridge, etc.)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Removal of existing structures and vegetation</li> <li>• Removal and relocation of utilities in ROW</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generation of construction waste</li> <li>• Generation of needs for alternate water sources</li> </ul>   |
|  | Set up of temporal structures<br>Removal of temporal structures (Detour road, etc.) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Slow speed at the detour road</li> <li>• Removal of existing structures and vegetation</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Increased risk of local occurrence of traffic jam</li> <li>• Increased risk of occurrence of traffic accidents</li> <li>• Generation of construction waste</li> </ul>  |
|  | Earth works   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Procurement of fill material</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteration of land form (at quarry site)</li> </ul>  |
|  |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generation of transportation vehicle (mainly to transport road bed and pavement material)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generation of exhaust gas(off-site)</li> <li>• Generation of noise (off-site)</li> <li>• Generation of traffic jam (off-site)</li> <li>• Increased risk of accidents (off-site)</li> </ul>   |
|  | Earth works on river bed  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Partial closure of river way</li> <li>• Digging on river bed</li> <li>• Construction of bridge footage</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Change of river cross section</li> <li>• Generation of muddy water in river bed</li> <li>• Activities of heavy construction machines on river bed</li> </ul>   |
|  | Construction general  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Operation of construction machinery and vehicles</li> <li>• Use of generators</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emission of exhaust</li> <li>• Emission of noise</li> </ul>  |
|  |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposal of construction wastes</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposal of construction wastes</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generation of employment</li> <li>• Procurement of materials, etc.</li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direct and indirect positive impact to local economy</li> </ul>  |   |

| Phase             | Project components and activities       |  | Typical impacts from project components and activities   |
|-------------------|---|--|--|
| Maintenance phase | Opening of bridge and new road sections |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Improved traffic network in Palu, Central Sulawesi, that leads to less emission of exhaust gas and noise along existing arterial road</li> <li>● Increased generation of exhaust gas</li> <li>● Increased generation of noise</li> <li>● Existence of major bridge in tidal area</li> </ul> |
|                   | Existence of upgraded road              |  |  |

The necessity of workers camp cannot be decided at this phase of the Study.

出典：JICA 調査団

## 2) 影響のスクーピング

現存する環境・社会の状況と、標準的に想定される事業の活動内容・影響内容を総合的に検討して、本事業の実施により発生する可能性がある正負の影響を表 2-2-39 に示した。

表 2-2-39 スクーピング

|                     | Item                 | Evaluation |    | Reason for evaluation  |
|---------------------|----------------------|------------|----|--|
|                     |                      | BC/DC      | AC |  |
| 1                   | Air quality          | B-         | D  | <b>DC:</b> Temporary air pollution by equipment operation is expected.<br><b>AC:</b> Passing traffic on the bridge will generate exhaust gas, but the air quality will not be significantly different from the condition with the original bridge. The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.                        |
| 2                   | Water quality        | B-         | D  | <b>DC:</b> Temporary water pollution by works in the river area is expected.<br><b>AC:</b> No additional water pollution is expected.  |
| 3                   | Waste                | B-         | D  | <b>DC:</b> Wastes will be generated such as debris of removed existing structures and bags and containers of materials and paints used for the works.<br><b>AC:</b> No additional waste generation is expected.  |
| 4                   | Soil contamination   | B-         | D  | <b>DC:</b> In case fuel, oil, grease, and paints used for the works are spilled on the ground, soil contamination may occur at the work area.<br><b>AC:</b> No additional waste generation is expected.  |
| 5                   | Noise and vibrations | B-         | D  | <b>DC:</b> Temporary noise pollution and vibrations by equipment operation is expected.<br><b>AC:</b> Passing traffic on the bridge will generate noise and vibration, but the condition will not be significantly different from the condition with the original bridge. The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge. |
| 6                   | Ground subsidence    | D          | D  | No significant negative impact is expected during and after the construction.  |
| 7                   | Offensive odor       | D          | D  | No significant negative impact is expected during and after the construction.  |
| 8                   | Bottom Sediment      | D          | D  | No significant negative impact is expected during and after the construction.  |
| Natural Environment |                      |            |    |  |
| 9                   | Protected area       | D          | D  | The Project is not located in or near any protected areas. The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.  |
| 10                  | Ecosystem            | C          | D  | During construction, there is a risk of temporary water pollution due to turbid water by construction works.. Ecosystem survey in the downstream area will be conducted.   |
| 11                  | Hydrology            | D          | D  | No significant negative impact is expected during and after the construction.  |

|                           | Item   | Evaluation |    | Reason for evaluation   |
|---------------------------|--|------------|----|---|
|                           |  | BC/<br>DC  | AC |   |
| 12                        | Topography and geology   | D          | D  | No significant negative impact is expected during and after the construction.   |
| <b>Social Environment</b> |  |            |    |   |
| 13                        | Involuntary resettlement   | B-/<br>C   | D  | <b>DC:</b> About 2 ha of land will be used for the Project. As of April 2019, no residential structures are located in the Project area and no resettlement will be caused by the Project. The approach road on the right bank is planned to pass between the roadside buildings and the original approach road. The roadside buildings, that will not be affected by the Project, look partially destroyed and unused as of April 2019. Further, repeated site survey is necessary to clarify whether there are residents in those buildings.<br><b>AC:</b> No additional negative impact is expected.   |
| 14                        | Poverty  | C          | B+ | <b>DC:</b> The land owners or the owners of the structures located on the Project area are affected by the tsunami and relocated. Further study is necessary to understand their recent socio-economic condition to understand the impact of the Project on poverty.<br><b>AC:</b> With the recovery of transportation axis along the coast, local economy in the coastal area is expected to recover to the pre-earthquake condition, that will give positive impacts to the livelihood of the poor group.   |
| 15                        | Ethnic minority and indigenous people  | D          | D  | The Project is not located in or near any protected areas. The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.   |
| 16                        | Local economy (Employment and livelihood)  | B±         | B+ | <b>DC:</b> Jobs will be generated for construction workers, service for such workers, and local procurement of construction materials and equipment.<br><b>AC:</b> With the recovery of transportation axis along the coast, local economy in the coastal area is expected to recover to the pre-earthquake condition   |
| 17                        | Land use and utilization of local resources  | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact on use of local resource is expected.  |
| 18                        | Water usage  | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact on local water use is expected.  |
| 19                        | Existing social infrastructure and service   | B-         | B+ | <b>DC:</b> The approach road on the right bank is planned to pass between the roadside buildings and the original approach road. There is an unused futsal court among the buildings. Access to the facility may become difficult during the construction works. The new approach road will use existing road space. With the construction works on the road space, current traffic that run on the road and make left turn along the river need to use other route.<br>Other utilities, such as electricity and water, that may be affected will be studied and the contacts for coordination will be found during the Detailed Design Phase.<br><b>AC:</b> The through traffic along the coast will be recovered. The other major roads in Palu will be relieved from heavy transportation vehicles, such as dump trucks and container trailers, and road safety condition along such roads, especially near schools and hospitals, will be improved. |
| 20                        | Social institutions such as social infrastructure and local decision-making institutions | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact is expected.   |



|              | Item  | Evaluation |    | Reason for evaluation   |
|--------------|---|------------|----|---|
|              |   | BC/<br>DC  | AC |   |
| 21           | Misdistribution of damage and benefit       | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact is expected.   |
| 22           | Local conflict of interest                  | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact is expected.   |
| 23           | Cultural heritage                           | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact is expected.   |
| 24           | Landscape                                   | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact is expected.   |
| 25           | Gender                                      | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact is expected.   |
| 26           | Children's rights                           | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact is expected.   |
| 27           | Infectious disease and HIV/AIDS             | B-         | D  | <b>DC:</b> In case migrant workers are high risk group of HIV infection in Indonesia, and are used for the construction works, regional risk may become higher during the construction works. If stagnant water is left at the work areas or at the yard, and mosquitoes are bred there, the risk of infectious disease may become higher.<br><b>AC:</b> No additional risk for infectious disease is expected. |
| 28           | Occupational Health (including work safety) | B-         | D  | <b>DC:</b> Work accidents may occur during the construction.<br><b>AC:</b> No additional work accident is expected.   |
| <b>Other</b> |   |            |    |   |
| 29           | Accident                                    | B-         | D  | <b>DC:</b> General public may be involved in accidents at or near the work areas or with transportation vehicle.<br><b>AC:</b> The Project is not located in or near any protected areas. The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge..   |
| 30           | Cross-border impact, climate change         | D          | D  | The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.<br>No significant negative impact is expected.   |

Evaluation:

- A-: Significant Negative Impact    A+: Significant Positive Impact  
B-: Some Negative Impact            B+: Some Positive Impact  
C: Impacts are not clear; need more investigation  
D: No Impact or Impacts are negligible; no further study required

注：BC:Before Construction, DC:During Construction, AC:After Construction

出典：JICA 調査団

## (6) 環境社会配慮調査の TOR

表 2-2-40 に示したスコーピング結果をベースに、詳細設計・施工計画の理解及び現地調査・情報収集等の環境社会配慮調査の TOR を下表の通り設定した。現地調査は 2019 年 6-8 月にかけて実施予定である。

表 2-2-40 環境社会配慮調査の TOR

|                     | Item                     | Objectives  | Methods  |
|---------------------|--------------------------|---|--|
| Pollution           |                          |   |  |
| 1                   | Air quality              | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Clarification of standards of air quality to be applied</li> <li>2. Understanding the normal condition of air quality without the Project, pre-quake and post-quake condition</li> <li>3. Understanding of generators, construction machineries, and transportation vehicles that will be used in the Construction.</li> <li>4. Identification of vulnerable facilities against air pollution</li> </ol>            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Literature survey. Confirmation with Environmental Office of Palu City (DLH)</li> <li>2. Literature survey and field observation</li> <li>3. Hearing with engineers.</li> <li>4. Field observation</li> </ol>  |
| 2                   | Water quality            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Clarification of standards of water quality to be applied</li> <li>2. Understanding the normal condition of water quality without the Project, and the potential impact by muddy water from the Project</li> <li>3. Understanding of construction methods to be used for the Project especially for the works in the river bed, including preventive measures of generating and/or releasing muddy water</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Literature survey. Confirmation with Environmental Office of Palu City (DLH)</li> <li>2. Literature survey and field observation</li> <li>3. Hearing with engineers</li> </ol>   |
| 3                   | Waste                    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Listing of potential construction debris and wastes</li> <li>2. Understanding standard measures handling wastes listed above</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hearing with engineers</li> <li>2. Discussion with IA.</li> </ol>  |
| 4                   | Soil contamination       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Listing of potential toxic substances that may be used or stored by the Project</li> <li>2. Preventive measures that are used in standard construction operated by IA</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hearing with engineers</li> <li>2. Discussion with IA.</li> </ol>  |
| 5                   | Noise and vibrations     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Clarification of standards of noise and vibration to be applied</li> <li>2. Measurement of distance between the Project Area and vulnerable facilities including residential area</li> <li>3. Understanding of construction methods and heavy machineries to be used for the Project</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Literature survey. Confirmation with Environmental Office of Palu City (DLH)</li> <li>2. Field observation</li> <li>3. Hearing with engineers.</li> </ol>  |
| Narural Environment |                          |   |  |
| 10                  | Ecosystem                | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ecosystem in downstream of the project area</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Literature survey. Confirmation with Environmental Office of Palu City (DLH), Field observation</li> </ol>   |
| Social Environment  |                          |   |  |
| 13                  | Involuntary resettlement | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Size and location of land acquisition.</li> <li>2. Number and current residential location of land owners and other affected persons</li> <li>3. Coordination with stakeholder agencies about the process, timing, and pricing of land acquisition (Palu City, Provincial BPN, Provincial Bina Marga, SATGAS, Central Bina Marga, PU, Spatial Planning, Tsunami Dike Planning)</li> </ol>                           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Overlay of Detailed Design with the land registration data stored by Provincial BPN in Palu</li> <li>2. Results of IP4T survey by Provincial BPN in Palu (to be conducted) (IP4T identifies the land owner, the asset owner, land and assets to be compensated)</li> <li>3. Comments in Stakeholder meeting</li> </ol> |
| 14                  | Poverty                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Consideration of necessity of any additional assistances for the PAPs because of their economic conditions.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Understanding of pre-quake condition and post-quake condition</li> <li>2. Understanding the impacts of the land acquisition for the PAPs</li> <li>3. Coordination with assistances for quake-affected people to improve their economic conditions when necessary</li> </ol>  |

|       | Item  | Objectives  | Methods  |
|-------|---|---|--|
| 16    | Local economy (Employment and livelihood)   | 1. Understanding the demand and opinion of local people<br>2. Existence status of local economy in the site   | 1,2, Literature survey., SHM discussion if found necessary and suitable.             |
| 19    | Existing social infrastructure and service  | 1. Location of Work Area boundary<br>2. Existence, character and number of residents and users adjacent to the Work Area<br>3. Traffic plan during and after the Construction (vulnerable facilities along the new detour route)                              | 1, 2, 3. Discussion with engineers.<br>On-site observation.                          |
| 27    | Infectious disease and HIV/AIDS             | 1. High risk group of HIV infection in Indonesia and Central Sulawesi Province<br>2. Agencies that provide awareness training in Central Sulawesi Province<br>3. Popular mosquito-related infectious diseases and available prevention training and materials | 1, 2, 3. Information collection from UNAIDS, Central Sulawesi Province and Palu City |
| 28    | Occupational Health (including work safety) | 1. Work safety plan   | 1. Collection of work safety plan approved by the same Implementation Agency         |
| Other |   |   |  |
| 29    | Accident                                    | 1. Possibility of accidents during construction (Location of work area, location of residents, draft plan for traffic restriction and detour, standard safety measures taken in Palu)   | 1. Study of detailed design and construction plan. On-site observation.              |

出典：JICA 調査団

(7) 環境社会配慮調査結果（予測結果を含む）

ESIA のスコーピングの結果において B-および C に分類された項目について、現地調査の結果を踏まえて環境影響を表 2-2-41 に示す。この表は現地調査後に更新する。

表 2-2-41 環境社会配慮調査結果及び予測結果

| No               | Item                | Main Factors Affecting Environmental Impact and Estimated Potential Impact   |
|------------------|---------------------|--|
| <b>Pollution</b> |                     |  |
| 1                | Air Quality         | The air quality information will be updated based on the field survey results.<br>Passing traffic on the bridge will generate exhaust gas, but the air quality will not be significantly different from the condition with the original bridge.  |
| 2                | Water Quality       | There is a risk of temporary induce erosion/siltation due to excavation during the rainy season at downstream of the project site.   |
| 3                | Soil Contamination  | Oil/fuel and waste spills from the construction area due to the repairing and maintenance works of equipment/vehicles on-site. It is necessary to prepare the well controlled management plan before construction by contractor.   |
| 4                | Solid Waste         | Construction soil and construction waste will be generated due to the clearing of the existing site because the damaged facilities of existing bridge by the disaster still remained in site.  |
| 5                | Noise and Vibration | The noise and vibration data will be updated based on the field survey results.<br>However,  |
| 6                | Ecosystem           | (1)Project site<br>The new bridges will be constructed within the right of way. There is no natural fauna and flora.<br>(2)Downstream of the site<br>There is a risk of temporary induce erosion/siltation due to excavation during the rainy season at downstream of the project site. There might be not sensitive biological area such as coral reef protection area. Field survey in the downstream area will be conducted to grasp the ecosystem. |

| No | Item   | Main Factors Affecting Environmental Impact and Estimated Potential Impact   |
|----|--|--|
| 7  | Involuntary resettlement                         | About 2 ha of land will be used for the Project. As of April 2019, no residential structures are located in the Project area and no resettlement will be caused by the Project.<br>The approach road on the right bank is planned to pass between the roadside buildings and the original approach road. The roadside buildings, that will not be affected by the Project, look partially destroyed and unused as of April 2019. Further, repeated site survey is necessary to clarify whether there are residents in those buildings.   |
| 8  | Poverty  | The land owners or the owners of the structures located on the Project area are affected by the tsunami and relocated. Further study is necessary to understand their recent socio-economic condition to understand the impact of the Project on poverty.  |
| 9  | Local economy (Employment and livelihood)        | Jobs will be generated for construction workers, service for such workers, and local procurement of construction materials and equipment.  |
| 10 | Existing Social Infrastructure and Services      | <u>(1) Traffic Congestion in the during the construction site</u><br>There is a possibility of traffic accidents caused by vehicle for transportation of construction soil and construction material near the project area. However, the impact will not significant due to the project scale.<br><u>(2) Recovery of the function of the existing bridge</u><br>The vertical shaft will be constructed on the existing road. Due to the reconstruction, the through traffic along the coast will be recovered. The other major roads in Palu will be relieved from heavy transportation vehicles, such as dump trucks and container trailers, and road safety condition along such roads, especially near schools and hospitals, will be improved. |
| 11 | Sanitation, infectious diseases such as HIV/AIDS | There is a possibility to increase the risks of infectious diseases due to the influx of construction workers into the project site under insanitary condition.  |
| 12 | Working Conditions                               | Impacts on occupational health and safety are inevitable due to the construction/operation work. It is necessary to prepare the adequate mitigation measures.  |
| 13 | Accidents  | There is a possibility of traffic accidents caused by vehicle for transportation of construction soil and construction material near the project area.   |

出典：JICA 調査団

## (8) 影響評価

現時点の環境評価結果を表 2-2-42 に示す。この表は現地調査終了後に更新する。

表 2-2-42 環境社会配慮調査結果及び予測結果

|                  | Item          | Scoping |    | Evaluation |    | Reason for evaluation   |
|------------------|---------------|---------|----|------------|----|---|
|                  |               | BC/DC   | AC | BC/DC      | AC |   |
| <b>Pollution</b> |               |         |    |            |    |   |
| 1                | Air quality   | B-      | D  | B-         | D  | <b>DC:</b> Temporary air pollution by equipment operation is expected.<br><b>AC:</b> Passing traffic on the bridge will generate exhaust gas, but the air quality will not be significantly different from the condition with the original bridge. The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge. |
| 2                | Water quality | B-      | D  | B-         | D  | <b>DC:</b> Temporary water pollution by construction works in the downstream of Palu river area is expected. However, the impact is not significant due to construction work scale.<br><b>AC:</b> No additional water pollution is expected.  |
| 3                | Waste         | B-      | D  | B-         | D  | <b>DC:</b> Wastes will be generated such as debris of removed existing structures and bags and containers of materials and paints used for the works. The contractor should prepare adequate waste management plan and needs to thoroughly process based on it.<br><b>AC:</b> No additional waste generation is expected.   |



|                            | Item  | Scoping |    | Evaluation |     | Reason for evaluation  |
|----------------------------|---|---------|----|------------|-----|--|
|                            |   | BC/DC   | AC | BC/DC      | AC  |  |
| 4                          | Soil contamination                          | B-      | D  | B-         | D   | <b>DC:</b> In case fuel, oil, grease, and paints used for the works are spilled on the ground, soil contamination may occur at the work area.<br><b>AC:</b> No additional waste generation is expected.  |
| 5                          | Noise and vibrations                        | B-      | D  | B-         | D   | <b>DC:</b> Noise pollution and vibrations by construction equipment operation is expected. The impact is expected to be minor and temporary due to the project site location.<br><b>AC:</b> Passing traffic on the bridge will generate noise and vibration, but the condition will not be significantly different from the condition with the original bridge. The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge.   |
| 6                          | Ground subsidence                           | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |
| 7                          | Offensive odor                              | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |
| 8                          | Bottom Sediment                             | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |
| <b>Natural Environment</b> |   |         |    |            |     |  |
| 9                          | Protected area                              | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |
| 10                         | Ecosystem                                   | C       | D  | B-         | N/A | <b>DC:</b> During construction, there is a risk of temporary water pollution due to turbid water by construction works. The water pollution has the possibility to give an impact on the ecosystem of the downstream area of the construction site temporality.<br><b>AC:</b> No additional impact is expected.  |
| 11                         | Hydrology                                   | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |
| 12                         | Topography and geology                      | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |
| <b>Social Environment</b>  |   |         |    |            |     |  |
| 13                         | Involuntary resettlement                    | B-/C    | D  | C          | N/A | <b>DC:</b> About 2 ha of land will be used for the Project. As of April 2019, no residential structures are located in the Project area and no resettlement will be caused by the Project.<br>The approach road on the right bank is planned to pass between the roadside buildings and the original approach road. The roadside buildings, that will not be affected by the Project, look partially destroyed and unused as of April 2019. Further, repeated site survey is necessary to clarify whether there are residents in those buildings.<br><b>AC:</b> No additional negative impact is expected. |
| 14                         | Poverty                                     | C       | B+ | C          | B+  | <b>DC:</b> The land owners or the owners of the structures located on the Project area are affected by the tsunami and relocated. Further study is necessary to understand their recent socio-economic condition to understand the impact of the Project on poverty.<br><b>AC:</b> With the recovery of transportation axis along the coast, local economy in the coastal area is expected to recover to the pre-earthquake condition, that will give positive impacts to the livelihood of the poor group.  |
| 15                         | Ethnic minority and indigenous people       | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |
| 16                         | Local economy (Employment and livelihood)   | B±      | B± | B±         | B+  | <b>DC:</b> Jobs will be generated for construction workers, service for such workers, and local procurement of construction materials and equipment.<br><b>AC:</b> With the recovery of transportation axis along the coast, local economy in the coastal area is expected to recover to the pre-earthquake condition  |
| 17                         | Land use and utilization of local resources | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |
| 18                         | Water usage                                 | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.  |

|              | Item   | Scoping |    | Evaluation |     | Reason for evaluation   |
|--------------|--|---------|----|------------|-----|---|
|              |  | BC/DC   | AC | BC/DC      | AC  |   |
| 19           | Existing social infrastructure and service   | B-      | B+ | B-         | B+  | <p><b>DC:</b> The approach road on the right bank is planned to pass between the roadside buildings and the original approach road. There is an unused futsal court among the buildings. Access to the facility may become difficult during the construction works.</p> <p>The new approach road will use existing road space. With the construction works on the road space, current traffic that run on the road and make left turn along the river need to use other route.</p> <p>Other utilities, such as electricity and water, that may be affected will be studied and the contacts for coordination will be found during the Detailed Design Phase.</p> <p><b>AC:</b> The through traffic along the coast will be recovered. The other major roads in Palu will be relieved from heavy transportation vehicles, such as dump trucks and container trailers, and road safety condition along such roads, especially near schools and hospitals, will be improved.</p> |
| 20           | Social institutions such as social infrastructure and local decision-making institutions | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.   |
| 21           | Misdistribution of damage and benefit  | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.   |
| 22           | Local conflict of interest   | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.   |
| 23           | Cultural heritage  | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.   |
| 24           | Landscape  | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.   |
| 25           | Gender   | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.   |
| 26           | Children's rights  | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.   |
| 27           | Infectious disease and HIV/AIDS  | B-      | D  | B-         | N/A | <p><b>DC:</b> In case migrant workers are high risk group of HIV infection in Indonesia, and are used for the construction works, regional risk may become higher during the construction works. If stagnant water is left at the work areas or at the yard, and mosquitoes are bred there, the risk of infectious disease may become higher.</p> <p><b>AC:</b> No additional risk for infectious disease is expected.</p>  |
| 28           | Occupational Health (including work safety)  | B-      | D  | B-         | N/A | <p><b>DC:</b> Work accidents may occur during the construction.</p> <p><b>AC:</b> There is no factor to cause negative impact by the project on the item.</p>   |
| <b>Other</b> |  |         |    |            |     |   |
| 29           | Accident   | B-      | D  | B-         | N/A | <p><b>DC:</b> General public may be involved in accidents at or near the work areas or with transportation vehicle.</p> <p><b>AC:</b> The Project is not located in or near any protected areas. The structure to be built by the Project is a reconstruction of the original bridge damaged by the earthquake at the upstream-side of the original bridge..</p>  |
| 30           | Cross-border impact, climate change  | D       | D  | N/A        | N/A | There is no factor to cause negative impact by the project on the item.   |

Evaluation:

- A-: Significant Negative Impact    A+: Significant Positive Impact
- B-: Some Negative Impact            B+: Some Positive Impact
- C: Impacts are not clear; need more investigation
- D: No Impact or Impacts are negligible; no further study required

(9) 環境管理計画・モニタリング計画（実施体制、方法、費用など）

影響評価実施後に関係機関と協議して取りまとめる。

(10) ステークホルダー協議

本件は UKL-UPL 手続きとなるため、インドネシアの法令上はステークホルダー協議の実施は要求されない。よって JICA ガイドライン上のステークホルダー協議を下記の通り実施することを想定している。

1) 関係機関を対象としたステークホルダー協議

これまで無償資金協力事業に関して実施されたステークホルダー協議の一覧を示す。これまで協議を行った相手先は国・州・市などの行政職員である。

表 2-2-43 これまでに実施された無償資金協力事業に関するステークホルダー協議

| Year | Month | Day | JICA | Mission Team | National                        | State                      | City  | Topics   |   |
|------|-------|-----|------|--------------|---------------------------------|----------------------------|-------|--|---|
| 2019 | 1     | 9   | X    | X            | SATGAS (Mr. Arie)<br>Bina Marga |                            |       | * Alternatives of Palu IV Bridge   |   |
|      |       | 18  |      | X            | SATGAS<br>Bina Marga            |                            |       | * Alternatives of Palu IV Bridge   |   |
|      |       | 21  | X    | X            |                                 |                            |       | * Alternatives of Palu IV Bridge   |   |
|      |       | 27  | X    | X            |                                 |                            |       | * Alternatives of Palu IV Bridge   |   |
|      |       | 25  |      | X            | ATR                             |                            |       | * Spatial Plan   |   |
|      |       | 30  | X    | X            |                                 |                            |       | * Project Schedule   |   |
|      | 2     | 1   | 1    | X            | X                               | Bina Marga                 |       |  | * Alternatives of Palu IV Bridge                            |
|      |       |     | 4    |              | X                               | Ministry of<br>Environment |       |  | * AMDAL, UKL UPL<br>* Spatial Plan and SEA                  |
|      |       | 7   | X    | X            | X                               |                            |       | * JCC No.1   |   |
|      |       | 7   |      | X            | Bina Marga                      |                            |       | * Alternatives of Palu IV Bridge   |   |
|      |       | 11  | X    | X            | X                               | X                          | X     | * Seminar on<br>Accelerating Recovery and<br>Reconstruction in Central Sulawesi ~<br>Experience Sharing between<br>Indonesia and Japan ~ |   |
|      |       | 18  | X    | X            | X                               | X                          | X     | * Alternatives of Palu IV Bridge   |   |
|      |       | 22  | X    | X            | Bina Marga                      |                            |       | * Alternatives of Palu IV Bridge   |   |
|      | 3     | 4   | 4    | X            | X                               |                            |       |  | * Project schedule  |
|      |       |     | 11   | X            | X                               | Bina Marga T/N             |       |  | * About the starting timing of Outline Design               |
|      |       |     | 13   | X            |                                 | Balai Palu                 |       |  | * Land acquisition implementation                           |
|      |       |     | 15   | X            | X                               | Bina Marga                 |       |  | * Project schedule  |
|      |       |     | 18   |              |                                 | Bina Marga T/N             |       |  | * Contents of Technical Note                                |
|      |       |     | 24   |              | X                               | SATGAS                     |       |  | * Alternatives of Palu IV Bridge                            |
|      |       |     | 26   |              | X                               | SATGAS<br>Balai Palu       |       |  | * Site inspection<br>* Selection of recommended alternative |
|      | 4     | 2   |      | X            | SATGAS<br>Balai Palu            |                            | Mayor | * Land acquisition   |   |

出典：JICA 調査団

2) 一般住民を対象としたステークホルダー協議

6月下旬に事業実施区域の住民（被災者であるため、現在は仮居住地に避難中）を対象として、下記のプログラムでステークホルダー協議を実施予定である。

表 2-2-44 予定しているステークホルダー協議の内容(暫定)

| Item                  | Main Factors Affecting Environmental Impact and Estimated Potential Impact   |
|-----------------------|--|
| Purpose               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- The purpose of this meeting is to explain the project activities including environmental and social important impact to local community and to collect their opinion, which should be reflected into the project adequately.</li> <li>- This meeting is conducted in line with JICA guidelines for environmental and social considerations.</li> <li>- Indonesia regulation require to conduct the public meeting for AMDAL project, no-need for UKL-UPL project. Palu IV bridge is categorized into UKL-UPL project in limerence to MoE Regulation No.5/2012</li> </ul>  |
| Date                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 26 June, 2019 (BPJN and head of Palu Barat District prefer 26 June, 2019)</li> <li>- At 10 am</li> </ul>  |
| Venue of SHM          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Palu Barat District office at Jalan WR. Supratman No 2 (room capacity &gt; 50 persons)</li> </ul>   |
| To be invited persons | <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Local community                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Village leaders (head of Besusu Barat Village, head of Lere Village)</li> <li>- District leaders (head of Palu Timur District and head of Palu Barat District)</li> <li>- Representative land owners (left-bank and right bank) (approximately 10-15 persons)</li> <li>- Residence along the bridge (left-bank and right bank) (approximately 10-15 persons)</li> </ul> </li> <li>(2) Local government (will be decided after 18 June, 2019)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- P2JN Kota Palu (Pengawasan Jalan Nasional)</li> <li>- Dinas Pekerjaan Umum Kota Palu (Departmen of Public Work Palu City)</li> <li>- Bappeda Palu</li> </ul> </li> </ul> |

出典：JICA 調査団

2-2-3-2 用地取得・住民移転

(1) 用地取得・住民移転の必要性

1) 用地取得・住民移転の必要性

本事業は、パル川の河口にある倒壊したパル第四橋の南側に、新たなパル第四橋を再建することを目的としている。260mの橋梁の右岸（東側）と左岸（西側）には、延長約250m及び幅員約20mの路肩を含むアプローチ道路の新設が必要であるため、用地取得が必要である。

2019年3月26日に撮影した現地写真を図2-2-27に示す。

事業用地は、道路用地（右岸）あるいは津波被災地の空き地（左岸）であるため、用地取得による住民移転は発生しない。右岸では、仮設店舗の移転が必要となる可能性がある。である。パル市と店舗所有者との間で適切な協議・交渉を行うことで、自発的な撤去あるいは移転が可能と考えられる。



| 左岸の現況   | 右岸の現況  |
|---|--|
|    |    |
| <p>Jalan Cumi Cumi (チュミチュミ道路) から計画橋梁方向を見る。計画道路は右側の住宅の前の地点付近から左側に分岐する。</p>           | <p>写真の左側に見える既存道路がまっすぐ延伸され、オリジナルのアプローチ道路と左側の既存建物の間を通過して、計画橋梁につながる。</p>                |
|   |   |
| <p>新しいアプローチ道路は既存建物の右側を通り、橋梁は、写真中心部に見える右岸の樹林(矢印)の左側につながる。</p>                        | <p>新しいアプローチ道路は、右側のオリジナルのアプローチ道路と左側の既存フットサルコートの間を通る。</p>                              |
|  |  |
| <p>オリジナルのアプローチ道路(右岸・左岸)を矢印で示す。計画道路・橋梁は、オリジナルのものの右側を通過する。</p>                        | <p>公共のベンチと日よけを利用して、仮設店舗が設置されている。写真中央に見える既存道路の空間を新しいアプローチ道路として利用する。</p>               |

出典：JICA 調査団、2019年3月26日

図 2-2-27 現地状況

(2) 用地取得・住民移転に係る法的枠組み

1) インドネシア国の制度

インドネシア国における公共事業のための用地取得に関する主な法制度を表 2-2-45 に示す。

The Law No. 2 of 2012 は、公共事業を目的とする用地取得が National Land Agency (BPN) によって実施されること、全ての権利者・ステークホルダーを手続きの対象とすることを定めている。また、同法は、物理的な損失だけでなく、収入の減少や自然資源へのアクセスの消失や制限などの非物理的損失の補償も行うことを定めている。用地取得手続きのステップは表 2-2-46 に示すとおりである。

一方、Presidential Decree No. 40, 2014 は、5ha 未満の用地取得を要する小規模な事業では、IA は直接権利者と交渉できると定めている。本事業の必要面積は約 2ha であることから、今後事業の IA に想定される道路局州事務所 (Balai Bina Marga Palu)、用地取得の実施機関に想定されるパル市等と協議して、本事業の用地取得手続きをどのように進めるかの意向を把握すると同時に、JICA ガイドラインが要求する補償・支援の対象・内容・レベル、ステークホルダーの参画等を確保することが必要である。

表 2-2-45 インドネシア国における公共事業のための用地取得に関する主な法制度

|  |  |
|--|--|
| Land Law 1960                                  | Defines various rights on the land, including legal rights and customary rights<br>Sovereign ownership resides with national government  |
| Land Acquisition Law 2012<br>Law No. 2 of 2012 | Defines about land acquisition for public interest.<br>Chapter I General<br>Chapter II Objectives<br>Chapter III Fundamentals<br>Chapter IV Performance of acquisition of land<br>(Survey, Consultation, Compensation, Monitoring)<br>Chapter V Sources of fund for acquisition of land<br>Chapter VI Rights, obligations, and public participation<br>Chapter VII Transitional provisions<br>Chapter VIII Concluding provisions   |
| Presidential Decree No. 71, 2012               | Defines details about land acquisition for public interest.<br>Chapter I General<br>Chapter II Land procurement planning<br>Chapter III Land procurement preparation<br>Chapter IV Land procurement implementation<br>Chapter V Transfer of result of land procurement<br>Chapter VI Monitoring and evaluation<br>Chapter VII Fund sources of land procurement<br>Chapter VIII Small scale land procurement<br>Chapter IX Taxation incentive<br>Chapter X Transfer provisions<br>Chapter XI Closing provisions |
| Presidential Decree No. 40, 2014               | Presidential Decree No. 71 Year 2012, Article 121 is amended as follows:<br>In order to efficiency and effectiveness, land procurement for the Public Interest that the extent of not more than 5 (five) hectare, can be done directly by the agency requiring the land with the holders of land rights, by buying and selling of sale or exchange or any other way agreed by both parties.  |

出典：JICA 調査団

表 2-2-46 Law No. 2, 2012 に基づく用地取得の手続きのステップ

| Phase             | Responsible Body  | L                              | Action (necessary days in the law)   | Law  |             |
|-------------------|---|--------------------------------|--|--|-------------|
| Planning phase    | Institution who needs the land                                      | 1.                             | Feasibility Study and planning document that include conformity with spatial plan and environmental and social impacts                                       | Art. 14, 15  |             |
|                   |   | 2.                             | Request for land acquisition permit  |  |             |
| Preparation phase | By the Governor, can be delegated to Mayor                          | 3.                             | Notification of the Development Plan to community (20 days)  | Art. 17  |             |
|                   |   | 4.                             | Forming preparation team (10 days)<br>(Consisted of Governor, Related Mayor, Related provincial agencies, Agency who needs the land, Other related agencies) | Presidential Decree No. 71, 2012   |             |
|                   |   | 5.                             | Preliminary data collection (= early inventory of PAP and asset) (IP4T study) (30 days)  | Art. 18  |             |
|                   |   | 6.                             | Public consultation to agree on project location (60 days)   | Art. 19  |             |
|                   |   | 7.                             | Collected data, the development plan, and compensation calculation method the appraiser may apply will be explained.   | Art. 19  |             |
|                   |   | 8.                             | If objection is raised, second consultation will be held inviting those who objected.  | Art. 20  |             |
|                   |   | 9.                             | Location permit (14 days)  | Art. 19 (6)  |             |
|                   |   | 10.                            | Location announcement to public (17 days)  | Art. 26  |             |
|                   | Execution   | Institution who needs the land | 11.  | Submit the Land Acquisition Implementation Request to the Land Administrator (Lembaga Pertanahan, BPN) | Art. 27     |
|                   |   | By Head of BPN                 | 12.  | Final inventory & identification of PAPs (30 days) and announcement (14 days)                          | Art. 28, 29 |
| 13.               |   |                                | When objection is raised, another verification and improvement shall be made.  |  |             |
| 14.               |   |                                | BPN confirms on the ground on which the Entitled Parties to Compensation are determined.   | Art. 30  |             |
| 15.               |   |                                | Stipulation of Appraiser (30 days) and Valuation (30 days)   | Art. 31 - 36   |             |
| 16.               |   |                                | Final negotiation with PAPs on type and amount of compensation (30 days)   | Art. 37  |             |
| 17.               |   |                                | Objection may be filed with the local district court regarding the amount of compensation.   | Art. 38  |             |
| 18.               |   |                                | Compensation payment and land title release (7 days)   | Art. 40, 41  |             |
| 19.               |   |                                | Monitoring and evaluation of the performance of Acquisition of Land is made by the Government  | Art. 51  |             |
| 20.               |   |                                | Monitoring and evaluation of the results of the handover of the Acquisition of Land is made by the Land Administrator  | Art. 51  |             |
| Land delivery     | From Head of Land Acquisition to the Institution who needs the land | 21.                            | Land delivery (7 days)   | Art. 48  |             |
|                   |   | 22.                            | Agency needing land may begin to perform the construction activities upon the handover of the results of the Acquisition of land                             |  |             |
|                   |   | 23.                            | Land Certification and Registration (30 days)  | Art. 50  |             |

出典：JICA 調査団

## 2) GAP 分析

インドネシア国の用地取得等の制度と JICA ガイドラインの方針とのギャップの有無及びギャップがある場合の解消方針を表 2-2-47 に示す。

本事業が必要とする用地面積が 5ha 未満であることから、2019 年 4 月の時点で、本事業の用地取得のステップ及び関係機関と役割は明らかでない。今後事業の IA に想定される道路局州事務所 (Balai Bina Marga Palu)、用地取得の実施機関に想定されるパル市等と協議して、本事業の用地取得手続きをどのように進めるかの意向を把握すると同時に、JICA ガイドラインが要求する補償・支援の対象・内容・レベル、ステークホルダーの参画等を確保することが必要である。



表 2-2-47 インドネシア国の用地取得等の制度と JICA ガイドラインの方針とのギャップの有無及びギャップがある場合の解消方針

|   | JICA Guidelines,<br>WB OPs  | Law No.2 of 2012 and related Presidential Decrees   | Gap  | Bridging Measures to be taken in the Project   |
|---|---|---|--|--|
| 1 | Involuntary resettlement and loss of means of livelihood are to be avoided when feasible by exploring all viable alternatives.  | In the Land Acquisition Plan and attached Feasibility Study, environmental impacts and social impacts will be included. (Article 14, 15)<br>Above is not mandated for land acquisition smaller than 5 ha.   | Exploration of alternative and effort of avoidance of impacts are not mandated.  | Exploration of alternative and effort of avoidance of impacts will be explained in the Public Consultations and will be recorded in the Report.  |
| 2 | When population displacement is unavoidable, effective measures to minimize impact and to compensate for losses should be taken.  | In the Land Acquisition Plan and attached Feasibility Study, environmental impacts and social impacts will be included. (Article 14, 15)<br>Preliminary data collection will identify the size and location of population displacement. (Article 16)<br>Above is not mandated for land acquisition smaller than 5 ha.   | Minimizing the population displacement is not mandated.  | Minimizing measures of the impacts on existing structures will be explained in the Public Consultations and will be recorded in the Report.  |
| 3 | People who must be resettled involuntarily and people whose means of livelihood will be hindered or lost must be sufficiently compensated and supported, so that they can improve or at least restore their standard of living, income opportunities and production levels to pre-project levels. | “Compensation” means any reasonable and fair reward given to the entitled party in exchange for acquisition of land. (Article 1, No. 10)<br>Acquisition of Land in the Public Interest shall be performed by giving reasonable and fair Compensation. (Article 9(2))<br>Appraisal of the amount of Compensation by the Appraiser shall be made on a parcel-by-parcel basis, including:<br>a. land;<br>b. over ground and underground space;<br>c. buildings;<br>d. plants;<br>e. objects related to land; and/or<br>f. other appraisable loss.<br>“Other appraisable loss” means nonphysical loss equivalent to money value, for example, loss due to loss of business or job, cost of change of location, cost of change of profession, and loss of value of the remaining property. (Article 33)<br>Above is not mandated for land acquisition smaller than 5 ha. | The law does not mention about that the PAPs must be able to improve or at least restore their standard of living, income opportunities and production levels to pre-project levels.                       | As of April 2019, the Project is considered not to generate involuntary resettlement nor hindering livelihood.<br>Reasonable and fair measures will be discussed with IA based on the results of the Census and the Socio-Economic Survey.                 |
| 4 | Compensation must be based on the full replacement cost as much as possible.  | Compensation will be provided based on valuation of independent appraiser for a parcel of land that include i) land; ii) over ground and underground spaces; iii) building; iv) plants; v) objects related to land and/or; vi) other appraisable loss such loss of business, jobs, change of profession, and moving costs. (Article 33)<br>For affected buildings, MAPPI applies solatium (emotional compensation) of 10% - 30% of the total compensation for physical loss.<br>Above is not mandated for land acquisition smaller than 5 ha.   | The law is silent on the issue of whether or not depreciation will be applied when calculating compensation for affected land and land-attached assets.<br><br>Tax incentive is provided to: a) person who | The principle of full replacement cost will be applied.<br><br>Valuation standard set by Independent appraisers association (MAPPI) indicates in principles, no depreciation will apply for affected structures.<br><br>Capital gains tax and the costs of |

|   | JICA Guidelines, WB OPs   | Law No.2 of 2012 and related Presidential Decrees  | Gap   | Bridging Measures to be taken in the Project  |
|---|---|--|---|---|
| 5 | Compensation and other kinds of assistance must be provided prior to displacement.  | When Compensation and Release of Titles have been made, or the Compensation given has been deposited with the district court, such land shall be in the direct possession of the state. (Article 43)<br>Above is not mandated for land acquisition smaller than 5 ha.  | The Law is silent about the timing of displacement.   | As of April 2019, the Project is considered not to generate involuntary resettlement. Compensation and other kinds of assistance will be provided prior to displacement if any displacement is found necessary after the Detailed Design.   |
| 6 | For projects that entail large-scale involuntary resettlement, resettlement action plans must be prepared and made available to the public.   | In the Land Acquisition Plan and attached Feasibility Study, environmental impacts and social impacts will be included. (Article 14, 15)<br>Preliminary data collection will identify the size and location of population displacement. (Article 16)<br>Above is not mandated for land acquisition smaller than 5 ha.  | The Law does not require a resettlement action plan made available to the public.   | As of April 2019, the Project is considered not to generate involuntary resettlement. Abbreviated RAP will be prepared following the JICA Guidelines because the Project will require land acquisition.   |
| 7 | In preparing a resettlement action plan, consultations must be held with the affected people and their communities based on sufficient information made available to them in advance. | The law defines three opportunities of consultations, either in public or private:<br>1. Notification of the Development Plan to community Method may be socialization (public meeting), face to face (in person), or notification letter. (Pres. Decree No. 71, 2012 Art. 12)<br>2. Public consultation to agree on project location. Results of Inventory, the development plan, and compensation calculation method the appraiser may apply will be explained.<br>3. Final negotiation with PAPs (in private) on type and amount of compensation  | The Governor approves the location of the Project before the first chance of consultation, and before the inventory survey. | As of April 2019, the public consultation with general public on the Spatial Plan is planned in June. JICA Mission Team will propose the IA to hold a public consultation meeting after the consultation on the Spatial Plan in June and before the commencement of the official survey of the PAPs                               |
| 8 | When consultations are held, explanations must be given in a form, manner, and language that are understandable to the affected people.   | “Public Consultation” means any communication process by a dialogue and consultation among parties in interest to achieve understanding and agreement in the planning of acquisition of land for development in the public interest. (Article 1, No. 8)<br>In the performance of Acquisition of Land, the Entitled Parties shall have the rights to:<br>a. have knowledge of the performance of the Acquisition of Land; and<br>b. receive information about the Acquisition of Land. (Article 55)<br>In the performance of Acquisition of Land in the Public Interest, the public may participate to, inter alia: | No clear guidance about the form, manner, and language in the consultations.  | The Public Consultations will be organized by the IA and the project explanation will be given in Bahasa Indonesia orally and in slides and in handouts.<br>Necessity of use of Kaili language will be asked during the Census. JICA Mission Team will discuss and propose to IA about involving the representative(s) of PAPs in |
| 9 | Appropriate participation of affected people must be promoted in the planning, implementation, and monitoring   |  | No clear guidance about promotion of participation in the planning, implementation  |   |

|    | JICA Guidelines, WB OPs  | Law No.2 of 2012 and related Presidential Decrees  | Gap  | Bridging Measures to be taken in the Project   |
|----|--|--|--|--|
|    | of resettlement action plans.  | a. provide inputs either in writing or orally of the Acquisition of Land; and support the performance of Acquisition of Land. (Article 57)   | and monitoring of land acquisition.  | implementation and monitoring of land acquisition.   |
| 10 | Appropriate and accessible grievance mechanisms must be established for the affected people and their communities.   | <p>There are three timings of raising objections.</p> <p>1. If within a sixty (60) working day period of the Public Consultation on a development plan there is a party objecting to the planned location of development, a(nother) Public Consultation shall be repeated by engagement of the objecting party within thirty (30) working days.</p> <p>A party objecting to the planned location of development shall present his/her objections in writing along with the reasons therefor. (Article 20)</p> <p>If in the repeated Public Consultation there are still parties objecting to the planned location of development, the Agency needing land shall report such an objection to the local governor.</p> <p>The governor shall form a team to make a study of the objections to the planned location of development. (Article 21)</p> <p>2. Where the Entitled Party does not receive the results of the inventory as intended, he/she may file an objection with the Land Administrator within fourteen (14) working days of the announcement of the results of the inventory.</p> <p>Where there is an objection to the results of the inventory, verification and improvement thereof shall be made within fourteen (14) working days of the receipt of the filing of an objection to the results of the inventory. (Article 29)</p> <p>3. Where there is agreement on the form and/or the amount of Compensation, The Entitled Parties may file an objection with the local district court within fourteen (14) working days of the negotiation on determination of Compensation.</p> <p>The district court shall decide the form and/or the amount of Compensation within thirty (30) working days of the receipt of the filing of objection. (Article 38)</p> | <p>Timing and method of filing grievance are clearly stated.</p> <p>Those who are not the owner of land or asset to be affected can not file grievance in the latter 2 timings.</p>    | <p>JICA Mission Team will strongly propose IA to open a contact window (telephone, email, SNS) to receive and record opinions and complaints about the Project.</p>  |
| 11 | Affected people are to be identified and recorded as early as possible in order to establish their eligibility through an initial baseline survey (including population census that serves as an <b>eligibility cut-off date</b> , asset inventory, and socioeconomic survey), preferably at the project | <p>(1) Inventory and identification of possession, ownership, use, and utilization of land shall include:</p> <p>a. surveying and mapping on a parcel-by-parcel basis; and</p> <p>b. gathering data on the Entitled Parties and the Objects of the Acquired Land.</p> <p>(2) Inventory and identification of possession, ownership, use, and utilization of land shall be conducted within thirty (30) working days.</p> <p>Inventory and identification shall be conducted to ascertain the</p>   | <p>Although the term 'Cut-off date' is not used, the inventory must be finished within 30 working days after the commencement, or after the Location Announcement by the Governor.</p> | <p>The official survey of the land, asset and ownership will set the Cut-off date. (Either the start date or the end date will be discussed with IA in later phase of the Project)</p> <p>Publishing the survey results at the public office will prevent influx of encroachers on the Project Area.</p> |

|    | JICA Guidelines, WB OPs   | Law No.2 of 2012 and related Presidential Decrees   | Gap  | Bridging Measures to be taken in the Project   |
|----|---|---|--|--|
|    | <p>identification stage, to prevent a subsequent influx of encroachers of others who wish to take advantage of such benefits. (WB OP4.12, Para. 6)</p>  | <p>Entitled Parties and Objects of the Acquired Land. The results of the inventory and identification shall contain the list of the nominated Entitled Parties and Objects of the Acquired Land. The Entitled Parties shall include the items of name, address, and employment of the parties who possess/own the land. The Objects of the Acquired Land shall include the items of location, size, status, and type of use and utilization of land. (Article 28)<br/>The results of the inventory and identification of possession, ownership, use, and utilization of land must be announced at the urban/rural village administration office, the subdistrict office, and at the place where Acquisition of Land is conducted, for fourteen (14) working days. (Article 29)</p>  | <p>It will be easy to set the eligibility cut-off date at the start date of the inventory.<br/>The results of the inventory that will be considered for compensation is published at the public office. Those who are not listed will not be compensated unless he/she files a public objection.<br/>No gap.</p> |  |
| 12 | <p>Eligibility of benefits includes, the PAPs who have formal legal rights to land (including customary and traditional land rights recognized under law), the PAPs who don't have formal legal rights to land at the time of census but have a claim to such land or assets and the PAPs who have no recognizable legal right to the land they are occupying. (WB OP4.12 Para. 15)</p> | <p>“Entitled Party” means any party by whom objects of the acquired land are possessed or owned. (Article 1, No. 3)<br/>The giving of Compensation must in principle be given directly to the Party Entitled to Compensation. Failing him/her, the Entitled Party may by operation of law assign the powers to other party or successor. The attorney-in-fact may only receive the powers from one person entitled to Compensation.<br/>Those entitled shall be, inter alia:<br/>a. landholders;<br/>b. land concessionaires;<br/>c. waqf organizers, in the case of waqf land;<br/>d. ex-customary land owners;<br/>e. indigenous people;<br/>f. parties in possession of the state land in good faith (customary residents/ occupants on public land without registration);<br/>g. land tenure holders; and/or<br/>h. owners of buildings, plants or other objects related to land.<br/>As regulated, Compensation shall be given to the landholder. In the case that the right to build or the right to use over the land is not his/her own, Compensation shall be given to the holder of the right to build or the right to use over the building, plants or other objects related to land owned by or belong to the him/her, whereas Compensation for his/her land shall be given to the title holder or the concessionaire. (Article 40)</p> | <p>No gap.</p>   | <p>Eligibility of benefits will be defined according to the Law No. 2 of 2012 and to the WB OP 4.12.</p> |
| 13 | <p>Preference should be given to land-based resettlement</p>  | <p>The giving of Compensation may be made in the form of:<br/>a. money;</p>   | <p>Although no preference is stated, substitute land</p>   | <p>(There is high possibility that the Project will not cause any</p>                                    |



|    | JICA Guidelines,<br>WB OPs   | Law No.2 of 2012 and related Presidential Decrees  | Gap   | Bridging Measures to be taken in the Project  |
|----|--|--|---|---|
|    | <p>strategies for displaced persons whose livelihoods are land-based. (WB OP4.12 Para. 11)</p>   | <p>b. substitute land;<br/>c. resettlements;<br/>“Resettlements” means a process of replacing the Entitled Party’s land with the land of different location as agreed upon during the process of Acquisition of Land.<br/>d. shareholding; or<br/>“Shareholding” means placement of shares in the relevant development activities in the public interest and/or the management thereof is made by agreement of the parties.<br/>e. other forms as agreed upon by both parties.<br/>Other forms as agreed upon by both parties are, for example, a combination of two (2) or more forms of Compensation as intended by point (a), point (b), point (c), and point (d). (Article 36)<br/>Compensation for indigenous land shall be given in the form of substitute land, resettlements, or other forms as agreed upon by the relevant indigenous people.<br/>Parties in possession of the state land that may be given Compensation shall be the state land users providing in compliance with or not in violation of the provisions of laws and regulations. For example, ex-right holders (whose tenure has expired) still using or utilizing the relevant land, parties in possession of the state land on a lease basis, or other parties using or utilizing the free and unclaimed state land not in violation of the provisions of laws and regulations. (Art. 40)</p> | <p>can be the form of compensation.<br/>No gap.</p>                       | <p>displacement)<br/>Preference will be given to land-based resettlement strategies if any displacement of land-based persons is found necessary after the Detailed Design.</p>   |
| 14 | <p>Provide support for the transition period (between displacement and livelihood restoration). (WB OP4.12 Para. 6)</p>  | <p>No provision of support during the transition period.</p>   | <p>No provision of support during the transition period.</p>              | <p>(There is high possibility that the Project will not cause any displacement)<br/>Support for the transition period will be provided if any displacement is found necessary after the Detailed Design.</p>                                |
| 15 | <p>Particular attention must be paid to the needs of the vulnerable groups among those displaced, especially those below the poverty line, landless, elderly, women and children, ethnic minorities etc. (WB OP4.12 Para. 8)</p> | <p>No particular description about handling of the vulnerable groups.</p>  | <p>No particular description about handling of the vulnerable groups.</p> | <p>(There is high possibility that the Project will not cause any displacement)<br/>Particular attention and assistance will be provided to vulnerable groups if any displacement of them is found necessary after the Detailed Design.</p> |

出典：JICA 調査団

### (3) 用地取得・住民移転の規模・範囲

#### 1) 用地取得の位置及び面積

2019年の6月から8月までの3か月間実施される予定の詳細設計により、事業実施に必要な用地の境界が明らかになる。

2019年3月26日の現地確認時には、事業計画地及び直近のエリアには居住者は確認できなかった。右岸の屋台1、2件は、自主的に移動しなかった場合事業実施に伴い影響を受ける可能性がある。

右岸の事業用地の大部分はパル市道路部の所有地と想定される。左岸の民有住宅地は津波によって破壊された。所有者情報はパル市にある州土地局(BPN)に登録されていると想定される。

#### 2) 今後の情報収集

JICA調査団によって事業用地境界が明らかにされた後、事業によって影響を受けるPAPsの情報収集が必要である。

Law No. 2, 2012に基づき、公共事業のために必要な土地情報は州土地局(BPN)が所有しているデータを使用して、事業ごとに設置されるPreparation Teamが収集・整理することとなっている。

BPNは2018年12月に、液状化被災地周辺の約5,000区画の土地情報の収集を実施した。この調査は公共事業等に際して実施される標準仕様IP4Tに従って実施されたものである。調査結果はGISデータ形式で提供される。

本事業に必要な用地についても同様な調査がBPNによって実施される必要がある。調査のタイミングは表2-2-46の6行目に示す。並行して、BPN調査に含まれないPAPsの人口センサスや社会経済調査をJICA調査団が実施する必要がある可能性がある。

なお、全てのPAPsが不在地主と想定されることから、PAPsの所在地の特定には地元コミュニティの協力を得るなど、工夫を要する必要がある。

### (4) 補償・支援の具体策

表2-2-47に示すギャップ分析結果のとおり、本事業の補償・支援の具体策はJICAガイドラインに比べて大きなギャップは存在しないと予想される。一方で、以下のような点について、今後関係機関と調整が必要である。

#### 1) 今後の関係機関との調整

用地取得の詳細について関係機関と協議・合意した後、カットオフデート、補償・支援の受給資格・内容・規模等の情報をPAPsに公開する必要がある。

#### 2) 沿岸域の土地に関する今後の検討・調整を要する課題

2019年4月2日のパル市長とJICA調査団の面談では、本事業に必要な用地は公共事業用地として取得される見通しが示された。

一方で、危険区域における土地利用規制や、危険区域内の土地所有者から買取要請があった場合の対応などについて、2019年6月の時点では、関係機関間で十分な協議が行われておらず、本事業の用地取得が必要なタイミングにおいても結論・合意が出ていない可能性がある。

無償事業に係る用地取得が一連の支援プロジェクトの中でも早期に実施されることから、IA、関係機関、JICA、及び JICA 調査団は、住民と意見交換を行い、地元住民の疑問に答え、地元社会に一連の支援プロジェクト全体に対する協力的な世論が形成されるよう努める必要がある。

#### (5) 苦情処理メカニズム

Law No.2 of 2012.は、以下の 3 回の苦情申し立てのタイミングを設定している。

|  |
|--|
| <p>1. If within a sixty (60) working day period of the Public Consultation on a development plan there is a party objecting to the planned location of development, a(nother) Public Consultation shall be repeated by engagement of the objecting party within thirty (30) working days.</p> <p>A party objecting to the planned location of development shall present his/her objections in writing along with the reasons therefor. (Article 20)</p> <p>If in the repeated Public Consultation there are still parties objecting to the planned location of development, the Agency needing land shall report such an objection to the local governor.</p> <p>The governor shall form a team to make a study of the objections to the planned location of development. (Article 21)</p> |
| <p>2. Where the Entitled Party does not receive the results of the inventory as intended, he/she may file an objection with the Land Administrator within fourteen (14) working days of the announcement of the results of the inventory.</p> <p>Where there is an objection to the results of the inventory, verification and improvement thereof shall be made within fourteen (14) working days of the receipt of the filing of an objection to the results of the inventory. (Article 29)</p>  |
| <p>3. Where there is agreement on the form and/or the amount of Compensation, The Entitled Parties may file an objection with the local district court within fourteen (14) working days of the negotiation on determination of Compensation.</p> <p>The district court shall decide the form and/or the amount of Compensation within thirty (30) working days of the receipt of the filing of objection. (Article 38)</p>  |

#### (6) 実施体制（住民移転に責任を有する機関の特定、及びその責務）

2019 年 6 月の時点で、本事業の Executing Agency (EA) は Bina Marga（国レベルの道路総局）に決定されている。また、用地取得については Palu 市が責任機関となる。

#### (7) 実施スケジュール（損失資産の補償支払い完了後に物理的な移転を開始）

##### 1) 2019 年 6 月時点の事業スケジュール

2019 年 3 月時点の事業スケジュールを表 2-2-48 に示す。これによると、用地取得は 2019 年 8 月末までに行う必要がある。また、JICA 無償資金協力事業では、一般的に、入札者への図面渡しまでに用地の登記が済んでいることが求められる。本事業の場合これは 2019 年 10 月 1 日である。

本事業の用地は道路用地及び津波被災地であるため、2019 年 12 月に想定されている準備工着工に先立つ撤去・整地には、それほど時間を要しないと予想される。

表 2-2-48 事業実施と用地取得のスケジュール案

|                 |    |  | Start      | End         |
|-----------------|----|--|------------|-------------|
| Design & Tender | 1  | Outline Design   | Jan. 2019  | April 2019  |
|                 | 2  | Detailed Design & Tender Document Preparation  | May 2019   | July 2019   |
|                 | 3  | JICA Approval of Cost Estimation   | July 2019  | August 2019 |
|                 | 4  | LARAP must be submitted to JICA and DG of Highways (IA) before PQ to the latest (ESMF)                           |            | August 2019 |
|                 | 5  | Agreement to sell must be obtained from 100 % land owners before PQ (Grant Project)                              |            | August 2019 |
|                 | 6  | PQ/Tender/Contract   | Sep. 2019  | Nov. 2019   |
|                 | 7  | Site clearance, and resettlement/relocation if any, to be finished before Preparatory Work starts (JICA Project) |            | Nov. 2019   |
| Construction    | 8  | Preparatory Work & Temporary Bridge  | Dec. 2019  | March 2020  |
|                 | 9  | Foundation Pile & Substructure   | April 2020 | Sep. 2020   |
|                 | 10 | Superstructure   | Aug. 2020  | March 2021  |
|                 | 11 | Surface Work & Clearance Work  | April 2021 | July 2021   |

出典：JICA 調査団

## 2) 今後の作業

目標スケジュールを実現するためには、全てのステークホルダー機関との協議調整、及び、目標スケジュールの現実性の確認が必要である。2019年6月の段階で未解決の課題を表 2-2-49 の右列に記載した。

表 2-2-49 インドネシア制度・JICA ガイドラインを踏まえたスケジュール及び今後の確認事項

| Law No.2, 2012 Land Acquisition for Public Purpose |  |   |   | JICA Guidelines  | Remaining Issues for Reconstruction of Palu IV Bridge  |
|--|--|---|---|--|--|
| Phase  | Responsible Body                           | L | Action (necessary days in the law)  |  |  |
| Planning phase                                     | Institution who needs the land             | 1 | Apply to the Governor with results of Feasibility Study, and the early inventory of PAPs and assets |  | Do we need the FS study?<br>Do we need to apply to the Governor?   |
| Preparation phase                                  | By the Governor, can be delegated to Mayor | 2 | Notification to community (20 days)   |  | May be prior to the Spatial Planning consultation with residents?  |
|  |  | 3 | Forming preparation team (10 days)  |  | Where the preparation team will be formed, province or city?   |
|  |  | 4 |   | <b>1st public consultation prior to the survey to explain the Project and purpose of the survey</b>  |  |
|  |  | 5 |   | <b>CUT-OFF DATE: START DATE OF THE SURVEY</b>  | (preliminary cut-off date)   |
|  |  | 6 | Preliminary data collection (30 days) (IP4T)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Population census                             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ including Vulnerability recognition</li> </ul> </li> <li>● Socio-economic condition of Project Affected person, household, business</li> <li>● Preference of measure of compensation</li> <li>● Opinions on the Project</li> </ul> | About how many land owners will be affected?<br><br>Do we need to share the survey between the Preparation Team and the JICA Study Team?<br><br>Or the Preparation Team will have a sociologist? |



| Law No.2, 2012 Land Acquisition for Public Purpose |   |          |   | JICA Guidelines   | Remaining Issues for Reconstruction of Palu IV Bridge   |  |
|--|---|----------|---|---|---|--|
| Phase  | Responsible Body  | L        | Action (necessary days in the law)  |   |   |  |
|  |   | 7        | OUTPUT: Temporary Location Plan List  |   | Is it overlay with the design and land parcel map (cadastral map)?  |  |
|  |   | 8        |   | <b>DEVELOPMENT OF ELIGIBILITY CRITERIA AND ENTITLEMENT</b>  | JICA Stud Team need to work together with the City and Province in this step.   |  |
|  |   | 9        | <b>Second public consultation TO AGREE ON THE PROJECT LOCATION (60 days)</b>  | <b>Second public consultation TO AGREE ON THE POLICY/CALCULATION OF ELIGIBILITY AND ENTITLEMENT</b> | Need to emphasize that this is the acquisition for the bridge reconstruction project. (differ from land use restriction because of the zoning, or land for tsunami dike project)                            |  |
|  |   | 10       |   |   | <b>Submission of LAPRAP to JICA</b>   |  |
|  |   | Governor | 11  | Location stipulation (14 days)  |   |  |
|  |   |          | 12  | Location announcement (17 days)   |   |  |
| Execution  | By Head of BPN  | 13       | Final inventory & identification of PAPs (30 days) and announcement (14 days) |   | JICA Study Team will conduct monitoring.  |  |
|  |   | 14       | Stipulation of Appraiser (30 days) and Valuation (30 days)                    |   |   |  |
|  |   | 15       | Final negotiation with PAPs on type and amount of compensation (30 days)      |   |   |  |
|  |   | 16       | Compensation payment and land title release (7 days)                          |   |   |  |
| Land delivery                                      | From Head of Land Acquisition to the Institution who needs the land | 17       | Land delivery (7 days)  |   |   |  |
|  |   | 18       | Land Certification and Registration (30 days)                                 |   | Grant Project is usually required Registration Certificate (or at least a proof of the process started) before distribution of bidding document <b>(TARGET: October 1)</b>                                  |  |
|  |   | 19       |   |   | All removal of private assets is required before the start of construction works <b>(TARGET: November 30)</b> Which institution (village?) will be responsible to keep the land vacant, without any influx? |  |

出典：JICA 調査団

#### (8) 必要な予算規模及び財源の確保手段

本事業の詳細設計は2019年6月から8月の3か月間で実施される予定である。この詳細設計期間に、以下に挙げる調査等を実施する。

- 用地調査・資産調査・所有者調査の結果を踏まえて、必要な予算を算出する。
- 市、州、国レベルのステークホルダー間の協議・調整を進め、予算措置の方法、事業における役割の分担を明らかにする。

(9) 実施機関によるモニタリング体制及びモニタリングフォーム

1) モニタリング体制

Law No.2 of 2012 の Article 51 では、モニタリングについて以下のように述べている。

- |  |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1) Monitoring and evaluation of the performance of acquisition of land shall be made by the Government.</li><li>2) Monitoring and evaluation of the results of the handover of the acquisition of land shall be made by the Land Administrator (BPN/ATR Palu City)</li></ol> |
|--|

現時点で、1) の用地取得の進行状況のモニタリングを行う ‘Government’ がパル市になるか中部スラウェシ州になるか未定である。2)の公共事業用地としての登記状況のモニタリングを行う Land Administrator は、州土地局(BPN)になると予想される。

モニタリング実施組織、体制、モニタリング項目について、今後さらに情報収集が必要である。

2) モニタリングフォーム

用地取得のモニタリングフォームの例を図 2-2-28 に示す。

| Preparation of Resettlement Sites (where necessary) |   |  |   |
|---|---|--|---|
| No.   | Explanation of the site<br>(e.g. Area, no. of resettlement HH,<br>etc.) | Status<br>(Completed (date) / not<br>complete) | Details<br>(e.g. Site selection, identification of candidate sites, discussion with PAPs,<br>Development of the site, etc.) |
| 1   |   |  |   |
| 2   |   |  |   |

| Public Consultation |      |       |  |
|---------------------|------|-------|--|
| No.                 | Date | Place | Contents of the consultation / main comments and answers |
| 1                   |      |       |  |
| 2                   |      |       |  |

| Resettlement Activities   | Planned<br>Total | Unit        | Progress in Quantity  |                          |                      | Progress in %            |                      | Expected Date of<br>Completion | Responsible<br>Organisation |
|---|------------------|-------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
|   |                  |             | During the<br>Quarter | Till the Last<br>Quarter | Up to the<br>Quarter | Till the Last<br>Quarter | Up to the<br>Quarter |                                |                             |
| Preparation of RAP  |                  |             |                       |                          |                      |                          |                      |                                | TANESCO                     |
| Employment of Consultants   |                  | Man-month   |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Implementation of Census Survey<br>(including Socioeconomic Survey) |                  |             |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Approval of RAP   |                  |             | Date of Approval:     |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Finalization of PAPs List   |                  | No. of PAPs |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Progress of Compensation Payment                                    |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 1   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 2   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 3   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 4   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Progress of Land Acquisition (All Lots)                             |                  | ha          |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 1   |                  | ha          |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 2   |                  | ha          |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 3   |                  | ha          |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 4   |                  | ha          |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Progress of Asset Replacement (All Lots)                            |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 1   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 2   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 3   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 4   |                  | ha          |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Progress of Relocation of People (All Lots)                         |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 1   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 2   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 3   |                  | No. of HHs  |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |
| Lot 4   |                  | ha          |                       |                          |                      |                          |                      |                                |                             |

出典：JICA 執筆要領 2017

図 2-2-28 用地取得のモニタリングフォーム例

### (10) 住民協議

インドネシアの用地取得関連法令である Law No.2, 2012 は住民協議の実施を必須としているが、本件の用地取得範囲は 2ha 程度を想定しているため、個別の権利者との協議だけで用地取得を行うことが可能である。パル市はこの手続きを行うことが想定される。

JICA ガイドラインは用地取得に関する調査の開始前に 1 回目のコンサルテーションを行うことを求めているため、6 月末に想定しているステークホルダー協議でパル市の用地取得担当から今後の補償方針及び手続きについて説明を行う予定である。

### (11) 環境モニタリングフォーム

環境調査及び影響評価を行った後に検討・作成する。

### (12) 環境チェックリスト

環境調査及び影響評価を行った後に検討・作成する。

### (13) その他

特になし。

## 2-3 その他

### (1) 免税方法の確認

PU Bureau of International Cooperation and Budgeting Planning にヒアリングを行った結果、以下に記載する情報を得た。

#### 1) 外国調達の場合

外国調達の場合、MOD (Minute of Discussion) に調達品リストを記載することで、免税とすることが可能となる。

#### 2) 「イ」国調達の場合

「イ」国調達の場合は免税にする方法はなく、還付申請を行う必要がある。以下に還付申請手続きの流れを示す。

- 施工業者が JICA に還付申請手続きに必要な“Official Letter”の提出を施主に依頼する。
- JICA から施主に施工業者が還付申請手続きを開始する内容を記載した“Official Letter”を送付する。
- 施主が“Official Letter”受領後、State Secretary of Ministry に施工業者が還付申請手続きを開始していることを報告し、申請承認の依頼を行う。
- State Secretary of Ministry が、施工業者からの還付申請の照査を行う。
- State Secretary of Ministry が還付申請を承認後、Ministry of Finance に還付支払いを依頼する。
- 施工業者は、還付対象になる書類を全て Ministry of Finance に提出する。
- 提出書類が Ministry of Finance に受理された後、施工業者は Local tax office にて、還付を受領する。

「イ」国において、還付方法は存在するが運用上の問題から方法が確立されておらず、還付を受けるまでにかかる期間等については具体的に定められておらず、長期化するリスクが伴う。

### (2) 「イ」国の入札制度

「イ」国の入札方法は、Peraturan Menteri PUPR Nomor07/PRT/M/2019 のチャプターⅢからⅥに記載されている。「イ」国における入札スケジュールを図 2-3-1 に示す。「イ」国の入札は、PUPR が国家開発計画に基づき、目標達成のための必要事業を計画する。次に、事業実施に向け事業パッケージ、事業予算等の各種条件を設定した後、事業を実施する建設コンサルタント及び施工業者を対象に契約書原案を作成する。続いて、入札委員会を組織し、入札参加者に対して資格審査方法及び入札評価方法を説明する。入札に係る準備が完了した後、入札を実施し、入札資格のある参加者の中から落札者を決定する。





出典：JICA 調査団

図 2-3-1 「イ」国の入札スケジュール

## 1) 調達計画

調達計画策定は、持続的開発の原則に基づき実施される。はじめに、需要分析を実施する。需要分析は、省庁が定める開発計画に基づいて実施される。需要分析に際して、開発計画の達成目標に基づいて建設工事を決定する必要がある。また、実施予定の建設工事レベルを決定した上で、中小企業も参画できる事業を計画する。

実施前に建設工事実施可能性調査を行うことが義務づけられており、事業実施において必要な建設コンサルタントの選定条件を決定する。建設コンサルタントの選定に際して、サービスレベルの設定、目標設定、作業実行時期、契約種別（単年・複数年）、必要な専門家の数を考慮しなくてはならない。

続いて、事業実施スケジュールの計画を行う。事業実施スケジュールには、事業主が定めた事業実施スケジュール及び事業落札者が提案した事業実施スケジュールから成果品引き渡しまでの期間が含まれ、調達予算計画の策定を実施する。調達予算には事業実施に必要なすべての費用が含まれ、技術仕様書/TOR の設定を行う。技術仕様書には、建設資材の仕様と施工方法・実施方法・作業方法が含まれる。技術標準は SNI に出来る限り準拠しなくてはならない。また、作業実施には事業実施に必要な最低限な数量を規定する。TOR には、実行する作業内容、作業実施スケジュール、専門家実績、企業実績、作業実施費用が含まれ、事業のパッケージ化を行う。事業パッケージ化は、効率性、健全な競争、技術的な品質確保の原則に基づいて、中小企業が出来る限り事業参画可能になるようパッケージ化を行う。

「イ」国の入札は、事業予算によって参加資格が異なる。1 億ルピアから 10 億ルピアまでの事業には、中小企業のみ入札資格が与えられる。10 億ルピアから 25 億ルピアまでの事業には、中堅規模の企業にのみ入札資格が与えられる。それ以上の事業には大企業のみ入札資格が与えられる。

## 2) 調達準備の実施

調達計画が実施された後、調達準備を実施する。調達準備として、まず技術仕様書及び TOR のレビューと決定を行う必要がある。最新の資料・情報を基に技術仕様書および TOR を見直した上で、事業主から承認を得る必要がある。次に、建設事業者選択の為の詳細設計調査を実施し、建設工事費用を算出する。算出された建設費用を基に事業主は、入札書類提出もしくは事前審査書

類提出 28 日営業日前には、事業実施予算を規定する。続いて、契約書原案作成及び決定を行う。建設コンサルティング業者対象の契約書は、ランプサム契約か人月契約が締結される。建設業者対象の契約書は、ランプサム契約か単価契約が締結される。契約書原案には、契約種類、業務範囲、成果品、業務レベル、業務実施期間、瑕疵期間、支払い方法、業務計画、サブコントラクター規定、紛争解決オプションが包括した内容とする必要がある。

### 3) 入札準備

調達準備後、入札準備が実施される。入札準備及び入札は入札委員会が実施する。入札準備として、まず調達準備の際作成した文書のレビューを実施する。次に、資格審査方法を決定する。事前資格審査と事後資格審査の 2 種類の資格審査方法が導入されている。事前資格審査は、資格証明書の登録及び資格書類の提出を入札予定者が行い、入札委員会が資格評価を行った後、ショートリスト結果を発表する流れになる。その際、参加者は結果に対して事業主に異議を表明することが出来る。続いて、入札評価方法を決定する。

建設コンサルタントが対象の場合は、品質価格評価、品質評価、予算上限・最低価格落札評価がある。事業の性格により、適切な入札方法が決定される。また、入札方法により、参加者の選定方法が異なる。品質が重要視される事業の場合、事前に候補に挙がっている参加者に招待状を送付し、入札を行う。

施工業者が対象の場合は、技術的品質が求められる際のバリューシステム評価方法、及び最低価格評価方法の 2 種類の方法が実施されている。

次に、資格証明書、建設コンサルタント選定文書、建設工事入札書からなる入札図書を作成する。資格証明書は、一般規定から参加者への指示書、資格データシート、資格評価方法を記載している。建設コンサルタント選定文書は、招待状、参加者への指示書、TOR、入札書類フォーマットが記載される。また、建設工事入札書は、招待状、参加者への指示書、入札書類フォーマットが記載される。

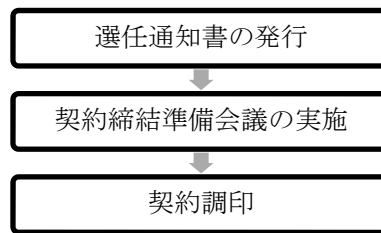
### 4) 入札

入札準備後、事業の入札が実施される。入札に際して、入札委員会より、事業公示が行われる。事業公示後、参加者はスケジュールに従い、資格文書を事業主が定めるウェブサイトに資格フォームを提出する。提出された資格フォームに基づき、入札委員会は資格を検証し、合格した参加者のみが入札資格を得る。審査結果発表から 5 営業日以内に異議申し立て期間が設けられる。異議申し立て期間後、3 営業日以内に入札委員会は異議申し立てに対する回答を書面で提供する。入札資格が認められた参加者が 3 社未満の場合は、再度入札を実施する。再入札を行い、2 社が入札資格を認められた場合には、その後の入札過程に移行する。1 社が入札資格を認められた場合には、直接契約交渉に進む。入札委員会は再入札の結果を事業主に報告する必要がある。

入札参加者が決定した後、入札委員会は、参加資格者全てを招集し、入札方法について発表する。招聘された参加者は、指定のウェブサイトを通じて入札図書を電子登録及びダウンロードする。入札図書提出期限までに、参加者は入札図書をウェブサイトから提出する。入札委員会は、参加者が入札図書提出期限までに入札書類を提出しなかった場合、1 日期限を延長することが出来る。提出期限後、入札委員会によって入札文書の評価が行われる。

(3) 「イ」国の契約方式

「イ」国の契約方法は、Peraturan Menteri PUPR Nomor07/PRT/M/2019 のチャプターVIIからXに記載されている。「イ」国の契約スケジュールを図 2-3-2 に示す。入札によって落札者が選定された後、事業主は落札者に対して事業の選任通知書を発行する。選任通知書が発行された後、契約署名をするための準備会議を開催する。準備会議に議論された内容は議事録にて記録を行う。契約書署名に当たり、建設工事専門家の意見を取り入れる必要があるが、適任者がいない場合は、関係省庁が結成したチームの意見を反映することが出来る。契約書署名は選任通知書が発行されてから 14 営業日以内に行う必要がある。



出典：JICA 調査団

図 2-3-2 「イ」国の契約調印スケジュール

### 3. プロジェクトの内容

#### 3-1 プロジェクトの概要

2018年9月28日に発生した地震（震源地：インドネシア中部スラウェシ州の州都パル市の北80km、Mw7.4）により、パル第四橋が落橋した。パル川河口に位置していた同橋梁が落橋したことにより、西向き交通はパル3橋（パル第四橋から南に約0.9kmに位置する）、東向き交通はパル1橋（パル第四橋から南に約1.6kmに位置する）への迂回を強いられている。係る状況の下、「イ」国政府は物流の改善、東西方向の交通容量拡大、道路ネットワーク強靱化等を目的として、パル第四橋の建設を日本政府に要請した。



出典：JICA 調査団

図 3-1-1 落橋したパル第四橋

なお、「イ」国から復興のシンボルとして早期の橋梁建設完工の要望が示されており、JICA と「イ」国政府は、その実現にはセクターローンの活用ではなく、無償資金協力事業による実施が適切との共通認識に達した。今回の業務はこの要請を受けて、パル第四橋に係る概略設計を実施するものである。

#### 3-2 協力対象事業の概略設計

##### 3-2-1 設計方針

###### 3-2-1-1 基本方針

本事業は、落橋したパル第四橋の架け替えを基本としているが、地震により発生した地滑り地帯を避けるため、既存橋位置より南側に架橋する方針とする。また、当該橋梁は津波堤防の一部区間として整備される予定であることから、津波堤防の平面・縦断計画、横断構造等を考慮する必要がある。架橋位置は、「イ」国政府の要望を踏まえ、移転数を極力減らすことが重要であり、空間計画も考慮して包括的に決定する。

###### 3-2-1-2 設計基準

###### (1) 橋梁設計

橋梁設計は、道路橋示方書／日本道路協会（以下、道示）に基づいて行うものとし、インドネシア基準／Standard National Indonesia（以下、SNI）にて設計照査を行う。以下に使用する基準類を記載する。

- 道路橋示方書・同解説（I～V）：日本道路協会
- Bridge Management System：Directorate General of Highways (DGH)
- SNI 12-2004 Perencanaan struktur beton untuk jembatan：Badan Standardisasi Nasional (BSN)
- SNI 1725-2016 Pembebanan untuk jembatan：Badan Standardisasi Nasional (BSN)



- SNI 2833-2016 Earthquake Map 2017 : Badan Standardisasi Nasional (BSN)
- SNI 8460-2017 Persyaratan perancangan geoteknik : Badan Standardisasi Nasional (BSN)

## (2) 道路設計

道路設計は、以下基準に準拠して実施する。

- Persyaratan teknis jalan dan kriteria perencanaan teknis jalan : Peraturan Menteri Pekerjaan Umum (Nomor: 19/PRT/M/2011)
- SNI T-14-2004 Geometri Jalan Perkotaan : Badan Standardisasi Nasional (BSN)
- Geometric Design of Highways and Streets (2018 7th Edition) : AASHTO

### 3-2-2 基本計画

#### 3-2-2-1 全体計画

パル市の中央部はパル川が流れており、東西交通を確保するため4つの橋梁（パル第一橋～パル第四橋）が建設されていた。しかしながら、2018年9月28日に発生した地震によりパル第四橋が落橋し、東西方向の交通容量が低下した状況に陥っている。そのため、パル市内及び近隣地域の交通容量確保、及び物流の向上等を目的として、道路総局（Directorate General of Highways / Direktorat Jenderal Bina Marga、以下 Bina Marga）及び関係機関と無償案件対象、及び架橋位置について協議を行った。比較案を図3-2-1～図3-2-4に示す。

**Alternative 1: The construction of the multipurpose pedestrian bridge considering aesthetic (Palu IV)**

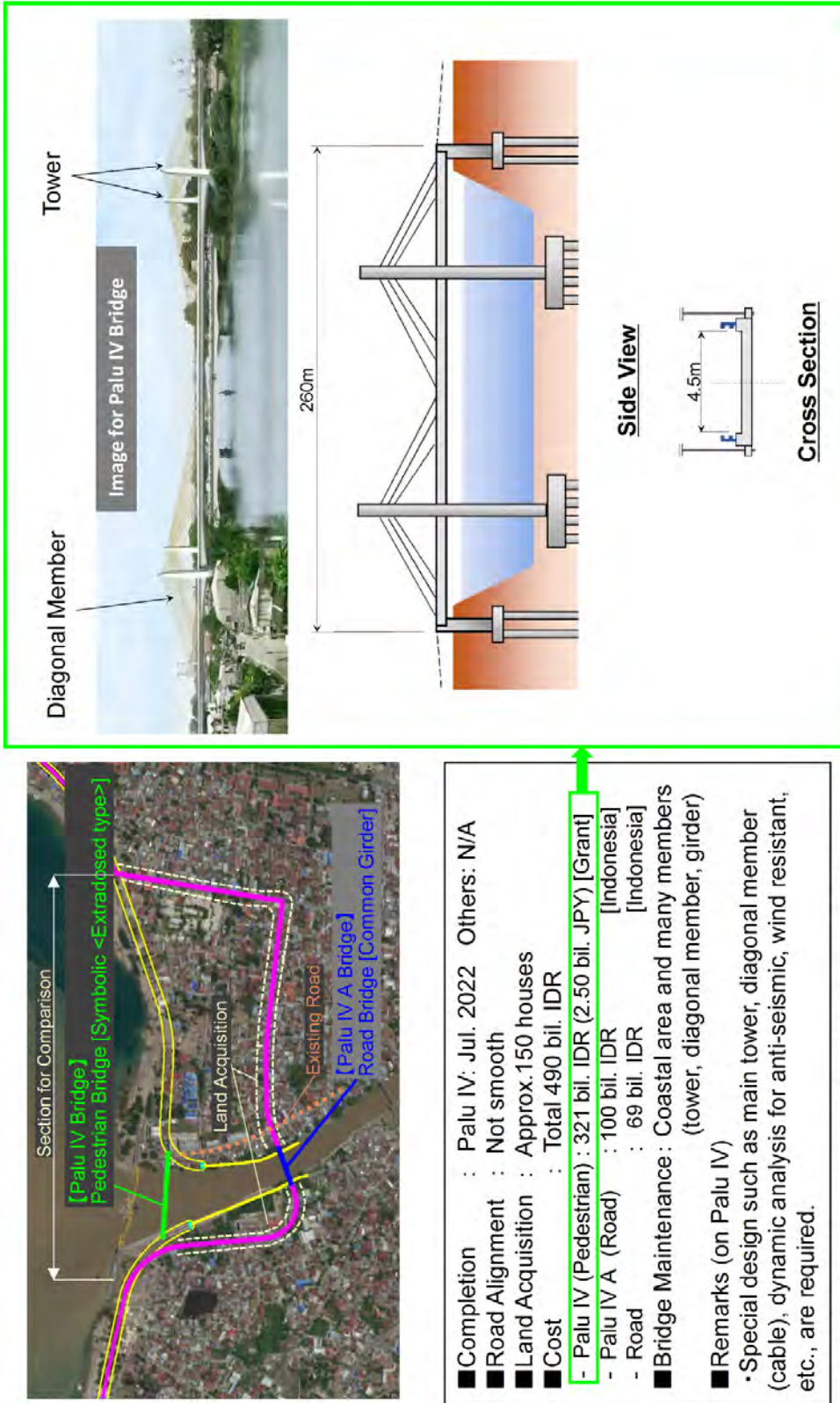
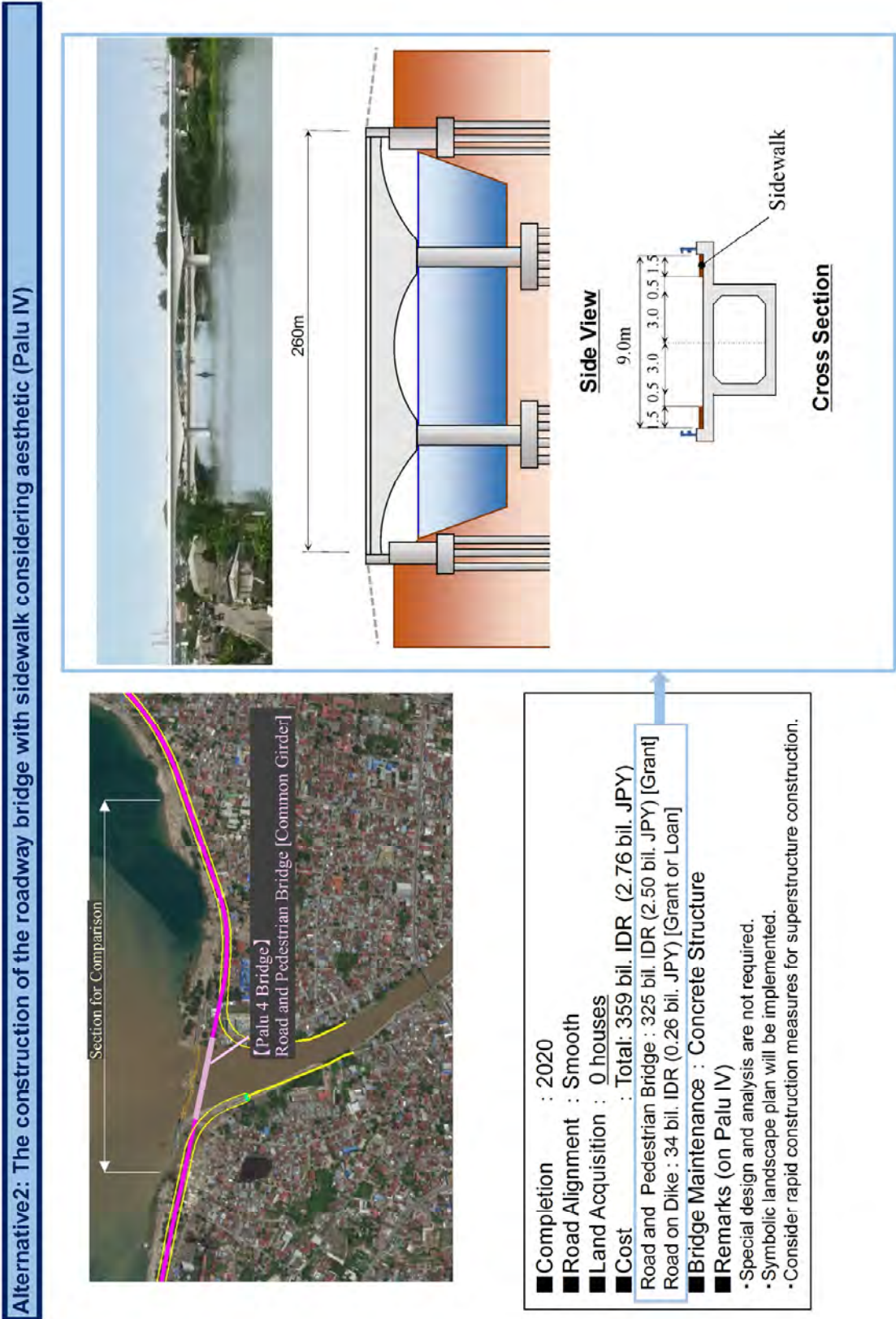


図 3-2-1 比較案 1

出典：JICA 調査団

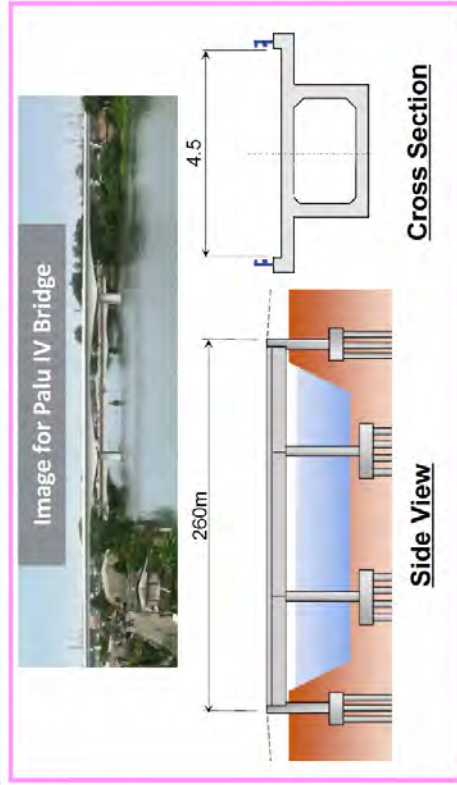


出典：JICA 調査団

図 3-2-2 比較案 2



**Alternative3: The construction of the multipurpose pedestrian bridge (Palu IV)  
The construction of the bridge for the improvement of the traffic network (Palu IV A)**

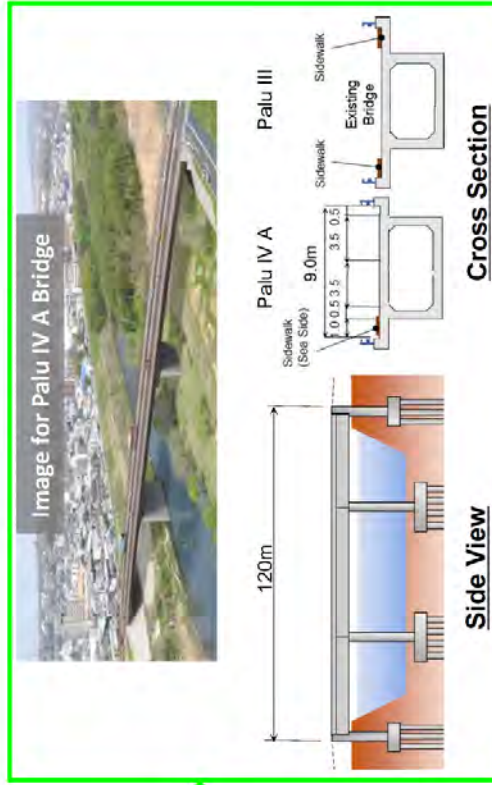


- Completion : Palu IV: May 2022  
Palu IV A: Oct. 2022  
(When it starts at the same time of Palu IV)
- Road Alignment : Smooth
- Land Acquisition : Palu IV: -, Palu IV A: Approx. 5 houses
- Cost : Total 372 ~ 384 bil. IDR
- Palu IV (Pedestrian) : 172 bil. IDR (1.34 bil. JPY) [Grant]
- Palu IV A (Road and Pedestrian): 142 bil. IDR (1.11 bil. JPY) [Grant]
- Improvement of the existing Palu III Bridge: 39 ~ 51 bil. IDR (It's necessary to carry out the detailed inspections) [Indonesia]
  - Road: 19 bil. IDR [Indonesia]
- Bridge Maintenance: Concrete structure
- Remarks (on Palu IV & IV A)
  - Dynamic analysis are required.
  - **Bridge type shall be determined based on discussion with GOI.**

\* When the bridge should be constructed by Dec. 2022, one-bridge can be constructed because the construction cost will be increased due to rapid construction.

\* Expected Commencement of Construction: Aug. 2020

\* Cost of tsunami dike is not included in construction cost above.



出典：JICA 調査団

図 3-2-3 比較案 3

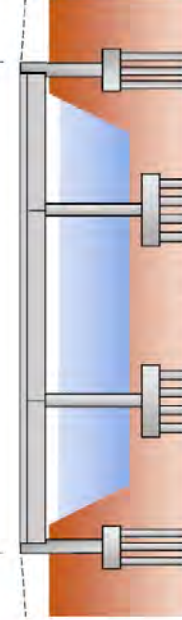


**Alternative 4: The construction of the bridge for the improvement of the traffic network (Palu IV A) (Palu I)  
The improvement of the Palu I and Palu III bridges**

\* The multipurpose pedestrian bridge will be constructed by sector loan.

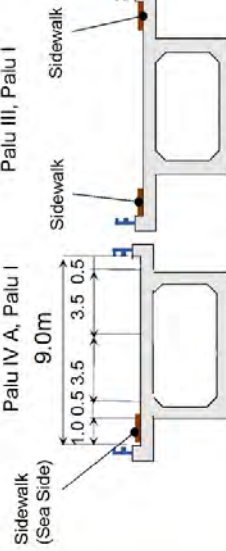


Palu I: 100m, Palu IV A: 120m



Side View

New Bridge  
Palu IV A, Palu I



Cross Section

- Completion : Palu IV A: Oct. 2022  
Palu I: Oct. 2022  
(When it starts at the same time of Palu IV A)
- Road Alignment : Smooth
- Land Acquisition : Palu IV Approx. 5 houses, Palu I: Approx. 5 houses
- Cost : Total 321 ~ 340 bil. IDR
- Palu IV A (Road and Pedestrian): 142 bil. IDR (1.11 bil. JPY) [Grant]
- Palu I (Road and Pedestrian) : 112 bil. IDR (0.87 bil. JPY) [Grant]
- Improvement of the Palu III and Palu I Bridge: 45 ~ 64 bil. IDR (It's necessary to carry out the detailed inspections) (0.35 ~ 0.50 bil. JPY) [Grant]
- Road: 22 bil. IDR [Indonesia]
- Bridge Maintenance: Concrete structure
- Remarks (on Palu IV A & I)
  - Dynamic analysis are required.
  - Bridge type shall be determined based on discussion with GOI.

\* When the bridge should be constructed by Dec. 2022, one-bridge can be constructed because the construction cost will be increased due to rapid construction.

\* Expected Commencement of Construction: Aug. 2020

出典：JTCA 調査団

図 3-2-4 比較案 4

2019年2月18日にパル市で行われた関係機関との会議において、「イ」国政府より比較案2を採用されたい旨要望を受け、日本側がこれを受け入れた。併せて、被災地の復興のシンボルとして、景観配慮、早期完工を要望されている。

### 3-2-2-2 道路計画

#### (1) 幾何構造基準

道路計画に係る幾何構造基準を表 3-2-1 に示す。

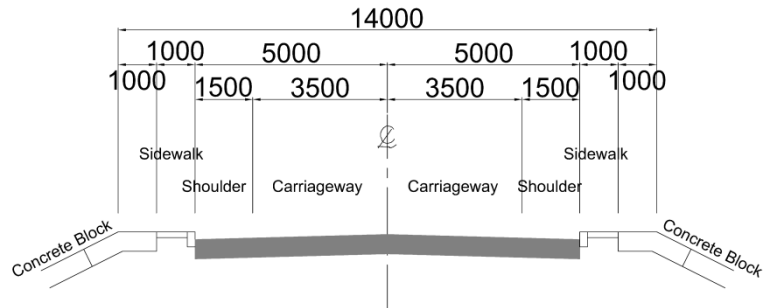
表 3-2-1 幾何構造基準

| Item   | Unit   | Criteria                            | Adopted Value | Remarks                         |
|--|--------|-------------------------------------|---------------|---------------------------------|
| Design Speed   | km/hr  | 60                                  | 60            |                                 |
| <b>Cross Section</b>                                       |        |                                     |               |                                 |
| - Carriageway  | m      | 3.50                                | 3.50          |                                 |
| - Left Shoulder  | m      | 1.50                                | 1.50          |                                 |
| - Sidewalk   | Bridge | m                                   | 1.00          |                                 |
|  | Road   | m                                   | 1.00          |                                 |
| - Frontage Road  | m      | 4.00                                | 4.00          | If necessary                    |
| - Shoulder of Frontage Road                                | m      | 0.50                                | 0.50          | If necessary                    |
| <b>Horizontal Alignment</b>                                |        |                                     |               |                                 |
| - Standard Minimum Radius                                  | m      | 150                                 | TBD           |                                 |
| - Desirable Minimum Radius                                 | m      | 200                                 | TBD           |                                 |
| - Minimum Radius for Normal Cross-fall (i=2.0%)            | m      | 2,000                               | TBD           |                                 |
| - Minimum Curve Length                                     | m      | 100                                 | TBD           |                                 |
| - Standard Minimum of Transition Sections                  | m      | 50                                  | TBD           |                                 |
| - Standard Minimum Radius not Requiring Transition Section | m      | 600                                 | TBD           |                                 |
| - Widening of Lanes  | m      | 0.25                                | TBD           | - less than R=160<br>- per lane |
| <b>Vertical Alignment</b>                                  |        |                                     |               |                                 |
| - Maximum Grade  | %      | 5.0                                 | 4.0           | as requested by Balai           |
| - Critical Length of Grade                                 | %      | 6% - 500m<br>7% - 400m<br>8% - 300m | TBD           |                                 |
| - Standard Minimum Radius                                  | m      | Crest - 1,400<br>Sag - 1,000        | TBD           |                                 |
| - Desirable Minimum radius                                 | m      | Crest - 2,000<br>Sag - 1,500        | TBD           |                                 |
| - Standard Minimum Length                                  | m      | 50                                  | TBD           |                                 |
| <b>Super-elevation</b>                                     |        |                                     |               |                                 |
| - Maximum Super-elevation                                  | %      | 8.0                                 | TBD           |                                 |
| - Minimum Length of Super-elevation Runoff                 | -      | 1/175                               | TBD           |                                 |

出典：JICA 調査団

(2) 標準横断構成

単路部の標準横断構成を図 3-2-5 に示す。パル第四橋、及びアプローチ道路は津波堤防の一部区間として計画されていることから、「イ」国道路基準を満足させうえで、津波堤防との整合性を図る必要がある。



出典：JICA 調査団

図 3-2-5 標準横断構成

(3) 平面線形検討

前述のとおり、パル川河口に落橋したパル第四橋を再建することで「イ」国政府と合意済みのため、空間計画等を考慮してパル川河口付近で路線位置の検討を行う。河口付近は、地滑り影響地帯が存在するため、基本的に計画路線の通過を回避する。しかしながら、Bina Marga 及び関係機関から移転が困難なことが想定されるため、地滑り影響地帯を通過させて、移転を減らす案も比較対象とすることを要望された。路線比較表を表 3-2-2 に示す。

関係機関と協議の結果、JICA 調査団が推奨した第 2 案ではなく、第 1 案が採用されることになった。合同現地踏査を行って議論を重ねたものの、「イ」国側は移転交渉が困難であり、かつパル市の予算等を考慮すると第 1 案が環境社会配慮の観点から現実的であるとの結論に至った。







### 3-2-2-3 橋梁計画

#### (1) 設計条件

##### 1) 水文条件

##### (a) 確率規模

パル第四橋の計画高水位の算出は、25年確率を用いるものとする。パル第四橋付近は、これまでの最大水位についてのヒアリング等から、河川堤防を越水した実績が数回発生している。このため、パル第四橋の計画高水位算出は、25年確率を採用するものとする。

##### (b) 計画高水流量

想定される25年確率の計画高水流量を表3-2-3に示す。

表 3-2-3 計画高水流量

| 確率年  | 計画高水位 (m) | 計画高水流量 (m <sup>3</sup> /s) |
|------|-----------|----------------------------|
| 1/25 | EL.+1.230 | 1,000*                     |

\*注：BWSの2017年計画では河口の計画高水流量は800m<sup>3</sup>/s(756.024m<sup>3</sup>/s)と算定されているが、現在JICA調査団によって2016年洪水を対象とした河道及び流域対策が検討されている。河道・流域対策の規模について現在検討が進行中であるものの、河口部においては河道拡幅のための河川用地取得が困難であることより、計画高水流量は1,000m<sup>3</sup>/sを超えないと想定されている。

出典：JICA調査団

##### (c) 設計流速

橋梁計画における25年確率の設計流速を表3-2-4に示す。

表 3-2-4 設計流速

| 確率年  | 設計流速 (m/s) |
|------|------------|
| 1/25 | 1.210      |

出典：BWS(2017)、「パル市域の河川境界と設計調査」報告書

##### (d) 計画高水位

想定津波高がクリティカルであるが、河川条件との整合を図るため、「イ」国に該当基準がないこともあり、河川管理施設等構造令（以下、河川構造令）に準拠し、表3-2-3に示す計画高水流量に基づいて、計画高水位を算出する。なお、計画橋梁位置での河川状況を確認すると、満潮時の河川水位はかなり上昇する傾向にある。さらに、2018年9月28日に発生した津波の記録も踏まえて計画水位を設定するものとする。これらから得られた結果を表3-2-5に示す。

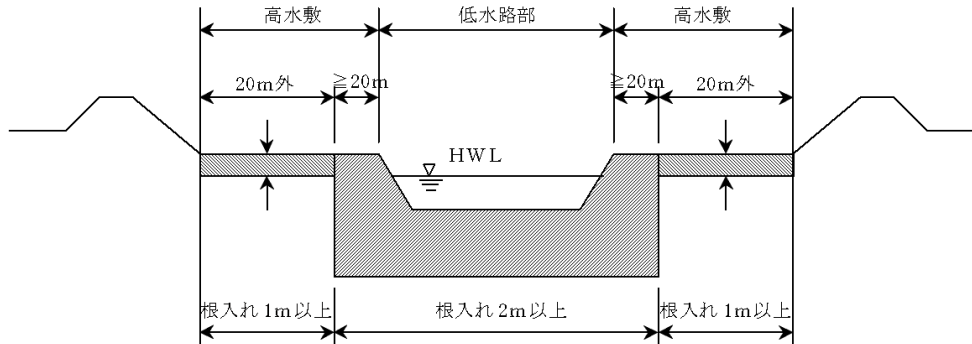
表 3-2-5 計画高水位

| 発生源                     | 水位 (m) |
|-------------------------|--------|
| 1/25 確率規模年              | 1.230  |
| 朔望平均満潮位                 | 2.316  |
| パル湾南沿岸の今次津波の痕跡（地盤高+浸水深） | 6.500  |

出典：JICA調査団

(e) 根入れ深さ

「イ」国に該当基準がないため、河川等構造令に準拠し、河川内基礎の根入れ深さを図 3-2-6 に示すように 2.0m 以上確保する。



出典：河川管理施設等構造令

図 3-2-6 河川内基礎根入れ深さ

(f) 河積の阻害率

パル第四橋は、重要な幹線道路に位置付けられる橋梁である。「イ」国に該当基準が無いため、河川構造令より河積阻害率を 5%未満確保することを遵守する。河積阻害率は、下記の基本式によって算出する。

$$\text{河積阻害率} = \frac{\text{橋脚幅の合計}}{\text{河川幅}} \times 100 (\%) < 5\%$$

結論から、パル第四橋が取り付く位置の河川幅は、おおよそ 230m となる。このことから、橋脚幅の合計は 11.5m と算出される。

(g) 径間長

径間長は、「イ」国に該当基準が無いため、河川構造令より（本令の場合、径間長の定義は橋梁構造上、支間長と同意語。なお、橋台が取り付く径間長の定義はパラペット前面から橋脚中心までの距離を言う。）、次式によって算出する。基準径間長算定の流れを図 3-2-7 に示す。

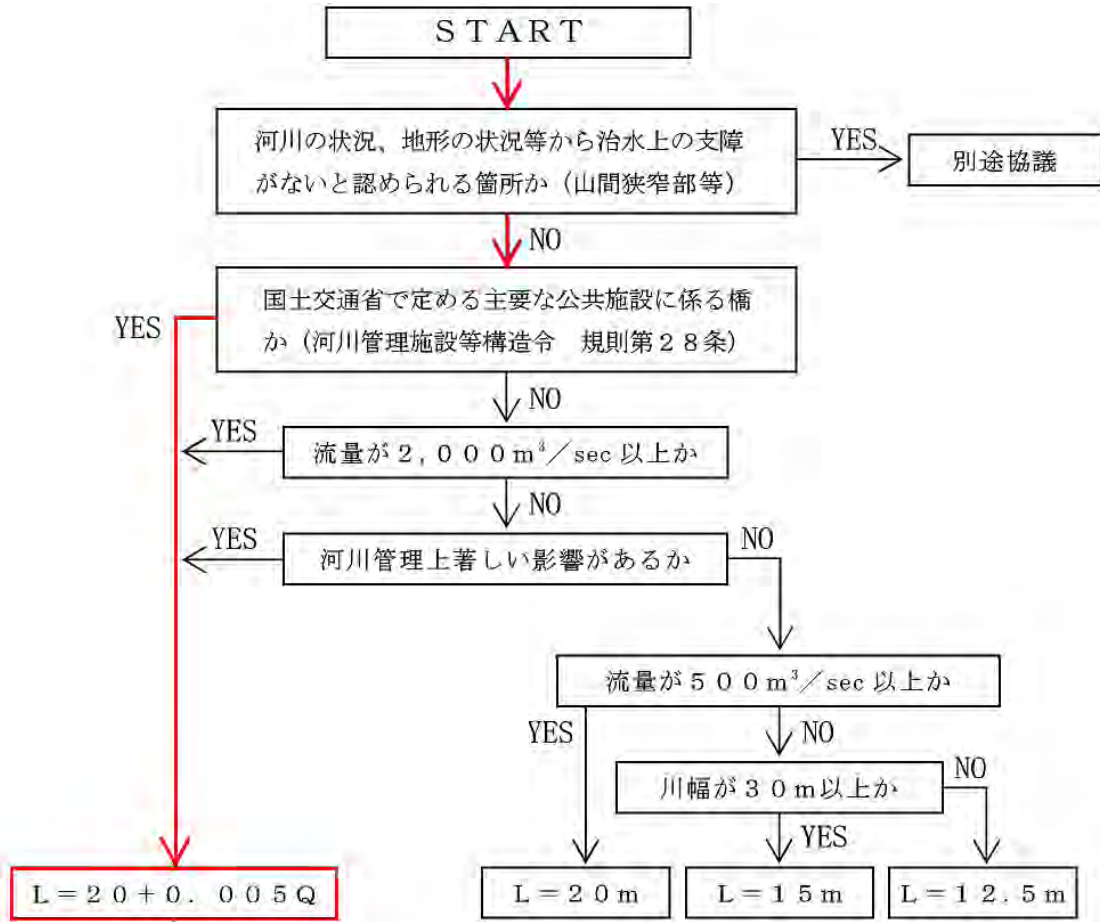
$$L = 20 + 0.005Q \quad (\text{ただし、} L \leq 70\text{m})$$

L : 基準径間長 (m)

Q : 計画高水流量 (m<sup>3</sup>/s)

計画高水流量 (m<sup>3</sup>/s) : 1,000

基準径間長 (m) : 25.0 以上



出典：国土交通省

図 3-2-7 基準径間長算定の流れ

2) 荷重条件

(a) 死荷重

死荷重は表 3-2-6 に示すとおり、道示により定められた単位重量を用いる。

表 3-2-6 材料の単位重量

| 材 料      | 単位重量 (kN/m <sup>3</sup> ) |
|----------|---------------------------|
| 鋼・铸鋼・鍛鋼  | 77.0                      |
| 鉄筋コンクリート | 24.5                      |
| 無筋コンクリート | 23.0                      |
| セメントモルタル | 21.0                      |
| アスファルト舗装 | 22.5                      |
| 砂及び砂礫    | 20.0                      |
| 砂質土      | 19.0                      |
| 粘性土      | 18.0                      |

出典：道路橋示方書（日本道路協会）

(b) 活荷重

活荷重は、道示で規定している B 活荷重を用いる。なお、その確認として SNI によって照査を行うものとする。

(c) 衝撃

活荷重の載荷に際して、衝撃を考慮するものとする。算出方法は、道示を適用する。なお、下部構造の設計に用いる上部構造反力には、活荷重による衝撃を考慮しない。

(d) コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響

コンクリートの各材齢に関するクリープひずみ、乾燥収縮度は道示Ⅲ編に従い算出し、構造系完成以降のクリープ係数は主桁コンクリートで 1.50 を採用する。また、主桁コンクリートの乾燥収縮度は  $15.00 \times 10^{-5}$  とする。

(e) 温度変化の影響

対象橋梁位置付近の気温は、年平均最高気温で約 30.7℃（月平均最高気温：32.1℃、10月）、年平均最低気温で約 23.0℃（月平均最低気温：22.0℃、7月）である。この結果より、年平均気温は約 26.8℃である。一方、SNI 1725:2016 ではコンクリート桁の温度影響について、最低気温 15℃、最高気温 40℃の基準があるためこれを採用し、温度変化を  $27.5 \pm 12.5$ ℃とする。

(f) 土圧

土圧は、構造物の種類や土質条件を適切に考慮して設定するものとする。算出方法は、道示を適用する。

(g) 水圧

水圧は、水位の変動、流速、洗掘の影響及び橋脚の形状・寸法を適切に考慮して設定するものとする。算出方法は、道示を適用する。

(h) 津波圧

津波圧は、以下の基準に提案される式のうち最も大きくなる値を採用する。

- 海岸の施設の技術上の基準・同解説 H30 年 8 月
- 津波を考慮した胸壁の設計の考え方（暫定版） H27 年 11 月
- 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究（朝倉他 2000 年海岸工学論文集 第 47 巻）

(i) 浮力または揚圧力

浮力または揚圧力は、間隙水や水位の変動を適切に考慮して設定するものとする。

(j) 風荷重

橋脚や桁に作用する風荷重は、架橋地点の位置、地形及び地表条件や橋の構造特性、断面形状によって大きく変動する。しかし、今次調査では、パル湾からの風による橋脚や桁に与える影響があるため、考慮するものとする。

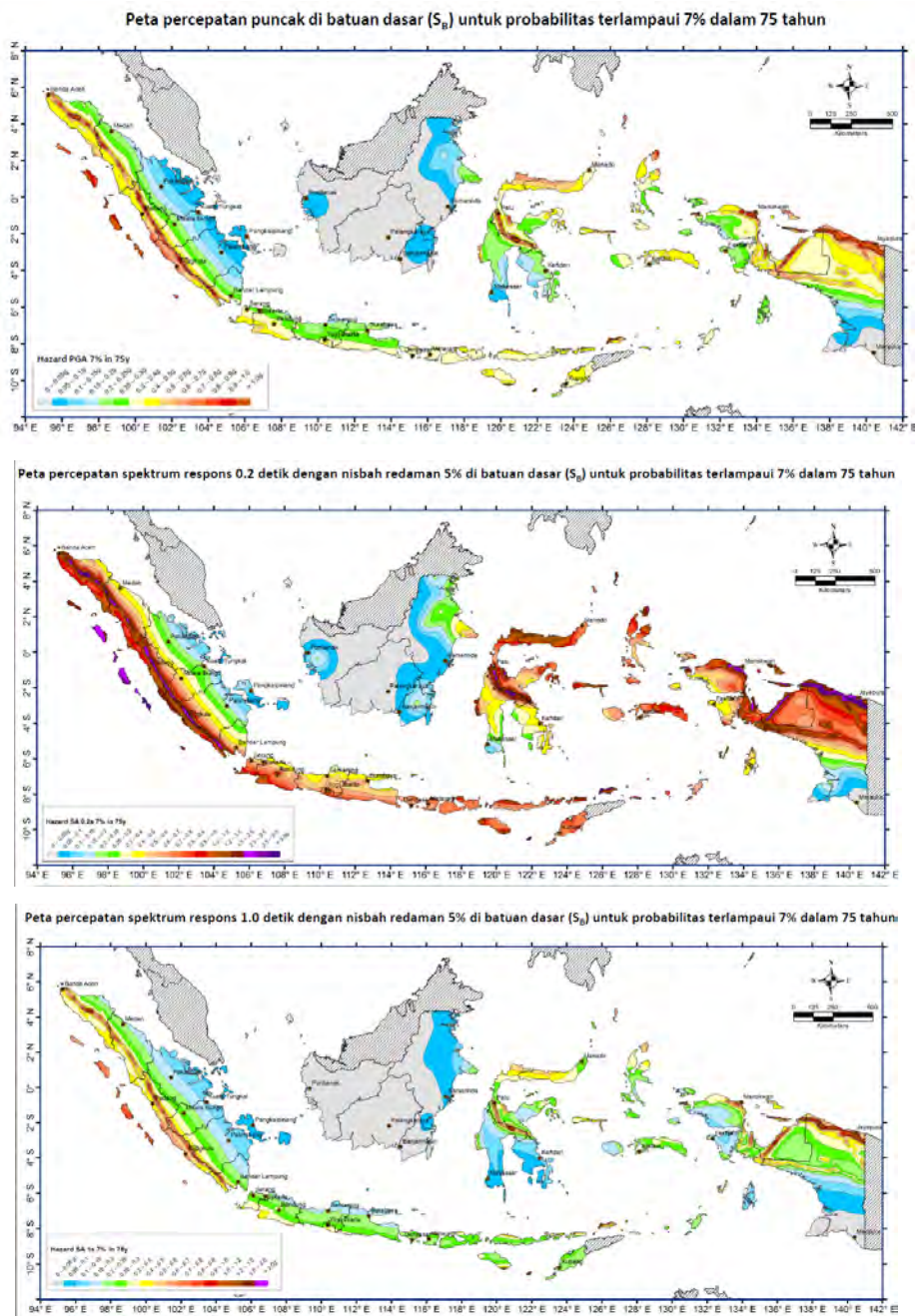


(k) 地震の影響

液状化予測を含む地震荷重は、パル第四橋周辺位置で行われている地質調査結果に基づいて道示を適用する。

さらに、橋全体の構造と各々の部材は、地震の危険分析も踏まえて SNI を適用することによって照査する。なお、スラウェシ島の地震の分布図は、図 3-2-8 に示す。また、パル湾に想定されている断層は、図 3-2-9 に示す。

地震の大きさを示す分類は、表 3-2-7 に示す。日本での地震発生頻度は、地震規模と関係しており、表 3-2-8 に示す。



出典：SNI- INDONESIA EARTHQUAKE SOURCES AND EARTHQUAKE 2017 MAP

図 3-2-8 スラウェシ島の地震発生分布図



出典：JICA 調査団

図 3-2-9 パル湾付近の断層

表 3-2-7 マグニチュードによる地震の分類

|       |                |
|-------|----------------|
| 巨大地震  | $8 \leq M$     |
| 大地震   | $7 \leq M$     |
| 中地震   | $5 \leq M < 7$ |
| 小地震   | $3 \leq M < 5$ |
| 微小地震  | $1 \leq M < 3$ |
| 極微小地震 | $1 < M$        |

出典：防災科学技術研究所

表 3-2-8 地震の規模とマグニチュードの関係

| 名称    | M  | 地震の概略(浅い地震の場合)                              | 日本周辺での発生       |
|-------|----|---|----------------|
| 大地震   | 9  | 数100～1,000kmの範囲に大きな地殻変動を生じ、広域に大災害・大津波をもたらす。 | 数百年に1回程度       |
|       |    | 内陸に起これば、広域にわたり大災害、海底に起これば大津波が発生する。          | 10年に1回程度       |
|       | 8  | 内陸の地震では大災害となる。海底地震では津波を伴う。                  | 1年に1～2回程度      |
| 中地震   | 7  | 震央付近で小被害が出る。M7に近いと、条件によっては大被害となる。           | 1年当たり、10～15回程度 |
|       | 6  | 被害が出ることは少ない。条件によっては、震央付近で被害が出る。             | 1ヶ月に10回程度      |
|       | 5  | 震央付近で有感となる。震源がごく浅いと、震央付近で軽い被害が出る。           | 1日に数10回程度      |
| 小地震   | 4  | 震央付近で有感となることがある。                            | 1日に数回程度        |
|       | 3  | 震源が、ごく浅い場合に、震央付近で、まれに有感となることがある。            | 1時間に10回程度      |
| 微小地震  | 2  | 人間に感じることはない。                                | 1分に1～2回程度      |
|       | 1  | 人間に感じることはない。                                | 無数に発生している      |
|       | 0  | 人間に感じることはない。                                |                |
| 極微小地震 | -1 | 人間に感じることはない。                                |                |

出典：防災科学技術研究所

(1) 衝突荷重

河川増水時に流木が衝突する恐れがあるため、衝突荷重は、適切に設定するものとする。算出方法は、道示を適用する。

(2) 橋梁基本計画

1) 基本方針

表 3-2-9 に示す橋梁計画に係る基本方針に基づき、橋梁計画を進める。

表 3-2-9 橋梁計画の基本方針

| 計画方針                     | 方針内容   |
|--------------------------|--|
| ① 適切な線形及び架橋位置            | 橋梁建設費は道路建設費に比べて割高となることから、原則、橋梁区間は出来るだけ短く、安全で快適な走行を可能とする路線線形・架橋位置を選定する。               |
| ② 経済性                    | 橋梁は上・下部工（基礎含む）を合わせた建設費の経済性を考慮するとともに維持管理に要するコストを加味したうえで、ライフサイクルコストに配慮した橋種及び橋梁形式を選定する。 |
| ③ 施工の確実さ<br>(安全対策に関する配慮) | 安全第一を優先として、確実な橋梁架設工法とする構造形式を選定するとともに、通行する車両及び周辺住民等、第三者の安全にも配慮した計画とする。                |
| ④ 景観性                    | 周囲の自然環境との調和に配慮する。また、既設橋の残置・撤去による景観にも配慮する。  |
| ⑤ 耐震性                    | 地震の影響を考慮し、適切な耐震設計を行う（第2メコン国際橋、ヒンフープ橋、セコン橋では地震の影響として水平係数は0.06を考慮）。                    |
| ⑥ 桁下高さへの対応               | 雨期の増水時による洪水、流木等の衝突による橋桁、橋台、橋脚への影響を考慮し、気象・水文情報収集を行い、水理・水文解析により必要な桁下余裕高、支間長、護岸対策を検討する。 |
| ⑦ 季節的な流況変化への対応           | 雨期と乾期における工程計画に配慮した橋梁形式・計画路面高の決定・架設工法を検討する。   |
| ⑧ 施工スペースの考慮              | 極力、一般車両の通行を妨げない限定的なヤードで施工できる橋梁形式、架設工法を選定する。  |
| ⑨ 輸送上の問題への対応             | 橋梁部材や架設資機材について、長さ・高さ・重量など、輸送上の制約を調査したうえで、条件に適合する橋梁形式及び架設工法を選定する。                     |
| ⑩ 交通安全に関する配慮             | 工専用道路、仮設橋梁、施工ヤードの設置において、十分な視距を確保できるよう配慮する。   |
| ⑪ 社会的（交通）弱者に対する配慮        | 社会状況調査の結果をもとに「ラ」国側と十分協議を行った上で、歩道の設置の有無および幅員構成を決定する。                                  |

出典：JICA 調査団

2) 基本計画の作業フロー

橋梁計画における基本的な考え方、作業の流れを図 3-2-10 に示す。

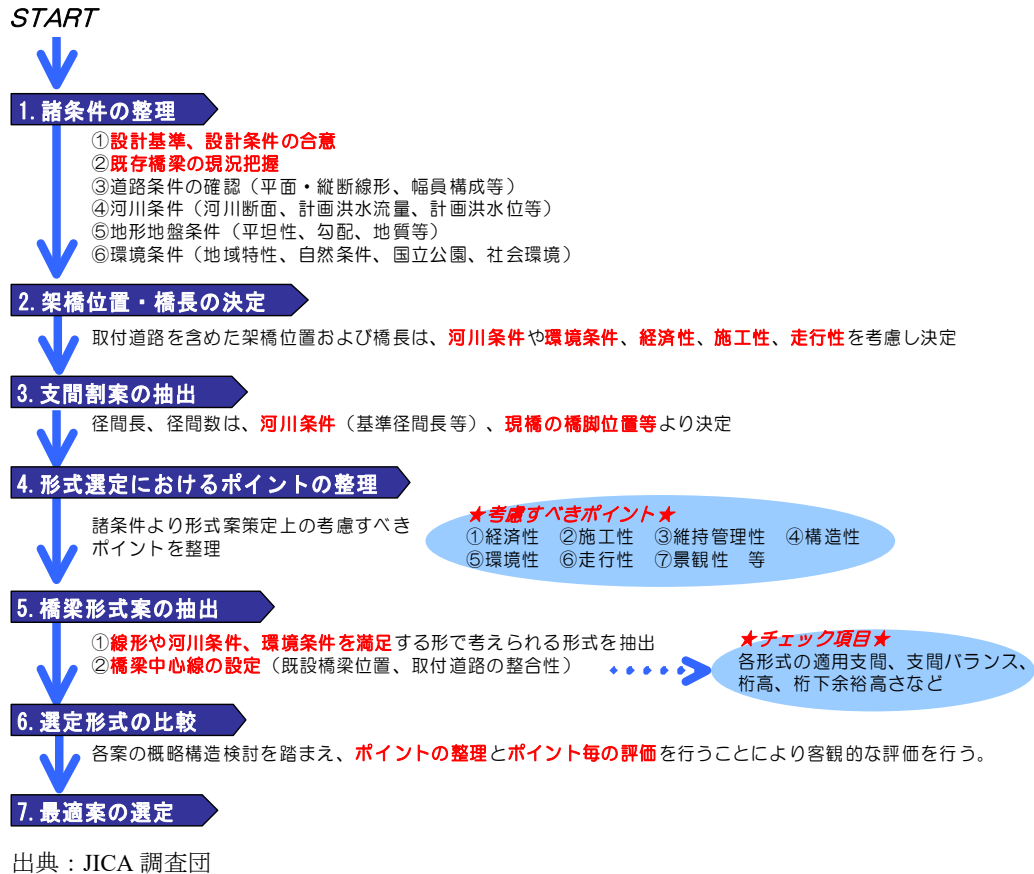


図 3-2-10 橋梁形式選定フロー

### 3) 架橋位置の選定

#### (a) 選定方針

架橋位置は、代替案を想定した上で、下記方針により総合的に判断して適切な位置を選定する。

##### 【基本事項】

- 安全で滑らかな交通流を可能とする取付け道路の線形に留意した位置
- 一般車両の通行をできるだけ妨げずに施工できるスペースを確保できる位置

##### 【当該地の特徴に留意した事項】

- パル第四橋周辺の民家・建物に立ち退き等に影響を極力与えない位置
- ZRB 区域に支障のない位置
- アプローチ道路は津波防潮堤への取り付きを考慮した位置

#### (b) 架橋位置の検討

表 3-2-2 に示すとおり第 1 案が選定されたため、当該位置にて橋梁計画を実施する。

#### (c) 橋台位置・橋長の検討

崩壊前の橋脚位置付近においては、越水記録が残っていない。このため、新たに両岸に設置される橋台位置は、以前の橋脚位置とほぼ同位置に建設することが望ましいと判断される。これにより、橋長は 260m となる。



4) 橋種・橋梁形式の検討

(a) 上部工形式と適用支間割り

前述のとおり、橋長は 260m、径間長（ここでは支間長と定義する）は 25m 以上を必要とする。橋長 260m における支間割は、モンスーン時期の河川内の流木や粗大物の影響、当該橋梁の上流に係る既設橋（パル第一橋～パル第三橋）の支間長を考慮し、40m 以上が望ましいと判断される。支間長、及び橋長を満足するケースを以下に示す。

- 3 径間： $2 \times 75.0\text{m} + 110.0\text{m} = 260.0\text{m}$ （鋼箱桁橋・鋼床版箱桁橋、PC 箱桁橋）
- 5 等径間： $5 \times 52.0\text{m} = 260.0\text{m}$ （鋼 I 桁橋・鋼箱桁橋・鋼床版箱桁橋、PC 箱桁橋）

上部工形式と適用推奨径間を表 3-2-10 に示す。

表 3-2-10 上部工形式と推奨適用径間

| 構造分類                |               | 断面形状                 | 架設工法            | 適用支間 (m) |    |    |    |                       | 桁高支間比     |
|---------------------|---------------|----------------------|-----------------|----------|----|----|----|-----------------------|-----------|
|                     |               |                      |                 | 20       | 40 | 60 | 80 | 100                   |           |
| 鋼<br>橋              | 鋼桁橋           | I桁橋                  | クレーン架設          |          | ■  |    |    |                       | 1/16～1/22 |
|                     |               | 箱桁橋                  | クレーン架設<br>送出し架設 |          |    | ■  |    |                       | 1/20～1/30 |
|                     |               | 鋼床版箱桁橋               | クレーン架設<br>送出し架設 |          |    | ■  |    |                       | 1/22～1/28 |
|                     | トラス橋          | タワークレーン等の<br>使用による架設 |                 |          |    | ■  |    | 主桁高/支間長<br>1/7.0～10.0 |           |
|                     | アーチ橋          | タワークレーン等の<br>使用による架設 |                 |          |    | ■  |    | スパンライズ比<br>1/5.3～76.3 |           |
| コン<br>クリ<br>ート<br>橋 | 場所打RC         | T桁橋                  | 固定支保工           | ■        |    |    |    |                       | 1/8～1/11  |
|                     |               | 床版橋                  | クレーン架設          | ■        |    |    |    |                       | 1/14～1/25 |
|                     | ポステン<br>(場所打) | 連結T桁橋                | クレーン架設<br>架設桁架設 |          | ■  |    |    |                       | 1/13～1/17 |
|                     | PC場所<br>打ち桁橋  | 中空床版橋                | 固定支保工           |          | ■  |    |    |                       | 1/20～1/24 |
|                     |               | 箱桁橋                  | 固定支保工<br>押し出し工法 |          | ■  |    |    |                       | 1/13～1/22 |

出典：橋梁ハンドブック

表 3-2-10 より、鋼 I 桁橋・鋼箱桁橋・鋼床版箱桁橋は、トラッククレーン架設や送出し架設が適用できる。一方、PC 橋梁は、押し出し工法や固定支保工が適用できるが、架設設備や経済性を考慮すると、張り出し架設工法が適切である。

(b) 適用支間割りの比較

前述のとおり、当該橋梁への適用支間割は、3 径間と 5 径間が想定されている。適用支間割の比較を表 3-2-11 に示す。

表 3-2-11 支間割りの比較

| 項目／案名              |        | 比較案 1：3 径間   | 比較案 2：5 径間  |
|--------------------|--------|--|---|
| 支間長 (m)            |        | 75.0、110.0、75.0  | 5×52.0  |
| 想定桁<br>高さ (m)      | 鋼 I 桁* | —  | 3.0 (1/17)  |
|                    | 鋼箱桁*   | —  | —   |
|                    | PC 箱桁* | 3.0 (1/25)、6.1 (1/18)、3.0  | 3.5 (1/15)  |
| 橋脚数 (本)            |        | 2  | 4   |
| 道路縦断線形への影響         |        | PC 桁は桁高が高いため、鋼桁に比べて<br>アプローチ部の道路延長が長くなる。<br>△                      | 鋼桁は PC 桁に比べてアプローチ部の道<br>路延長が短くなる。<br>○  |
| 橋梁下部工への影響/<br>施工工期 |        | 橋脚数は少ないが、上部構造重量が増加<br>する分、規模が大きくなるが、橋脚数が<br>少ないため、施工期間が短縮される。<br>○ | 橋脚数は 4 本と多いが、上部工構造が 3<br>径間案より軽くなるため、下部工への影<br>響が少ない。しかし、橋脚数が多いため、<br>施工期間が 3 径間案より長くなる。<br>△ |
| 全体工費               |        | 5 等径間案とほぼ同額である。<br>○   | 3 径間案とほぼ同額である。<br>○   |
| 評 価                |        | ○  | ○   |

○:最適 △:適切 ×:不適切

\*: 鋼 I 桁橋の桁高支間比、PC 箱桁の桁高支間比

出典：JICA 調査団

比較の結果、3 径間及び 5 径間ともに優位性が高いため、橋梁形式を含めて総合的に決定することとし、以下に検討結果を示す。

#### (c) 橋梁形式の抽出

適用支間長に対して優位となる橋梁形式を表 3-2-10 を参考に抽出する。

第 1 案：3 径間連続 PC 箱桁橋 (75m+110m+75m=260m)

第 2 案：5 径間連続 PC 箱桁橋 (5×52m=260m)

第 3 案：5 径間連続鋼 I 桁橋 (5×52 m=260m)

#### (d) 橋梁形式の比較

抽出された橋梁形式に基づいて比較を行うものとし、表 3-2-12 に比較結果を示す。

比較の結果、以下の優位性から第 1 案・3 径間連続 PC 箱桁橋 (変断面) を採用した。

- 間口を広げた中央支間、そして変化のある桁下曲線など、周辺の景観やシンボリック性に富む橋梁形式であること
- アプローチ道路の施工に関係なく、上部工の施工が単独にできる橋梁形式であること
- 維持管理費が最も安い橋梁形式であること
- 本邦技術を取り入れることが可能な橋梁形式であること

表 3-2-12 橋梁形式比較表

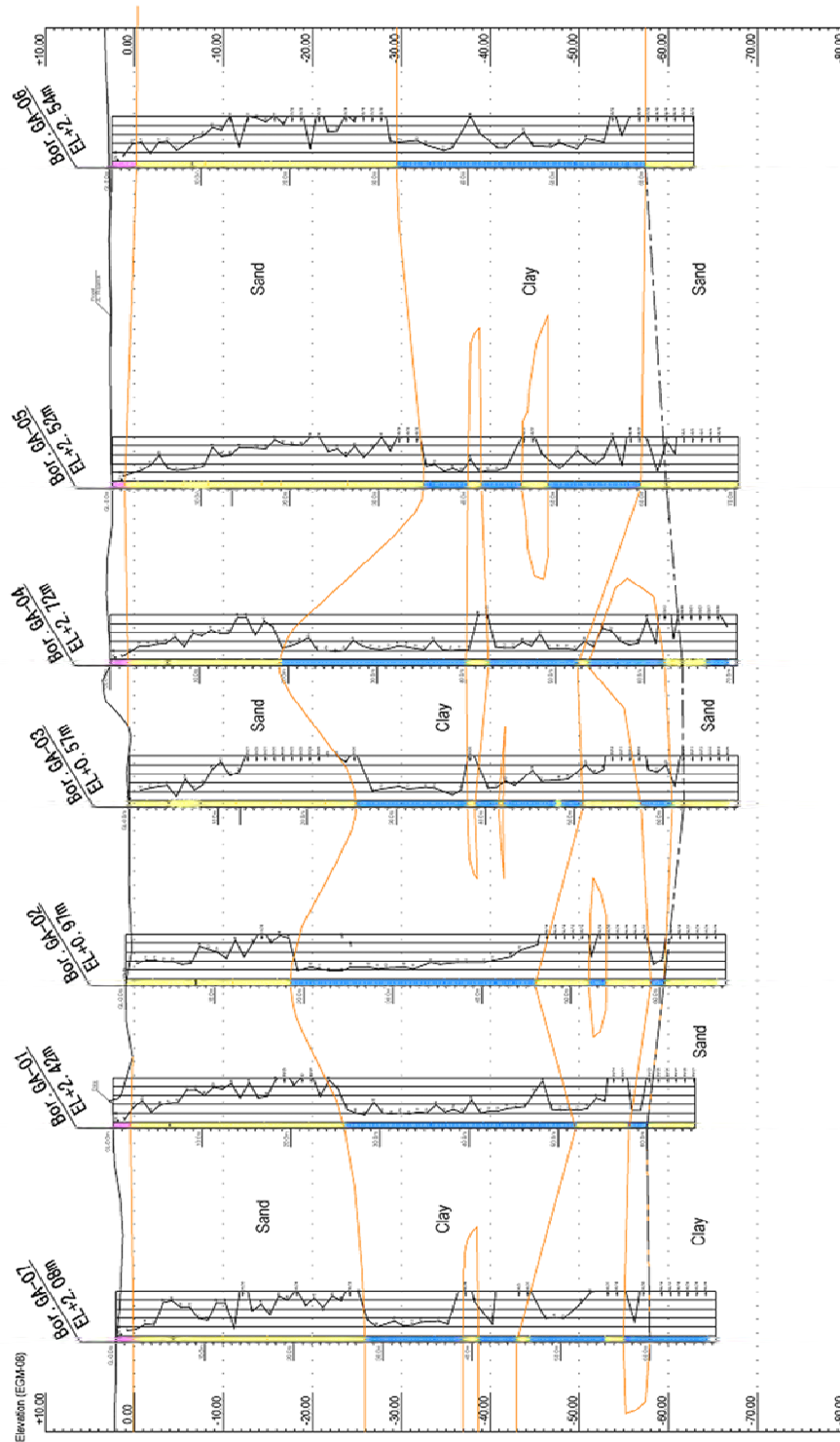
|  | Side View | Cross Section | Image | Cost   | Recommendation   |
|--|-----------|---------------|-------|--|--|
| Alternative-1<br>PC-Box Girder<br>(Balanced Cantilever Method) |           |               |       | 1). Total<br>- 321 bil. Rp<br>- 2.5 bil. JPY<br>2). Superstructure<br>- 154 Rp<br>- 62 Rp<br>4). Others<br>- 65 Rp<br>5). Consultant(DD,CS)<br>- 40Rp<br><b>Recommendation</b> | The number of piers in the Palu River is the fewest among alternatives. From the viewpoints of river inhibition, Alt-1 is the most advantageous among alternatives.<br><b>Recommendation</b> |
| Alternative-2<br>PC-Box Girder<br>(Launching Girder Method)    |           |               |       | 1). Total<br>- 290 bil. Rp<br>- 2.3 bil. JPY<br>2). Superstructure<br>- 110 Rp<br>3). Substructure<br>- 80 Rp<br>4). Others<br>- 64 Rp<br>5). Consultant(DD,CS)<br>- 36Rp      | From the viewpoints of river inhibition, it is inferior to Alt-1 because 4 piers will be constructed in the river.   |
| Alternative-3<br>Steel-I Girder<br>(Launching Girder Method)   |           |               |       | 1). Total<br>- 311 bil. Rp<br>- 2.4 bil. JPY<br>2). Superstructure<br>- 130 Rp<br>3). Substructure<br>- 78 Rp<br>4). Others<br>- 65 Rp<br>5). Consultant(DD,CS)<br>- 39Rp      | Ditto  |

出典：JICA 調査団

5) 下部工及び基礎形式の検討

(a) 支持層深さ

地質調査によって得られた N 値を図 3-2-11 に示す。地質調査の結果、支持層は GL-60m 付近の位置にある。



出典：JICA 調査団

図 3-2-11 ボーリング柱状図



(b) 基礎工形式の選定

地質調査結果を踏まえ、十分な支持層へ設置するために、深い基礎形式を選定する必要がある。深い基礎形式として、杭基礎、鋼管矢板井筒基礎、ケーソン基礎が想定されることから、これら3形式において比較を行う。いずれも日本の技術移転が可能な形式である。

表 3-2-13 基礎形式比較表

| Item / Alternatives | Alternative-1: Cast-in-place RC Pile<br>(D=1.8m) | Alternative-2: Steel Pipe Sheet Pile<br>(D=1.2m) | Alternative-3: Open Caisson |
|---------------------|--|--|-----------------------------|
| Schematic View      |  |  |                             |
|                     | 4x4=16 Nos, L=58.5m                              | 40 Nos, L=62.50m+7.00m=69.50m                    | L=62.50m                    |
| Construction Cost   | Ratio = 1.00 ◎                                   | Ratio = 1.76 △                                   | Ratio = 1.91 ×              |
| Construction Period | 44 days ◎  | 223 days △                                       | 409 days ×                  |
| Evaluation          | Recommended                                      | -  | -                           |

◎: Excellent, ○ Good, × Poor

出典: JICA 調査団

基礎形式比較の結果、経済性と工期的に最も有利となる杭基礎を選定した。当該橋梁形式は、PC箱桁を採用しており、中央径間が110mで計画されているため、下部工への作用荷重が大きい。よって、杭基礎は、高耐力を有する現地で施工が可能な場所打ち杭(φ1500、φ1800、φ2000)、及び鋼管杭(φ1000、φ1200、φ1500)を選定し、比較検討を行った。

杭種・杭径比較の結果、基礎形式同様に経済性と工期的に最も優れる場所打ち杭φ1800を選定した。それぞれの比較結果を表3-2-13及び表3-2-14に示す。

表 3-2-14 杭種・杭径比較表

| Item / Alternatives | Alternative 1: Cast-in-Place Concrete Pile ( φ1500 ) | Alternative 2: Cast-in-Place Concrete Pile ( φ1800 ) | Alternative 3: Cast-in-Place Concrete Pile ( φ2000 ) |
|---------------------|--|--|--|
| Schematic View      |  |  |  |
|                     | 6x5=30 Nos, L=58.50m                                 | 4x4=16 Nos, L=58.50m                                 | 4x4=16 Nos, L=58.50m                                 |
| Construction Cost   | Ratio = 1.34 ×                                       | Ratio = 1.00 ◎                                       | Ratio = 1.23 △                                       |
| Construction Period | 69 days △  | 44 days ◎  | 48 days ◎  |
| <b>Evaluation</b>   | —  | <b>Recommended</b>                                   | —  |

◎: Excellent, ○Good, △Moderate, × Poor

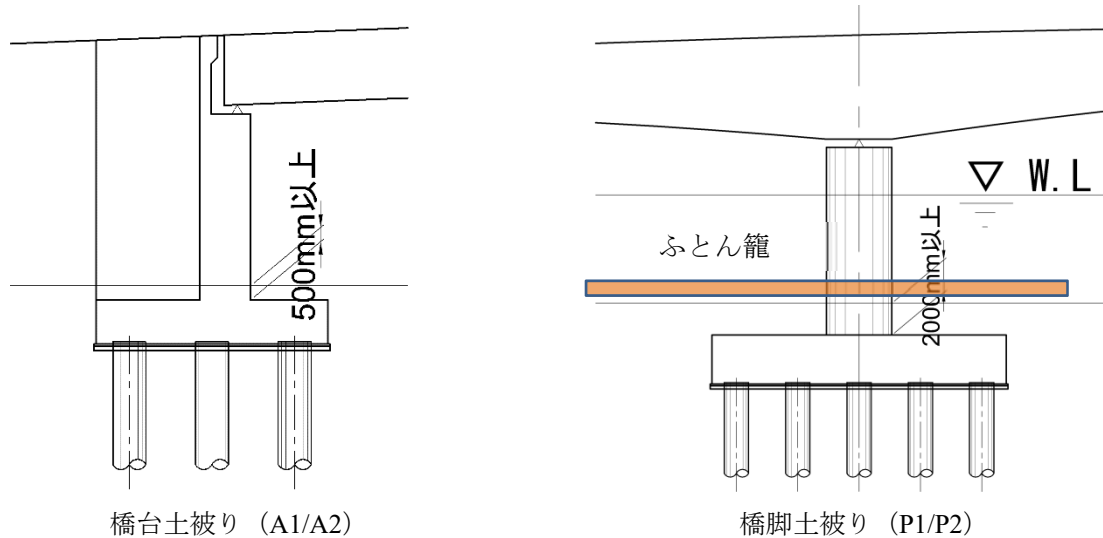
| Item / Alternatives | Alternative 4: Steel Pile ( φ1000 ) | Alternative 5: Steel Pile ( φ1200 ) | Alternative 6: Steel Pile ( φ1500 ) |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Schematic View      |                                     |                                     |                                     |
|                     | 7x7=49 Nos, L=58.00m                | 6x5=26 Nos, L=58.50m                | 4x4=16 Nos, L=58.50m                |
| Construction Cost   | Ratio = 1.24 △                      | Ratio = 1.05 ○                      | Ratio = 1.07 ○                      |
| Construction Period | 114 days ×                          | 73 days ○                           | 56 days ○                           |
| <b>Evaluation</b>   | —                                   | —                                   | —                                   |

◎: Excellent, ○Good, △Moderate, × Poor

出典: JICA 調査団

(c) 橋台・橋脚のフーチング設置面

橋台・橋脚のフーチング設置面は、地形測量の調査結果を基に河床面の将来計画も踏まえて設置する。A1 橋台、P1 橋脚、P2 橋脚、A2 橋台のフーチング設置面を図 3-2-12 に示す。



出典：JICA 調査団

図 3-2-12 下部工フーチング設置高さ

- A1 橋台： 橋台高さが 14.0m 程度となり、逆 T 式橋台が適用可能である。フーチング上面の根入れは、計画地表面から 0.5m 下げた位置とする。
- P1 橋脚： フーチング上面の根入れは、河床面の洗掘の影響を考慮して、計画河床面から 2.0m 下げた位置とし、ふとん籠で保護する。
- P2 橋脚： フーチング上面の根入れは、河床面の洗掘の影響を考慮して、計画河床面から 2.0m 下げた位置とし、ふとん籠で保護する。
- A2 橋台： 橋台高さは 13.0m 程度となり、逆 T 式橋台が適用可能である。フーチング上面の根入れは、計画地表面から 0.5m 下げた位置とする。

(d) 下部工形式の選定

下部工形式は、表 3-2-15、及び表 3-2-16 に示す下部工形式選定表を参考に設定する。橋台形式については、橋台高さが 10.0～15.0m の間にあるため、逆 T 式橋台を選定する。橋脚形式については、いずれの橋脚も河川内に位置するため、流水への影響が少ない小判型橋脚を選定する。

表 3-2-15 橋台形式の選定

| 橋台形式                 | 高さ (m)                                   |    |    | 備考 |
|----------------------|--|----|----|----|
|                      | 10                                       | 20 | 30 |    |
| 逆 T 式<br>(土圧軽減工法の場合) | 6<br>-----<br> <br>15<br> <br>(  ----- ) |    |    |    |
| ラーメン                 | 15<br>-----<br>                          |    |    |    |
| 箱式                   | 15<br>-----<br>                          |    |    |    |
| 盛りこぼし<br>h<br>H      | 5 7<br>-----<br> <br>-----<br>H          |    |    |    |

出典：国土交通省

表 3-2-16 橋脚形式の選定

| 橋脚形式          | 高さ (m)    |           |    | 備考       |
|---------------|-----------|-----------|----|----------|
|               | 10        | 20        | 30 |          |
| 柱式<br>壁式      |           |           |    | 中空式を含む   |
| ラーメン式<br>(一層) | -----<br> |           |    |          |
| ラーメン式<br>(二層) |           | -----<br> |    |          |
| 二柱式           | -----<br> | -----<br> |    | RC版桁橋の場合 |

出典：国土交通省

### (3) 橋梁デザイン計画

落橋したパル第四橋は、パル市のシンボルとして地域住民から親しまれていた。被災後、地域のシンボルを失ったうえ、パル第三橋及びパル第一橋への迂回を強いられ、物流等に大きな影響を与えている。係る状況の下、「イ」国より復興のシンボルとして景観に配慮した橋梁デザインを計画されたい旨要望を受け、無償資金協力として実施される本事業の性格を鑑み、表 3-2-17 に示す 4 案について、日本側の関係機関にて協議が行われた。



- 第1案 (Alternative 1) : コンクリート構造物の持つ圧迫感を軽減し、自然環境との調和を図ることを目的として“化粧型枠”を提案する。
- 第2案 (Alternative 2) : 橋梁空間のランドマーク性を向上させるため、シンボリックな親柱(像)を設置することを提案する。
- 第3案 (Alternative 3) : 景観を楽しむための歩道だまり、かつデザイン性を考慮した構造とすることによるデザイン性の向上を目的としてバルコニーの設置を提案する。
- 第4案 (Alternative 4) : 「イ」国、特に首都であるジャカルタで多数採用されているライトアップにより、当該橋梁を夜間に美しく浮かび上がらせることを目的に提案する。

表 3-2-17 橋梁デザインの選定

| Alternative 1: Retaining Wall for Approach Road   | Alternative 3: Balcony  |
|---|---|
| <p>Image:</p>  <p>一般型枠 : 約2,000万円、化粧型枠 : 約5,000万円</p> | <p>Image:</p>  <p>4箇所設置 : 約1,200万円</p>   |
| Alternative 2: Statue   | Alternative 4: Light Up   |
| <p>Image:</p>  <p>4箇所設置 : 約1,600万円</p>               | <p>Image:</p>  <p>Bridge in Sumatra      Bridge in Jakarta</p> <p>ライトアップ・建設費 : 約14,000万円<br/>【参考】ライトアップ・電気代 : 約2万1000円/夜 (東京タワーの場合)</p> |

出典 : JICA 調査団

協議の結果、第3案で提案したバルコニーの設置を日本側採用案とすることで合意し、「イ」国に提案及び協儀を行う。









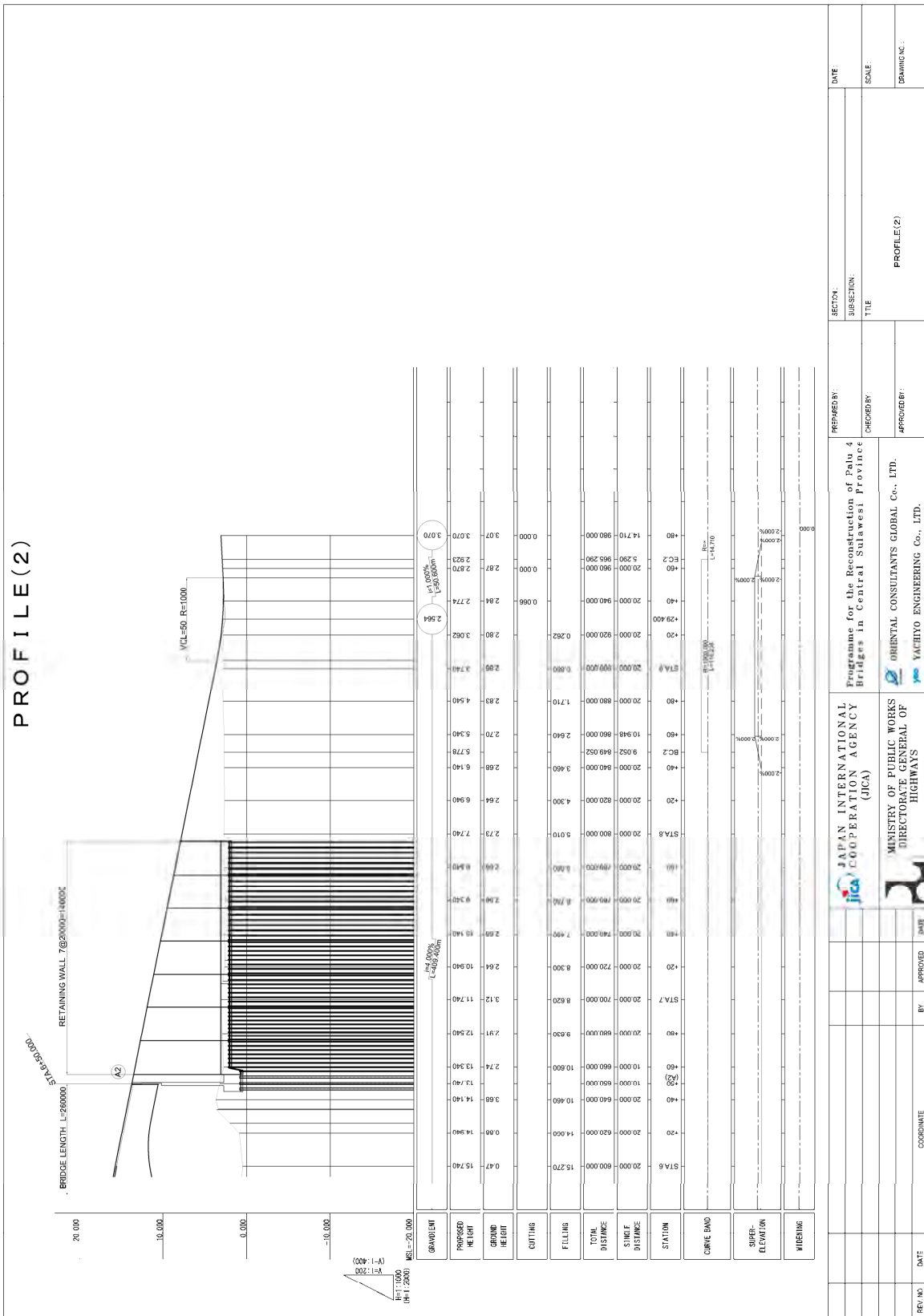


図 3-2-16 縦断面 (2)









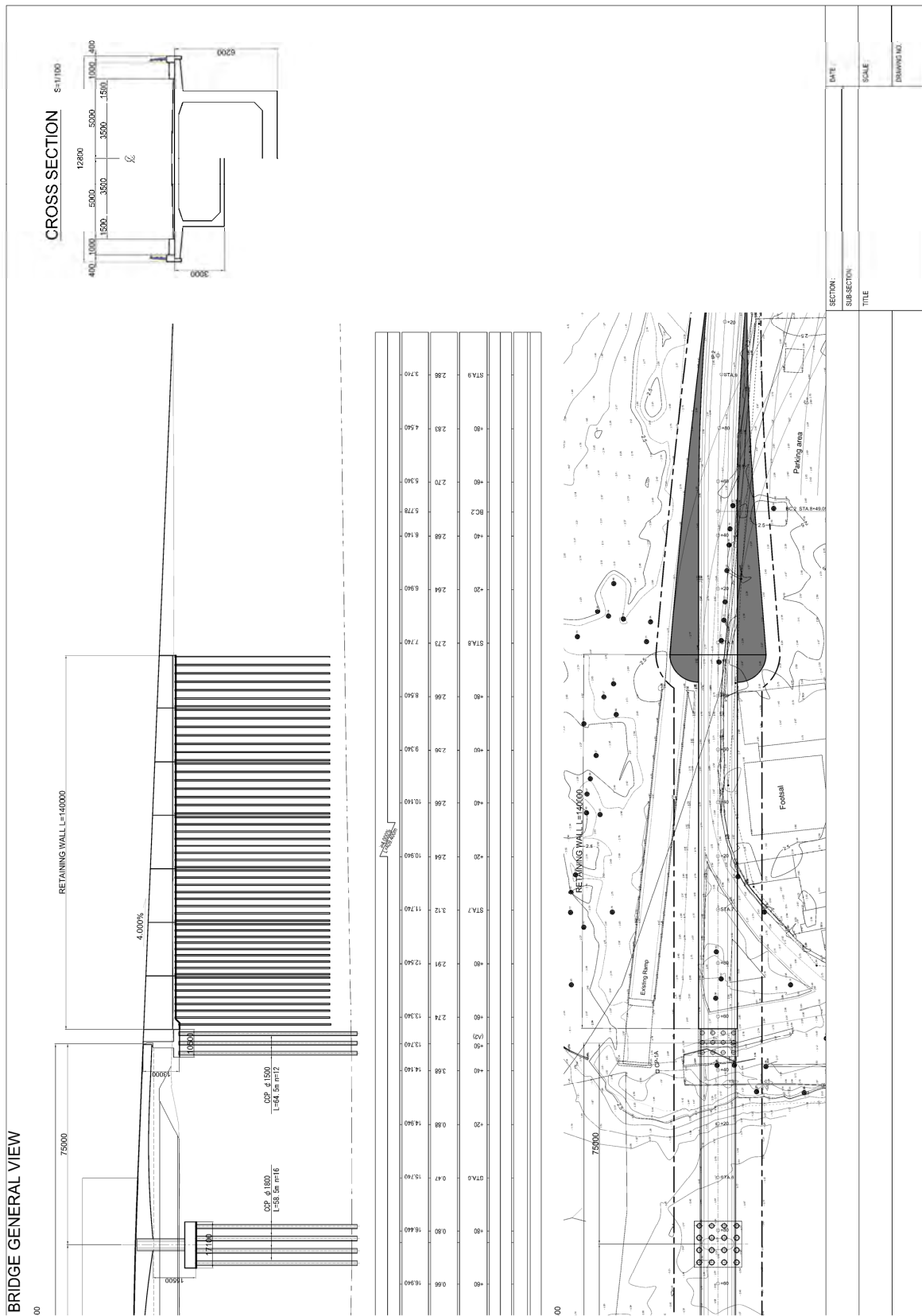


図 3-2-20 橋梁一般図 (2)

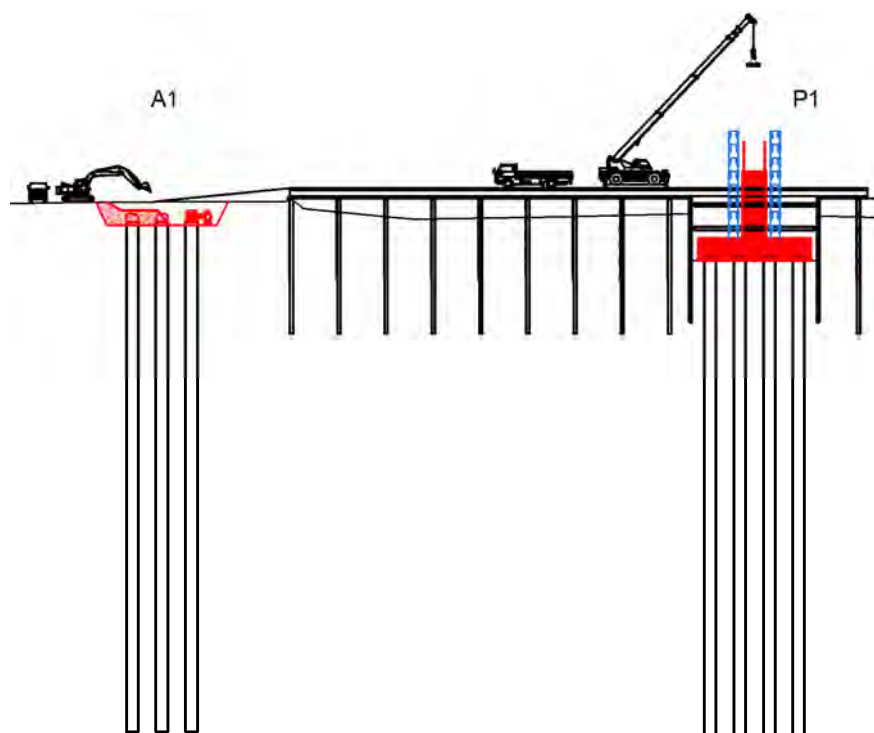
### 3-2-4 施工計画

#### 3-2-4-1 施工方針

パル第四橋は、パル川河口部の潮位の影響を大きく受ける区域であり、干満差が約 2.8m (水深 0.5m ~3.3m) の水上施工となる。橋梁工事の施工方針を以下に記載する。

##### (1) 橋梁下部工 (橋台・橋脚工事)

橋台工事は、陸上工事となるため、自立式土留め工あるいは素掘り掘削での一般的な構造物工事となる。橋脚工事は水上施工となり、杭基礎・躯体工事において栈橋施工とする。なお、橋脚の土留め工は水中部となり、1日の干満差 2.8m の水位の影響を考慮する必要がある。

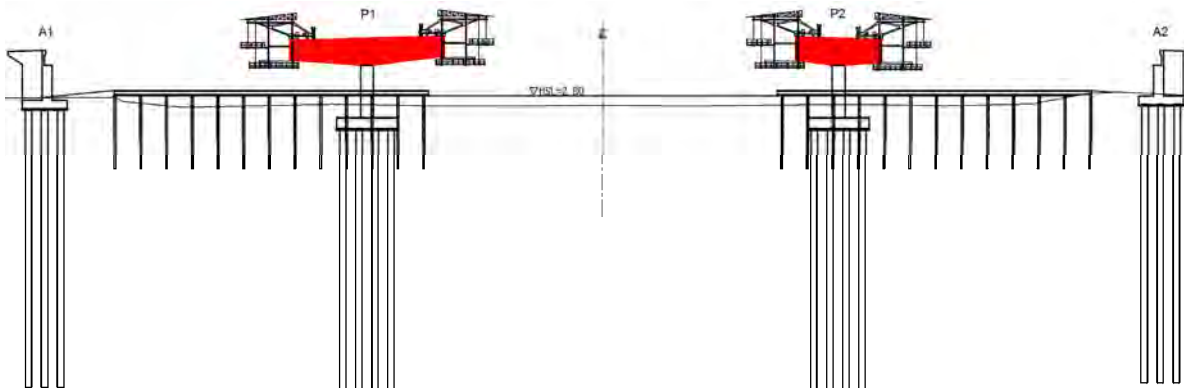


出典：JICA 調査団

図 3-2-21 橋台・橋脚施工部

##### (2) 橋梁上部工 (3 径間連続 PC 箱桁橋 (変断面))

橋梁上部工は、水上部となるため構台を構築しての支保工施工は不経済であり、かつ施工期間が長くなることから、P1・P2 橋脚を利用して張出し施工を採用することが有利となる。資材の供給は工事用栈橋を使用する。



出典：JICA 調査団

図 3-2-22 上部工施工図

### 3-2-4-2 施工上の留意事項

#### (1) 施工工期

「イ」国政府から早期の工事完成を求められているため、右岸及び左岸から同時に施工を行う必要がある。施工工期については、図 3-2-23 に示すとおり現時点において 20 ヶ月と想定している。但し、地質調査が完了していない現時点における想定のため、詳細設計において変更される可能性がある。

| 項目      | 月   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |  |  |
|---------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|
| 準備工・仮橋工 | 4.0 | ■ |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |  |
| 基礎工・下部工 | 6.0 |   |   |   | ■ |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |  |
| 上部工     | 8.0 |   |   |   |   |   |   |   | ■ |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |  |
| 橋面工・片付工 | 4.0 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | ■  |    |    |  |  |

出典：JICA 調査団

図 3-2-23 施工工期

#### (2) 水上施工

橋脚工事の土留め工は、施工箇所がパル川の河口部のため、潮位の影響を受け水深が 0.5m～3.3m に変化することに留意する必要がある。

#### (3) アプローチ道路部

アプローチ道路部は、盛土高が 0m～11m となり、比較的軟弱な地盤であることが想定される。地質調査完了後、結果に応じて基礎構造の沈下対策等を検討する。

#### (4) 施工箇所の特性

施工箇所はスラウェシ島であり、大型特殊建設機械はジャワ島もしくは第三国からの調達が必要であり、輸送に係る施工工期への影響に留意する必要がある。また、一般作業員はスラウェシ島での確保が可能であるが、特殊技能工はジャワ島もしくは第三国からの調達となる。

#### 3-2-4-3 施工区分

本プロジェクトを、日本の無償資金協力で実施する場合、日本側と「イ」国側の施工に関する事業負担区分は以下のとおりである。

##### (1) 日本側負担分

- ① 日本あるいは第三国からの荷揚港までの資機材輸送
- ② 「イ」国荷揚港あるいは資機材調達先からサイトまでの陸送
- ③ 設計図に示される崩壊斜面对策工、道路復旧工の建設
- ④ 建設工事に伴う作業基地、作業場、キャンプの建設と撤去
- ⑤ 建設工事に必要な資機材、労務の調達
- ⑥ 建設工事に必要な工事管理業務
- ⑦ 事業実施に必要なコンサルタント業務

##### (2) 「イ」国側負担分

- ① 本プロジェクト実施に伴う必要な用地の取得・補償、用地内公共施設・障害物の移設手続及び移設工事
- ② 施設設置に係る関係機関との調整、許認可。特に、DHR との合意
- ③ 銀行取り決めに基づく、日本の銀行に対する A/P 通知、手数料の支払い
- ④ 港で荷揚げされる製品の関税の免除及び通関手数料の免除
- ⑤ 認証契約の枠内で調達される製品及び役務に課される関税、国内税、付加価値税の支払いを日本人に対して免除すること
- ⑥ サイト近傍までの電気、水道、排水、その他施設移設。設置に係る関係機関との調整、許認可、照明・信号施設への電源供給など
- ⑦ 日本側改修区間以外の維持管理区間の道路保全
- ⑧ 日本側建設工事完了後、必要に応じて既存道路の改修工事
- ⑨ 本無償資金協力で建設される施設の適切な使用と維持管理
- ⑩ 本無償資金協力で賄われる経費以外の施設建設に必要な経費を負担

#### 3-2-4-4 施工監理計画

本プロジェクトの実施にあたっては、まず日本及び「イ」国両政府間で、本プロジェクトの無償資金協力に係る交換公文 (E/N)、JICA と「イ」国政府間で贈与契約 (G/A) の締結が行われ、これらの締結後、コンサルタントは JICA より発出される推薦状をもとに、「イ」国の実施機関である “Ministry of Public Works and Housing (以下、PU)” と実施設計、入札補助業務及び施工監理に係るコンサルタント業務契約を結ぶ。コンサルタント契約に含まれる内容は以下のとおりである。



### (1) 入札図書の作成

本調査報告書の結果に基づき、入札契約図書の作成を行い PU の承認を得る。入札契約に含まれる内容は以下のとおりである。

- 設計図・数量
- 入札指示書、工事契約書（案）、技術仕様書

### (2) 工事入札補助の実施

コンサルタントは、PU が実施する工事入札を補佐する。入札補助の業務内容は以下のとおりである。

- 入札公示
- 事前資格審査
- 入札評価
- 契約交渉

### (3) 施工監理

JICA による工事契約の認証を受け、コンサルタントは工事業者に対し、工事着工命令の発行を行い、施工監理業務に着手する。施工監理業務では、工事進捗状況を PU、現地日本大使館等に直接報告するとともに、施工業者には作業進捗状況、品質、安全、支払いに係る事務行為及び技術的に工事に関する改善策の提案などの業務を行う。

また、必要に応じて JICA、現地日本大使館及び「イ」国政府との調整・協議を行う。主な業務内容は表 3-2-18 のとおりである。

**表 3-2-18 施工監理計画（案）**

| 整理項目         | 業務内容  |
|--------------|---|
| ① 施工計画・施工図承認 | 施工業者より提出される施工計画書、工程表、施工図が契約書、契約図面、仕様書等に適合しているか否かを照査して承認する。                      |
| ② 工程監理       | 施工業者より工事の進捗状況の報告を受け、工期内に工事が完了するように必要な指示を出す。                                     |
| ③ 品質監理       | 工事材料や施工の品質が契約図面や仕様書に適合しているか否かを検査して承認を与える。                                       |
| ④ 出来高監理      | 完成断面や平面形状等を検査し、出来形が監理基準を満足しているかのチェックを行うと同時に、数量の確認を行う。                           |
| ⑤ 証明書の発行     | 施工業者の支払い、工事の完了、瑕疵担保期間の終了等に際して、必要な証明書を発行する。                                      |
| ⑥ 報告書の提出     | 施工業者が作成する工事月報、完成図面、完成写真等を検査し、インド国政府側と JICA に提出する。また、工事完了後に完了報告書を作成し、JICA に提出する。 |

出典：JICA 調査団

#### 3-2-4-5 品質管理計画

品質管理を実施するに当たっては、プロジェクトで作成する仕様書に基づき実施する。仕様書は AASHTO 又は我が国の基準、試験方法に準拠する。品質管理計画（案）を表 3-2-19、出来形管理計画（案）を表 3-2-20 に示す。

表 3-2-19 品質管理計画（案）

| 工事                        | 対象項目                            | 検査、監理試験等  | 検査、試験頻度                             |
|---------------------------|---------------------------------|---|-------------------------------------|
| 土工、アスファルト舗装工、路体、路床、構造物埋戻し | 材料管理                            | CBR 試験、土質試験（比重、粒度、含水量、液性・塑性限界、密度）、滑材試験（比重、粒度、強度、吸水率）、瀝青材（品質証明書、成分分析表） | 施工前                                 |
|                           | 日常管理                            | 締固め密度試験、含水比、瀝青材（安定度、フロー値、空隙率、マーシャル試験、温度）                              | 施工直後<br>施工箇所一層毎一日一回                 |
| コンクリート工                   | バッチャープラント                       | 計量機器、練り混ぜ性能、静荷重検査、計量制御装置、動荷重検査、練り混ぜ性能                                 | 施工前、毎月（載荷重は3ヶ月毎）                    |
|                           | 材料                              | セメント、水、規格証明により検査を行う。細骨材、粗骨材試験・粒度・比重・吸水率・単位重量・耐久性・アルカリ骨材反応、            | 施工前及び使用材料変更時                        |
|                           | コンクリート基準試験                      | 試験練りを実施し配合を決定する。スランプ・空気量・温度・試験体強度                                     | 施工前                                 |
|                           | 日常管理                            | フレッシュコンクリート：空気量・スランプ・温度   | 最初の連続5台、以降50m <sup>3</sup> 毎、供試体作成時 |
|                           |                                 | コンクリート打設：打設方法・締固め・打継位置・養生方法・レイタンス処理                                   | 打設時立会検査                             |
|                           | コンクリート供試体：供試体圧縮強度試験。コンクリート管理図作成 | 1日1回供試体作製、打設後7日及び28日  |                                     |
| 鉄筋 PC 鋼材                  | 材料                              | 鉄筋、PC 鋼材は製造工場のミルシートにより確認。品質・引張強度・曲げ試験                                 | 施工前                                 |
|                           | 設置検査<br>日常管理                    | 組み上がったものに対して以下について検査を実施。材料サイズ・寸法・配置・ラップ長・かぶり・固定状況・打継目処理状況             | コンクリート施工前：打設範囲ごとに全数検査               |
| PC 鋼材緊張                   | コンクリート強度確認                      | ● コンクリートの供試体圧縮強度  | 緊張前                                 |
|                           | 緊張装置                            | ● ジャッキ、ポンプのキャリブレーション  | 緊張前。50本のケーブル緊張毎、緊張装置の組合せ変更時         |
|                           | 試験緊張                            | ● 緊張管理図による  | 本緊張前                                |
|                           | 緊張管理                            | ● ケーブル1本毎の管理<br>● ケーブルのグループによる管理<br>● 横締め鋼材の管理                        | 緊張時<br>緊張管理図                        |
| PC グラウト                   | 配合設計                            | コンシステンシー・ブリージング率・膨張率・強度・塩分総量  | 使用前                                 |
|                           | 日常管理                            | コンシステンシー・温度   | 1日1回、5バッチ毎                          |
|                           |                                 | ブリージング率・膨張率・圧縮強度  | 1日1回                                |

出典：JICA 調査団

表 3-2-20 出来形管理計画（案）

| 工事 | 工種       | 項目     | 基準値              | 備考        |
|----|----------|--------|------------------|-----------|
| 土工 | 路体       | 計画高    | 5cm              | 40m 間隔    |
|    |          | 幅員     | -10cm 以上         | 〃         |
|    | 路盤       | 計画高    | ±4cm（±2.5cm）以上   | 〃         |
|    |          | 仕上がり厚さ | -4.5cm（-2.5cm）以上 | 〃         |
|    |          | 幅員     | -5cm 以上          | 〃         |
| 舗装 | アスファルト舗装 | 幅員     | ±4cm 以上          | 〃         |
|    |          | 厚さ     | -1.5cm 以上        | 〃 10個の平均値 |

| 工事             | 工種                  | 項目     | 基準値               | 備考    |
|----------------|---------------------|--------|-------------------|-------|
| 基礎工            | 切込砂利、碎石、割栗石、均コンクリート | 幅      | 設計値以上             |       |
|                |                     | 厚さ     | -30mm             |       |
|                |                     | 延長     | 各構造物による           |       |
|                | H鋼、鋼管               | 基準高    | ±50mm             |       |
|                |                     | 根入長    | 設計値以上             |       |
|                |                     | 偏心量    | D/4 以内且つ 100mm 以内 |       |
|                |                     | 傾斜     | 1/100 以内          |       |
| 鉄筋工            | 組立                  | 平均間隔   | ±Φ                | Φ：鉄筋径 |
|                |                     | かぶり    | ±Φ 且つ 最少かぶり以上     | Φ：鉄筋径 |
| コンクリート構造物（擁壁工） | 基準高                 | ±50mm  | 40m/1ヶ所毎          |       |
|                | 厚さ                  | -20mm  | 40m/1ヶ所毎          |       |
|                | 幅                   | -30mm  | 40m/1ヶ所毎          |       |
|                | 高さ                  | -50mm  | 40m/1ヶ所毎          |       |
|                | 延長                  | -200mm | 40m/1 施工箇所毎       |       |

出典：JICA 調査団

### 3-2-4-6 資機材等調達計画

#### (1) 工事用資材

PC ケーブルについては、日本もしくは第三国からの輸入となるが、その他のコンクリート、アスファルト材料等は「イ」国内での調達が可能である。表 3-2-21 に主要材料調達先リストを示す。

表 3-2-21 主要資材調達先リスト

| 建設資材名        | 現地調達 | 日本調達 | 第三国調達 | 摘要     |
|--------------|------|------|-------|--------|
| 鋼材           | ○    |      |       |        |
| PC 鋼材        | ○    | ○    |       |        |
| 鉄筋 (D13~D32) | ○    |      |       |        |
| 鉄筋 (D36~D50) | △    | ○    |       | 現地では特注 |
| H形鋼          | ○    |      |       |        |
| セメント         | ○    |      |       |        |
| アスファルトコンクリート | ○    |      |       |        |
| 生コンクリート      | ○    |      |       |        |
| 碎石・砂         | ○    |      |       |        |
| 型枠材          | ○    |      |       |        |
| 鋼製型枠         | ○    |      |       |        |
| 支保工・足場工材     | ○    |      |       |        |
| ヒューム管        | ○    |      |       |        |

出典：JICA 調査団

#### 1) コンクリート

パル川河口から北東約 50km の箇所に生コンクリート工場“PT.UTAMA BETON 社”があり、コンクリートの供給が可能である。

2) 瀝青材・舗装用合材

パル市周辺では、“PT.Asbuton Jaya Abadi 社” からアスファルト合材の供給が可能であり、舗装工事に支障をきたさない。

3) 鋼製品

H 形鋼など、各種鋼材は主にジャカルタからの調達となるが、供給に問題はない。

4) 骨材

パル川河口から北西 15km の箇所に “PT.Watu Merida Jaya 社” などの採石場が複数あり、骨材の供給に問題はない。

5) 資材調達先位置図

資材調達先の位置を図 3-2-24 に示す。



出典：JICA 調査団

図 3-2-24 資材調達先位置図

(2) 工事用機械

本事業における汎用機械については、「イ」国国内での現地調達を基本とする。表 3-2-22 に主要機材の調達先リストを示す。

表 3-2-22 主要機材調達先リスト

| 建設機械名        | 現地調達 | 日本調達 | 第三国調達 | 摘要 |
|--------------|------|------|-------|----|
| ダンプトラック      | ○    |      |       |    |
| バックホウ        | ○    |      |       |    |
| ブルドーザ        | ○    |      |       |    |
| トラッククレーン     | ○    |      |       |    |
| アスファルトフィニッシャ | ○    |      |       |    |



| 建設機械名              | 現地調達 | 日本調達 | 第三国調達 | 摘要 |
|--------------------|------|------|-------|----|
| タイヤローラ             | ○    |      |       |    |
| 振動ローラ              | ○    |      |       |    |
| 大型ブレーカ             | ○    |      |       |    |
| 発動発電機              | ○    |      |       |    |
| クローラークレーン          | ○    |      |       |    |
| 杭打機（リバース工法φ1500mm） |      | ○    |       |    |
| パイプロハンマ            | ○    |      |       |    |

出典：JICA 調査団

### (3) 労務

#### 1) 概要

サブコントラクターは、ジャカルタに事務所を置く「イ」国の建設会社が想定される。本事業に必要な労務は、サブコントラクターを通して、「イ」国国内で調達が可能と考えられる。

賃金に関する法令は、改正労働法のほか時間外労働と時間外労働手当に関する労働基準大臣令や最低生活費について規定した労働大臣令、最低賃金の上昇率に関して定めた「賃金に関する政令 2015 年 78 号」がある。

雇用条件に関する法令は、労働法に従い主要な労働条件を雇用契約で規定する必要があることが記載されている。主要な労働条件は、賃金、就労時間、休日、休憩、退職金・慰労金等がある。

#### 2) 建設技術者

2018 年 8 月の「イ」国統計庁の調査によると、「イ」国国内には 1.31 億人（うち約 7 百万人が失業者）の就業者人口がいる。うち約 8.7 百万人（全体割合の内 6.69%）の労働者が建設業に従事している。従事している労働者のうち、約百万人が正規雇用者である。また、「イ」国国内には約 15 万の建設企業が存在している。約 8.7 百万人の建設業従事者及び約 15 万の建設企業が「イ」国国内にあることから、労働力確保は十分可能である。労働力が十分にある一方で、就業人口に占める大学以上の卒業生比率が男女合計で 4.29%と低く、専門的な基礎知識・技術を有する人材が少ないことが挙げられる。

#### 3) 第三国労務者

労働法第 VII 章第 42 条から第 49 条において、第三国労務者の就労について規定されている。「イ」国における第三国労務者の就労には、労働大臣等の許可が必要である。次に、就労は特定の役職及び期間に限定され、対象の外国人には役職規定や能力基準を遵守することが求められている。

「イ」国労務者に遂行できない管理職や専門職に限り、第三国労務者の就労が認められている。

#### 3-2-4-7 実施工程（案）

表 3-2-23 に本調査の結果を踏まえた実施工程（案）を示す。本調査終了後、実施設計業務として詳細設計、入札図書作成を行い、施工監理業務として入札、施工の順序で事業が実施される。

実施設計は現地調査に始まり、国内作業の中で詳細設計、仕様書・入札図書作成を実施する。その後、詳細設計について「イ」国側に説明を行う。引き続き施工監理業務において、入札補助及び業者契約関連業務が実施され、この期間に 7 ヶ月を要する。



を日本人に対して免除すること

- ⑥ サイト近傍までの電気、水道、排水、その他付帯施設の移設・設置（照明施設への電源供給含む）に係る関係機関との調整及び許認可手続き
- ⑦ 日本側改修区間以外の維持管理区間の道路保全
- ⑧ 日本側建設工事完了後、必要に応じて既存道路の改修工事
- ⑨ 無償資金協力で建設される施設の適切な使用と維持管理
- ⑩ 本無償資金協力で賄われる経費以外の施設建設に必要な経費を負担すること

### (3) その他

- ① 日本の無償資金協力ガイドラインに則った入札方式および契約方式
- ② 実施設計及び施工監理を行う日本のコンサルタントとの契約
- ③ 日本の建設業者との建設工事契約

## 3-4 プロジェクトの運営・維持管理計画

### 3-4-1 運営・維持管理体制

パル第四橋の安定的な運用を維持するためには、橋梁維持管理が非常に重要となる。当該橋梁の維持管理は、PU傘下の Bina Marga が実施する。組織図については、図 2-1-1 及び図 2-1-2 を参照されたい。

### 3-4-2 維持管理方法

橋梁の維持管理は、5年毎に以下の要領で健全性の診断を行う。部材単位の健全性の診断結果に基づき、橋梁の効率的な維持および修繕が図られるよう必要な対策を講じる。

#### ① 健全性の判定区分

| 区 分 |        | 状 態   |
|-----|--------|---|
| I   | 健全     | 構造物の機能に支障が生じていない状態。                           |
| II  | 予防保全段階 | 構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。   |
| III | 早期措置段階 | 構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。             |
| IV  | 緊急措置段階 | 構造物の機能に支障が生じている。または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。 |

#### ② 健全性の評価単位

| 上部構造 |    |    | 下部構造 | 支承部 | その他 |
|------|----|----|------|-----|-----|
| 主桁   | 横桁 | 床版 |      |     |     |
|      |    |    |      |     |     |

#### ③ 変状の種類

| 材料の種類    | 変状の種類           |
|----------|-----------------|
| 鋼部材      | 腐食、亀裂、破断、その他    |
| コンクリート部材 | ひびわれ、床版ひびわれ、その他 |
| その他      | 支承の機能障害、その他     |

### 3-5 プロジェクトの概略事業費

#### 3-5-1 協力対象事業の概略事業費

##### 3-5-1-1 日本側負担経費

本協力対象事業を実施する場合に必要な事業費総額は、25 億円となり、日本と「イ」国の負担区分に基づく双方の経費内訳は、以下に示す積算条件によれば、表 3-5-1 に示すとおりに見積もられる。但し、この金額は交換公文上の供与限度額を示すものではない。

表 3-5-1 概算事業費（日本側負担）

|               |
|---------------|
| 施工業者契約認証まで非公表 |
|---------------|

出典：JICA 調査団

##### 3-5-1-2 相手国側負担経費

「イ」国負担事項の費目、金額を表 3-5-2 に示す。

表 3-5-2 相手国側負担事項及び金額

| 負担事項  | 内容    | 負担金額（百万円） | 負担金額（IDR）     | 備考                    |
|-------|-------|-----------|---------------|-----------------------|
| 銀行手数料 |       | 2.00      | 300,000,000   |                       |
| 用地取得費 |       | 110.00    | 8,250,000,000 | 29,400 m <sup>2</sup> |
| 施設移設費 | 電柱・電線 | 5.00      | 750,000,000   |                       |
| 合計    |       | 117.00    | 9,300,000,000 |                       |

\*上記負担事項、及び金額は環境調査実施後に確定されるため、暫定とする。

出典：JICA 調査団

##### 3-5-1-3 積算条件

積算条件を以下に記載する。

- ① 積算時点 : 平成 31 年 4 月
- ② 為替交換レート : 1 USD (TTS レート) = 111.62 円  
: 1 IDR (TTS レート) = 0.006607 円
- ③ 施工・調達期間 : 表 3-2-23 参照
- ④ その他 : 積算は、日本国政府の無償資金協力の制度を踏まえて実施する。

#### 3-5-2 運営・維持管理費

本事業により復旧された橋梁についての主な維持管理業務は、表 3-5-3 に示す橋梁定期点検、擁壁日常点検、法面、除草、排水施設の清掃・補修、舗装の補修等が必要である。なお、各点検の頻度は、定期点検 1 回/年、日常点検 1 回/週、舗装打替え 1 回/7 年目を基準とする。

表 3-5-3 主な維持管理項目

| 項目                | 頻度                  | 点検部位                                     | 作業内容  | 概算費用                 | 備考 |
|-------------------|---------------------|--|---|----------------------|----|
| 日常点検              | 1回/週                | 橋梁<br>擁壁構造物<br>排水施設<br>路肩、法面<br>舗装       | 目視<br>目視<br>堆積物除去<br>除草<br>クラック,ポットホール補修                  | 7,500,000 IDR/週      |    |
| 定期点検              | 1回/年                | 橋梁<br>擁壁構造物<br>交通安全施設<br><br>路肩、法面<br>舗装 | 目視、打音<br>目視、測量、打音<br>路面標示・標識の再塗装<br>転落防止柵の再塗装<br>目視、計測、観測 | 75,000,000 IDR/年     |    |
| 再舗装               | 1回/7年               | 舗装                                       | 舗装打替え   | 4,500,000,000 IDR/7年 |    |
| 毎年必要な維持<br>管理費の合計 | 90,000,000<br>IDR/年 |  |   |                      |    |
| 5年毎に必要な維持管理費の合計   |                     |  |   | 4500,000,000 IDR/5年  |    |
| 7年毎に必要な維持管理費の合計   |                     |  |   | 4,500,000,000 IDR/7年 |    |

出典：JICA 調査団



## 4. プロジェクトの評価

### 4-1 事業実施のための前提条件

事業実施のための前提条件は以下のとおりである。なお、支障物件の移転や撤去さらに補償及び関係機関からの承認書類は、原則、E/N 後に開始し、施工業者の事前審査公示までに完了する必要がある。

- ▶ 本プロジェクトの実施にあたり、用地取得が必要となる。詳細は、本報告書「2-2-3-2 用地取得・住民移転」に記述されている。用地取得及び補償については、施工入札公示までに完了する。
- ▶ 工事遅延の原因となる、プロジェクト用調達資機材に対する通関手続きへの支援及び協力、免税措置の手続きの速やかな実施が必要となる。更に、無償資金協力ガイドラインに則った入札方式および契約方式を遵守する必要がある。PU が行うべきこれらの内容は、本報告書、「3-3 相手国側分担事業の概要」に詳述されている。
- ▶ 本事業による工事完了後は、円滑な交通及び復旧した橋梁の安全性を確保するため、「イ」国による維持管理が必要となる。維持管理は、日常点検や定期点検を行い、損傷が見られた場合には、早期に適切な補修を行うことが肝要となる。したがって、運営・維持管理に必要とされる要員・予算を確保し、継続的に維持管理を実施することが必要である。PU 及び Bina Marga が行うべきこれらの内容は、本報告書「3-4 プロジェクトの運営・維持管理計画」に詳述されている。

### 4-2 プロジェクト全体計画達成のために必要な相手方投入（負担）事項

プロジェクトの効果を発現・持続するために相手国が取り組むべき事項は以下のとおりである。

- ▶ 本プロジェクトの遂行を円滑に実施するために、本報告書、「3-3 相手国側分担事業の概要」に述べられた「イ」国側の予算を事前に確保する。
- ▶ 本プロジェクトで整備する施設の機能を確保するために、「イ」国は、本報告書「3-4 プロジェクトの運営・維持管理計画」に述べられた毎年の予算確保と維持管理内容を本プロジェクト完成後に持続的に行う要員を配置する。

### 4-3 外部条件

プロジェクトの効果を発現・持続するためには、本事業で復旧するパル第四橋のみならず、湾岸道路を通して、道路の適切な運営・維持管理を行い、安全で安定的な交通を確保する必要がある。

## 4-4 プロジェクトの評価

### 4-4-1 妥当性

#### (1) 「イ」国の上位計画との整合性

「イ」国は、2004年に策定された国家の長期開発計画を基に5年ごとの開発計画を策定し、策定案が実行されている。現在は、第3次計画期間中（2015-2019）である。

計画ビジョンに基づき、開発計画が実行され、第3次国家開発計画では3つの実行戦略を策定し、指標ごとにアウトプットを設定している。本事業の対象期間となる第3次国家開発計画の国家間接続強化戦略の代表的な例として、スマトラ～ジャワ回廊計画が実施されている。スマトラ島北部の都市バンダアチェから南部の都市ランブンを接続し、またジャワ島西部の都市メラックから東部都市クタパンを接続する回廊計画である。

本事業実施対象地域となるスラウェシ島は、スラウェシ島北部の都市マナドから南部の都市マカサル間を接続する大スラウェシ回廊計画が実施されている。2012年から2016年の期間でマナドからパル区間が開通されており、今後はパルからマカサル区間の開発が進められる予定である。本事業実施対象地域であるパル市は、中部スラウェシ州に位置し、第3次国家開発計画の枠組みの中で、大スラウェシ回廊計画に包括された地域として開発が進められている。パル市内には東西方向に国道が整備されているが、市内を流れるパル川を横断する国道の本数は1本のみであることから、交通容量の拡大が課題となっている。本事業は、東西方向交通の道路ネットワークを強化することを目的の一つとして実施される。

よって、本事業は「イ」国の上位計画の方針と合致するものである。

#### (2) 我が国の援助方針・政策との整合性

我が国は「イ」国の経済発展を援助する目的で質の高いインフラ整備を実施することを基本方針にしている。本事業は2018年9月に発生した地震において崩落したパル4橋の跡地に、日本の設計基準を用いてパル4橋を再建するものである。パル4橋はパル市内の東西方向の交通確保において必要な橋梁であったが、現在は崩落したことで東西方向の交通確保が課題となっている。再建することで、パル4橋が崩落する以前の様に東西方向の交通確保をすることが可能となる。中部スラウェシ州の道路整備計画の中においても、都市間を接続する国道が市内に整備されているが、現状東西方向を横断する国道は1本しかないため、東西方向の道路ネットワークを強化することは、都市間移動の利便性を高めるために重要である。続いて、耐震基準の整備・履行が不完全な「イ」国において、我が国が定める基準で耐震設計を行うことは、地震の頻発する「イ」国において質の高いインフラ整備を供給することに繋がる。

よって、本事業は我が国の援助方針・政策と合致するものである。

#### (3) プロジェクトの緊急性

スラウェシ州は、第3次国家開発計画の中で北部の都市マナドから南部の都市マカサルを接続する大スラウェシ回廊計画を実施している。2016年までにマナドから事業実施対象地域のパルまでの区間が開通しており、今後はパルからマカサル区間の開通に向けて計画が進められる予定である。

事業実施対象地域のパル市内においては、落橋したパル第四橋から南に約 800m に位置するパル第三橋が東から西向き交通のみが通行可能となっている。同じく南に約 1,600m に位置するパル第一橋は、西から東向き交通のみが通行可能となっており、相互交通が可能なのは南に約 4,200m に位置するパル第二橋のみの状況である。その為、パル第四橋の落橋により東西方向の交通確保が喫緊の課題になっているうえ、沿岸部の交通が南に迂回を強いられている。

本事業を通じてパル市内の東西方向の交通を確保し、大スラウェシ回廊計画の実施の中で、都市間の道路ネットワークを高める重要な役割を担うとともに、物流が改善され経済復興及び発展に寄与することが期待される。

#### (4) 本邦技術導入

我が国と「イ」国はプレート境界に隣接し、人口密集地に活火山が存在している点で共通している。我が国では耐震基準を基にインフラ整備や集合住宅等が建設されているが、「イ」国の郊外では未だにレンガ造りの建物が多く、地震対策が十分であるとは言えない状況にある。また、「イ」国においては地震に対する研究者または専門家が少なく、耐震基準の整備・履行が十分になされていない。

我が国は、地震のみならず台風、洪水、土砂災害等の自然災害が多く、特に全世界においてマグニチュード 6 以上の 20% が発生する地震大国である。我が国の橋梁については、1995 年に発生した阪神・淡路大震災を受けて、基準類の見直しや落橋防止構造・装置の設置等、先の大震災からの教訓を活かした対策を講じている。

地震大国である我が国の基準において耐震設計を行うことは、同じく地震が多い「イ」国への技術移転に繋がり、今後の耐震基準整備の一助になると確信する。

#### (5) プロジェクトの裨益対象

本プロジェクトの利用者（直接裨益人口）は、パル川を渡河し東西を繋ぐ道路であることから、広範囲に及ぶと推定されるものの、パル第四橋が建設されるパル市に限定すると約 38 万人となる。

表 4-4-1 裨益人口

| 地区           | 人口      |         |
|--------------|---------|---------|
|              | 2016    | 2017    |
| Palu Barat   | 61,424  | 62,293  |
| Tatanga      | 39,369  | 39,997  |
| Ulujadi      | 27,319  | 27,763  |
| Palu Selatan | 69,492  | 70,571  |
| Palu Timur   | 70,378  | 71,452  |
| Mantikulore  | 62,822  | 63,804  |
| Palu Utara   | 22,834  | 23,196  |
| Tawaeli      | 20,382  | 20,706  |
| 合計           | 374,020 | 379,782 |

出典：JICA 調査団

## 4-4-2 有効性

### (1) 定量的効果

本事業により期待される定量的な効果を、表 4-4-2 に示す。

- パル第三橋（西向き交通）及びパル第一橋（東向き交通）への迂回が解消され、2 車線対面通行が可能となる。
- 西向き交通の迂回距離が 1.2km 短縮され、東向き交通の迂回距離が 1.8km 短縮される。

**表 4-4-2 本事業における定量的効果**

| 指 標   | 基準値<br>(2019 年実績値)     | 目標値 (2024 年)<br>【事業完成 3 年後】                  |
|---|------------------------|--|
| 車線数   | —                      | 2 車線   |
| 通行方法  | —                      | 対面交通   |
| 移動距離短縮 (Palu-Donggala 道路～<br>Munif Rahman 道路) 注 1 | 西向き 6.1km<br>東向き 6.8km | 西向き 4.9km (1.2km 短縮)<br>東向き 4.9km (1.8km 短縮) |

注 1：2019 年の経路は、パル第四橋が落橋して通行が出来ないため、西向きはパル第三橋、東向きはパル第一橋を通過することを想定した。

出典：JICA 調査団

### (2) 定性的効果

#### ① 地域住民の生活・安全性の向上

本事業を実施することで、道路ネットワークの強化、地域のアクセス性向上、物流の改善、津波発生時の避難場所確保等が成され、地域住民の生活及び安全性が向上する。

#### ② 地域経済活動の促進

本事業を実施することにより、交通制限が解除され、交通・物流の円滑化が図られるとともに、人的・物的な交流が活性化することが期待されるとともに、復興のシンボルとなる橋梁が再建されることから、地域経済の発展および促進が期待される。

#### ③ 交通事故の低減

相互交通が可能となる「イ」国基準に則った 2 車線道路を建設することにより、安全かつ安定した道路インフラが確保され、交通事故の低減に寄与する。

#### ④ 維持管理費の低減

本邦基準及び技術を取り入れて耐震設計を行うことで災害に対する強靱性が図られ、大規模改修の費用逡減が可能になり、限られた予算の有効活用に繋がることを期待される。

以上により、本案件の妥当性は高く、また、有効性が見込まれると判断される。

インドネシア国  
公共事業・国民住宅省 道路総局

## インドネシア国

# 中部スラウェシ州パル第四橋再建計画準備調査

## 概略設計報告書

### 付 録

2019年5月

独立行政法人国際協力機構  
株式会社オリエンタルコンサルタンツグローバル  
八千代エンジニアリング株式会社



付録

環境チェックリスト (橋梁)

| 分類          | 環境項目               | 主なチェック事項   | Yes: Y<br>No: N<br>Not applicable: N/A | 具体的な環境社会配慮<br>(Yes/No の理由、根拠、緩和策等)   |
|-------------|--------------------|--|--|--|
| 1<br>許認可・説明 | (1) EIA および環境許認可   | (a) 環境アセスメント報告書 (EIA レポート) 等は作成済みか。                          | (a) N                                  | (a) 本事業は「イ」国環境審査制度 (Law No. 32 of 2009 on Protection and Management of Environment) で UKL-UPL レポートの作成を要求されている。現在事業実施主体である Balai BINA MARGA が JICA の支援により UKL-UPL レポートを作成中であり、2019年8月末に許認可を得る予定である。 |
|             |                    | (b) EIA レポート等は当該国政府により承認されているか。                              | (b) N                                  | (b) 同上   |
|             |                    | (c) EIA レポート等の承認は付帯条件を伴うか。付帯条件がある場合は、その条件は満たされるか。            | (c) N                                  | (c) UKL-UPL 承認時に付帯条件が明らかになる見込みである。   |
|             |                    | (d) 上記以外に、必要な場合には現地の所管官庁からの環境に関する許認可は取得済みか。                  | (d) N/A                                | (d) 該当無し   |
|             | (2) 現地ステークホルダーへの説明 | (a) プロジェクトの内容および影響について、情報公開を含めて現地ステークホルダーに適切な説明を行い、理解を得ているか。 | (a) N                                  | (a) 2019年6月末に事業実施主体である Balai 及び用地取得責任機関である Palu 市によるステークホルダー協議を実施予定である。  |
|             |                    | (b) 住民等からのコメントを、プロジェクト内容に反映させたか。                             | (b) N                                  | (b) 上記で計画されているステークホルダー協議で得られたコメントをプロジェクト内容に反映させる見込みである。  |
|             | (3) 代替案の検討         | (a) プロジェクト計画の複数の代替案は (検討の際、環境・社会に係る項目も含めて) 検討されているか。         | (a) Y                                  | (a) 2019年1月から対象事業の位置、道路構造などの代替案が提案され、環境・社会に係る項目も含めて比較検討された。2019年2月に河口橋梁とすることが最適プロジェクトとして選定された。その後、橋梁位置の3案及び事業を行わないケースの比較を行った結果、現在のプロジェクトが最適案として選定された。  |
| 2<br>汚染対策   | (1) 大気質            | (a) 通行車両等から排出される大気汚染物質による影響はあるか。当該国の環境基準等と整合するか。             | (a) N                                  | (a) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、本事業によりプロジェクト地域周辺の大気質を震災以前より悪化させる可能性は低い。   |

| 分類      | 環境項目          | 主なチェック事項  | Yes: Y<br>No: N<br>Not applicable: N/A                   | 具体的な環境社会配慮<br>(Yes/No の理由、根拠、緩和策等)  |
|---------|---------------|---|--|---|
|         | (2) 水質        | (b) ルート付近において大気汚染状況が既に環境基準を上回っている場合、プロジェクトが更に大気汚染を悪化させるか。大気質に対する対策は取られるか。 | (b) N  | (b) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、本事業により橋梁周辺の大気質を震災以前より悪化させる可能性は低い。                        |
|         |               | (a) 盛土部、切土部等の表土露出部からの土壌流出によって下流水域の水質が悪化するか。                               | (a) Y  | (a) アクセス道路の盛土工事、及び、河床の橋脚工事（掘削）によって濁水が発生する可能性がある。計画位置は河口の直近であり、パル湾奥部で濁度の上昇が発生する可能性がある。 |
|         |               | (b) プロジェクトによる周辺の井戸等の水源への影響はあるか。   | (b) N  | (b) 計画位置は河口の直近であり、井戸・表流水は水源として利用されていないため、影響はない。                                       |
|         | (3) 騒音・振動     | (a) 通行車両や鉄道による騒音・振動は当該国の基準等と整合するか。  | (a) N  | (a) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、本事業により橋梁周辺の騒音・振動を震災以前より悪化させる可能性は低い。                      |
|         |               | (b) 通行車両や鉄道による低周波音は当該国の基準等と整合するか。   | (b) Y  | (b) 本事業の橋梁は延長約 260m、2 桁間の短いものであり、低周波の発生は著しいものではない。                                    |
|         | 3<br>自然<br>環境 | (1) 保護区   | (a) サイトは当該国の法律・国際条約等に定められた保護区内に立地するか。プロジェクトが保護区に影響を与えるか。 | (a) N   |
| (2) 生態系 |               | (a) サイトは原生林、熱帯の自然林、生態学的に重要な生息地（珊瑚礁、マングローブ湿地、干潟等）を含むか。                     | (a) N  | (a) 本事業の計画地は、原生林、熱帯の自然林、生態学的に重要な生息地（珊瑚礁、マングローブ湿地、干潟等）に該当しない。                          |
|         |               | (b) サイトは当該国の法律・国際条約等で保護が必要とされる貴重種の生息地を含むか。                                | (b) N  | (b) 本事業の計画地は、「イ」国の法律・国際条約等で保護が必要とされる貴重種の生息地を含まない。                                     |
|         |               | (c) 生態系への重大な影響が懸念される場合、生態系への影響を減らす対策はなされるか。                               | (c) N  | (c) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、本事業の実施は生態系に対する重大な影響を発生させない。                              |

| 分類 | 環境項目   | 主なチェック事項   | Yes: Y<br>No: N<br>Not applicable: N/A | 具体的な環境社会配慮<br>(Yes/No の理由、根拠、緩和策等)   |
|----|--|--|--|--|
|    |  | (d) 野生生物及び家畜の移動経路の遮断、生息地の分断、動物の交通事故等に対する対策はなされるか。  | (d) N                                  | (d) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、新たに野生生物及び家畜の移動経路の遮断、生息地の分断、動物の交通事故等を発生させるものではない。工事期間中の河道内の工事は、河道の付け替えを行わずに実施する計画である。水生生物の持続的な生存に対する著しい影響は発生しないと考えられる。 |
|    |  | (e) 橋梁・道路が出来たことによって、開発に伴う森林破壊や密猟、砂漠化、湿原の乾燥等は生じるか。外来種（従来その地域に生息していなかった）、病害虫等が移入し、生態系が乱される恐れがあるか。これらに対する対策は用意されるか。 | (e) N                                  | (e) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、改修後の橋梁の存在が新たな森林破壊等の影響の原因となる恐れはない。   |
|    | (3) 水象   | (a) 構造物の設置による水系の変化に伴い、地表水・地下水の流れに悪影響を及ぼすか。   | (a) N                                  | (a) 本事業は地震で破壊された河口橋梁を再建するものであり、構造物の設置による水系の変化、地表水・地下水の流れの変化は発生しない。   |
|    | (4) 地形・地質  | (a) ルート上に土砂崩壊や地滑りが生じそうな地質の悪い場所はあるか。ある場合は工法等で適切な処置がなされるか。   | (a) N                                  | (a) 本事業は地震で破壊された河口橋梁を再建するものであり、地形・地質への大きな変更は発生しない  |
|    | (b) 盛土、切土等の土木作業によって、土砂崩壊や地滑りは生じるか。土砂崩壊や地滑りを防ぐための適切な対策がなされるか。 | (b) N  | (b) 同上                                 |  |
|    | (c) 盛土部、切土部、土捨て場、土砂採取場からの土壌流出は生じるか。土砂流出を防ぐための適切な対策がなされるか。    | (c) N  | (c) 同上。                                |  |

| 分類                    | 環境項目     | 主なチェック事項   | Yes: Y<br>No: N<br>Not applicable: N/A | 具体的な環境社会配慮<br>(Yes/No の理由、根拠、緩和策等)   |
|-----------------------|----------|--|--|--|
| 4<br>社<br>会<br>環<br>境 | (1) 住民移転 | (a) プロジェクトの実施に伴い非自発的住民移転は生じるか。生じる場合は、移転による影響を最小限とする努力がなされるか。 | (a) N                                  | (a) 右岸は道路用地を使用するため居住建物への影響は生じず、非自発的住民移転は生じない。左岸は津波被害地を使用する。左岸の計画地に立地していた住宅等は津波によって破壊されたため、本事業による建物の撤去は生じず、非自発的住民移転は生じない。 |
|                       |          | (b) 移転する住民に対し、移転前に補償・生活再建対策に関する適切な説明が行われるか。                  | (b) Y                                  | (b) 住民移転は生じないが、小規模な用地取得が発生する。補償及び必要な支援に関して、「イ」国制度及び JICA ガイドラインに基づく適切な説明を行う見込みである。                                       |
|                       |          | (c) 住民移転のための調査がなされ、再取得価格による補償、移転後の生活基盤の回復を含む移転計画が立てられるか。     | (c) Y                                  | (c) 住民移転は生じないが、小規模な用地取得が発生する。用地取得交渉はパル市によって個別に行われる可能性が高い。「イ」国制度及び JICA ガイドラインに基づいて適切に実施される予定である。                         |
|                       |          | (d) 補償金の支払いが移転前に行われるか。                                       | (d) N/A                                | (d) 「イ」国制度に基づき、補償金の支払いは土地の権利の移転前に行われる見込みである。   |
|                       |          | (e) 補償方針は文書で策定されているか。  | (e) U                                  | (e) 用地取得交渉はパル市によって個別に行われる可能性が高い。用地取得計画書の策定が行われない場合、個別の補償方針については文書での記載をパル市に提案する。  |
|                       |          | (f) 移転住民のうち特に女性、子供、老人、貧困層、少数民族・先住民等の社会的弱者に適切な配慮がなされた計画か。     | (f) U                                  | (f) 本事業による住民移転は生じない。   |
|                       |          | (g) 移転住民について移転前の合意は得られるか。                                    | (g) N                                  | (g) 本事業による住民移転は生じない。   |
|                       |          | (h) 住民移転を適切に実施するための体制は整えられるか。十分な実施能力と予算措置が講じられるか。            | (h) Y                                  | (h) 用地取得の体制の整備、予算措置について、用地取得の責任機関であるパル市の用地取得担当部局が準備中である。この用地取得についてはパル市長が実施を確約しており、手続き及び予算措置は適切に実施される。                    |
|                       |          | (i) 移転による影響のモニタリングが計画されるか。                                   | (i) Y                                  | (i) 「イ」国制度により用地取得のモニタリングが実施される計画である。   |
|                       |          | (j) 苦情処理の仕組みが構築されているか。                                       | (j) Y                                  | (j) 「イ」国制度により苦情処理が実施される計画である。  |

| 分類 | 環境項目      | 主なチェック事項   | Yes: Y<br>No: N<br>Not applicable: N/A | 具体的な環境社会配慮<br>(Yes/No の理由、根拠、緩和策等)  |
|----|-----------|--|--|---|
|    | (2) 生活・生計 | (a) 新規開発により橋梁・アクセス道路が設置される場合、既存の交通手段やそれに従事する住民の生活への影響はあるか。また、土地利用・生計手段の大幅な変更、失業等は生じるか。これらの影響の緩和に配慮した計画か。 | (a) N                                  | (a) 本事業は地震で破壊された河口橋梁を再建するものであり、新設ではないため該当しない。   |
|    |           | (b) プロジェクトによりその他の住民の生活に対し悪影響を及ぼすか。必要な場合は影響を緩和する配慮が行われるか。   | (b) N                                  | (b) 本事業は地震で破壊された河口橋梁を再建するものであり、その他の住民の生活に対し悪影響は生じない。  |
|    |           | (c) 他の地域からの人口流入により病気の発生 (HIV 等の感染症を含む) の危険はあるか。必要に応じて適切な公衆衛生への配慮が行われるか。                                  | (c) Y                                  | (c) UKL-UPL 報告書では道路・橋梁の工事に当たって標準的に行われる公衆衛生への配慮の内容について、提案される。                                |
|    |           | (d) プロジェクトによって周辺地域の道路交通に悪影響を及ぼすか (渋滞、交通事故の増加等)。  | (d) Y                                  | (d) 本事業の施工段階には、既存道路の閉鎖・う回が必要となり、周辺の道路交通に影響が発生する。供用段階には、地震で破壊された河口橋梁が再建され、周辺地域の道路交通状況は改善される。 |
|    |           | (e) プロジェクトによって住民の移動に障害が生じるか。   | (e) Y/N                                | (e) 本事業の施工段階には、既存道路の閉鎖・う回が必要となり、周辺の道路交通に影響が発生する。供用段階には、地震で破壊された河口橋梁が再建され、周辺地域の道路交通状況は改善される。 |
|    |           | (f) 陸橋等による日照障害、電波障害は生じるか。  | (f) N                                  | (f) 本事業の計画地は南緯 0 度に位置しており、日照障害は生じない。また、本事業の橋梁は電波障害を生じる構造・規模ではない。                            |
|    | (3) 文化遺産  | (a) プロジェクトにより、考古学的、歴史的、文化的、宗教的に貴重な遺産、史跡等を損なう恐れはあるか。また、当該国の国内法上定められた措置が考慮されるか。                            | (a) N                                  | (a) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、考古学的、歴史的、文化的、宗教的に貴重な遺産、史跡等を損なう恐れはない。                           |



| 分類           | 環境項目          | 主なチェック事項  | Yes: Y<br>No: N<br>Not applicable: N/A | 具体的な環境社会配慮<br>(Yes/No の理由、根拠、緩和策等)   |
|--------------|---------------|---|--|--|
|              | (4) 景 観       | (a) 特に配慮すべき景観が存在する場合、それに対し悪影響を及ぼすか。影響がある場合には必要な対策は取られるか。                    | (a) N                                  | (a) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、配慮すべき景観を損なう恐れはない。   |
|              | (5) 少数民族、先住民族 | (a) 当該国の少数民族、先住民族の文化、生活様式への影響を軽減する配慮がなされているか。                               | (a) N/A                                | (a) 該当しない。パル市の中心的な民族は地元民族カイリ族である。事業実施区域は都市部であることから他民族との混在は進んでおり、特段特殊な文化・生活を営んでいる区域は確認されていない。 |
|              |               | (b) 少数民族、先住民族の土地及び資源に関する諸権利は尊重されるか。   | (b) N/A                                | (b) 該当しない。   |
|              | (6) 労働環境      | (a) プロジェクトにおいて遵守すべき当該国の労働環境に関する法律が守られるか。                                    | (a) Y                                  | (a) 事業提案者は、国家労働法の雇用条件、IFC ガイドライン、世界銀行の EHS ガイドラインなどに関連する法令を遵守する。                             |
|              |               | (b) 労働災害防止に係る安全設備の設置、有害物質の管理等、プロジェクト関係者へのハード面での安全配慮が措置されているか。               | (b) Y                                  | (b) プロジェクト関係者に対しては、労働災害防止のための安全設備の設置および有害物質の管理などの具体的な安全方法が実施されている。                           |
|              |               | (c) 安全衛生計画の策定や作業員等に対する安全教育（交通安全や公衆衛生を含む）の実施等、プロジェクト関係者へのソフト面での対応が計画・実施されるか。 | (c) Y                                  | (c) プロジェクトは、建設請負業者が警備員を含む建設作業員のための安全および環境教育プログラムを実施することを義務付ける。                               |
|              |               | (d) プロジェクトに関係する警備要員が、プロジェクト関係者・地域住民の安全を侵害することのないよう、適切な措置が講じられるか。            | (d) Y                                  | (d) 同上   |
| 5<br>その<br>他 | (1) 工事中的影響    | (a) 工事中的の汚染（騒音、振動、濁水、粉じん、排ガス、廃棄物等）に対して緩和策が用意されるか。                           | (a) Y                                  | (a) UKL-UPL の中で工事中的の緩和策について、立案を行う。   |

| 分類       | 環境項目   | 主なチェック事項  | Yes: Y<br>No: N<br>Not applicable: N/A                    | 具体的な環境社会配慮<br>(Yes/No の理由、根拠、緩和策等)                                 |
|----------|--|---|---|--|
|          |  | (b) 工事により自然環境（生態系）に悪影響を及ぼすか。また、影響に対する緩和策が用意されるか。                    | (b) N   | (b) 計画橋梁下流域の現地調査を計画しているが、現時点では計画地及び近隣に特に注意を払うべき自然環境（生態系）は確認されていない。 |
|          |  | (c) 工事により社会環境に悪影響を及ぼすか。また、影響に対する緩和策が用意されるか。                         | (c) Y   | (c) UKL-UPL の中で工事中の社会環境への悪影響の予測、緩和策について示す。                         |
|          | (2) モニタリング                                     | (a) 上記の環境項目のうち、影響が考えられる項目に対して、事業者のモニタリングが計画・実施されるか。                 | (a) Y   | (a) UKL-UPL 報告書は事業者による EMP&EMOP 文書であり、モニタリングについても詳細が明記される。         |
|          | (b) 当該計画の項目、方法、頻度等どのように定められているか。               | (b) Y   | (b) UKL-UPL 報告書は EMP 及び EMOP が記載される文書であり、項目、方法、頻度が明記される。。 |  |
|          | (c) 事業者のモニタリング体制（組織、人員、機材、予算等とそれらの継続性）は確立されるか。 | (c) Y   | (c) UKL-UPL 報告書に事業者のモニタリング体制が記載され、実施される。                  |  |
|          | (d) 事業者から所管官庁等への報告の方法、頻度等は規定されているか。            | (d) U   | (d) UKL-UPL 報告書にて規定される。。                                  |  |
| 6<br>留意点 | 他の環境チェックリストの参照                                 | (a) 必要な場合は、道路、鉄道、林業に係るチェックリストの該当チェック事項も追加して評価すること（大規模な伐採を伴う場合等）。    | (a) N/A   | (a) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、道路、鉄道、林業の分野に著しい影響を発生させるものではない。        |
|          |  | (b) 必要な場合には送変電・配電に係るチェックリストの該当チェック事項も追加して評価すること（送変電・配電施設の建設を伴う場合等）。 | (b) N/A   | (b) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、送変電・配電施設の建設は行わない。                     |

| 分類 | 環境項目            | 主なチェック事項   | Yes: Y<br>No: N<br>Not applicable: N/A | 具体的な環境社会配慮<br>(Yes/No の理由、根拠、緩和策等)                                 |
|----|-----------------|--|--|--|
|    | 環境チェックリスト使用上の注意 | (a) 必要な場合には、越境または地球規模の環境問題への影響も確認する（廃棄物の越境処理、酸性雨、オゾン層破壊、地球温暖化の問題に係る要素が考えられる場合等）。 | (a) N                                  | (a) 本事業は地震で破壊された橋梁を再建するものであり、廃棄物の越境処理、酸性雨等の地球規模の環境問題に影響を与えるものではない。 |

注1) 表中『当該国の基準』については、国際的に認められた基準と比較して著しい乖離がある場合には、必要に応じ対応策を検討する。当該国において現在規制が確立されていない項目については、当該国以外（日本における経験も含めて）の適切な基準との比較により検討を行う。

注2) 環境チェックリストはあくまでも標準的な環境チェック項目を示したものであり、事業および地域の特性によっては、項目の削除または追加を行う必要がある。