

(7) 第一次ボーリング調査の評価

第一次ボーリング調査結果の概要を整理すると次のとおりである。調査は地震後の調査であるため地震時の地盤状況とは言えないが、大きく攪乱された地盤を除くと概ね地盤状態は変化していないとして評価した。

▶ ボーリング調査の評価；

Palu 低地の調査は、Nalodo の発生域を除くと、 N 値 20 程度以上の礫質砂層であることが多い。図 3-12 に N 値の深度分布図を地域別に示す。赤で表示した調査が Nalodo 内部の調査である。

Balaroa(B-1)は Nalodo の発生していない地域よりも、深部まで N 値が低い傾向を示す。B-4 および B-5 では、B-1 同様に表層地盤がルーズであるが、B-3・B-6 では表層から良く締まった状況が確認出来た。Petobo では LP-2 が深さ 10m まで N 値が低く、それ以外の調査では全般に高い N 値であった。Jono Oge の流動域 (J-2) では深さ 4m 程度まで低い N 値、5m より深部では大きい N 値であった。Jono Oge の南部は流動化した深さが薄く、一部は地盤の流動化は無く上層に移動した土砂が覆った地域もあったことが判っている。J-3 は堆積域の調査で N 値はやや高い。これ以外の調査は N 値が高い傾向が見られる。ただし、地盤変状のほとんど無かった J-12 は N 値 10 程度の地盤が深さ 8m まで分布した。

一次調査結果からは、地盤流動の発生した地域と発生していない地域では、 N 値が異なる傾向が見られた。大型扇状地の地盤条件として N 値の高い良好な地盤条件の場所が多くあることが確認された。ただし、Nalodo 発生していない J-12 などではややルーズな地盤条件であった。

地下水位環境では、Balaroa 地域あるいは J-5 の Biromaru 地域で、扇状地に特有の被圧地下水を確認しており、水位は GL-10m 程度である。

▶ 移転候補地の評価；

移転候補地は、Nalodo の発生地域より高い標高³100m 程度の扇状地内にあり、地層は粗い礫層から構成され、地下水位が深いため、液状化のリスクはないことを確認した。

▶ SWS 調査の評価；

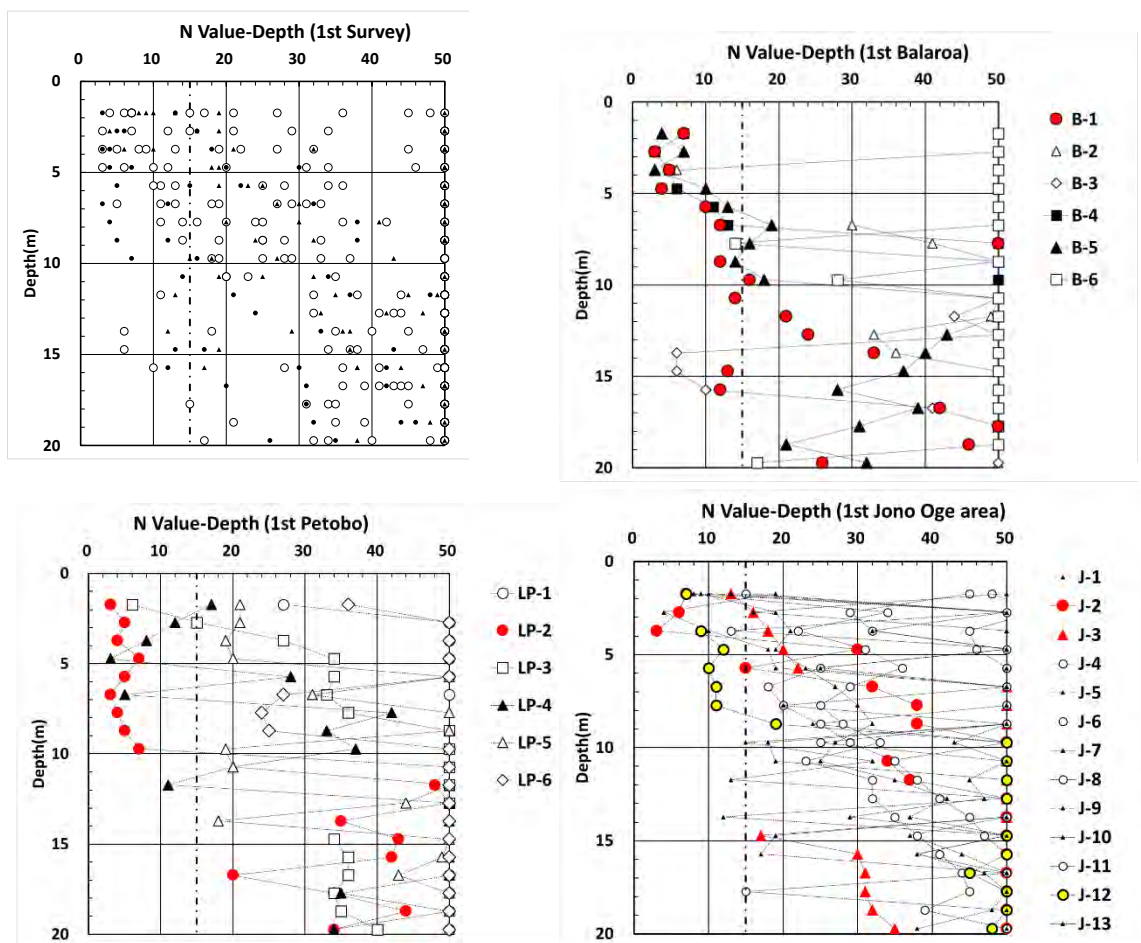
SWS 調査は、ボーリング調査を補完することを目的にボーリング機材の運搬が困難な東側の Nalodo 内部を主体に配置した。

図 3-13 に SWS の実施位置と換算 N 値の深度分布 (換算 N 値 15 以上の出現深度) を示す。Nalodo 内部における深さ 10m までの調査では、換算 N 値で概ね 10 程度以下であり、Nalodo の発生していない周辺地域ではその大半の地域で 2m~5m 程度の浅い深度で貫入困難な結果が得られた。ただし、流動化していない範囲でもルーズな地盤条件である箇所は分布している。SWS の結果から見ると、Nalodo の発生地域は周辺地盤よりもルーズな堆積物が分布する条件にあったと言える。

³ 標高は地震後の AW3D の地表面標高より設定している

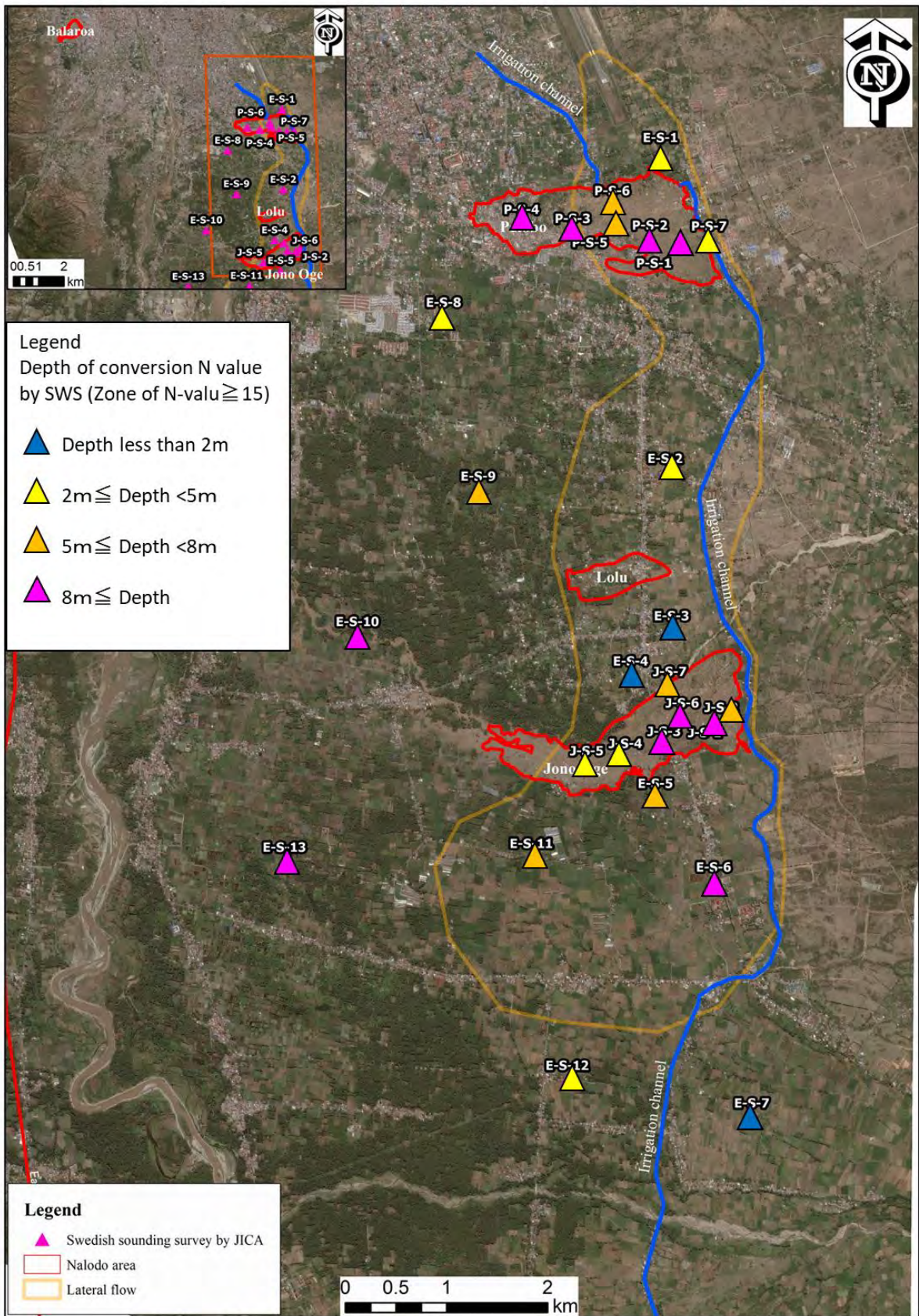
➤ 地質構成・堆積構造；

Nalodo 内部の地質構成・堆積構造は、第二次調査結果で述べる。図 3-14 に示した大型の緩傾斜扇状地の南北方向断面を見ると、Nalodo の発生した Petobo と Jono Oge は、大型扇状地に挟まれた微低地であり、緩い谷沿いに新しいルーズな堆積物が分布する地域であったと想定される。大型扇状地を構成する礫質砂層と砂層は、地形と調和的に分布するが、新しいルーズな堆積物は、濘スジや低い低地帯を埋積しながら扇状地は成長するため、相対的には低い地域の新しくルーズな堆積物が厚く堆積する環境にある。大型扇状地堆積物でも深部の礫質砂層は、全般に N 値が大きく N 値 30 以上が主体をなす。地下水位は、凹地である Nalodo 発生地域では地表にほぼ一致（一部は被圧）し、丘となる扇状地の中心付近では深い傾向を示す。



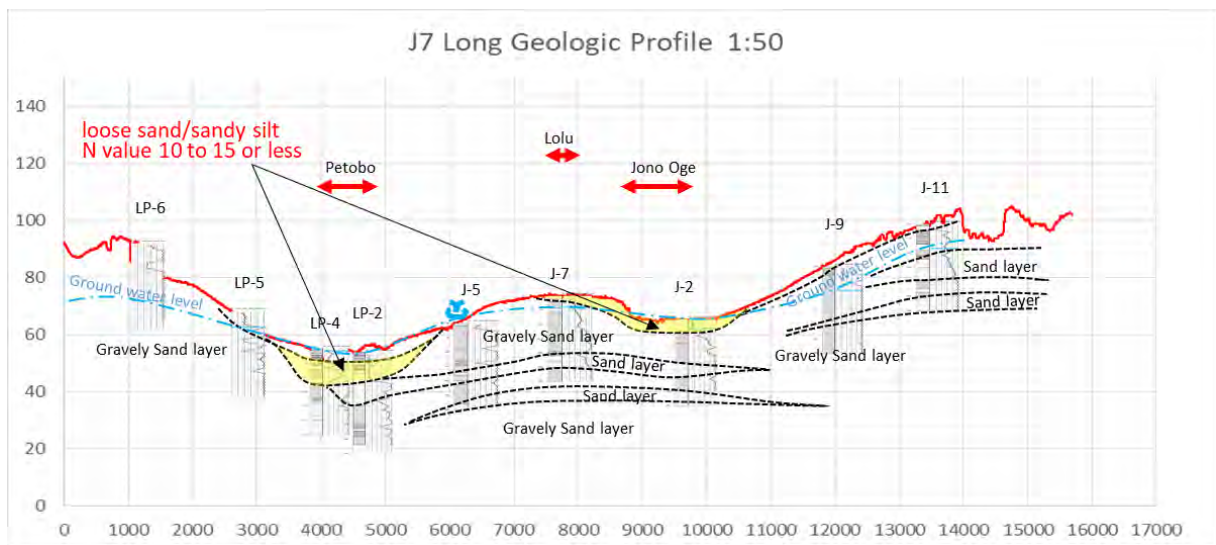
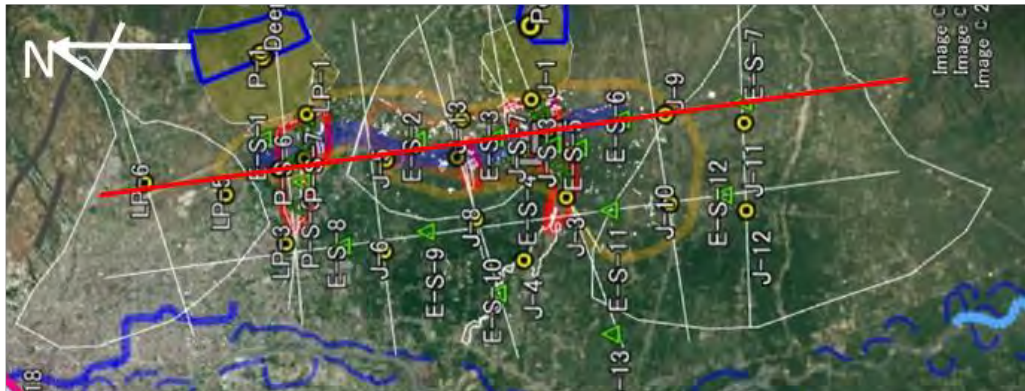
出典：JICA 調査団作成

図 3-12 ボーリング調査の N 値—深度分布図（第一次調査）



出典：JICA 調査団作成

図 3-13 SWS による換算 N 値 15 以下の厚さ分布図



出典：JICA 調査団作成

図 3-14 Palu 低地東側の広域南北方向地質断面図

3-3 第二次ボーリング調査

(1) 目的

第二次調査の目的は、長距離流動にかかる状況証拠を取得することにある。一次調査ではハザードマップの精緻化のため安全地域を評価する調査を行ったが、Nalodo の発生機構を評価するデータは限定された。そのため、表 3-4 に示す調査を第二次調査として実施した。

- ▶ 液状化地すべりの発生源（地すべり内部のやや上部）と考えられる場所の地盤条件を把握する（地質構造及び液状化層の有無・厚さ）。
- ▶ キャップレイヤー⁴・液状化層の分布及び透水性を確認する
- ▶ 液状化地すべり発生箇所の液状化強度を評価する。
- ▶ 地震波の伝搬特性評価のために PS 検層を実施する。
- ▶ 著しく被災した範囲の地盤特性・地下水条件を確認する。

表 3-4 検証項目

検証する項目	液状化地すべりが長時間・長距離流動した原因を検証する
これまでの調査結果の課題	液状化が発生し、地すべりの初動が行われたことは一致。 ただし、液状化地すべりの長距離流動の機構が説明できていない。 また、地すべり地内部の調査数量が少ないことから、データを補完する必要がある。 長距離流動は、扇状地起源の地下水が地すべり発生に伴い大量に湧出した現象をシミュレーションで検証する必要がある。 →これで説明できない場合には、地下深部からの異常水圧の発生の可能性が強い結論となる。
調査項目	調査概要
ボーリング調査	地すべり内部において、液状化したと考えられる範囲の調査を行い、地質構成・地質構造及び液状化の深さ・強さを把握する。合わせて、透水性・乱れの少ない試料を採取して、より正確な液状化の程度を確認する
トレンチ調査及び DCP	ボーリングコアでは判断できない表層付近の詳細な土質分布（10cm 程度の互層を想定）を確認し、トレンチでは乱れの少ない試料を採取する。DCP はボーリング調査表層付近の補完するために、1m 程度離れた場所で行う。
PS 検層	地震計設置場所他の PS 検層を行い、地盤の地震波の伝搬速度を測定する。液状化の判定に必要な地震強度を補強する。
ヒアリングの補完	長距離流動に関連する地すべり後の湧水の流出状況・水温などを補完する
浸透流解析	長距離流動に起因したと考えられる、下からの地下水の供給について、扇状地モデルで量・時間を再現し、長距離流動の直接の原因であるかどうかを判定する資料とする。
液状化解析	既往検討と同様に、 F_L 法・エネルギー法による液状化解析を行い、液状化した地盤の深さ・強さを確認する。（PS 検層結果を反映し・追加ボーリングデータで行う）

出典：JICA 調査団作成

⁴ 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。

(2) 検証方法

以上の方針に従い、ボーリング調査 14 箇所・現位置試験・試料サンプリング及び室内試験を実施した。ボーリングは Nalodo 内部地域を主体に配置、液状化判定のための各種試験を設定した。

なお、インドネシア側専門家の意見は、「BG(地質庁)；地すべりは断層沿いに湧き上がった湧水で発生した」などで、液状化による原因には同意しているが、水の起源については、断層起源としている。この意見は、2019 年 1 月に JICA と合同で行われた Nalodo の合同会議で発表されているが、その根拠は、現地踏査の結果により温水等の湧水が発生していることによると説明されている。日本側の第二次ボーリング調査前段階の意見は「主要な要因は地震動に伴う地盤の液状化により発生した。ただし、長距離流動が発生するためには、液状化だけではない異常間隙水圧の発生が必要と考えられる」などである。これらの相違は、地盤調査・試験だけでは明らかにすることができないため、現地被災者から Nalodo 発生時の状況の確認を行っている。ボーリング調査によって検証される項目は表 3-5 に示すとおりである。

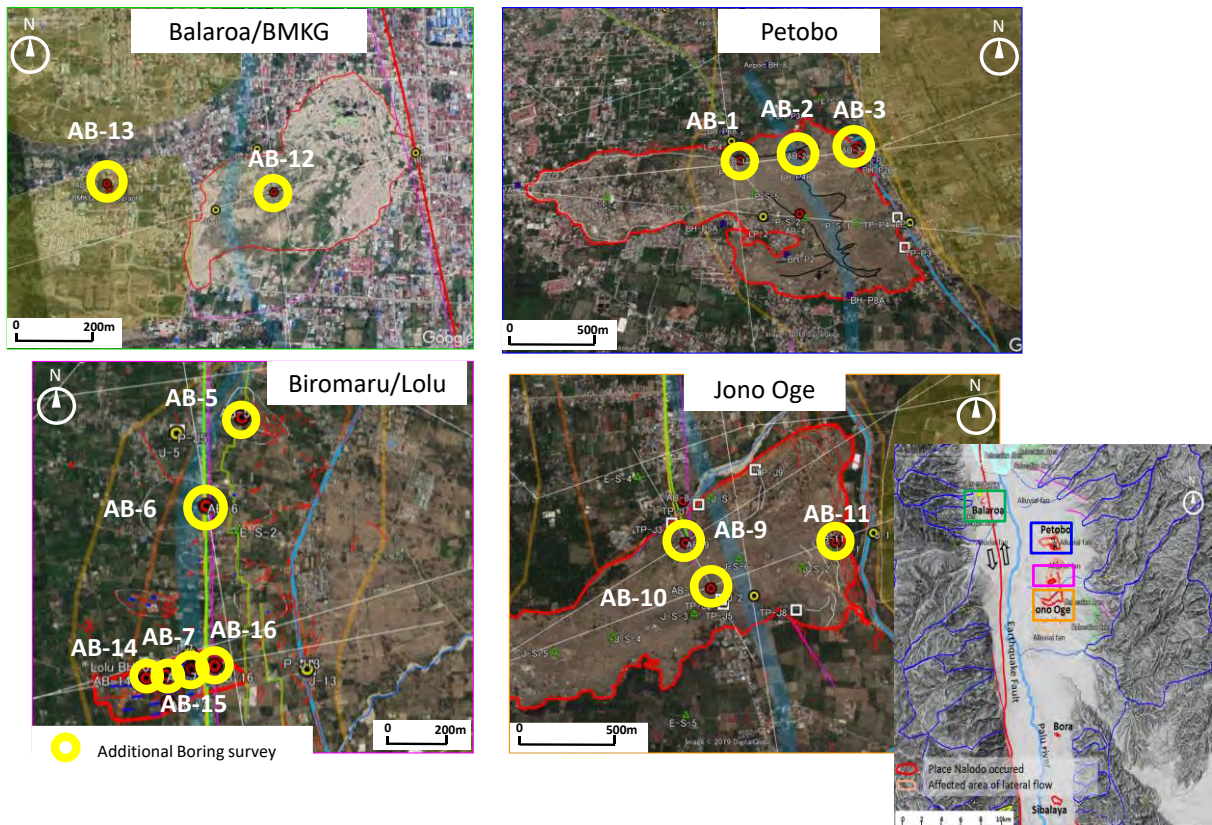
表 3-5 Nalodo 追加調査の検証仮説

確認される調査結果	Nalodo の発生機構
●Nalodo (中央上部) において、液状化層が厚く分布し、激しく液状化が発生した状況が確認された場合	液状化が有望、ただし流動化が開始した時間及び流動距離を説明できることが必要
■確認されない、あるいは極薄い場合	断層起源などの異常間隙水圧が有望
●Biromaru 付近 (Lolu 地区) の側方流動において、液状化層が分布し、液状化が発生した状況が確認された場合	液状化が有望、ただし流動化が開始した時間及び流動距離を説明できることが必要
■確認されない、あるいは極薄い場合	断層起源などの異常間隙水圧が有望

出典：JICA 調査団作成

(3) 調査対象位置と数量

ボーリング調査は Nalodo の中 (液状化の激しく起こったと考えられる箇所) 及び Biromaru 付近 (Lolu 地区) の数m規模の側方流動が発生した場所で 13 孔の調査を行い、地震波形記録を取得できた BMKG 地震計設置箇所 1 孔、延べ 14 孔を実施した。ボーリング調査では、約 1m 離れた別孔において乱れの少ない試料を採取した。ボーリング調査位置及び諸元を図 3-15 及び表 3-6 に示す。また、動的コーン貫入試験 (DCP) は、ボーリング表層 (3m) 程度の標準貫入試験を補完する目的で、ボーリング地点の脇 1m 程度の地点で実施した。



出典：JICA 調査団作成

図 3-15 Nalodo の第二次ボーリング調査・DCP 調査位置

表 3-6 第二次ボーリング調査リスト

No	Boring	Depth (m)	SPT test(tos)	Stand pipe	Field permeability test	Position			Ground water level		Site Location	working time	
						Elevation (m)	Northing	Easting	GL-m	EL.m		Commenced	Completed
1	AB-1	30.0	29	1	1	51.8	9,896,241	824,322	-1.50	53.30	Petobo	2019/7/23	2019/7/27
2	AB-2	26.0	25	1	1	59.8	9,896,266	824,700	-3.40	63.20	Petobo	2019/7/14	2019/7/19
3	AB-3	30.0	29	1	1	72.0	9,896,281	825,053	4.83	67.17	Petobo	2019/7/3	2019/7/8
4	AB-5	30.0	29	1	1	68.9	9,894,336	824,925	1.68	67.22	Biromaru	2019/7/16	2019/7/19
5	AB-6	30.0	29	1	1	69.7	9,893,696	824,658	3.21	66.49	Biromaru	2019/7/5	2019/7/19
6	AB-7	30.0	29	1	1	65.0	9,892,597	824,406	4.10	60.90	Lolu	2019/7/1	2019/7/5
7	AB-9	30.0	29	1	1	63.1	9,892,599	824,400	2.63	60.47	Jono Oge	2019/7/20	2019/7/20
8	AB-10	30.0	29	1	1	62.4	9,890,962	824,916	0.81	61.59	Jono Oge	2019/7/1	2019/7/5
9	AB-11	30.0	29	1	1	72.9	9,891,188	825,552	6.50	66.40	Jono Oge	2019/7/15	2019/7/19
10	AB-12	30.0	29	1	2	29.3	9,899,742	816,358	-0.15	29.45	Balaroa	2019/7/23	2019/7/30
11	AB-13	30.0	29	1	-	71.5	9,899,855	815,750	19.10	52.40	BMKG Office	2019/7/5	2019/7/7
12	AB-14	30.0	29	1	1	63.5	9,892,560	824,266	3.56	59.94	Lolu	2019/7/20	2019/7/20
13	AB-15	30.0	29	1	1	67.7	9,892,641	824,576	4.97	62.73	Lolu	2019/7/17	2019/7/21
14	AB-16	30.0	29	1	1	71.3	9,892,650	824,725	7.01	64.29	Lolu	2019/7/25	2019/8/2
Total		416.0	402	14	13								

II. Sampling Drilling										
No	UDS Sampling borehole	Depth (m)	Triple-tube sampling	Core box	Field permeability test	Coordinate		Site Location	Execution Date	
						Northing	Easting		Commenced	Completed
1	AB-1'	10	3	2	1	9,896,234	824,316	Petobo	2019/7/28	2019/7/30
2	AB-5'	10	3	2	2	9,894,337	824,920	Biromaru	2019/7/22	2019/7/22
3	AB-6'	8.5	3	2	1	9,893,699	824,658	Biromaru	2019/7/11	2019/7/12
4	AB-7'	12.5	2	3	1	9,892,598	824,406	Lolu	2019/7/7	2019/7/8
5	AB-9'	10	4	2	1	9,891,167	824,780	Jono Oge	2019/7/13	2019/7/14
6	AB-10'	10	3	2	1	9,890,957	824,916	Jono Oge	2019/7/7	2019/7/8
7	AB-11'	13	3	3	1	9,891,185	825,552	Jono Oge	2019/7/22	2019/7/23
8	AB-12'	4	3	1		9,899,737	816,360	Balaroa	2019/7/28	2019/7/30
9	AB-14'	8.5	2	2	1	9,892,558	824,267	Lolu	2019/7/13	2019/7/14
10	AB-15'	9	4	2	1	9,892,641	8,244,576	Lolu	2019/7/22	2019/7/24
Total		95.5	30	21	10					

IV. DCP Test							
No	BH-Name	Coordinate		Site Location	DCP (m)	Execution Date	
		Northing	Easting			Commenced	Completed
1	DCP-1	9,896,235	824,315	Petobo	3	2019/7/18	2019/7/18
2	DCP-2	9,896,261	824,707	Petobo	3	2019/7/17	2019/7/17
3	DCP-3	9,896,278	825,052	Petobo	3	2019/7/18	2019/7/18
4	DCP-5	9,894,333	824,925	Biromaru	3	2019/7/16	2019/7/16
5	DCP-6	9,893,697	824,656	Biromaru	3	2019/7/18	2019/7/18
6	DCP-7	9,892,601	824,395	Lolu	3	2019/7/14	2019/7/14
7	DCP-9	9,891,161	824,786	Jono Oge	3	2019/7/15	2019/7/15
8	DCP-10	9,890,965	8,244,920	Jono Oge	3	2019/7/14	2019/7/14
9	DCP-11	9,891,192	825,551	Jono Oge	3	2019/7/16	2019/7/16
10	DCP-12	9,899,737	816,357	Balaroa	3	2019/7/27	2019/7/27
11	DCP-14	9,892,561	824,267	Lolu	3	2019/7/15	2019/7/15
12	DCP-15	9,892,637	824,570	Lolu	3	2019/7/14	2019/7/14
13	DCP-16	9,892,651	824,730	Lolu	3	2019/7/14	2019/7/14
Total		13 DCP					

出典：JICA 調査団作成

(4) 調査結果

図 3-16 (1) ～図 3-16 (14) に第二次ボーリング調査概要柱状図・コア写真・室内土質試験結果概要を示す。概要柱状図は第一次調査と同様にコア観察から作成し、以下に観察した層相を整理した。室内粒度試験結果との対応は、コア写真・柱状図・室内粒度試験結果を参照いただきたい。層相の観察では、薄い砂層・細粒土層を評価し、風化痕跡を伴う赤色土壌層を抽出した。なお、本調査によるボーリング柱状図などの基礎データは、JICA 図書館のページ

(<https://libportal.jica.go.jp/library/public/Index.html>)から検索画面に行って「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成果品」で検索すると閲覧・ダウンロード可能である。

■ AB-1 ;

- 0～2.3m ----- 砂・シルト互層
- 2.3～5.1m ----- 礫混じり粗砂
- 5.1～6.5m ----- 砂質シルト
- 6.5～7.3m ----- 砂、7.3mにシルト薄層を挟む。
- 7.3～10.3m ----- 礫質砂、9.8～9.9mのシルト薄層を挟む
- 10.3～11.0m ----- 砂質シルト
- 11.0～12.1m ----- 礫質砂・シルト質砂
- 12.1～12.6m ----- 粘土質シルト
- 12.6～13.25m ----- 砂（シルト薄層挟む）
- 13.25～16.9m ----- 砂質シルト
- 16.9～19.9m ----- 礫混じり砂～砂互層
- 19.9～21.4m ----- 粘土質シルト（木片を含む）
- 21.4～23.9m ----- 礫質砂
- 23.9～25.2m ----- シルト質砂（23.9～24.15m粘土質シルト）
- 25.2～26.5m ----- 砂質シルト（25.2mに粘土薄層を挟む）
- 26.5～26.9m ----- 砂
- 26.9～28.3m ----- 砂質シルト、シルト質粘土、シルト互層
- 28.3～30.0m ----- 礫質シルト・砂・シルト互層

■ AB-2

- 0～4.4m ----- 礫混じりシルト質砂
- 4.4～6.1m ----- 粘土質シルト（砂の薄層を挟む）
- 6.1～10.5m ----- 礫混じり砂（7.25～7.6mにシルト質砂を挟む）
- 10.5～12.3m ----- 砂（11.1～11.5mに粘土質砂を挟む）
- 12.3～13.1m ----- シルト質砂
- 13.1～14.25m ----- 礫混じり砂、砂
- 14.25～14.9m ----- 砂質シルト
- 14.9～18.0m ----- 砂、礫混じり砂互層（15.4～15.5mシルト質砂）
- 18.0～20.0m ----- 礫混じり砂

22.0～22.8m-----砂質シルト・粘土質シルト

22.8～26.0m-----礫混じり砂

■ AB-3

0.0～3.3m ----- シルト質砂（細砂を挟む）

3.3～5.4m ----- 砂質礫

5.4～13.6m ----- シルト質砂（9.8m13.5mにシルト薄層を挟む）

13.6～27.3m ----- 礫混じり砂（19.25～19.5m砂質シルトを挟む、20.3～20.5mシルト（黄鉄鉱）を挟む、22.3～22.4 シルトを挟む）

27.3～30.0m ----- 砂・礫混じり砂

■ AB-4（欠番）

■ AB-5

0～0.5m -----表土

0.5～1.4m -----粘土質シルト（0.9～1.0m砂薄層）

1.4～2.4m -----砂（1.8～2.0m、2.0～2.4mシルト質粘土）

2.4～3.1m -----シルト質粘土

3.1～6.0m -----礫混じり砂（3.9～4.0mシルト、5.2～5.45m粘土）

6.0～7.0m -----砂質シルト、シルト質砂

7.0～8.2m -----シルト質砂（8.0～8.2mシルト質粘土）

8.2～16.0m -----礫混じり砂（10.3～11.3mシルト質砂）

16.0～18.0m -----砂、砂質シルト、シルト質砂

18.0～21.4m -----礫混じり砂（19.3～19.6m礫）

21.4～23.6m -----砂質粘土（22.0～22.3m砂薄層、23.0～23.2mシルト、23.2～23.4m砂薄層）

23.6～24.35m -----シルト質砂

24.35～25.2m -----礫混じり砂

25.2～26.9m -----シルト質砂

26.9～28.4m -----砂（26.9～27.1m砂質礫）

28.4～30.0m -----礫混じり砂

■ AB-6

0～1.0m-----礫混じり表土（埋め土）

1.0～6.5m -----シルト質砂・砂質シルト（6.4～6.5mシルト薄層）

6.5～17.2m-----礫混じり砂（8.4～9.0mシルト、9.0m礫混じり砂、11.4～12.4m砂を挟む）

17.2～19.3m -----シルト質砂（18.8～19.3mシルト）

19.3～21.5m -----礫混じりシルト

21.5～22.2m -----シルト
22.2～23.0m -----砂
23.0～23.5m -----シルト
23.5～25.6m -----礫混じり砂
25.6～27.5m -----シルト質砂（互層）
27.5～30.0m -----砂質礫

■ AB-7

0.0～1.8m-----砂質シルト
1.8～4.2m-----礫混じり砂
4.2～6.1m-----砂
6.1～7.5m-----砂質シルト（6.1m7.5mシルト薄層）
7.5～9.2m-----砂
9.2～12.75m-----礫混じり砂（11.8～12mシルト薄層）
12.75～13.6m -----シルト
13.6～18.2m-----礫混じり砂（13.6～15.0m細砂）
18.2～19.6m-----砂質シルト（18.5 砂薄層）
19.6～23.05m -----礫混じり砂
23.05～23.5m-----赤色土壌（旧表土）
23.5～30.0m-----礫混じり砂（24.7～26.0 シルト質砂）

■ AB-8（欠番）

■ AB-9

0～0.5m -----表土
0.5～2.0m-----礫混じり砂
2.0～2.8m-----シルト質砂
2.8～3.4m-----粘土質シルト
3.4～4.1m-----粗砂
4.1～5.5m-----シルト質砂
5.5～7.5m-----粗砂（7.1～7.2m旧表土）
7.5～7.9m-----粘土質シルト
7.9～10.3m -----シルト質砂
10.3～11.2m-----シルト質粘土
11.2～13.0m-----中砂（11.8～12.0mシルト薄層）
13.0～21.0m-----礫混じり砂（16m 粗砂）
21.0～21.9m-----細砂
21.9～23.0m-----赤色土壌（旧表土）・シルト
23.0～24.4m -----礫混じりシルト

24.4～28.3m-----礫混じり砂

28.3～29.3mシルト質砂

29.3～30.0m礫混じり砂

■ AB-10

0～1.4m ----- 礫混じり砂質シルト（表土）

1.4～2.15m ---- 砂（シルト薄層を挟む）

2.15～3.9m ---- シルト（2.6m3.3mに砂薄層）

3.9～5.9m----- 粘土

5.9～14.95m--- 礫混じりシルト

14.95～16.5m - シルト

16.5～23.9m--- 礫混じり砂

23.9～25.9m--- 砂質シルト

25.9～29.2m--- 中砂

29.2～30.0m--- シルト質砂

■ AB-11

0～0.8m ----- シルト質砂

0.8～1.7m----- シルト質砂（1.7粘土薄層）

1.7～3.4m----- 礫混じり砂（2.4～2.6mシルト薄層）

3.4～9.5m----- 礫混じり砂（7.8～7.9mシルト薄層）

9.5～9.9m----- 粘土

9.9～10.4m ----- 砂

10.4～11.6m----- 砂質シルト（11.6m赤色土壌）

11.6～15.1m----- 砂

15.1～15.5m----- 赤色シルト質砂（旧表土）

15.5～16.35m --- 礫混じり砂

16.35～20.0m --- シルト質粘土（17.0～17.4m砂、18.0～18.5m砂、19.0～19.7m砂）

20.0～22.3m----- 礫混じり砂

22.3～23.1m----- 粘土

23.1～30.0m----- 礫混じり砂（22.2～22.4m砂質シルト）

■ AB-12

0～1.5m ----- 礫混じり砂

1.5～4.2m----- シルト質砂

4.2～7.2m----- シルト質砂（6.3m粗砂、6.4～6.9 礫混じり砂、7.2 シルト）

7.2～16.7m ----- 砂質礫

16.7～18.4m----- 砂質シルト（17.7～18.4 シルト）

18.4～20.5m----- シルト質砂

20.5m ----- 赤色土壌
20.5～22.5m----- 粘土質シルト
22.5～24.4m----- 礫混じりシルト
24.4～25.0m----- シルト
25.0～26.0m----- シルト質砂
26.0～30.0m----- 礫混じり砂

■ AB-13

0～0.7m ----- 砂
0.7～2.0m----- 巨礫
2.0～10.0m ----- 礫質砂
10.0～11.0m----- 巨礫
11.0～19.0m----- 砂質礫
19.0～30.0m----- 砂質礫 (19.0m巨礫)

■ AB-14

0～0.3m ----- 表土
0.3～1.5m----- 礫質砂
1.5～2.5m----- シルト質粘土
2.5～5.2m----- 粗砂
5.2～5.7m----- シルト質粘土
5.7～8.7m----- シルト質砂 (6.5～7.0 礫混じり砂)
8.7～9.3m----- 粘土質砂
9.3～10.9m ----- シルト質細砂
10.9～13.1m---- 礫混じり砂
13.1～13.8m---- シルト質砂
13.8～15.6m---- 粘土質シルト・砂質シルト
15.6～17.8m---- 砂、砂質シルト、砂質シルト、粘土質砂
17.8～30.0----- 粘土質砂 (19.3、20.6、23.2、27.25 シルト薄層、28.4 砂薄層)

■ AB-15

0.0～5.0m----- 礫混じり砂 (1.5mシルト質砂、2.7m砂、4.5mシルト質砂)
5.0～16.2m ---- 礫混じり砂 (6.1～6.8 砂質シルト、8.05～9.3m砂質シルト、
12.0～13.35m - 砂質シルト、15～16.2 砂)
16.2～25.4m--- 礫混じり砂
25.4～26.5m--- シルト質砂
26.5～28.5m--- 砂シルト互層
28.5～30.0m--- シルト質砂

■ AB-16

- 0.0～3.7m----- シルト質砂質礫
- 3.7～6.6m----- 礫混じり砂 (5.5～6.0 砂)
- 6.6～7.8m----- 砂・礫混じり砂
- 7.8～8.1m----- 砂質シルト
- 8.1～9.5m----- 礫混じり砂・砂
- 9.5～18.0m ---- 砂質礫・礫質砂
- 18.0～19.2m--- シルト質粘土
- 19.2～21.5----- シルト質砂
- 21.5～30.0----- 礫混じり砂

Petobo AB-1

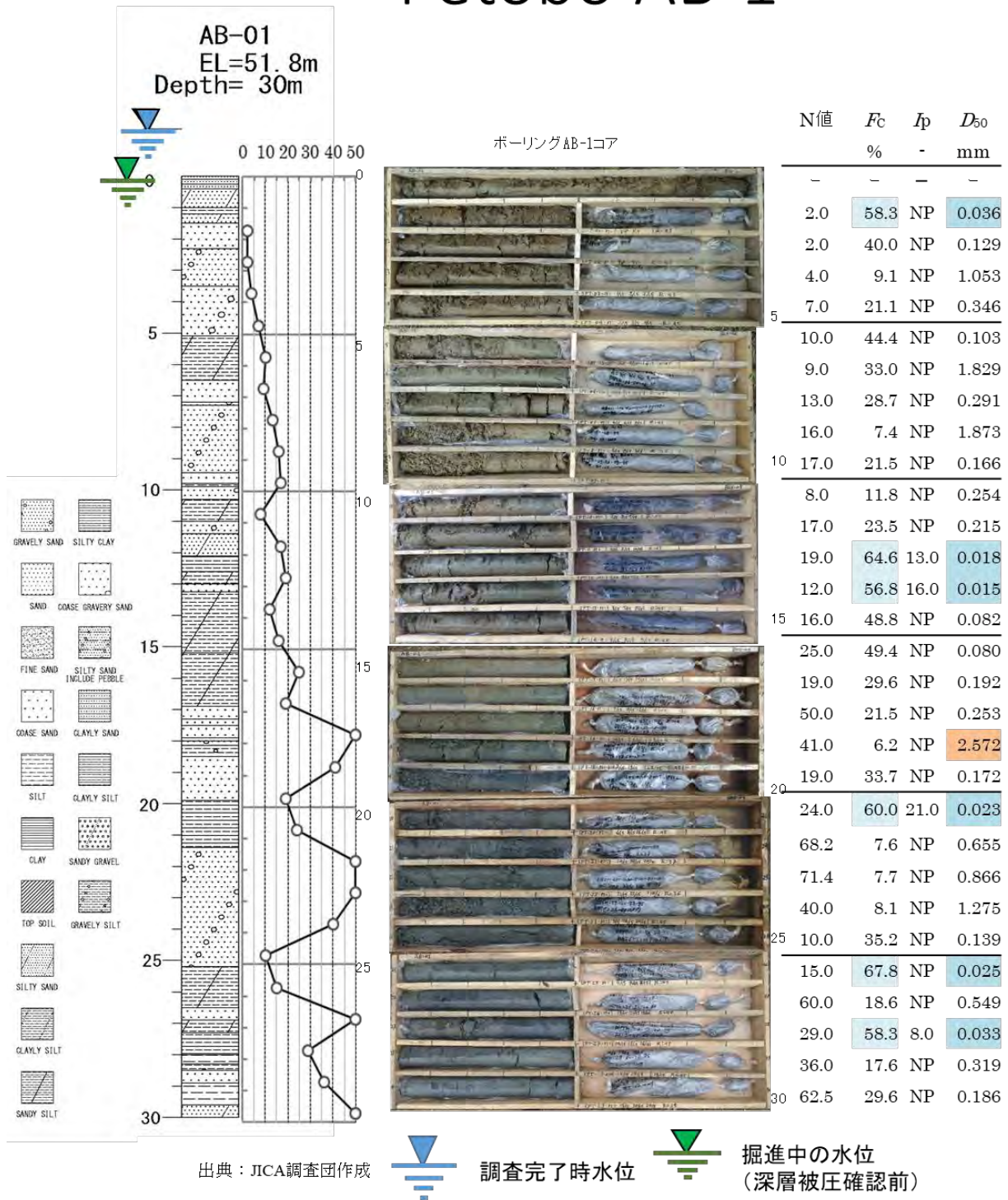


図 3-16(1) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-1)

Petobo AB-2

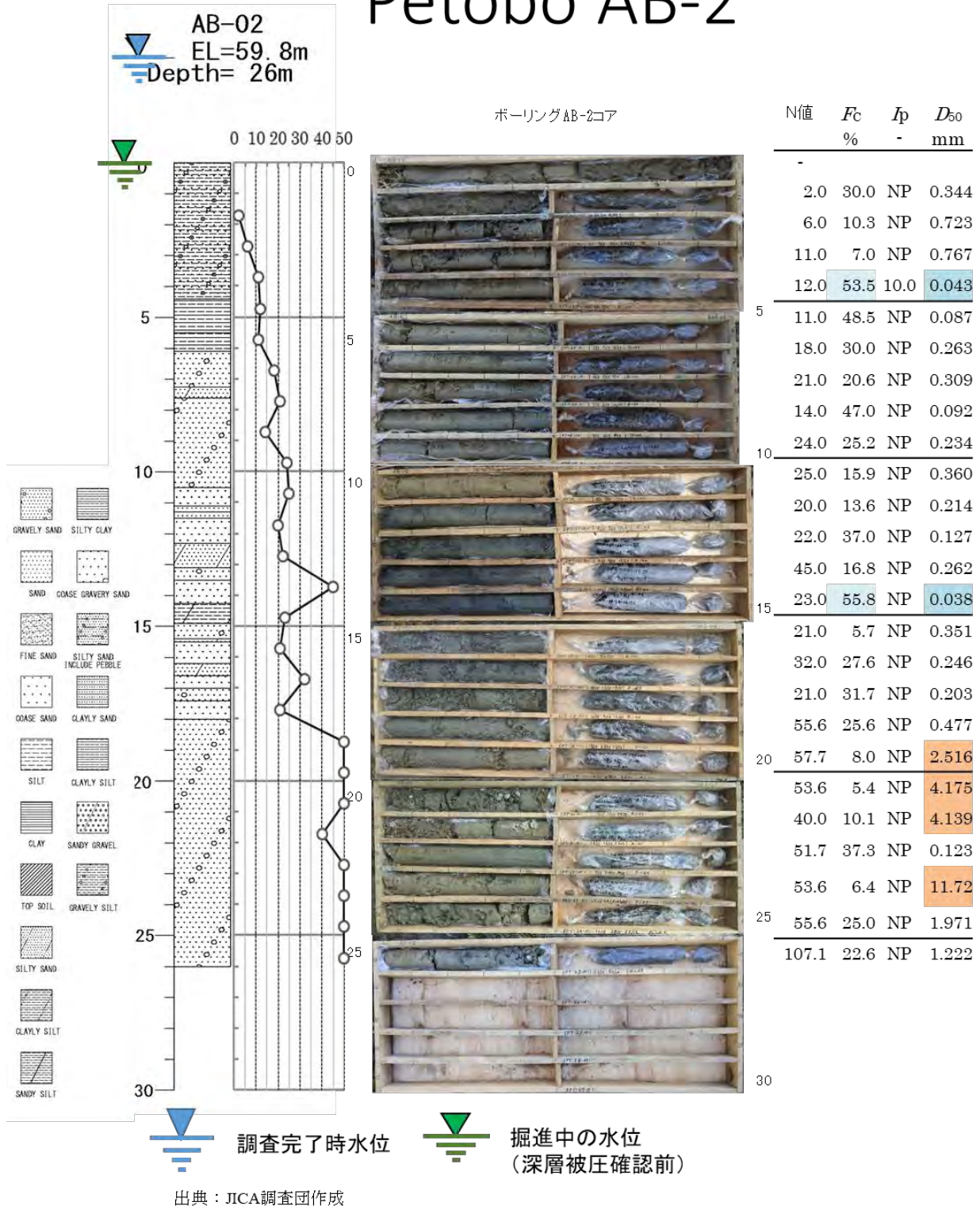


図 3-16 (2) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-2)

Petobo AB-3

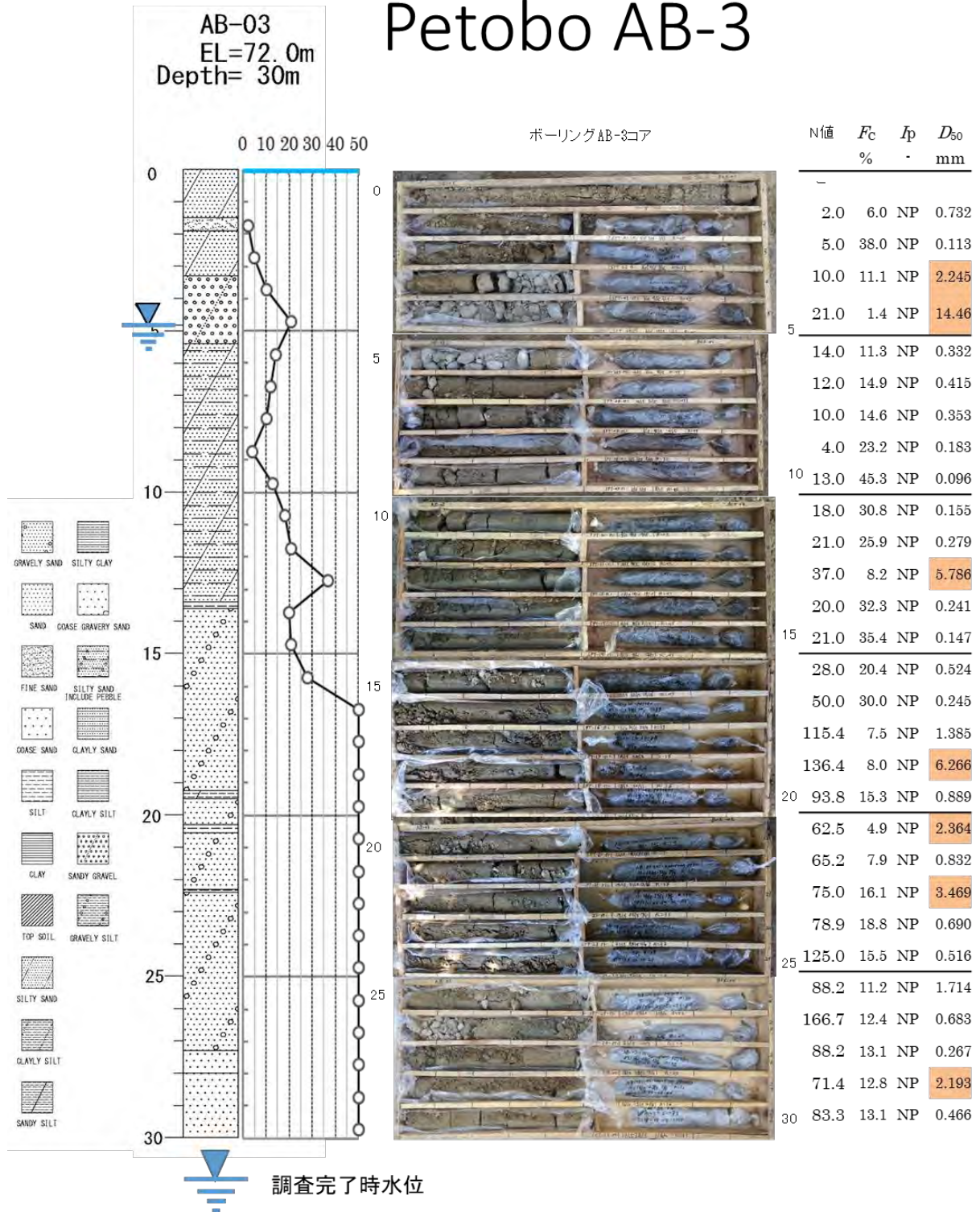


図 3-16 (3) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-3)

Lolu・Biromaru AB-5

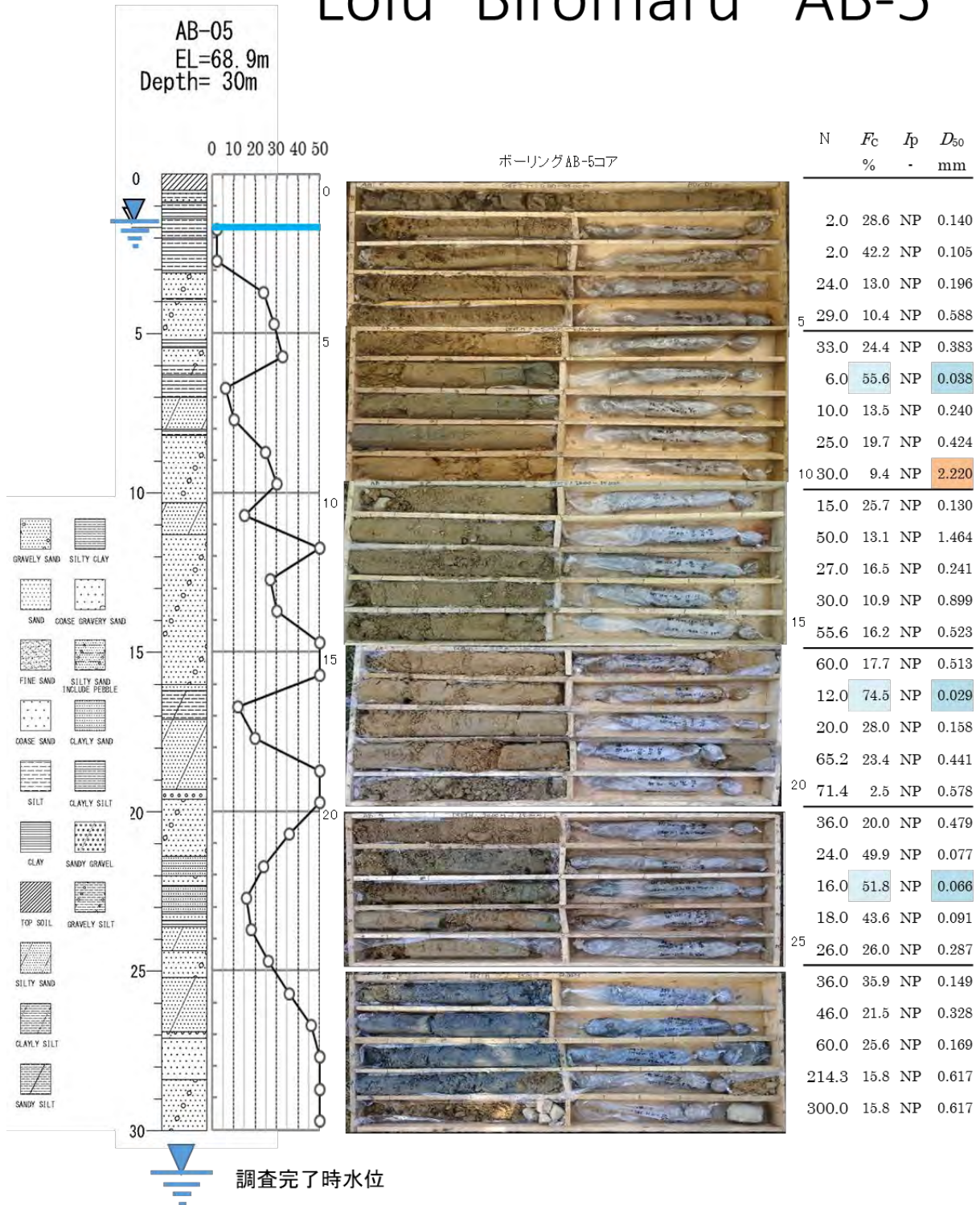


図 3-16(4) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-5)

Lolu - Biromaru AB-6

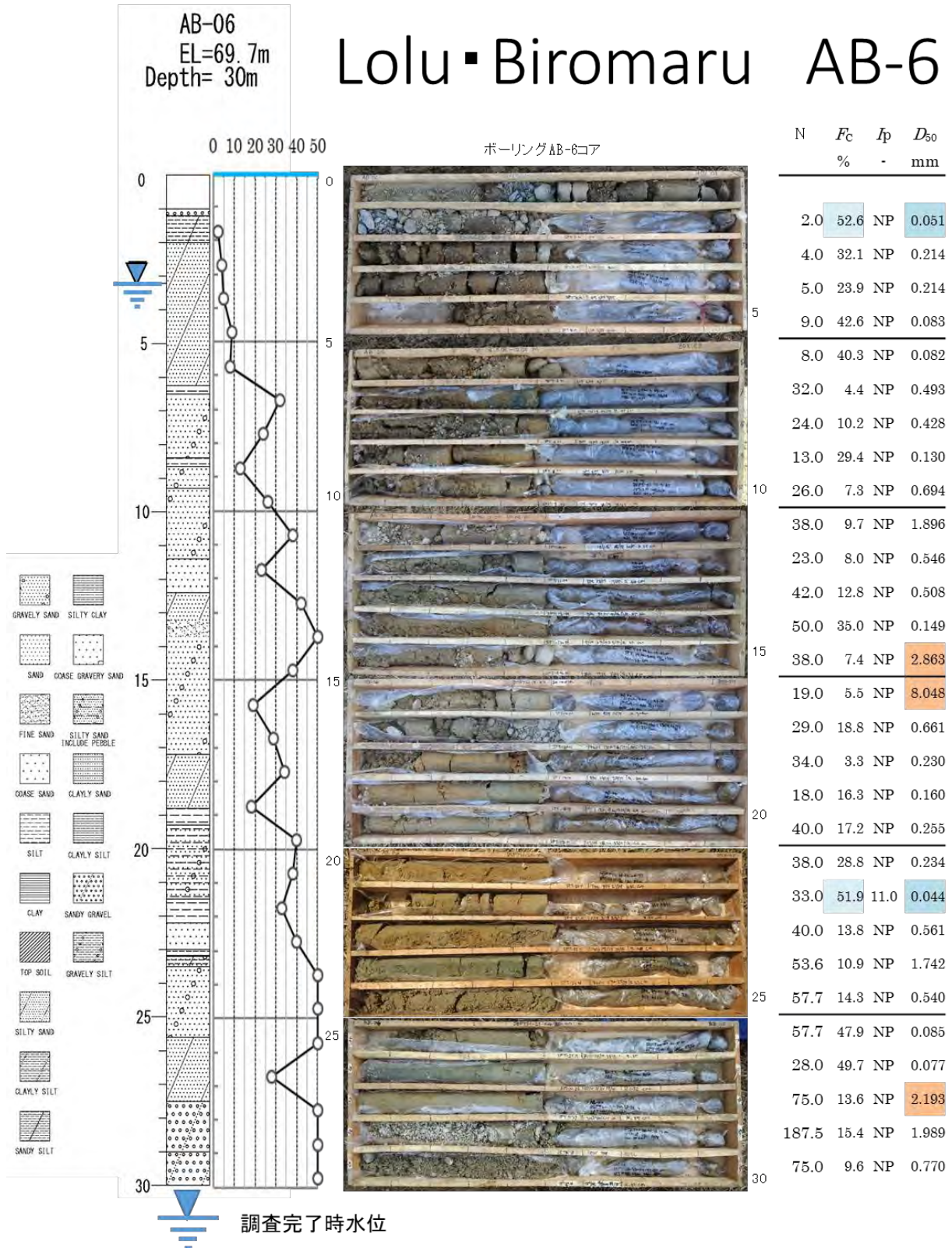


図 3-16 (5) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-6)

Lolu AB-7

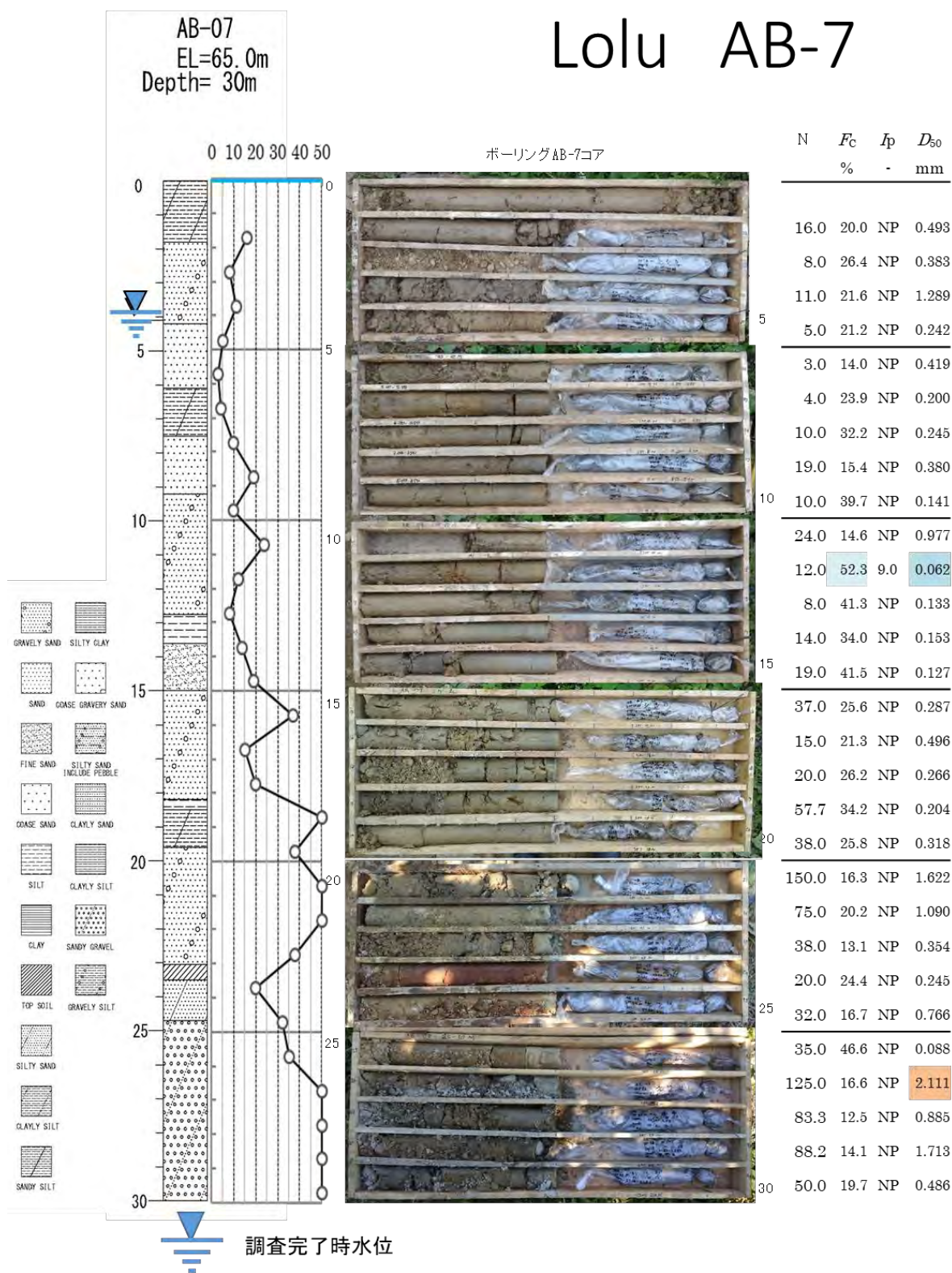


図 3-16(6) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-7)

Jono Oge AB-9

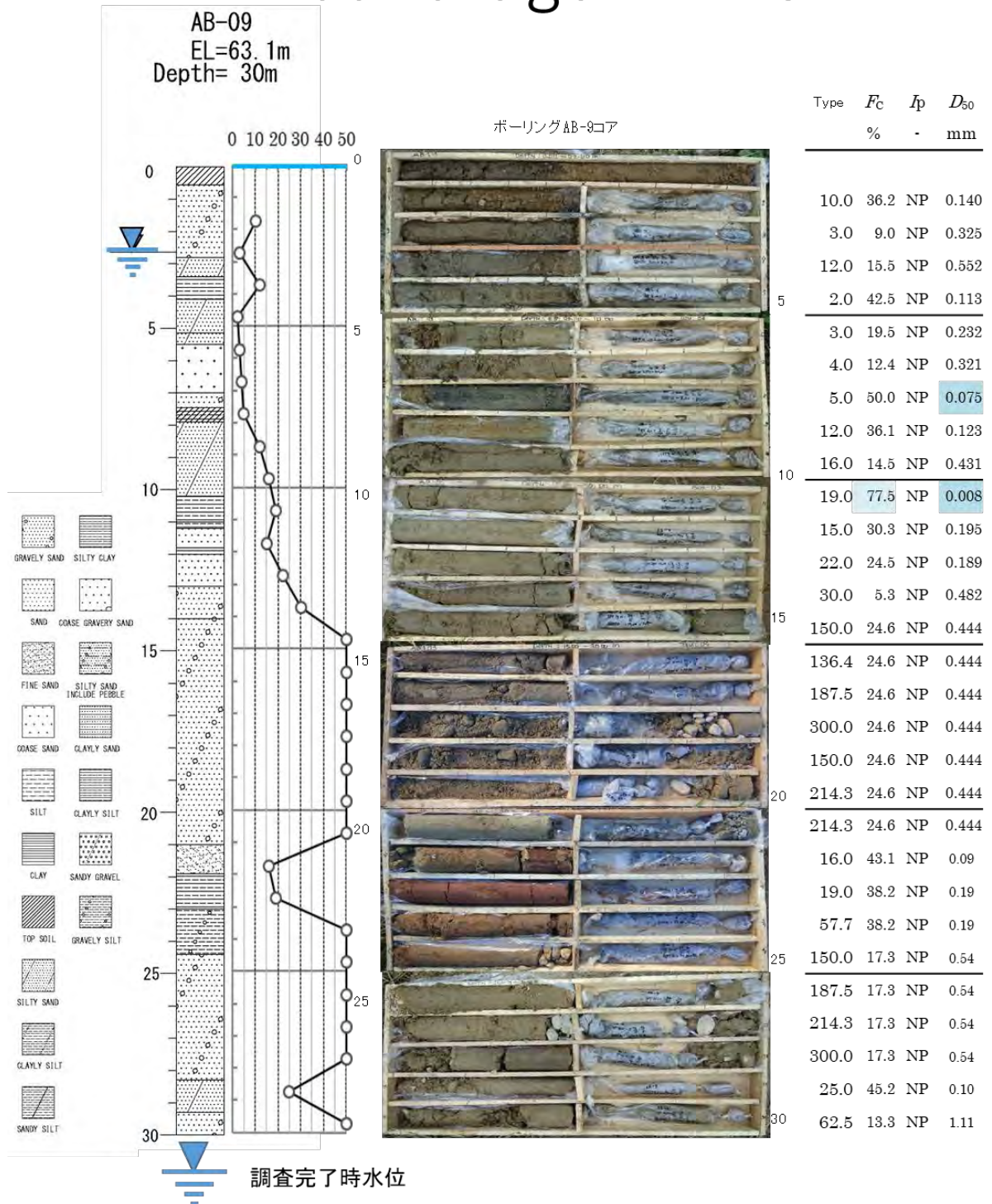


図 3-16(7) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-9)

Jono Oge AB-10

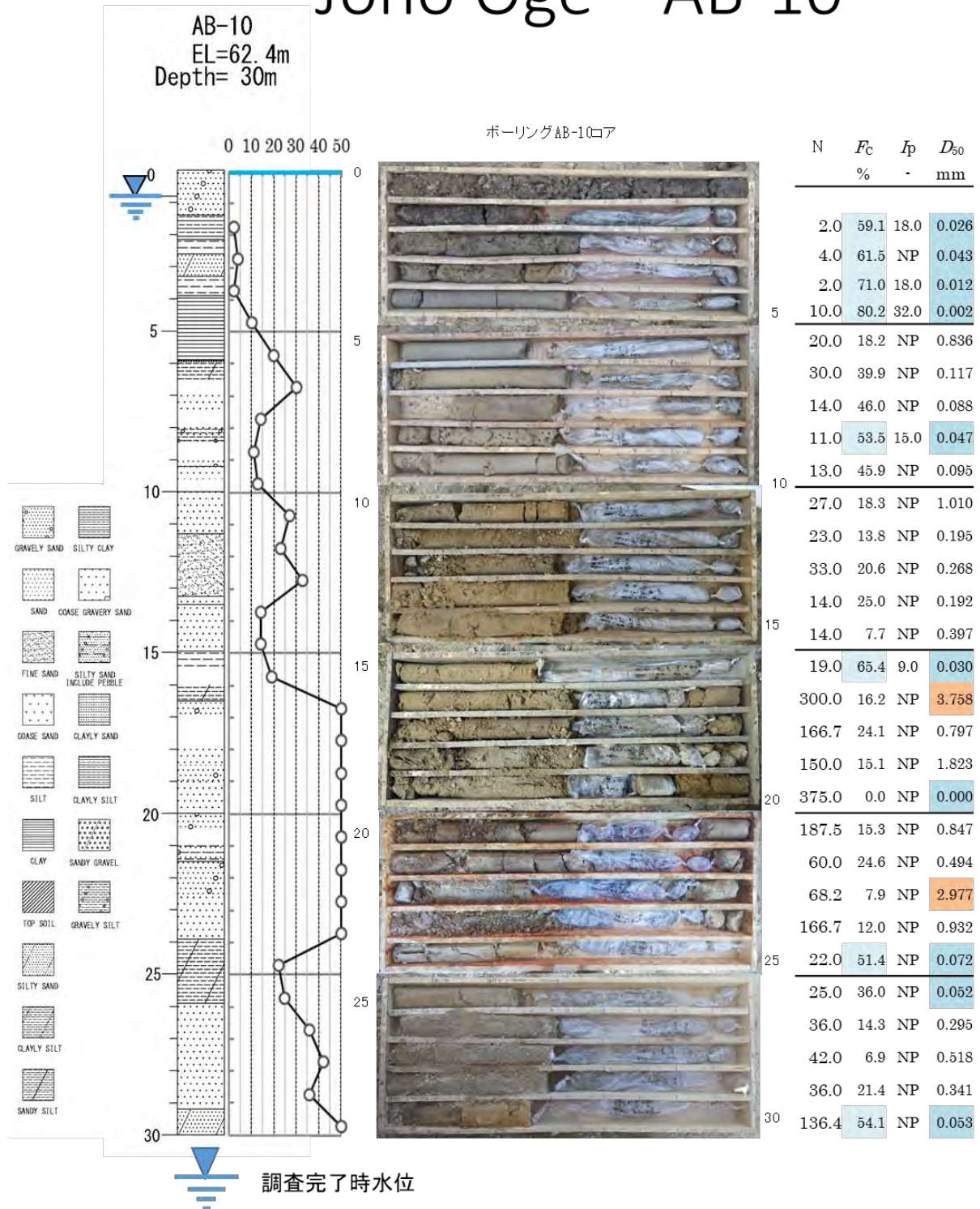


図 3-16(8) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-10)

Jono Oge AB-11

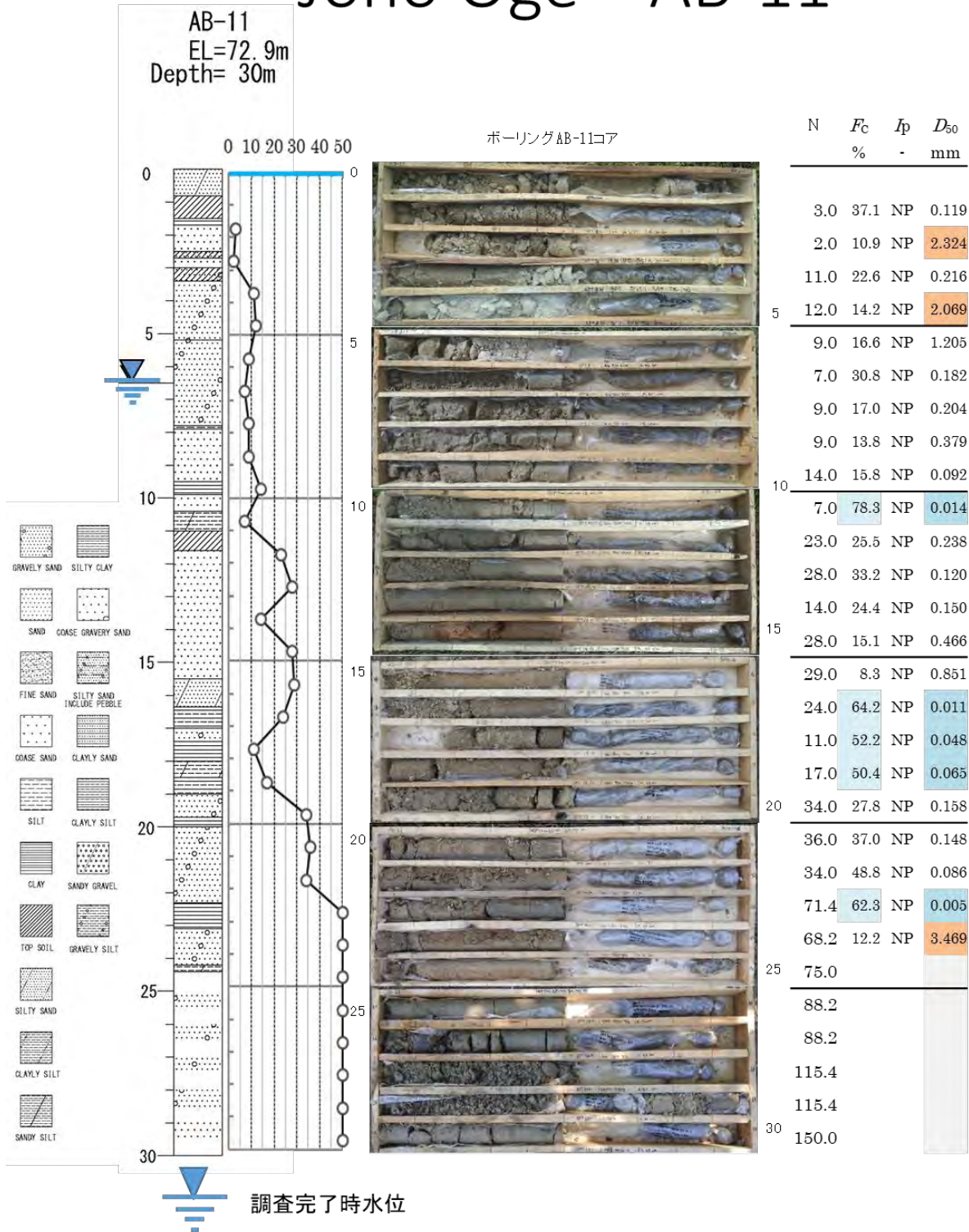


図 3-16(9) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-11)

Balaroa AB-12

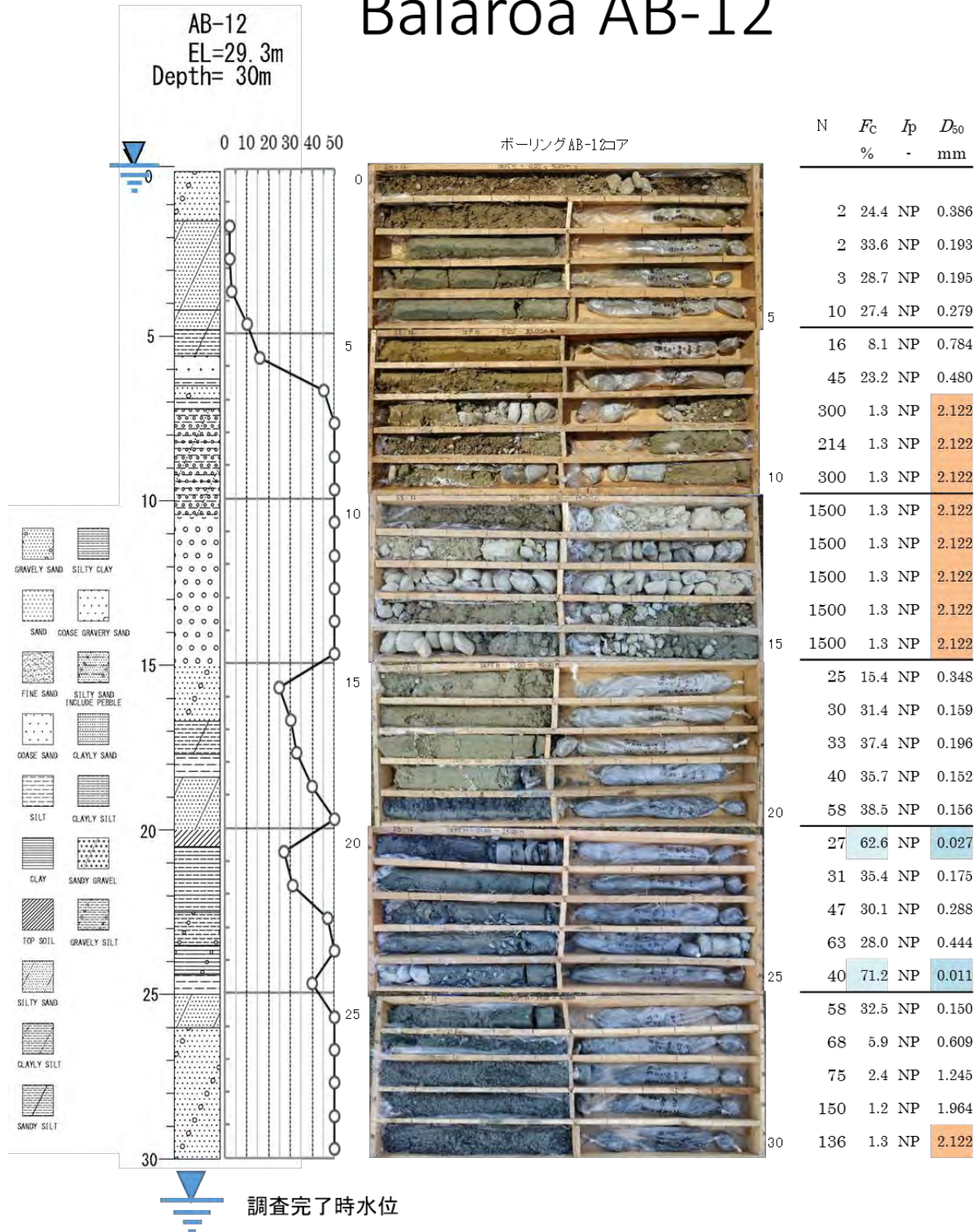
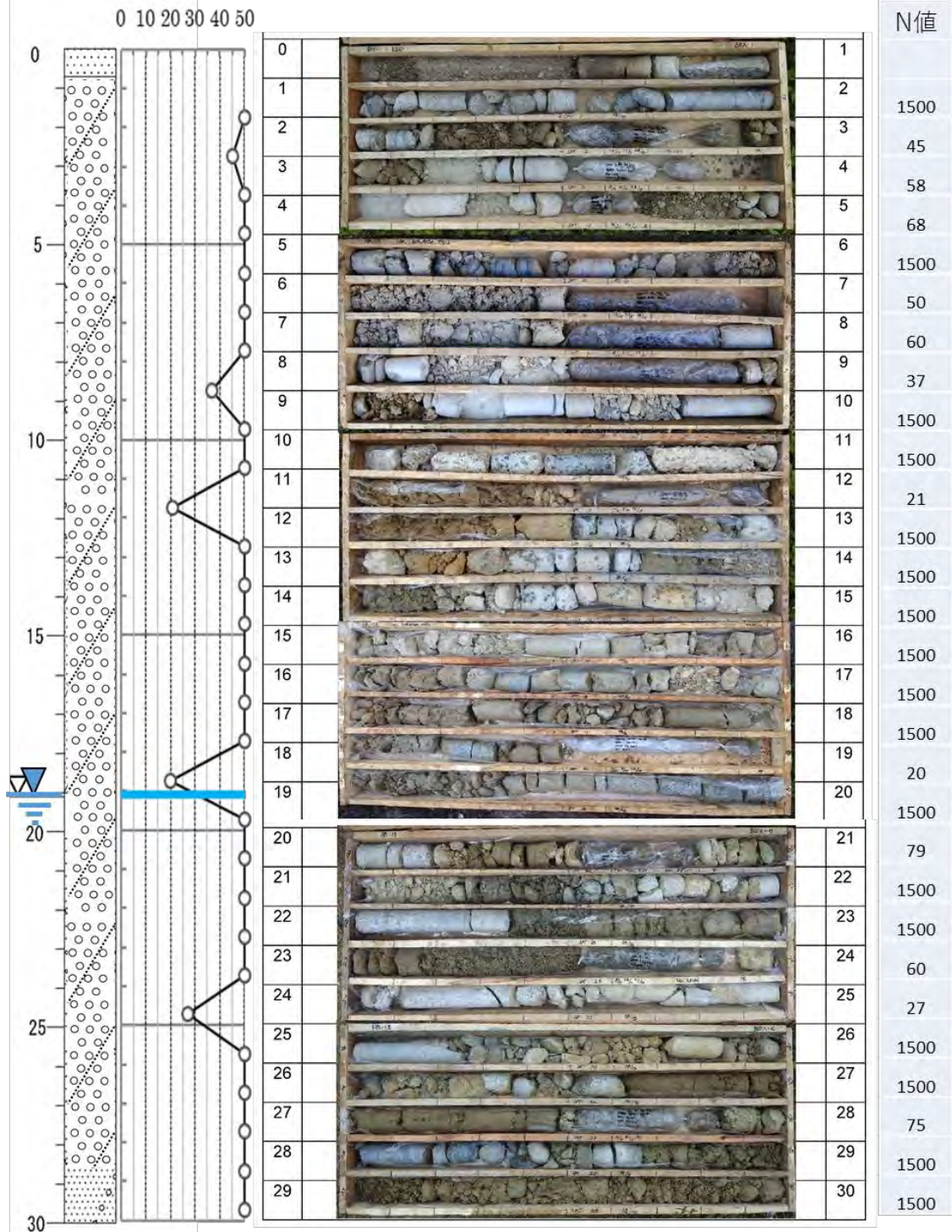


図 3-16 (10) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-12)

AB-13
 EL=71.5m
 Depth= 30m

BMKG AB-13



出典：JICA 調査団作成

図 3-16(11) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-13)

Lolu AB-14

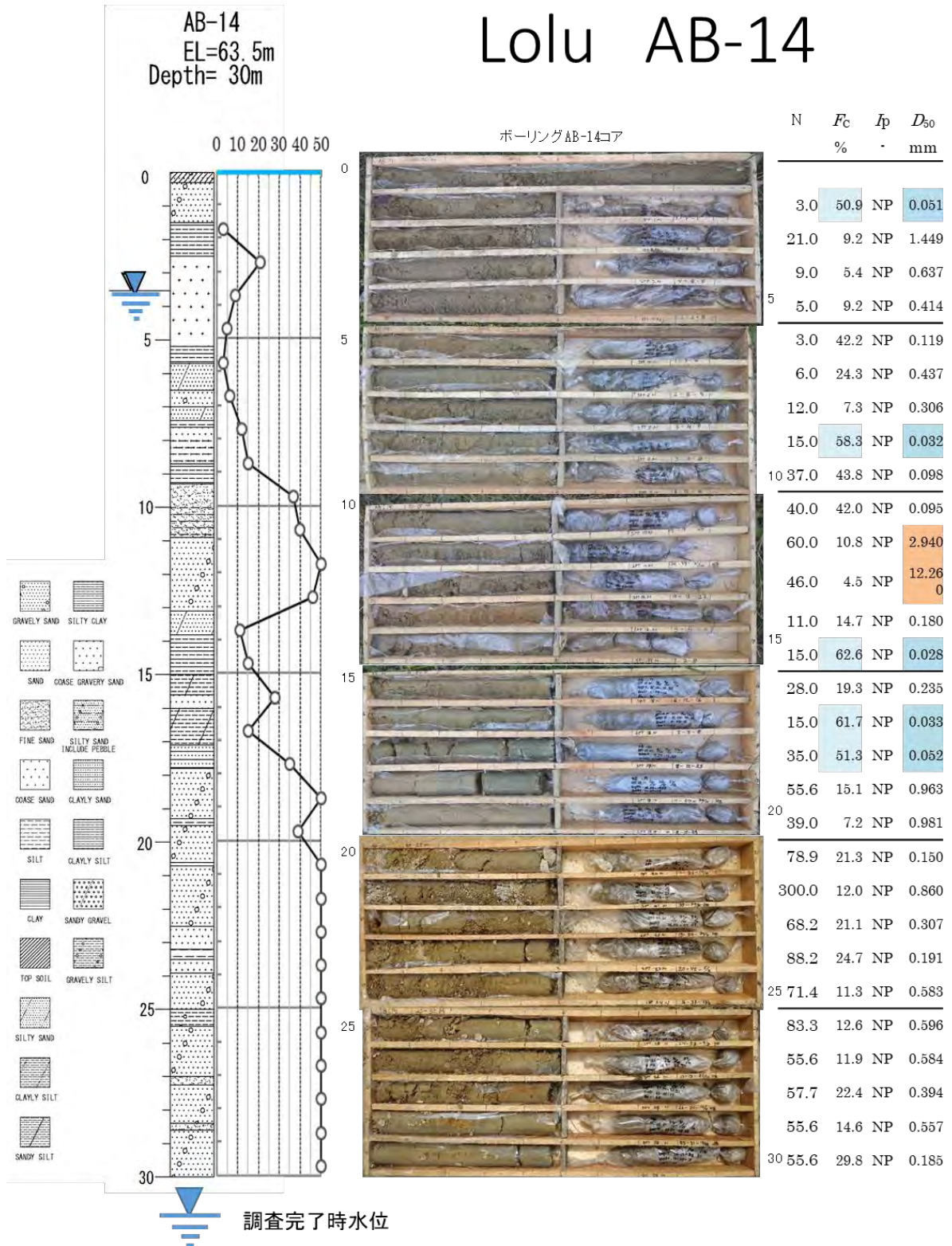


図 3-16 (12) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-14)

AB-15
EL=67.7m
Depth= 30m

Lolu AB-15

ボーリングAB-15コア



調査完了時水位

出典：JICA調査団作成

図 3-16 (13) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-15)

Lolu AB-16

AB-16
EL=71.3m
Depth= 30m

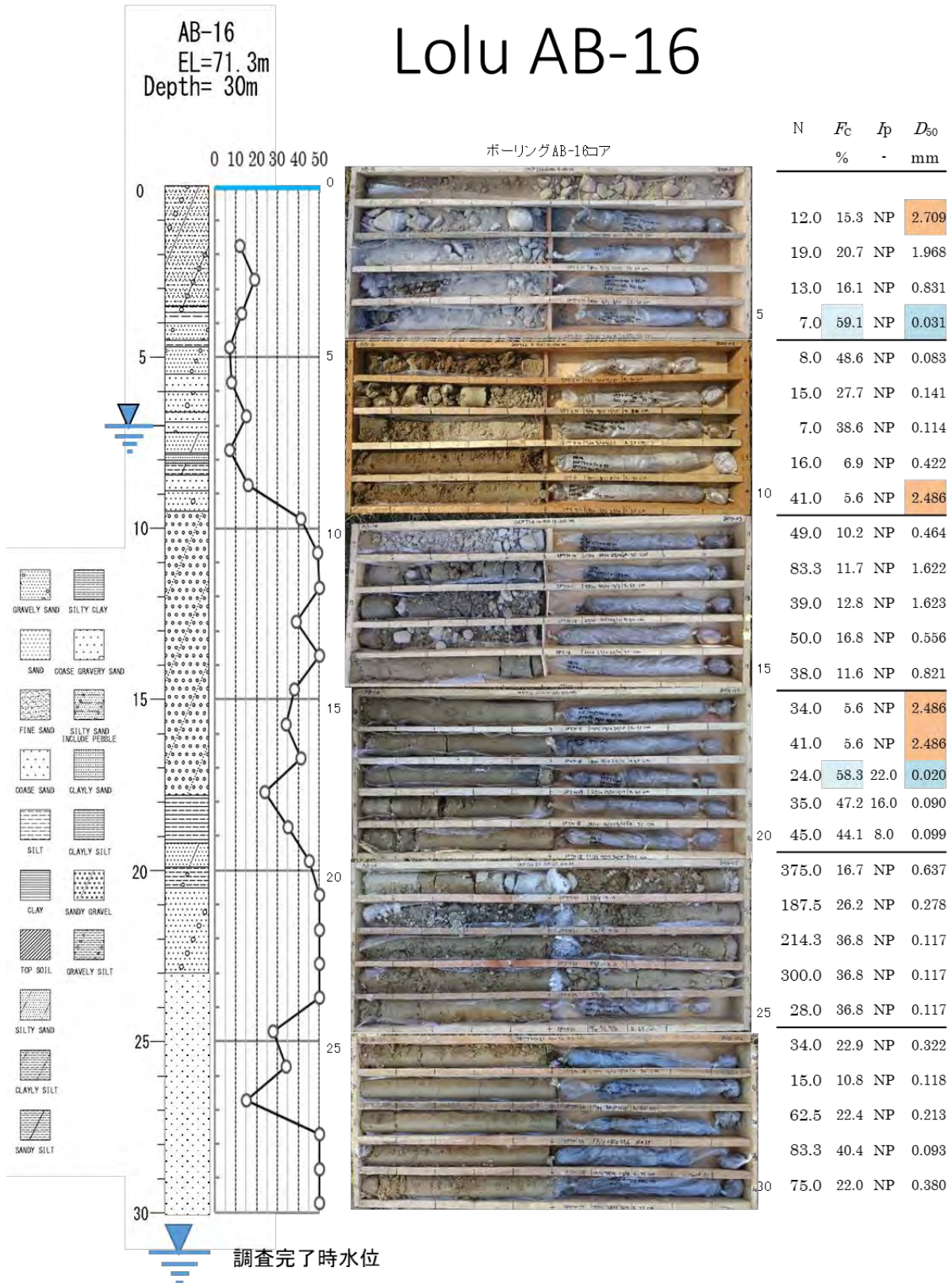
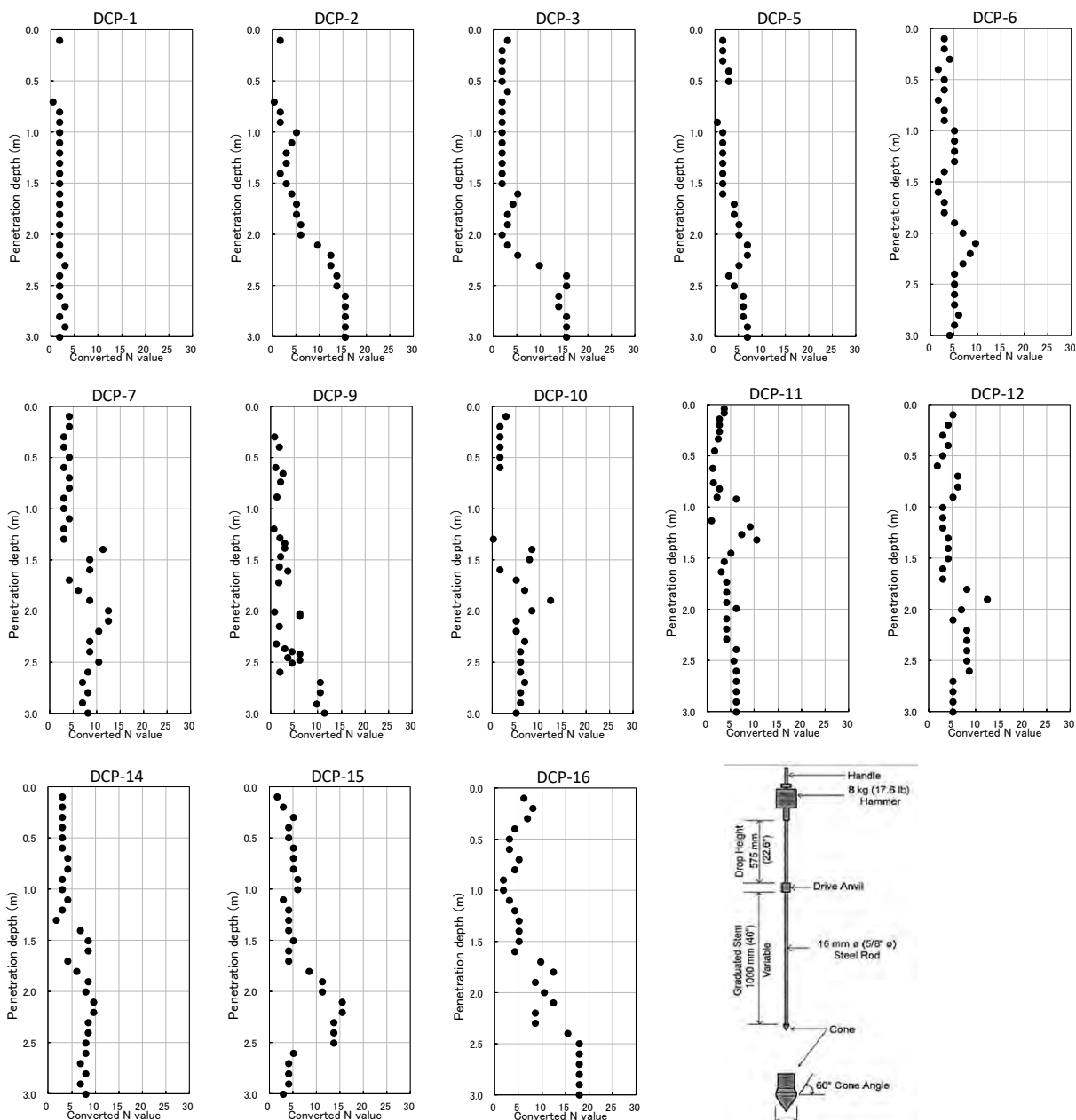


図 3-16(14) 第二次ボーリング調査結果概要 (AB-16)

DCP の換算 N 値に補正した深度分布図を図 3-17 に示す。DCP はボーリング調査の脇 1 m 程度の場所で行い、表層 3 m 程度のより詳細な地盤状況を確認するためにいった。試験方法は ASTM D6591 に準拠し、8kg の重錘を 575mm の高さから自由落下させて貫入量 10cm 毎の打撃回数を測定している。

ASTM D6591
 Scale length: 1000mm
 Penetration rod upper rod: 803mm
 Drop distance: 575±1mm
 Penetration rod lower rod: 910mm
 Drop hammer weight: 8±0.1 kg(17.6-lb)
 Dynamic cone: dia. 20±0.25mm, cone angle 60°±1°degree
 • DPI = DCP Penetration Index
 • SPT = Standard Penetration Test (ASTM D 1586-64)

Results of DCP

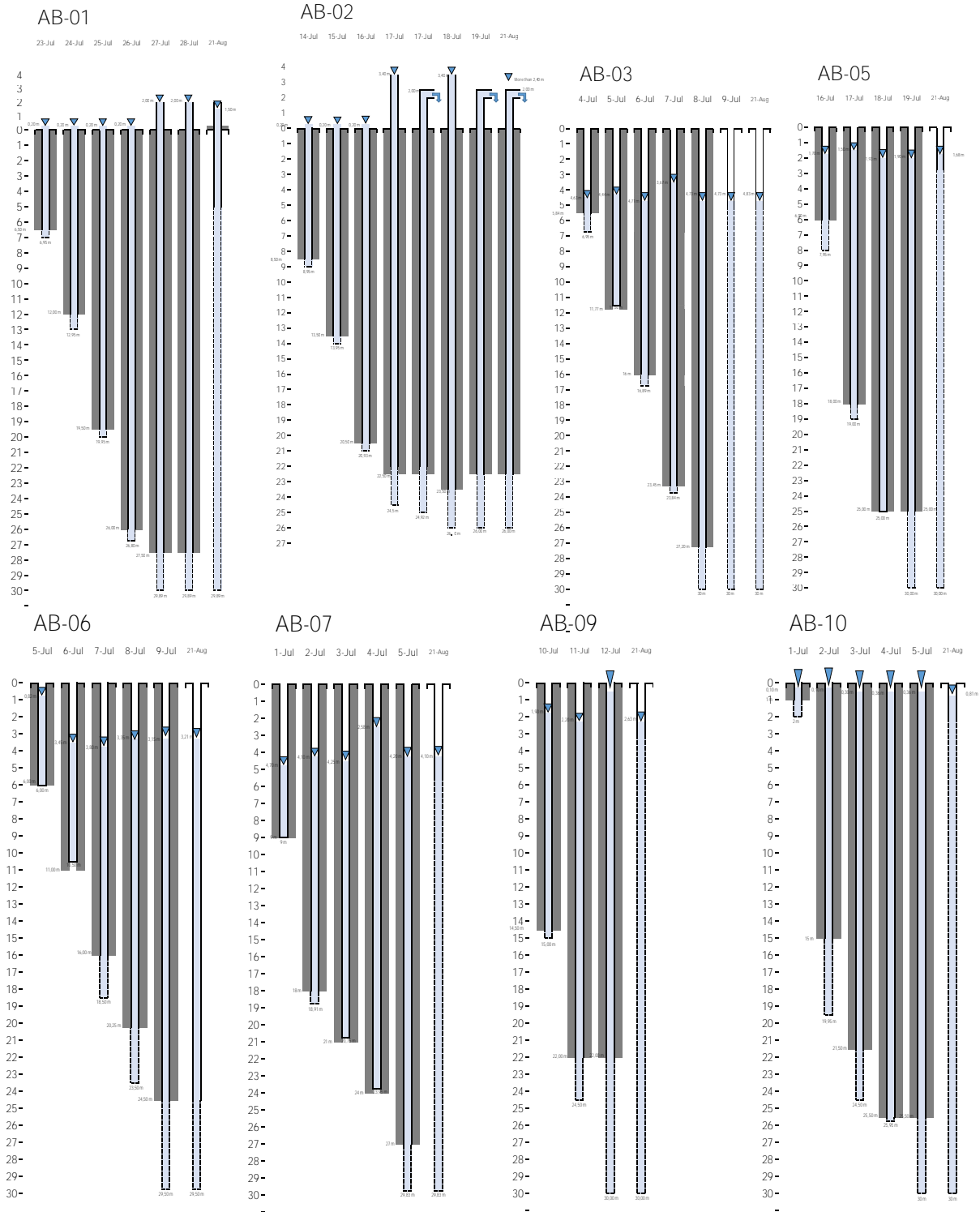


※X 軸：Converted N Value、Y 軸：Penetration Depth (m)

出典：JICA 調査団作成

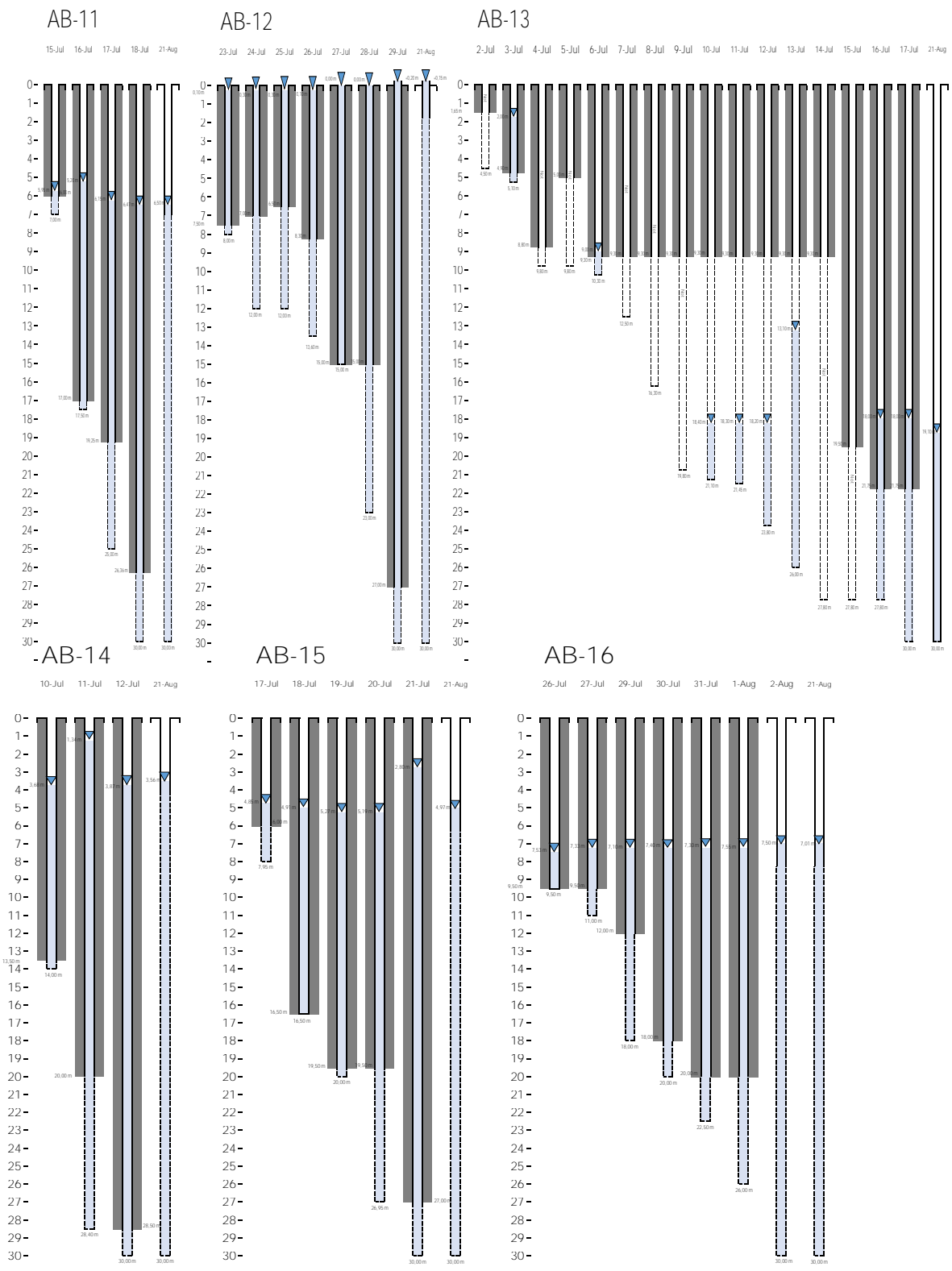
図 3-17 Nalodo の第二次調査 DCP 換算 N 値 (調査深度 3m)

ボーリング調査期間中の作業前の降水水位変化を図 3-18 (1) (2) に示す。ボーリング調査は、ケーシングを追い込みながら送水堀を基本として行っている（一部区間は泥水を使用）。毎朝作業前の水位は、一定値を示す場合が多いが、深部の被圧確認した場合には AB-1・AB-2・AB-12 に示す様に、口元から自噴している。水頭はケーシングを地上に立ち上げ、定常水位を測定した。



出典；JICA 調査団作成

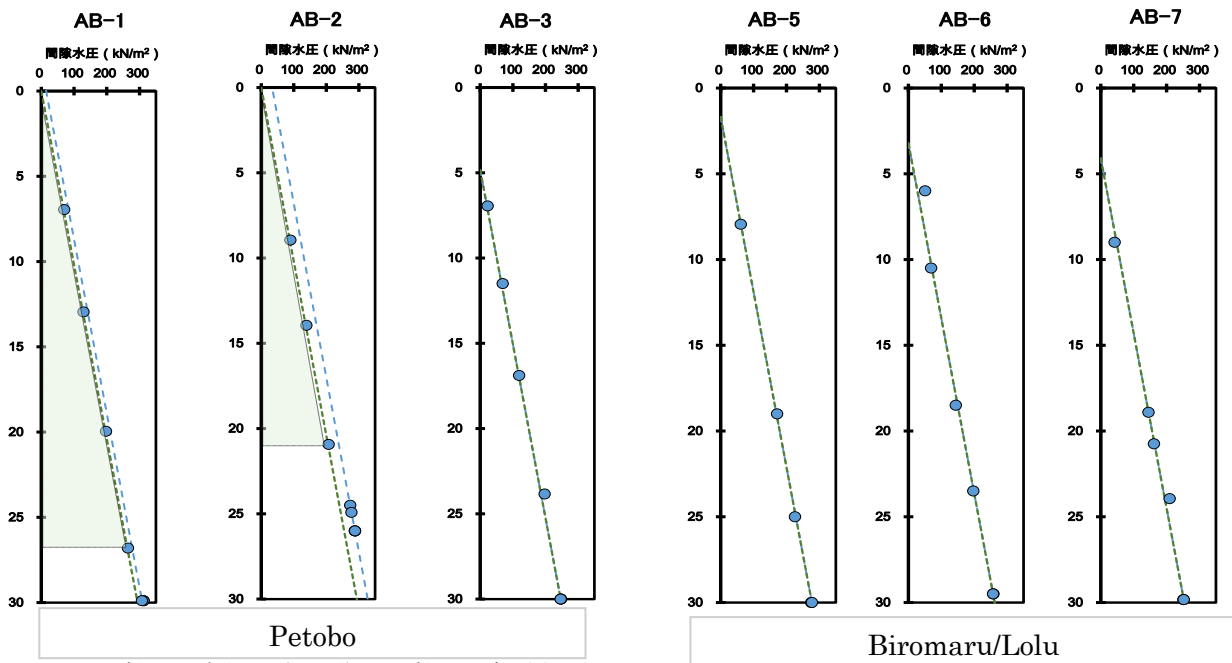
図 3-18 (1/2) 調査中の孔内水位変動図



出典：JICA 調査団作成

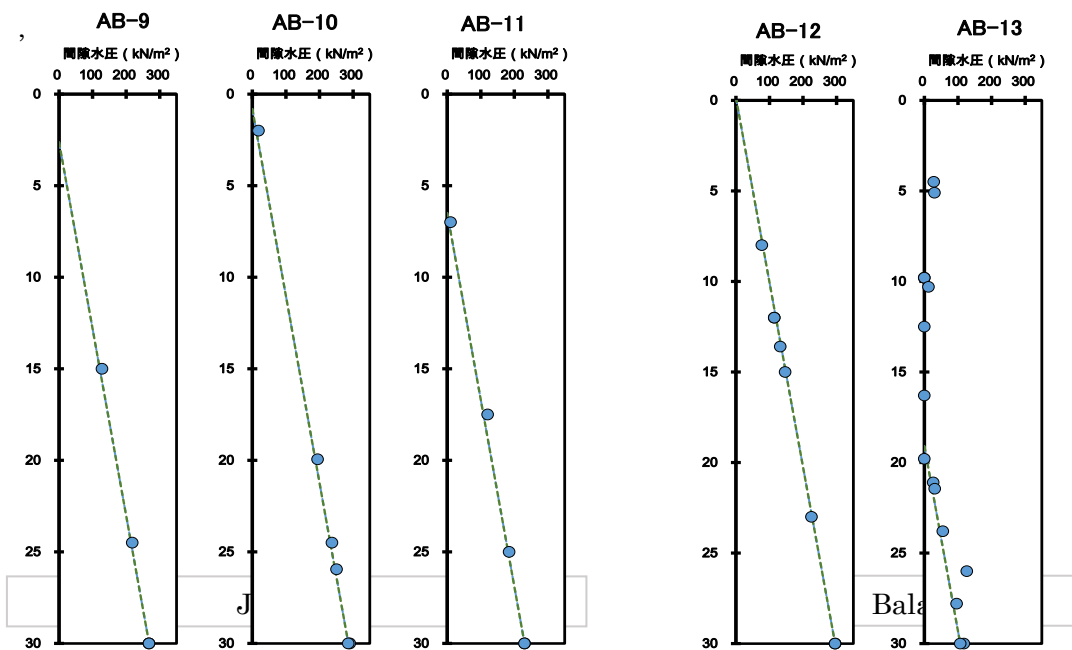
図 3-18 (2/2) 調査中の孔内水位変動図

計測した孔内水位から、ボーリング孔内の間隙水圧分布（図 3-19）を作成した。ボーリング調査では、水や泥水を使用しているため、正確な間隙水圧を測定しているわけではないが、被圧や宙水を判定することが出来る。AB-1・AB-2 孔を除くと、自由水面を持つ不圧帯水層の水圧分布特性を示している。



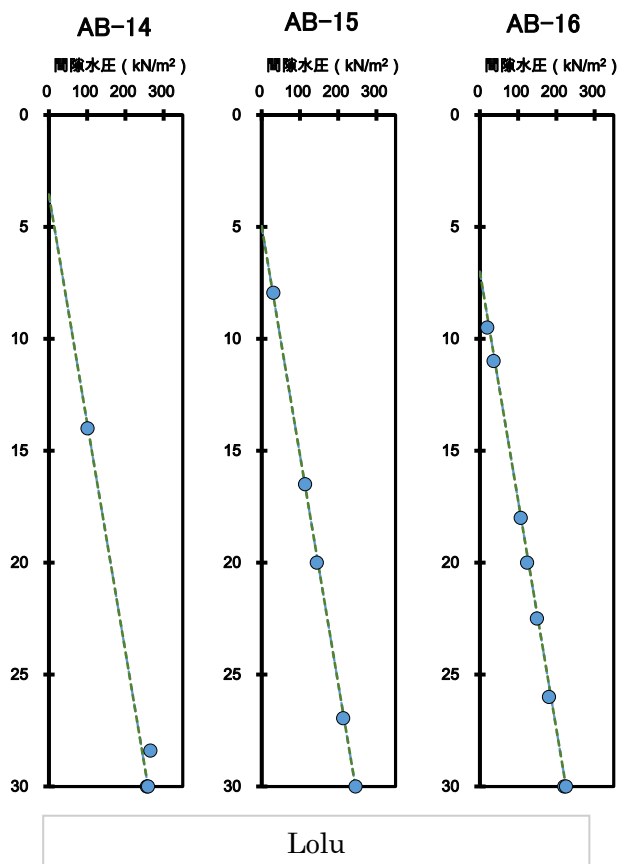
※X 軸：間隙水圧 (kN/m²)、Y 軸：深度 (m)
 出典：JICA 調査団作成

図 3-19(1/3) ボーリング第二次調査結果・間隙水圧分布 (Petobo、Biomaru/Lolu)



※X 軸：間隙水圧 (kN/m²)、Y 軸：深度 (m)
 出典：JICA 調査団作成

図 3-19(2/3) ボーリング第二次調査結果・間隙水圧分布 (Jono Oge 地区、Balara 地区)



※X 軸：間隙水圧 (kN/m²)、Y 軸：深度 (m)

出典：JICA 調査団作成

図 3-19(3/3) ボーリング第二次調査結果・間隙水圧分布 (Lolu 地区)

第二次調査は、Nalodo の長距離流動の発生原因評価を目的として、Nalodo 内部を主体に 14 孔のボーリング調査（SPT テスト）を行った。第二次調査は Nalodo が発生した内部で行っているため、表層は地震時に流動し、また液状化や地下水の噴出といった現象も起きていて、 N 値にそれらの影響を受けている可能性も考えられることに、注意が必要である。調査の結果概要は次のとおりである。

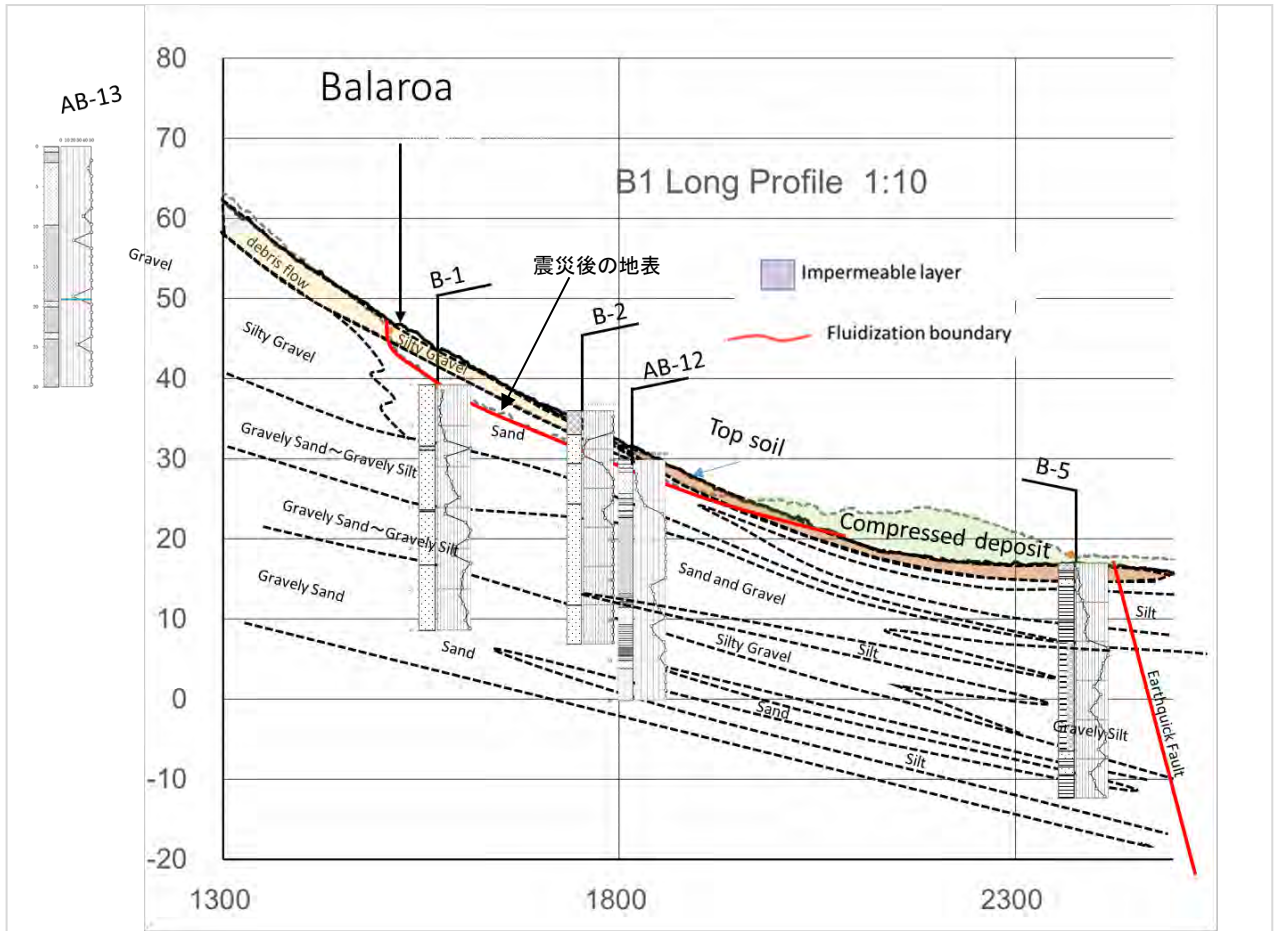
（５）Balaroa の調査結果

Balaroa の地質縦断面図を図 3-20 に、 N 値、 F_c 、 I_p 、 D_{50} 分布を表 3-7 示す。Balaroa では、中央部をとる主測線断面において、3 孔（B-1・AB-12・B-5）を実施している。中央部に表示される B-2 孔は側方崖の Nalodo 外部の調査を投影している。断面は、震災前の旧地形と被災後に改変された地形を表示している。

頭部滑落崖の断面及びボーリング調査の結果から、流動化地域では液状化する砂質土層が厚く分布することを確認した。一方、地すべり末端の B-5 孔は、浅い範囲には細粒土が分布し、深部には良く締まった礫質土～礫質砂が分布する。

- Nalodo 頭部の滑落崖は比高差 5～7m の崖が出現し、砂層を覆って土石流堆積物の巨礫層が覆っている。
- 流動化した範囲には、花崗岩巨礫が残存するものの、砂層が表面の露出し、湧水が発生していた（湧水の多い時期は、震災直後から 1 ヶ月程度の期間）。
- 砂層の層厚は頭部付近で約 15m あり、全体に N 値が小さく⁵ルーズな状態である。
- Nalodo 末端の堆積域では、高さ 5m 程度の堆積物が集積している。
- 堆積域の堆積物は、建物の残骸と表層土壌と思われる腐植臭のある細粒土層であった。
- 以上からすると、B-1 孔の表層で確認されたルーズの砂層を覆う礫質堆積物と表土などが流動したこととなる。

⁵ 本調査は地震後に実施したものであり、後述の液状化の推定も本 N 値を用いた（流動化層では地震前の状態から変化している）



出典：JICA 調査団作成

図 3-20 Balaroa の地質縦断図

表 3-7 N 値、 F_c 、 I_p 、 D_{50} 分布 (Balaroa)

B-1				
深さ (m)	N	F_c %	I_p -	D_{50} mm
0.7	8			
1.7	7	28.5	NP	0.33
2.7	3	36.1	NP	0.15
3.7	5	32.8	NP	0.27
4.7	4	24.4	NP	0.38
5.7	10	26.2	NP	0.34
6.7	12	27.1	NP	0.32
7.7	68	12.5	NP	8.42
8.7	12	22.0	NP	0.36
9.7	16			
10.7	14			
11.7	21	20.5	NP	0.36
12.7	24			
13.7	33			
14.7	13			
15.7	12	22.9	NP	0.34
16.7	42			
17.7	51			
18.7	46	24.9	NP	0.34
19.7	26			
20.7	23			
21.7	500			
22.7	40	13.7	NP	0.82
23.7	37			
24.7	37			
25.7	34			
26.7	39			
27.7	45	14.1	NP	0.74
28.7	42			
29.7	49			

AB-12				
深さ (m)	N	F_c %	I_p -	D_{50} mm
0.7				
1.7	2	24.4	NP	0.39
2.7	2	33.6	NP	0.19
3.7	3	28.7	NP	0.19
4.7	10	27.4	NP	0.28
5.7	16	8.1	NP	0.78
6.7	45	23.2	NP	0.48
7.7	300	1.3	NP	2.12
8.7	214			
9.7	300			
10.7	1,500			
11.7	1,500			
12.7	1,500			
13.7	1,500			
14.7	1,500			
15.7	25	15.4	NP	0.35
16.7	30	31.4	NP	0.16
17.7	33	37.4	NP	0.20
18.7	40	35.7	NP	0.15
19.7	58	38.5	NP	0.16
20.7	27	62.6	NP	0.03
21.7	31	35.4	NP	0.17
22.7	47	30.1	NP	0.29
23.7	63	28.0	NP	0.44
24.7	40	71.2	NP	0.01
25.7	58	32.5	NP	0.15
26.7	68	5.9	NP	0.61
27.7	75	2.4	NP	1.24
28.7	150	1.2	NP	1.96
29.7	136	1.3	NP	2.12

出典：JICA 調査団作成

(6) Petobo の調査結果

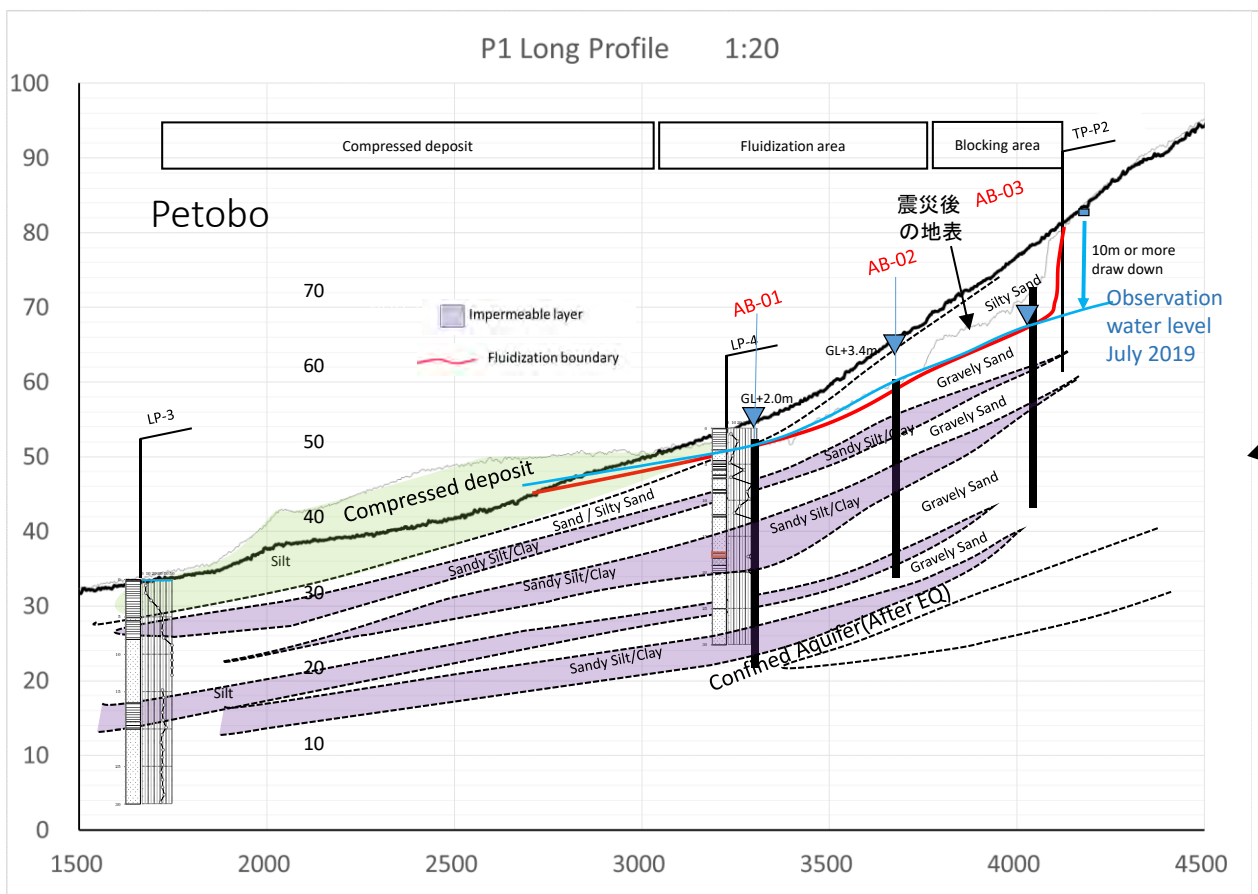
図 3-21 に Petobo の地質縦断図を、表 3-8 に N 値、 F_c 、 I_p 、 D_{50} 分布を示す。Petobo では、第二次調査で AB-1～AB-3 の 3 孔を追加した。断面は、震災前の旧地形と被災後に改変された地形を併記し、塗色は震災前の状況を推定して表示している。追加したボーリング調査では、深さ 5～10m に液状化する地層が分布し、深部では礫質砂層に挟まれたシルト層を複数挟在することを確認した。AB-1 及び AB-2 地点では最下部の難透水層を掘り抜くと被圧した地下水が地表に湧き出す構造を確認した。

- Nalodo 頭部の滑落崖は比高差 5～7m の崖が出現し、地盤が低下した。滑落崖から 400m 程度の区間は、多くの展張亀裂が入り、ブロック化した堆積物が覆っている。
- それよりも下流側の区間は、震災 1 ヶ月程度では湧水が残り、湿地状となっていた。ほとんどの堆積物が下の斜面に流動し、無くなった区間と考えられる。
- Nalodo 末端の堆積域では、高さ 5m 程度の堆積物が集積している。
- 堆積域の堆積物は、建物の残骸と表層土壌と思われる細粒土層であった。
- Nalodo 内部で行った AB-3 孔および AB-2 孔は、孔底付近まで達すると地表よりも高い水位となり、被圧状態である事が確認された。
- 中央南側の LP-2 孔は、Nalodo の範囲内であるが、上から流動層が薄く被った地点で、基層が流動していない地域である。

(7) Jono Oge の調査結果

図 3-22 に Jono Oge の地質縦断図を、表 3-9 に N 値、 F_c 、 I_p 、 D_{50} を示す。Jono Oge では、第一次調査の J-1～J-3 に加えて、第二次調査で AB-10・AB-11 を追加した。断面は、震災前の旧地形と被災後に改変された地形を併記し、塗色は震災前の状況を推定して表示している。追加したボーリング調査では、頭部付近の深さ 5～10m までルーズな砂質土層が分布し、深部では礫質砂層に挟まれたシルト層が複数挟在することを確認した。また、下半部の堆積域の浅所地盤は、細粒土層が卓越することを確認した。

- Nalodo 頭部の滑落崖は比高差 2～3m の崖が出現し、地盤が低下した。滑落崖から 300m 程度の区間は、多くの展張亀裂が入り、ブロック化した堆積物が覆っている。
- それよりも下流側の区間は、震災 1 ヶ月程度では湧水が残り、湿地状となっていた。ほとんどの堆積物が下の斜面に流動し、無くなった区間と考えられる。
- Nalodo 末端では、大量湧水により移動土塊が砂泥流として Palu 川まで流出したため、ほとんど堆積物は残っていない。高さ 1m 程度の堆積物のみが集積している。
- Nalodo 南部の赤い屋根の家は、Nalodo 内で動かなかった家として注目したが、周辺の流動層が極薄いことが動かなかった原因と考えられる。赤い家の南部は薄く堆積物が覆った。



出典：JICA 調査団作成

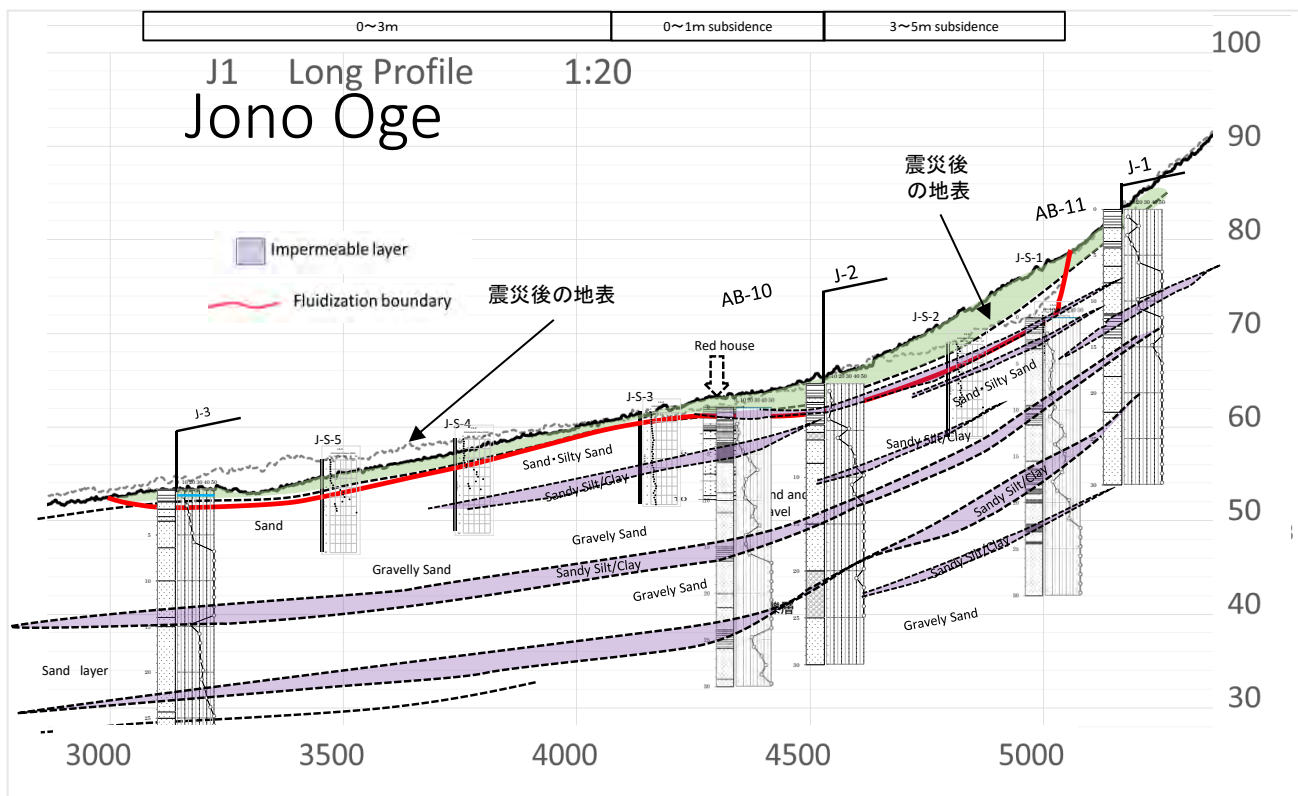
図 3-21 Petobo の地質縦断面図

表 3-8 N 値、 F_c 、 I_p 、 D_{50} 分布 (Petobo)

AB-1				
深さ (m)	N値	F_c %	I_p	D_{50} mm
0.7				
1.7	2.0	58.3	NP	0.04
2.7	2.0	40.0	NP	0.13
3.7	4.0	9.1	NP	1.05
4.7	7.0	21.1	NP	0.35
5.7	10.0	44.4	NP	0.10
6.7	9.0	33.0	NP	1.83
7.7	13.0	28.7	NP	0.29
8.7	16.0	7.4	NP	1.87
9.7	17.0	21.5	NP	0.17
10.7	8.0	11.8	NP	0.25
11.7	17.0	23.5	NP	0.21
12.7	19.0	64.6	13	0.02
13.7	12.0	56.8	16	0.02
14.7	16.0	48.8	NP	0.08
15.7	25.0	49.4	NP	0.08
16.7	19.0	29.6	NP	0.19
17.7	50.0	21.5	NP	0.25
18.7	41.0	6.2	NP	2.57
19.7	19.0	33.7	NP	0.17
20.7	24.0	60.0	21	0.02
21.7	88.2	7.6	NP	0.65
22.7	71.4	7.7	NP	0.87
23.7	40.0	8.1	NP	1.27
24.7	10.0	35.2	NP	0.14
25.7	15.0	67.8	NP	0.02
26.7	60.0	18.6	NP	0.55
27.7	29.0	58.3	8	0.03
28.7	36.0	17.6	NP	0.32
29.7	62.5	29.6	NP	0.19

AB-3				
深さ (m)	N値	F_c %	I_p	D_{50} mm
0.7				
1.7	2.0	6.0	NP	0.73
2.7	5.0	38.0	NP	0.11
3.7	10.0	11.1	NP	2.25
4.7	21.0	1.4	NP	14.46
5.7	14.0	11.3	NP	0.33
6.7	12.0	14.9	NP	0.42
7.7	10.0	14.6	NP	0.35
8.7	4.0	23.2	NP	0.18
9.7	13.0	45.3	NP	0.10
10.7	18.0	30.8	NP	0.16
11.7	21.0	25.9	NP	0.28
12.7	37.0	8.2	NP	5.79
13.7	20.0	32.3	NP	0.24
14.7	21.0	35.4	NP	0.15
15.7	28.0	20.4	NP	0.52
16.7	50.0	30.0	NP	0.24
17.7	115.4	7.5	NP	1.38
18.7	136.4	8.0	NP	6.27
19.7	93.8	15.3	NP	0.89
20.7	62.5	4.9	NP	2.36
21.7	65.2	7.9	NP	0.83
22.7	75.0	16.1	NP	3.47
23.7	78.9	18.8	NP	0.69
24.7	125.0	15.5	NP	0.52
25.7	88.2	11.2	NP	1.71
26.7	166.7	12.4	NP	0.68
27.7	88.2	13.1	NP	0.27
28.7	71.4	12.8	NP	2.19
29.7	83.3	13.1	NP	0.47

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 3-22 Jono Oge の地質縦断面図

表 3-9 N 値、 F_C 、 I_p 、 D_{50} 分布 (Jono Oge)

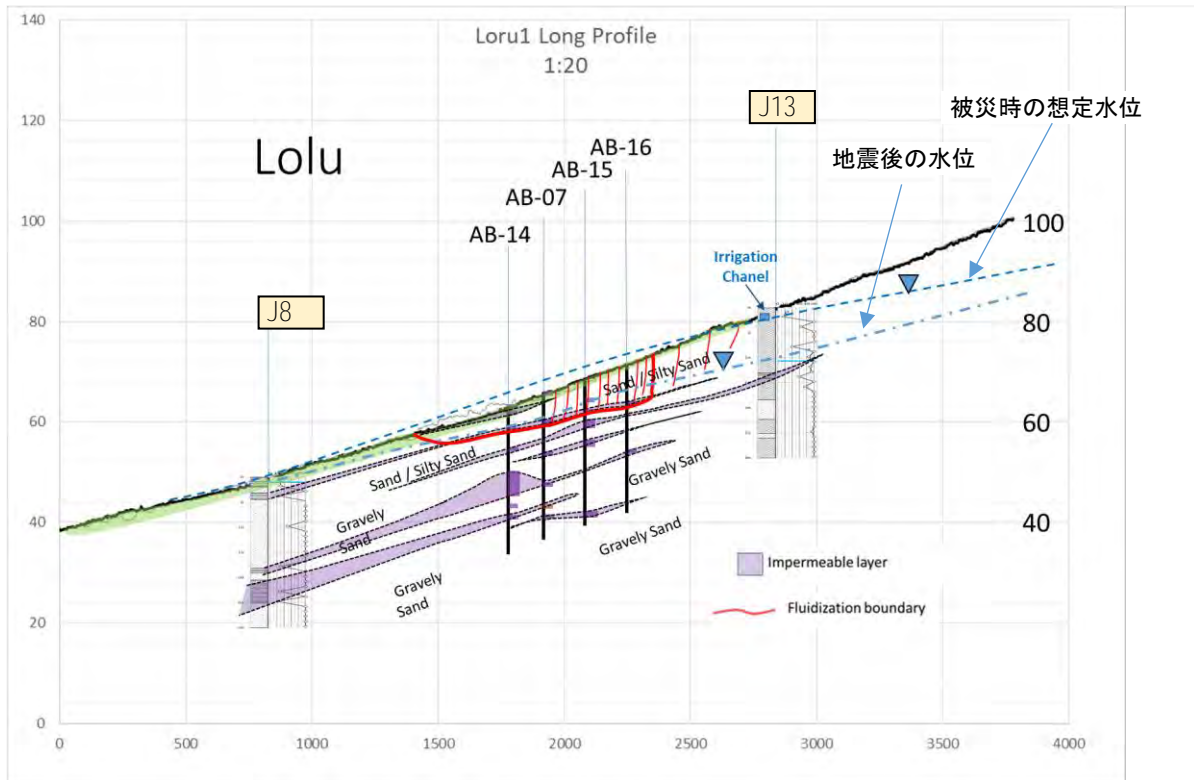
AB-10					AB-11				
深さ (m)	N値	F_C %	I_p	D_{50} mm	深さ (m)	N値	F_C %	I_p	D_{50} mm
0.7					0.7				
1.7	2.0	59.1	18	0.03	1.7	3.0	37.1	NP	0.12
2.7	4.0	61.5	NP	0.04	2.7	2.0	10.9	NP	2.32
3.7	2.0	71.0	18	0.01	3.7	11.0	22.6	NP	0.22
4.7	10.0	80.2	32	0.00	4.7	12.0	14.2	NP	2.07
5.7	20.0	18.2	NP	0.84	5.7	9.0	16.6	NP	1.20
6.7	30.0	39.9	NP	0.12	6.7	7.0	30.8	NP	0.18
7.7	14.0	46.0	NP	0.09	7.7	9.0	17.0	NP	0.20
8.7	11.0	53.5	15	0.05	8.7	9.0	13.8	NP	0.38
9.7	13.0	45.9	NP	0.10	9.7	14.0	15.8	NP	0.09
10.7	27.0	18.3	NP	1.01	10.7	7.0	78.3	NP	0.01
11.7	23.0	13.8	NP	0.19	11.7	23.0	25.5	NP	0.24
12.7	33.0	20.6	NP	0.27	12.7	28.0	33.2	NP	0.12
13.7	14.0	25.0	NP	0.19	13.7	14.0	24.4	NP	0.15
14.7	14.0	7.7	NP	0.40	14.7	28.0	15.1	NP	0.47
15.7	19.0	65.4	9	0.03	15.7	29.0	8.3	NP	0.85
16.7	300.0	16.2	NP	3.76	16.7	24.0	64.2	NP	0.01
17.7	166.7	24.1	NP	0.80	17.7	11.0	52.2	NP	0.05
18.7	150.0	15.1	NP	1.82	18.7	17.0	50.4	NP	0.06
19.7	375.0	0.0	NP	0.00	19.7	34.0	27.8	NP	0.16
20.7	187.5	15.3	NP	0.85	20.7	36.0	37.0	NP	0.15
21.7	60.0	24.6	NP	0.49	21.7	34.0	48.8	NP	0.09
22.7	68.2	7.9	NP	2.98	22.7	71.4	62.3	NP	0.00
23.7	166.7	12.0	NP	0.93	23.7	68.2	12.2	NP	3.47
24.7	22.0	51.4	NP	0.07	24.7	75.0	0.0	0	0.00
25.7	25.0	36.0	NP	0.05	25.7	88.2	0.0	0	0.00
26.7	36.0	14.3	NP	0.29	26.7	88.2	0.0	0	0.00
27.7	42.0	6.9	NP	0.52	27.7	115.4	0.0	0	0.00
28.7	36.0	21.4	NP	0.34	28.7	115.4	0.0	0	0.00
29.7	136.4	54.1	NP	0.05	29.7	150.0	0.0	0	0.00

出典：JICA 調査団作成

(8) Lolu の調査結果

図 3-23 に Lolu の地質縦断図を、表 3-10 に N 値、 F_c 、 I_p 、 D_{50} 分布を示す。Lolu では、第一次調査の J-8 及び J-13 に加えて、第二次調査で AB-7 及び AB-14～AB-16 を追加した。断面は、震災前の旧地形と被災後に改変された地形を併記し、塗色は震災前の状況を推定して表示している。ボーリング調査に加えて、インドネシア側が実施した CPTu 調査による土性図も併記している。追加したボーリング調査では、頭部付近の深さ 5～10m までルーズな砂質土層が分布し、深部では礫質砂層に挟まれたシルト層を複数挟在することを確認した。第一次調査で行った灌漑水路付近及び地すべり末端より下流側では、 $N > 50$ ゾーンが浅所から分布するのとは対照的である。

- Lolu では、最も流動した場所での流動距離は 100m を超えたが、滑落崖は形成せずに、展張性のブロック化ゾーンが広く分布した。そのため、地表面標高にほとんど変化が見られなかった。
- 流動した範囲のボーリング調査 (AB-7・AB-14～AB-16) では、約 10m のルーズな砂質土層が分布することを確認した。地下水位は、震災後地表近くにあったが、調査時には GL-5 m 程度となる。
- Nalodo 末端の明瞭な堆積域はなく、移動した土塊で丘様の地形は形成されていない。



出典：JICA 調査団作成

図 3-23 Loruの地質縦断面図

表 3-10 N 値、 F_c 、 I_p 、 D_{50} 分布 (Loru)

AB-7				
深さ (m)	N値	F_c %	I_p	D_{50} mm
0.7				
1.7	16.0	20.0	NP	0.49
2.7	8.0	26.4	NP	0.38
3.7	11.0	21.6	NP	1.29
4.7	5.0	21.2	NP	0.24
5.7	3.0	14.0	NP	0.42
6.7	4.0	23.9	NP	0.20
7.7	10.0	32.2	NP	0.25
8.7	19.0	15.4	NP	0.38
9.7	10.0	39.7	NP	0.14
10.7	24.0	14.6	NP	0.98
11.7	12.0	52.3	9	0.06
12.7	8.0	41.3	NP	0.13
13.7	14.0	34.0	NP	0.15
14.7	19.0	41.5	NP	0.13
15.7	37.0	25.6	NP	0.29
16.7	15.0	21.3	NP	0.50
17.7	20.0	26.2	NP	0.27
18.7	57.7	34.2	NP	0.20
19.7	38.0	25.8	NP	0.32
20.7	150.0	16.3	NP	1.62
21.7	75.0	20.2	NP	1.09
22.7	38.0	13.1	NP	0.35
23.7	20.0	24.4	NP	0.24
24.7	32.0	16.7	NP	0.77
25.7	35.0	46.6	NP	0.09
26.7	125.0	16.6	NP	2.11
27.7	83.3	12.5	NP	0.89
28.7	88.2	14.1	NP	1.71
29.7	50.0	19.7	NP	0.49

AB-14				
深さ (m)	N値	F_c %	I_p	D_{50} mm
0.7				
1.7	3.0	50.9	NP	0.05
2.7	21.0	9.2	NP	1.45
3.7	9.0	5.4	NP	0.64
4.7	5.0	9.2	NP	0.41
5.7	3.0	42.2	NP	0.12
6.7	6.0	24.3	NP	0.44
7.7	12.0	7.3	NP	0.31
8.7	15.0	58.3	NP	0.03
9.7	37.0	43.8	NP	0.10
10.7	40.0	42.0	NP	0.09
11.7	60.0	10.8	NP	2.94
12.7	46.0	4.5	NP	12.26
13.7	11.0	14.7	NP	0.18
14.7	15.0	62.6	NP	0.03
15.7	28.0	19.3	NP	0.23
16.7	15.0	61.7	NP	0.03
17.7	35.0	51.3	NP	0.05
18.7	55.6	15.1	NP	0.96
19.7	39.0	7.2	NP	0.98
20.7	78.9	21.3	NP	0.15
21.7	300.0	12.0	NP	0.86
22.7	68.2	21.1	NP	0.31
23.7	88.2	24.7	NP	0.19
24.7	71.4	11.3	NP	0.58
25.7	83.3	12.6	NP	0.60
26.7	55.6	11.9	NP	0.58
27.7	57.7	22.4	NP	0.39
28.7	55.6	14.6	NP	0.56
29.7	55.6	29.8	NP	0.19

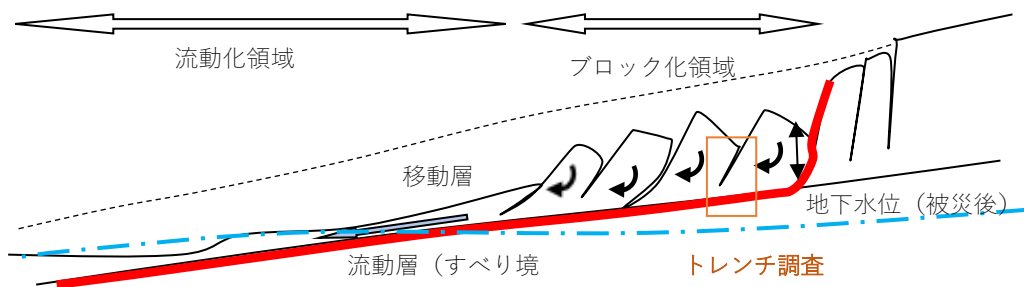
出典：JICA 調査団作成

3-4 トレンチ調査

トレンチ調査は、ボーリング調査では評価が難しい細互層の状況確認や流動化層の深さを確認するために行った。調査に際しては、移動層の塑性変形構造の下限深度、流動化層の特定（深さ）に重点を置いて観察を行った。また、液状化試験供試体採取のために乱れの少ない試料の採取している。調査は、第一次ボーリング調査及び第二次ボーリング調査に合わせて行ったが、ボーリングの孔口で行った調査は、現地の作業員による手掘のテストピットであるために、最大深さ2m程度を限度とした。テストピットの調査では表層付近の層構造を確認することで終了したため、更に深い位置にある流動層の特定までは至らなかった。流動化層を特定するためのトレンチは、地下水位がGL-5mよりも低下している場所で大型のエクスカベータで掘削したトレンチに限定された。トレンチ調査の計画・観察に際して、次の点を留意した。

(1) トレンチ調査の留意点

- Balaroa では、全域で地表近い浅い地下水位のためトレンチ調査が実施出来ない。また、移動層はほとんど末端の堆積域に集積したと考えられることから、トレンチ調査は実施していない。
- Petobo・Jono Oge のトレンチ調査は、流動域では地下水位が浅い位置にあること、堆積域は人家等が厚く堆積していることから、地下水位が低下した地すべり頭部（ブロック化領域）を主体に実施した。移動層の下面（流動化層）判定の目安は、液状化していない移動ブロック内に形成された正断層系の亀裂が消滅する深さに着目した。（流動境界は液化した状態のため、亀裂が入らないことに着目）。また、直接側方崖の連続を深さ方向に追跡調査し、移動層の下面を確認できたトレンチもある。
- Lolu・Sibaraya のトレンチ調査は震災後に地下水位が低下している区間で実施した。
- 移動層の下面（流動化層）判定の目安は、塑性変形の引張り亀裂が消滅する深さに着目した。
- ただし、塑性変形が残存した移動土塊は、流動化領域にはほとんど無く、頭部付近の液状化が弱いブロック化領域に限定される。また、ブロック化領域においても移動層自体に液状化が強い場所では、明確な流動化層を判定できない場合がある。この場合には、直接側方崖の連続を深さ方向に追跡調査し、移動層の下面を確認する必要がある。
- 引張り亀裂の下限深さ以外の判定方法は、互層やラミナ等の堆積構造が流動化したことによって混合した状態を識別する、あるいは水平層がブロック化して回転した場合の地層の傾斜によって判定するなどがあるが、確認したトレンチの周辺の変形形態を評価した上で最も確からしい状況証拠を検討する必要がある。



出典：JICA 調査団作成

図 3-24 移動層下面（流動化層）が確認できるトレンチ調査の位置（模式図）

出典：JICA 調査団作成

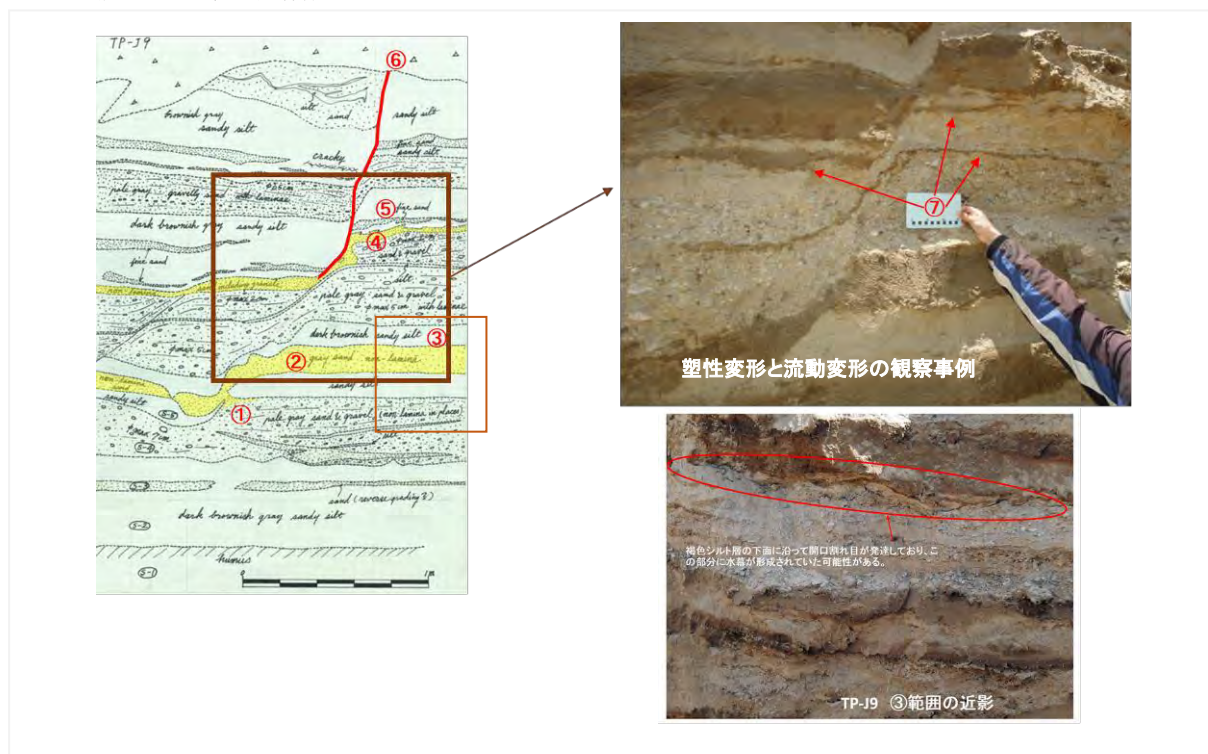


図 3-25 塑性変形領域と流動化層の特定事例（Jono Oge の TP-J9）

(2) 調査数量と調査位置

ボーリング調査孔口付近で行ったテストピット（小型のトレンチ）とトレンチ調査は、表 3-12～表 3-15 に整理した。これには、インドネシア側の研究機関（PuSGen）が行ったトレンチ調査も含まれている。表 3-11 に流動層・移動層が特定できたトレンチ調査の一覧を示す。

表 3-11 流動化層・移動層を特定できたトレンチ調査

地点	トレンチ番号	移動層の下面/トレンチの基底深さ (m)	確認深さの根拠・旧地表からの深さ
Petobo	Petobo (サンプリング AB-3) 第二次調査 (No.A)	3.5m /5m	東端の地すべり頭部付近。被災後地表から深さ 3.5m。引張り亀裂の消滅深度を流動化層と見なした。旧地表からは 5m 地表面が低下しているため、旧地表からのすべり面は深さ 8.5m 程度となる。
Lolu	Lolu (サンプリング) 第二次調査 (No.B)	3.5m /5m	南端の側方崖付近。被災後地表から 3.5m。引張り亀裂の消滅深度を流動化層と見なした。旧地表からはほとんど低下していないため、旧地表からのすべり面は深さ 3.5m 程度となる。
	Lolu (PuSGen) トレンチ 1 (No.C)	3m /5m	南端の側方崖。70m 西方に移動した側方崖の追跡トレンチ。地表から 3.0m 付近で側方崖の不連続面が水平に変化する。旧地表からはほとんど低下していないため、旧地表からのすべり面は深さ 3.0m 程度となる。
Jono Oge	Jono Oge (サンプリング) 第二次調査 (No.D)	5m /5m	南東端の側方崖。80m 西方に弧状に移動したブロック境界。展張亀裂が消滅する深さ 5m を流動化層と判定した。
Sibalaya	TP-S2・TP-S3・TP-S4 (No.E)	1～2.5m /5m	側方崖の北側付近。Sibalaya では塑性変形した移動ブロックの範囲が広く、堆積域まで広がっている。

出典：JICA 調査団作成

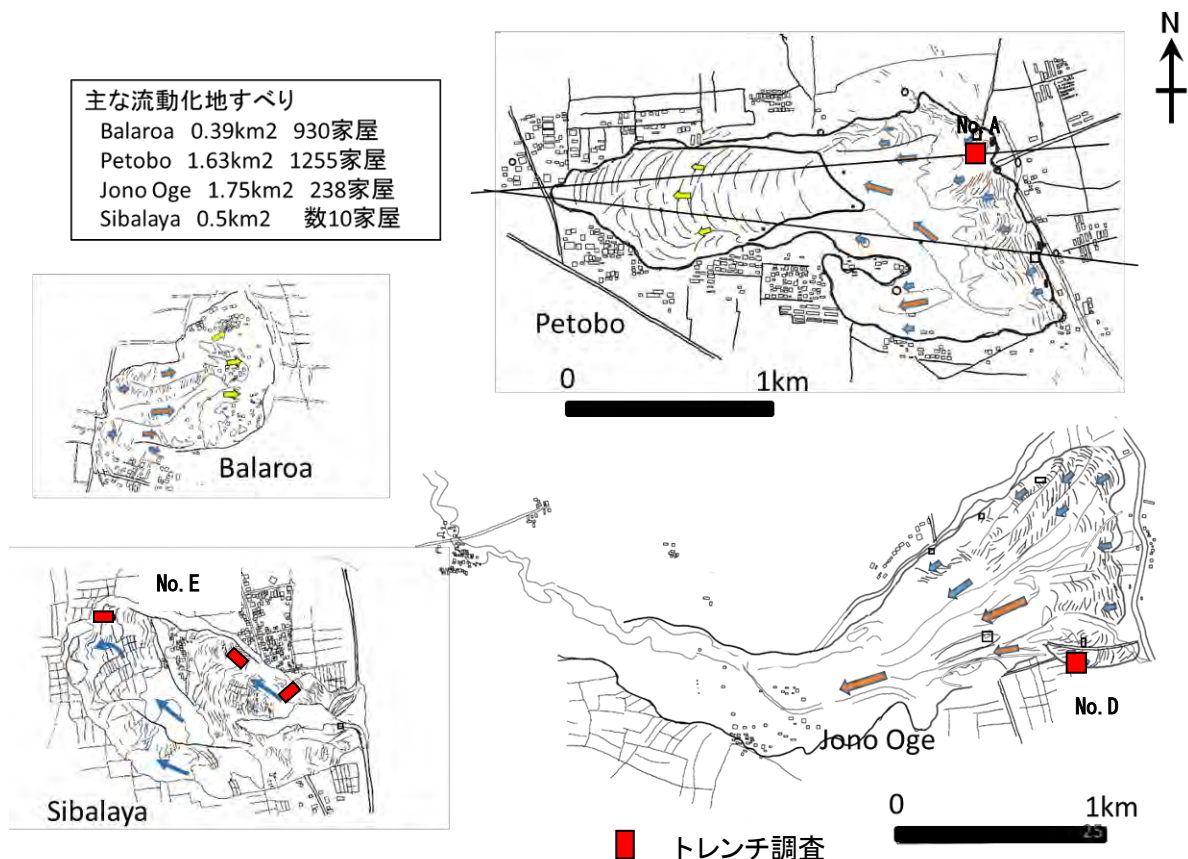


表 3-12 第二次ボーリング調査で行ったテストピット一覧

No	Test Pit	Depth (m)	DS Sampling from Test Pit	DS Sampling from Test Pit (Lab Test)	Coordinate		Location	Execution Date	
					Northing	Easting		Commenced	Completed
2	TAB-5	1.5	2	1	9,894,333	824,919	Biomaru	2019/6/29	2019/6/29
3	TAB-6	1.5	2	1	9,893,697	824,662	Biomaru	2019/6/28	2019/6/28
4	TAB-7	2	2	1	9,892,596	824,403	Lolu	2019/6/27	2019/6/27
5	TAB-8	1.5	2	1	9,891,392	824,796	Jono Oge	2019/7/8	2019/7/8
6	TAB-9	1.5	2	6	9,891,170	824,779	Jono Oge	2019/7/8	2019/7/8
7	TAB-10	1.5	2	1	9,890,956	824,915	Jono Oge	2019/7/1	2019/7/1
8	TAB-11	2	2	8	9,891,186	825,555	Jono Oge	2019/7/9	2019/7/9
9	TAB-14	1.5	2	1	9,892,561	824,272	Lolu	2019/6/27	2019/6/27
10	TAB-15	2	2	1	9,892,632	824,572	Lolu	2019/6/27	2019/6/27
11	TAB-16	1.5	2	1	9,892,647	824,727	Lolu	2019/6/28	2019/6/28
12	Jono		3	3	9,892,647	824,727	Lolu	2019/6/28	2019/6/28
Total	11 TAB		25	32					

出典：JICA 調査団作成

表 3-13 第二次ボーリング調査で行ったトレンチ調査一覧 (UDS サンプリング)

V. **Trench**

No	Trench	Depth (m)	UDS Sampling	DS Sampling from Test Pit (Lab Test)	Coordinate		Location	Execution Date	
					Northing	Easting		Commenced	Completed
1	Petobo AB-3	5	14		9896287.23 m S	825052.25 m E	Petobo	2019/11/25	2019/11/28
2	Lolu	5	14		9892383.33 m S	824501.68 m E	Lolu	2019/11/25	2019/11/28
3	Jono Oge	5	10		9896287.23 m S	825052.25 m E	Jono Oge	2019/11/25	2019/11/29

出典：JICA 調査団作成

表 3-14 PuSGen が実施したトレンチ調査

No	Test Pit	Depth (m)	DS Sampling from Test Pit
	PuSGen Trench Lolul 1	3.5	5
	PuSGen Trench JonoOge 1	5.5	0
	PuSGen Testpit Lolul 1	3	0
	PuSGen Testpit Lolul 2	3	0
	PuSGen Testpit Lolul 3	3	0
	PuSGen Testpit Lolul 4	3	0
	PuSGen Testpit Sibalaya 1	3	0
	PuSGen Testpit Sibalaya 2	3	0
	PuSGen Testpit Sibalaya 3	3	0
	PuSGen Testpit Sibalaya 4	3	0

出典：JICA 調査団作成

表 3-15 第一次ボーリング調査で行ったテストピットとトレンチ調査

Location	Name	Coordinate of center		Feature	Purpose
		Latitude	Longitude		
Petobo	TP-P1	S00° 56'30.52"	E119° 55'20.57"	Under the main scarp (Fissuree zone)	confront boring LP-1
	TP-P2	S00° 56'12.80"	E119° 55'13.86"	Under the main scarp (Fissuree zone)	identify the surface of separation
	P-P1	S00° 56'31.10"	E119° 55'20.54"	Under the main scarp (Fissuree zone)	confront boring LP-1
Jono Oge	TP-J1	S00° 59'8.84"	E119° 55'10.43"	Side of "Red house"	identify the surface of separation
	TP-J2	S00° 59'8.74"	E119° 55'10.39"	Side of "Red house"	identify the surface of separation
	TP-J3	S00° 58'56.16"	E119° 55'2.27"	Right flank (Fissured zone)	identify the surface of separation
	TP-J4	S00° 58'52.61"	E119° 55'7.37"	Right flank (Fissured zone)	identify the surface of separation
	TP-J5	S00° 59'9.56"	E119° 55'10.75"	Side of "Red house"	identify the surface of separation
	TP-J6	S00° 59'8.68"	E119° 55'10.33"	Side of "Red house"	identify the surface of separation
	TP-J7	S00° 58'53.10"	E119° 55'6.70"	Right flank (Fissured zone)	identify the surface of separation
	TP-J8	S00° 59'11.98"	E119° 55'22.83"	Left flank (Fissured zone)	identify the surface of separation
	TP-J9	S00° 58'48.53"	E119° 55'16.93"	Right flank (Fissured zone)	identify the surface of separation
	P-J5	S00° 57'22.49"	E119° 54'54.44"	Transformed zone	confront boring J-5
	P-J9	S01° 00'23.32"	E119° 55'27.35"	Transformed zone	confront boring J-9
P-J13	S00° 58'10.81"	E119° 55'22.67"	Transformed zone	confront boring J-13	
Sibaraya	TP-S1	S01° 08'55.36"	E119° 55'28.01"	Under the main scarp (Fissuree zone)	identify the surface of separation
	TP-S2	S01° 08'50.17"	E119° 55'19.89"	Right flank (Fissured zone)	identify the surface of separation
	TP-S3	S01° 08'47.44"	E119° 55'15.14"	Right flank (Fissured zone)	identify the surface of separation
	TP-S4	S01° 08'42.35"	E119° 54'57.86"	Beside the farm road	identify the surface of separation

出典：JICA 調査団作成

(3) 流動化層・移動層を特定できたトレンチ調査

1) Petobo 頭部のトレンチ

Petobo 頭部では、2019年7月に行ったボーリング（AB-3）近傍で実施した（図 3-26 参照）。調査地点の東方 50m に主滑落崖があり、調査地点は約 5m 元地盤より陥没している。滑落崖からトレンチの間はブロック化領域に該当し、震災後の地下水位は GL-5m、震災時の移動量は 20~30m の場所である。

Petobo 頭部でのトレンチは次のとおりである。

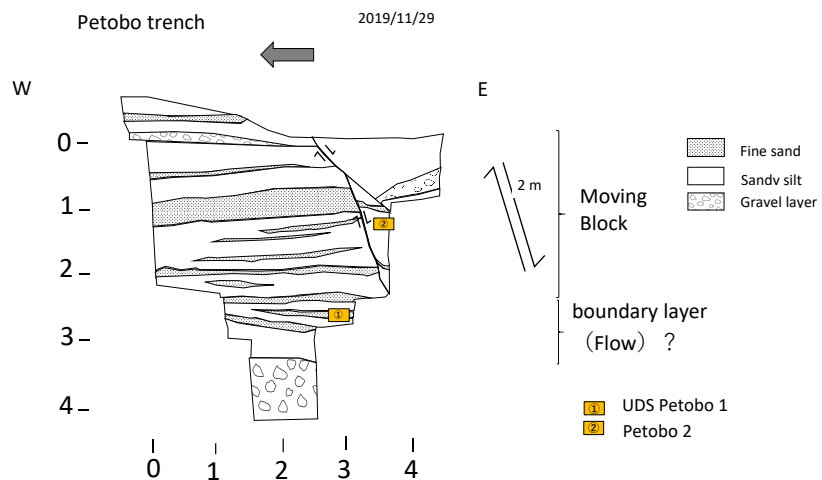
- トレンチ内の西側は、ほぼ水平層を維持して層構造の乱れは少ない。
- 東側は西側に比べて 1.5m 低下した陥没ブロックであるが、展張性亀裂（正断層 1.5m 以上変位）の無くなる深度は未確認である。
- 近傍のボーリング（AB-3）調査結果から 4m 以深には流動境界がないと推定している。
- 正断層的変位の認められる亀裂の確認される深さ 2.5m から礫層上面の深さ 3.3m の間、砂質シルト優勢で砂層の薄層（レンズ様を挟む）に流動化層があると想定している。
- 相対的にルーズなシルト質砂層を流動層境界と見なし、深さ 3.5m からチューブ試料 10 本をサンプリングした。陥没した東側の深さ 1.2m には石英や長石類と同じ程度の雲母片を含むシルト層があり、葉理が認められないことから、流動化層の可能性があると見て、チューブ試料 4 本をサンプリングした。



トレンチ調査場所



壁面写真



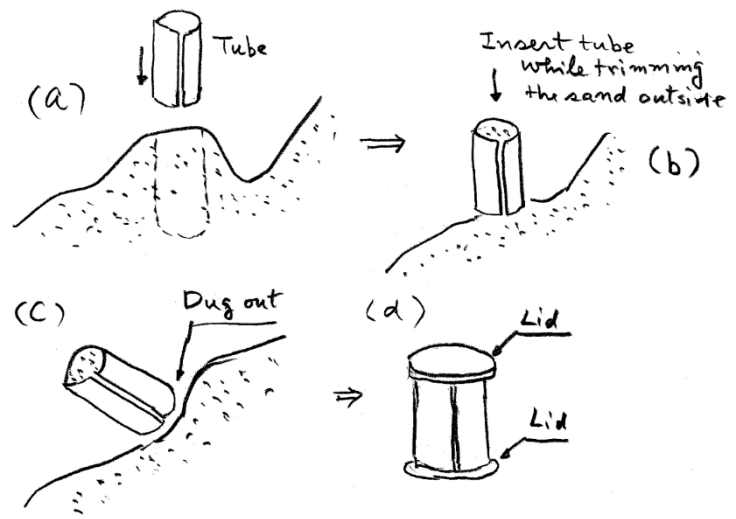
出典：JICA 調査団作成

図 3-26 Petobo 頭部のトレンチ (No. A) 調査結果

サンプリングの方法は、図 3-26(1)に示すように、内径φ70mm×長さ150mmのステンレスチューブ（先端を鋭利に尖らせたもの）を使用した。サンプリング対象位置を選定した上で、

- (a) 採取位置の整形およびチューブの押し込み（乱さないよう慎重に）
- (b) 周辺地盤の掘削
- (c) サンプルの掘り出し
- (d) キャッピング

不要な振動を与えないように、緩衝材に包んで丁寧に梱包し、空港手荷物（精密機器扱い）として日本まで運搬した。採取状況を図 3-26(2)に示した。



出典：石原委員

図 3-26(1) チューブ試料の採取方法



出典：JICA 調査団作成

図 3-26(2) チューブ試料の採取状況

なお、日本への試料運搬に際しては日本サイドの植物検疫の許可、インドネシアサイドの有用な鉱物を含まないことの証明などを行って運搬した。

2) Lolu(南方側境界付近)のトレンチ

Lolu のトレンチ調査（図 3-27 参照）は、2019 年 7 月 PuSGen との共同作業で行ったトレンチ（深さ 3.5m で流動境界を確認した地点。図 3-28 参照）の東南東約 100m の地点を選定した。調査地点は、水田の形を残し、展張性の亀裂が各所に形成され、約 70m 西方に移動した場所である。Lolu 頭部でのトレンチ調査結果は次のとおりである。

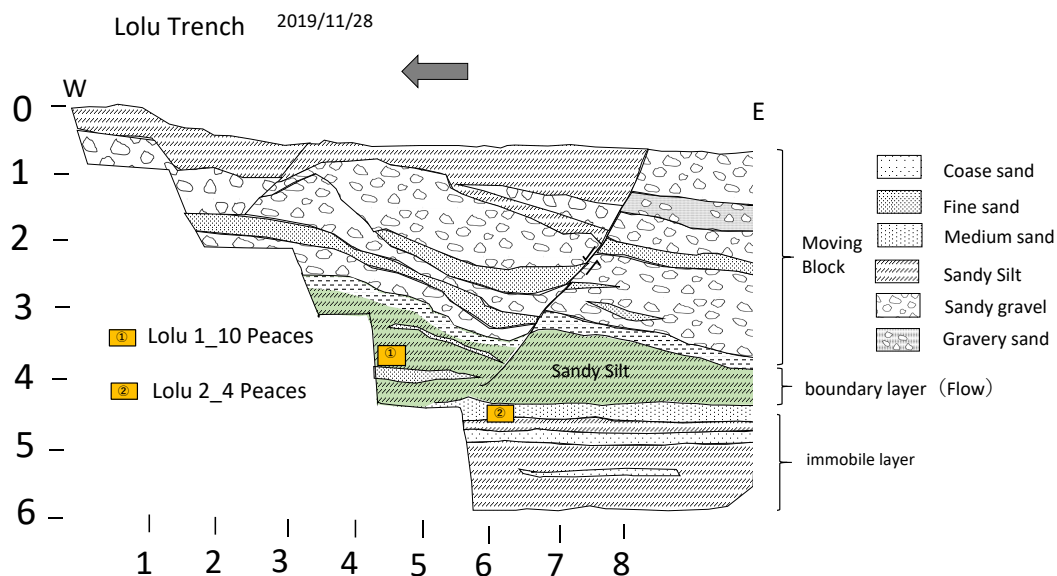
- トレンチ内は層構造がやや乱れ、南東側に層理面が傾斜している。表層から 3m は砂質礫層優勢、それより下位は砂質シルトあるいはシルト質砂が優勢。
- 流動境界の深さは、地すべりブロック内の展張性亀裂（正断層 0.5m 変位）が無くなる深さ 3~4m と判定した。
- 流動層より下位は水平層（地表面と平行）をなし、大きな変形は認められない。深さ 4~5.5m はシルト質砂と粗砂の互層 流動層の最上位（礫層の下面）にシルト質粘土を挟む。
- 深さ 3.5m の混合した層からチューブ試料 10 本、深さ 4.5m のレンズ様挟在層からチューブ試料 4 本をサンプリングした。



トレンチ調査場所



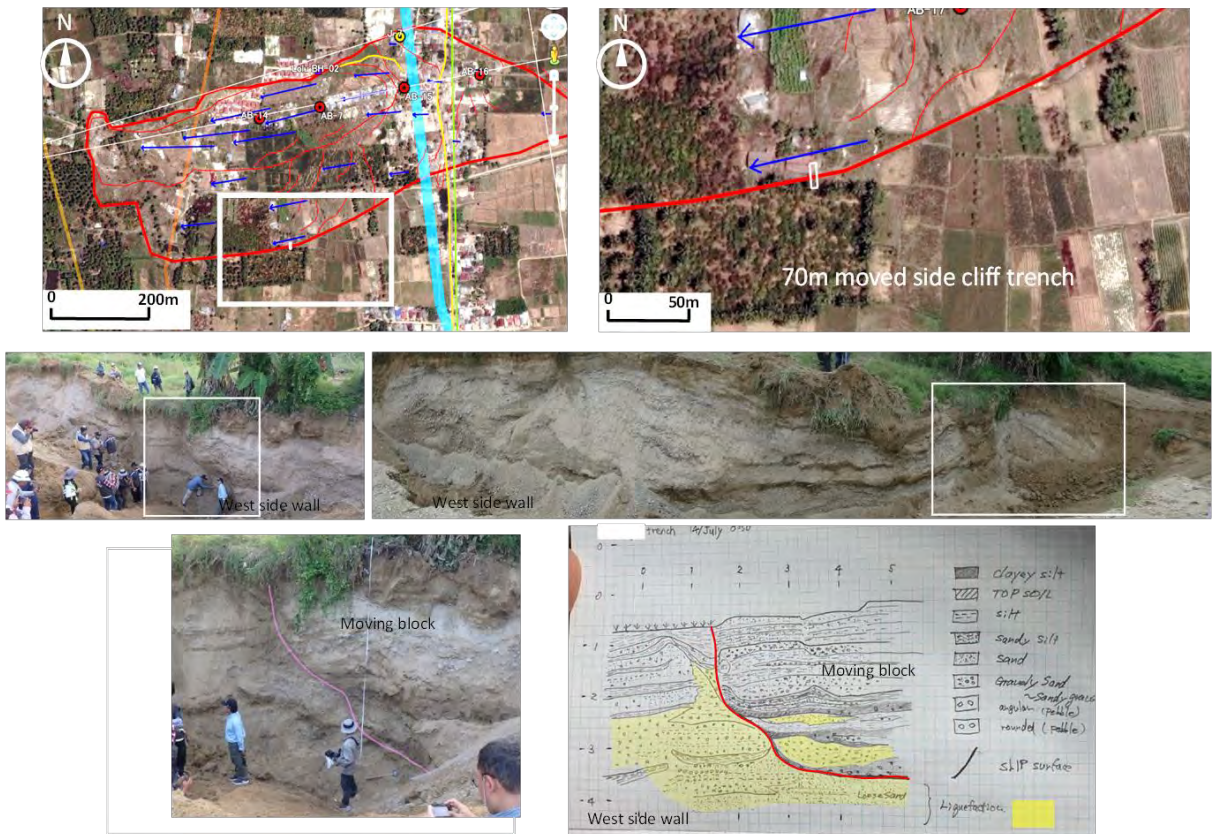
トレンチ壁面写真



出典：JICA 調査団作成

図 3-27 Lolu のトレンチ (No. B) 調査結果

Lolu Trench with Pusgen Group 0713



The sliding surface was confirmed to a depth of about 3 m. In addition, it was confirmed that the sand layer below the sliding surface had no lamina and was in a loose and easily liquefied Layer.

Source : THE PROJECT FOR DEVELOPMENT OF REGIONAL DISASTER RISK RESILIENCE PLAN IN CENTRAL SULAWESI (JICA Project)

出典 : JICA 調査団作成

図 3-28 PuSGen 実施の Lolu のトレンチ調査 (No. C)

3) Jono Oge 頭部（南方側方境界）のトレンチ

Jono Oge のトレンチ調査（図 3-29 参照）は、地下水位が深く、流動層が 5m 程度以浅に分布する場所を選定した。この場所は、2019 年 7 月 PuSGen との共同作業で行ったトレンチ（深さ 5m で流動境界層を確認した地点）の近傍箇所（西北西方向に右回転を伴って 80m 移動した場所。）である。Jono Oge 頭部でのトレンチ調査結果は次のとおりである。

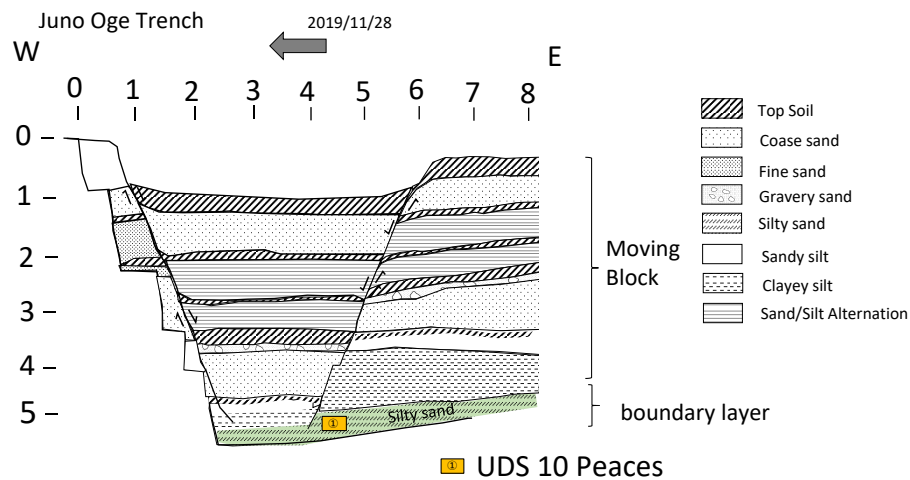
- ▶ トレンチ内はほぼ水平層を維持して層構造の乱れは少ない。
- ▶ 地すべりブロック内の展張性亀裂（正断層 1.5m 変位）が無くなる深さを流動層と見なした。
- ▶ 優黒色の有機質土（粘性土）の薄層を 5 層確認。粗砂～砂質シルトが互層をなす。
- ▶ 最下位深さ 5m のシルト質砂は葉理が消失し混合した層相で、上位には粘土質シルトの難透水層が分布する。
- ▶ 流動境界層と思われる深さ 5.2m からチューブ試料 10 本をサンプリングした。近接する既往トレンチでは、粗砂～中砂が流動境界をなしていたが、本箇所ではシルト質砂で会った。



トレンチ調査場所



トレンチ調査壁面写真



出典：JICA 調査団作成

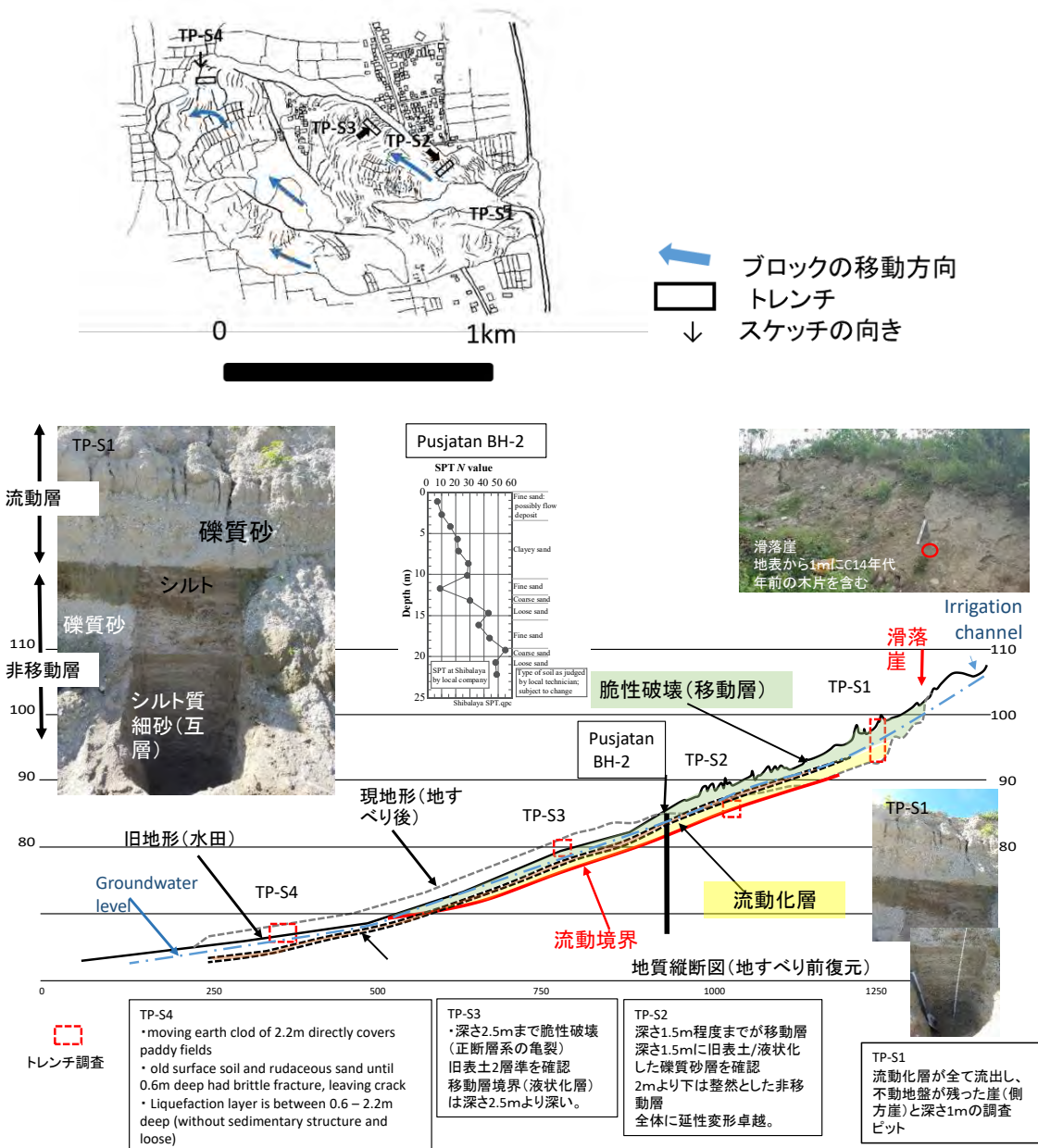
図 3-29 Jono Oge 頭部のトレンチ (No. D) 調査結果

4) Sibalaya のトレンチ調査

Sibalaya では、頭部滑落崖に灌漑水路が位置する。移動土塊は大きく3つのブロックに分かれて西北西方向に200~400m移動している。先端(末端・堆積域)でも圧縮集積の形跡はなく、弱く左回転を伴い水田上を被覆している(全体に引張り亀裂が形成されている)

トレンチ調査の結果、滑動層の厚さはTP-S2で1.2m、TP-S3で2.5m+、TP-S4で約2mである。移動層内に旧表土(厚さ30cm程度)を伴い、その下位の地層は液状化・流動化の痕跡を示している。最上部は液状化せずに移動している(図3-30参照)。

頭部付近で確認する移動層は、緩いシルト質砂・細礫・シルトの細互層である。

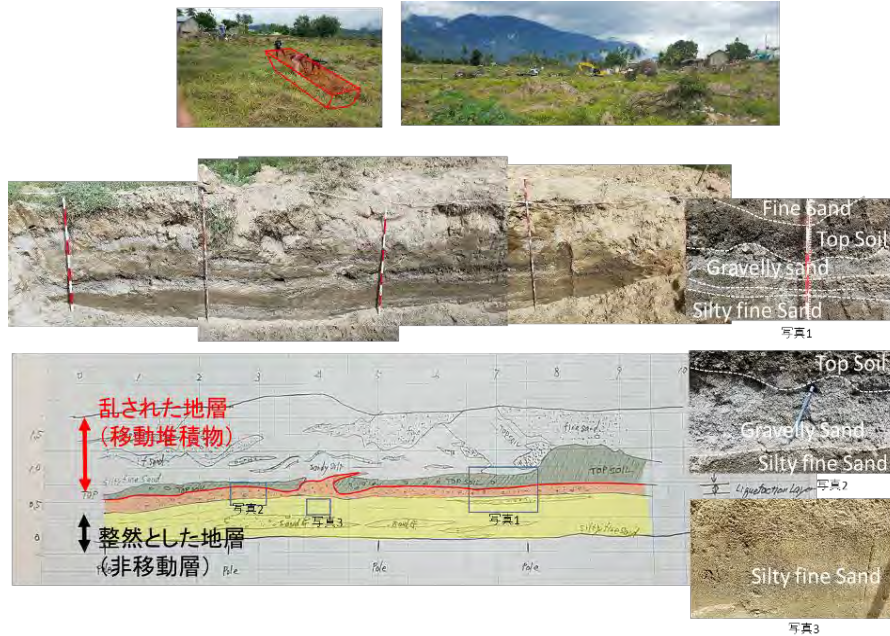


出典：JICA 調査団作成

図 3-30 Sibalaya のトレンチ調査位置 (No. E)

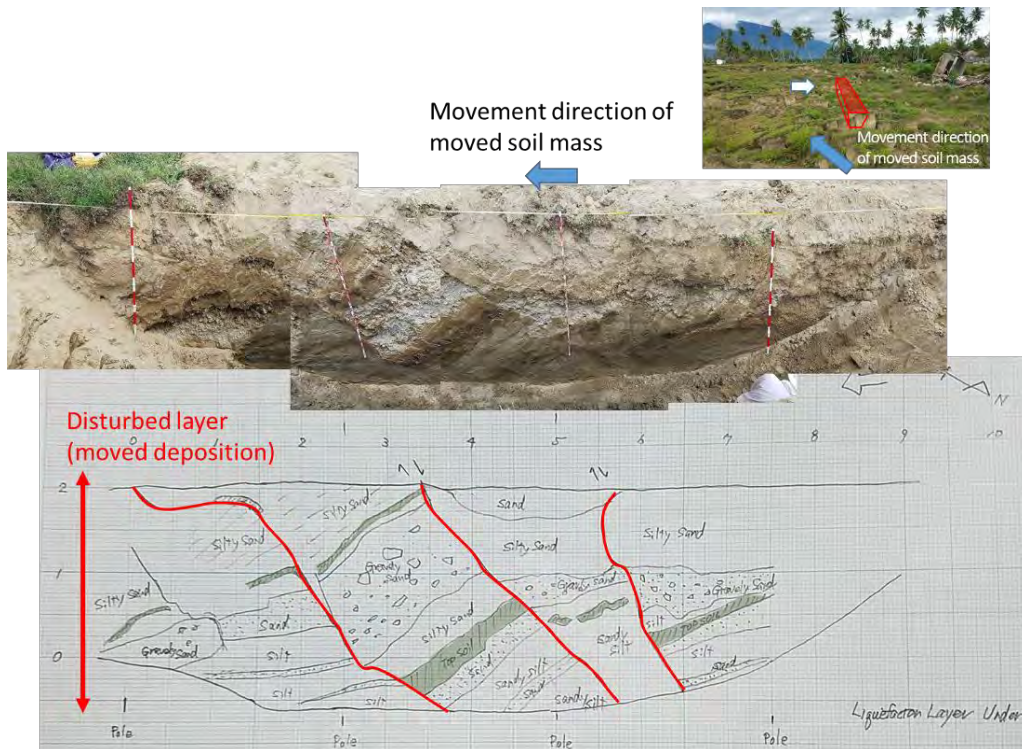
① 追加トレンチ調査結果 (Sibalaya TP-S2)

礫層上面の土壌層(TOPSOIL)を境に、上位；乱された移動堆積物、下位；整然層が分布することを確認した。礫質砂層に角状の構造があり、本層が移動層との境界になっている（図 3-31、図 3-32 参照）。



出典：JICA 調査団作成

図 3-31 Sibalaya の TP-S2 トレンチ調査



出典：JICA 調査団作成

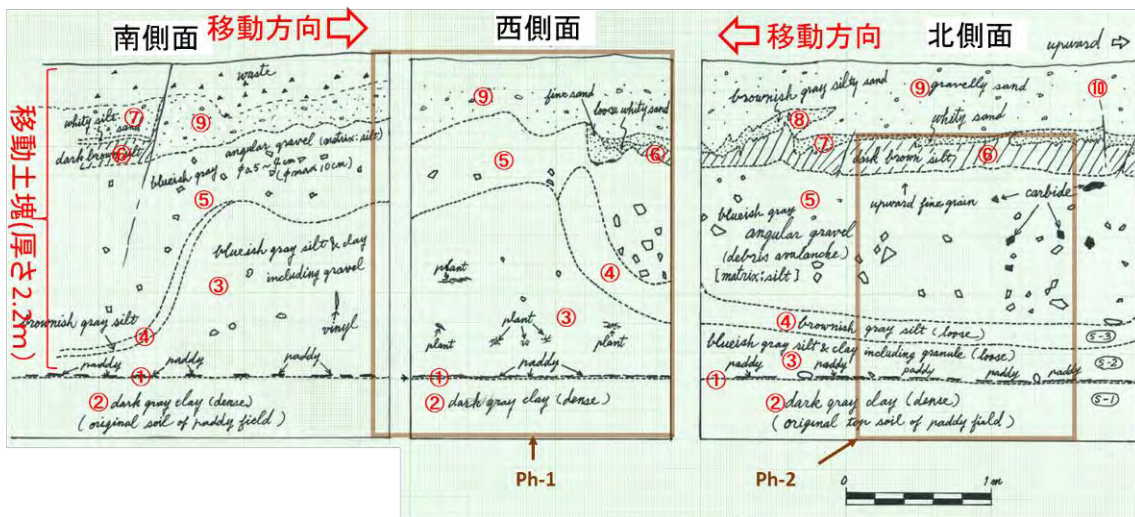
図 3-32 Sibalaya の TP-S3 トレンチ調査

転倒ブロックが深さ2.5mまで確認出来る（下の流動化層は深さ2.5mよりも深い）

② 追加トレンチ調査結果 Sibalaya(TP-S4)

農道脇の水路底を掘削する許可が得られなかったため、水路の南側約 1m 離れた場所で水路に平行にトレンチを実施した（図 3-33、図 3-34 参照）。

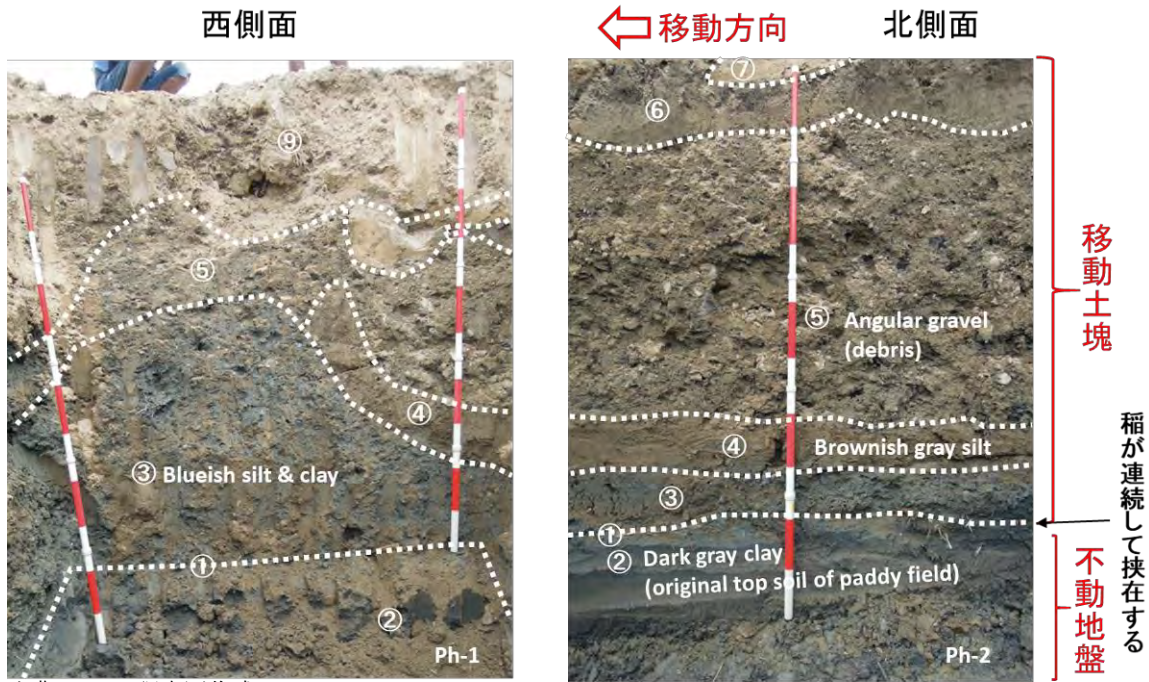
- 深度 2.2m にほぼ水平の①旧地表面(湿田)を確認した。
- 旧地表面には稲が挟在しており、それより下位には②暗灰色粘土が分布している。
- 移動土塊は下位より、③小礫を含む青灰色シルト、④褐灰色シルト、⑤角礫を多く含む青灰色シルト、⑥暗褐色シルト、⑦白色砂、⑧褐灰色シルト質砂、⑨礫質砂に区分され、このうち上位 4 層準(⑥～⑨)が道路脇水路で見られた地層に対比される。
- 道路脇水路で見られた⑥暗褐色シルト中に発達する⑩正断層的クラックは、下位の⑤角礫を多く含む青灰色シルト中で消滅している。
- 移動土塊中の下位から 3 層準(③～⑤)はかなりルーズであるが、上位の⑥暗褐色シルトは比較的密である。
- 移動土塊の最下位に分布する③青灰色シルトは下流側で大きく波打ち、その上位の④灰褐色シルトはその部分で途切れている。
- 移動土塊中の⑤角礫を多く含む青灰色シルトより下位の層(③～⑤)はコンタミにより細粒分が多くなっている可能性がある。



出典：JICA 調査団作成

図 3-33 Sibalaya の TP-S4 トレンチ調査(1)

Sibalaya(TP-S4)



出典：JICA 調査団作成

図 3-34 Sibalaya の TP-S4 トレンチ調査 (2)

3-5 参考；インドネシア政府機関が実施した調査

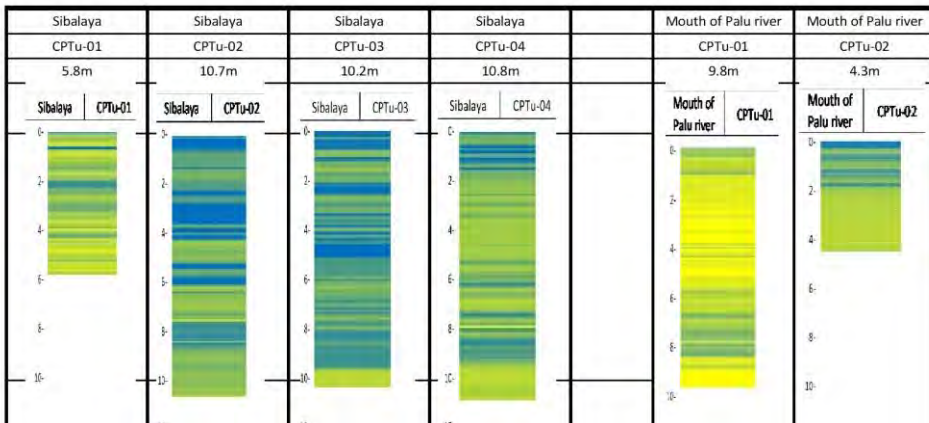
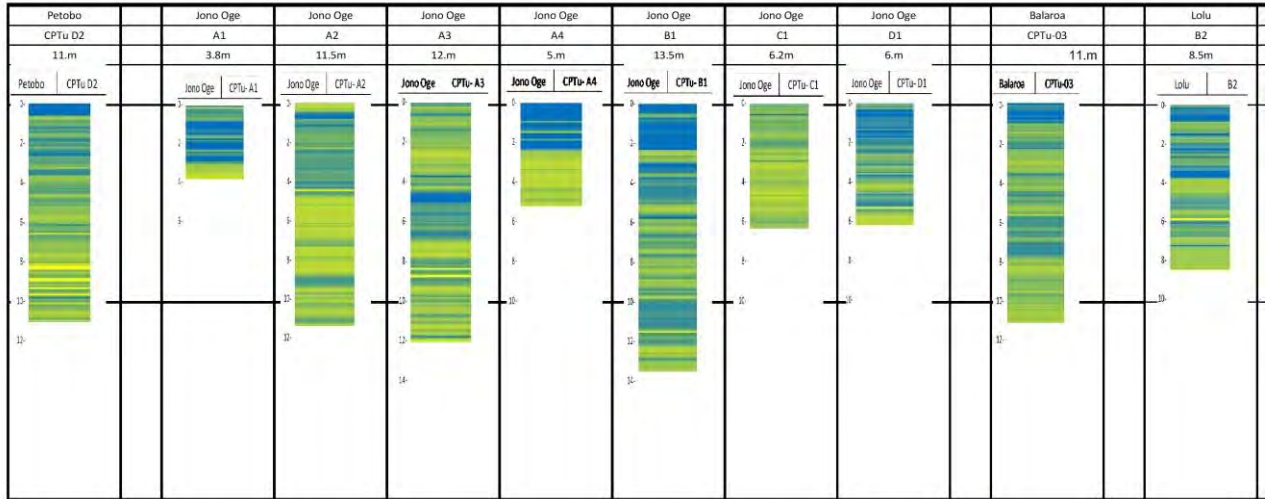
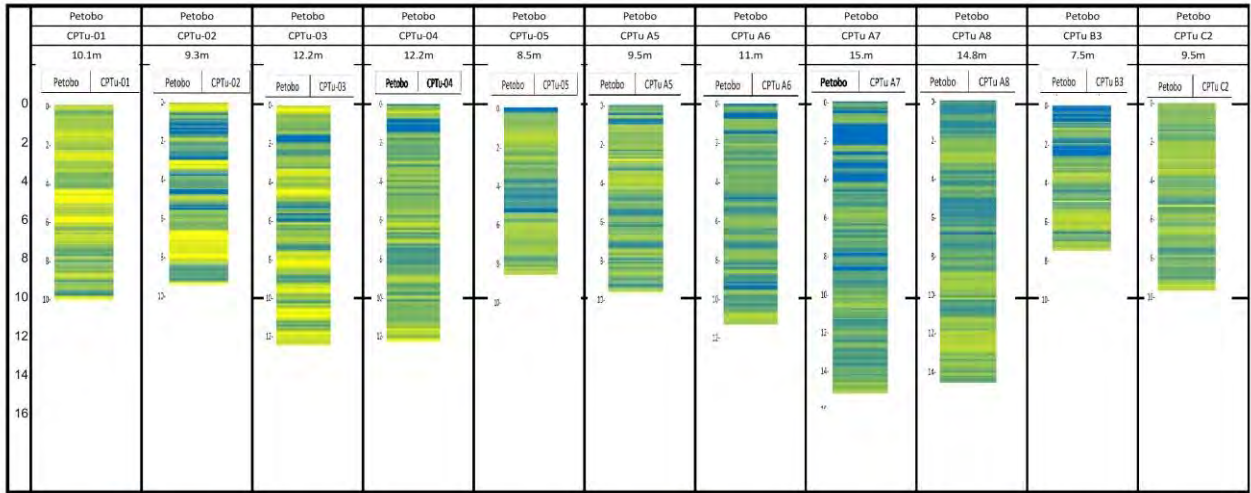
(1) 調査概要

インドネシア政府機関は6地点（Balarooa、Petobo、Jono Oge、Sibalaya、Lolu、Palu 川河口）においてボーリング調査及びコーン貫入試験（CPT）・電気式コーン貫入試験（CPTu）を実施している。図 3-47～図 3-50 に JICA 調査とインドネシア側調査を合わせた位置図を示している。ボーリング調査では、2m 毎の標準貫入試験及び室内土質試験を行い、液状化判定の基礎資料としている。また、電気式コーン貫入試験（CPTu）は、コーン貫入抵抗（qc）、周面摩擦（fs）、間隙水圧（u）の三成分を同時に測定できるコーンプローブを用いた調査で、貫入装置を用いて地盤に静的に貫入し、地盤情報（qc、fs、u）を連続的に測定している。試験結果は、Robertson による土質分類チャートを用いて、連続的な土質分類が行われ、土質柱状図が作成されている。扇状地の氾濫原堆積物など、堆積層の上下変化が著しく細粒土の薄層を挟む様な地層では、細粒土層の頻度・規模などが識別でき、有用である。そのため、成果を図 3-35 のように整理した。これ以外の調査試験は、実施場所と試験結果概要を整理した（図 3-37～図 3-46 参照）。

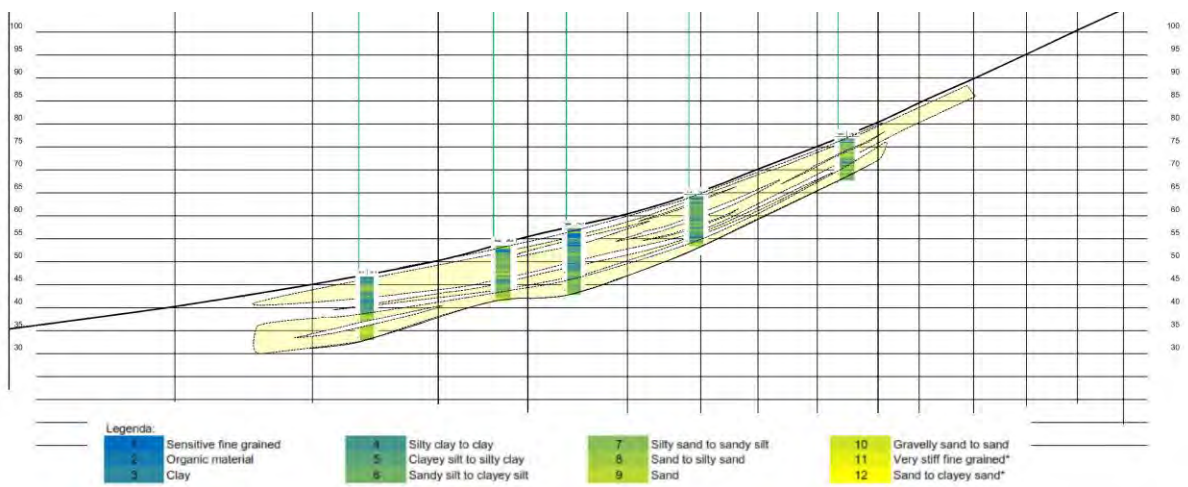
(2) 電気式コーン貫入試験結果から得られた土性図

電気式コーン貫入試験結果から得られた土性柱状図を、地域毎に配列した。調査深さは、最大 15m で、貫入困難な場合には途中で終了としている。土性柱状図を見ると、粘性土系（青）、シルト系（黄緑）と砂質土系（黄色）が数 10cm 以下の互層をなしている状況が読み取れる。また、深部よりも表層付近に細粒土の割合が高く、表層付近には難透水の薄層を挟む場合が多い。

土性柱状図を並べ、Petobo の北側の東西断面の層相断面を見ると図 3-36 のとおりである。深さ 15m 程度の断面に見られる地質構成は、シルト質砂が主体をなすが、細粒土層の薄層を 5 層程度以上挟み、キャップレイヤーを作る互層をなしていると考えられる。



出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT データを JICA 調査団が編集
 図 3-35 電気式コーン貫入試験の土性図（集成）



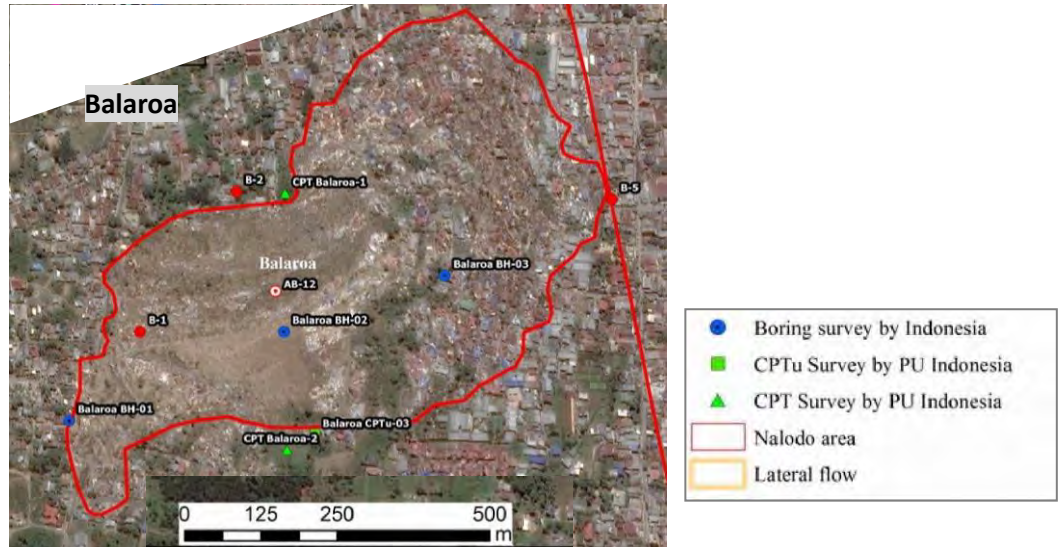
出典：JICA 調査団作成

図 3-36 Petobo 北側の土性断面図（CPTu データから作成）

電気式 3 成分コーン貫入試験から得られた土性図を断面上に表示すると、上記のとおり砂質土層中に細粒土層（シルト・粘土層）の薄層を頻繁に挟む構造が確認できる。

(3) Balaroa の調査

Balaroa では3地点でボーリング調査・標準貫入試験、2地点でコーン貫入試験、1地点で電気式コーン貫入試験が行われた。調査位置は図 3-37 のとおりであり、試験内容は及び得られた N 値は図 3-38 のとおりである。



出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-37 土質試験の調査位置 (Balaroa)

BALAROA Boring			
No.	Boring locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	BH - 01	816022.0	9899555.0
2	BH - 02	816374.0	9899701.0
3	BH - 03	816638.0	9899793.0

BALAROA CPT			
No.	CPT locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	CPT Balaroa-1	816376.0	9899928.0
2	CPT Balaroa-2	816379.0	9899507.0

BALAROA CPTu			
No.	CPTu locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	CPTu-03	816425.0	9899533.0

Depth (m)	N-SPT Value		
	BH-01	BH-02	BH-03
1.55	2	8	7
3.55	8	4	6
5.55	100	9	3
7.55	18	52	8
9.55	23	13	18
11.55	16	9	19
13.55	11	11	22
15.55	100	49	16
17.55	34	11	55
19.55	100	100	60
21.55	100	100	21
23.55	100	100	24
25.55	100	51	35
27.55	100	57	27
29.55	60	83	50
EOB	30.00 m	30.00 m	30.00 m

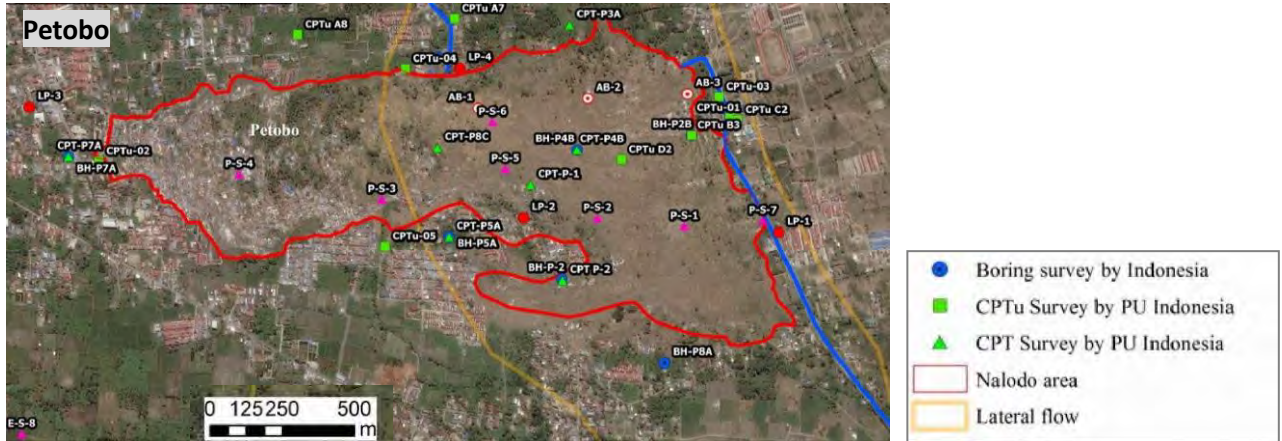
*EOB = end of boring

出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-38 土質試験内容と N 値 (Balaroa)

(4) Petobo の調査

Petobo では 8 地点でボーリング調査・標準貫入試験、9 地点でコーン貫入試験、12 地点で電気式コーン貫入試験が行われた。調査位置は図 3-39 のとおりであり、試験内容は及び得られた N 値は図 3-40 のとおりである。



出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-39 土質試験の調査位置 (Petobo)

PETOBO Boring			
No.	Boring locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	BH - P-1	825177.0	9896228.0
2	BH - P-2	824606.0	9895626.0
3	BH - P2B	825068.0	9896133.0
4	BH - P4B	824661.0	9896082.0
5	BH - P5A	824208.0	9895774.0
6	BH - P6A	824168.0	9896410.0
7	BH - P7A	822859.0	9896058.0
8	BH - P8A	824972.0	9895328.0

PETOBO CPTu			
No.	CPTu locations	UTM Coordinate	
		X	Y
1	CPTu-01	825202.0	9896195.0
2	CPTu-02	822967.0	9896041.0
3	CPTu-03	825164.0	9896269.0
4	CPTu-04	824053.0	9896369.0
5	CPTu-05	823981.0	9895740.0
6	CPTu A5	824932.6	9896705.3
7	CPTu A6	824541.5	9896660.0
8	CPTu A7	824227.2	9896547.5
9	CPTu A8	823671.3	9896490.7
10	CPTu B3	825068.0	9896133.5
11	CPTu C2	825231.8	9896187.0
12	CPTu D2	824819.5	9896047.2

PETOBO CPT			
No.	CPT locations	UTM Coordinate	
		X	Y
1	CPT P-1	824497.0	9895958.0
2	CPT P-2	824610.0	9895620.0
3	CPT-P1A	825231.0	9896186.0
4	CPT-P3A	824634.0	9896524.0
5	CPT-P4B	824661.0	9896082.0
6	CPT-P5A	824208.0	9895774.0
7	CPT-P6A	824168.0	9896410.0
8	CPT-P7A	822859.0	9896058.0
9	CPT-P8C	824167.0	9896090.0

Depth (m)	N-SPT Value							
	BH P-1	BH P-2	BH-P2B	BH-P4B	BH-P5A	BH-P6A	BH-P7A	BH-P8A
1.55	6	9	4	6	4	2	6	1
3.55	23	9	6	2	3	8	14	2
5.55	8	5	14	9	30	4	9	3
7.55	21	8	16	12	14	7	19	6
9.55	10	40	15	20	14	11	9	38
11.55	25	43	25	31	18	9	51	17
13.55	8	24	26	40	50	37	15	35
15.55	8	56	41	11	47	34	17	55
17.55	33	52	31	34	36	21	21	55
19.55	22	24	44	60	45	15	38	60
21.55	35	60	100	50	49	68	24	44
23.55	37	52	86	53	60	38	65	100
25.55	60	58	100	44	60	44	60	23
27.55	58	57	100	61	60	48	60	31
29.55	37	49	62	61	60	70	60	38
EOB	30.00 m	30.00 m	30.00 m	30.00 m	30.00 m	30.00 m	30.00 m	30.00 m

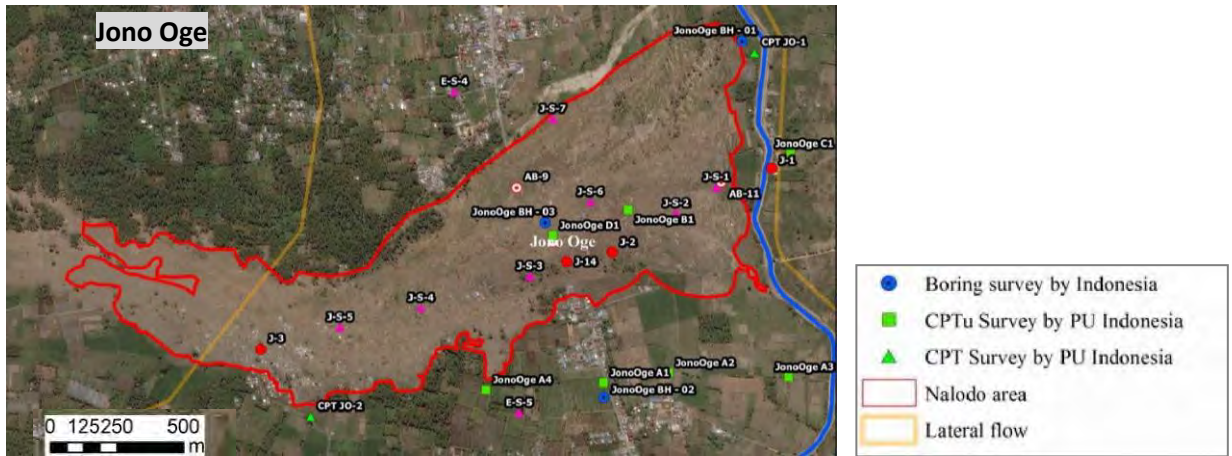
*EOB = end of boring

出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-40 土質試験内容と N 値 (Petobo)

(5) Jono Oge の調査

Jono Oge では3 地点でボーリング調査・標準貫入試験、2 地点でコーン貫入試験、7 地点で電気式コーン貫入試験が行われた。調査位置は図 3-41 のとおりであり、試験内容は及び得られた N 値は図 3-42 のとおりである。



出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-41 土質試験の調査位置 (Jono Oge)

JONO OGE Boring			
No.	Boring locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	BH - 01	825630.0	9891717.0
2	BH - 02	825108.0	9890377.0
3	BH - 03	824886.0	9891034.0

JONO OGE CPT			
No.	CPT locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	CPT JO-1	825677.0	9891674.0
2	CPT JO-2	824001.0	9890304.0

JONO OGE CPTu			
No.	CPTu locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	A1	825106.0	9890431.0
2	A2	825352.0	9890469.0
3	A3	825805.0	9890453.0
4	A4	824662.0	9890405.0
5	B1	825199.0	9891082.0
6	C1	825812.0	9891294.0
7	D1	824915.0	9890986.0

Depth (m)	N-SPT Value		
	BH JO - 01	BH JO - 02	BH JO - 03
1.55	14	4	2
3.55	6	15	6
5.55	12	41	12
7.55	25	33	48
9.55	4	20	12
11.55	45	57	32
13.55	100	60	56
15.55	100	57	48
17.55	46	100	33
19.55	21	60	24
21.55	26	60	100
23.55	57	60	100
25.55	100	100	100
27.55	60	60	100
29.55	60	100	100
31.55	46		
33.55	53		
35.55	100		
37.55	60		
39.55	57		
EOB	40.00 m	30.00 m	30.00 m

*EOB = end of boring

出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-42 土質試験内容と N 値 (Jono Oge)

(6) Sibalaya の調査

Jono Oge では4 地点で電気式コーン貫入試験が行われた。調査位置は図 3-43 のとおりであり、試験内容は図 3-44 とおりである。



出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-43 土質試験の調査位置 (Sibalaya)

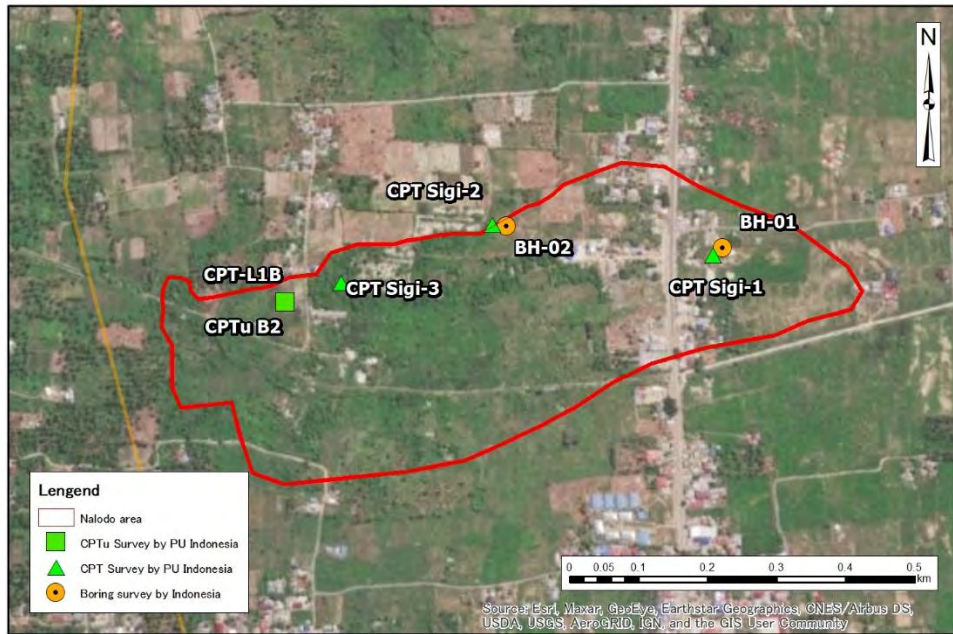
SIGI - POROS PALU KULAWI CPTu			
No.	CPTu locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	CPTu-01	825577.0	9872832.0
2	CPTu-02	824786.0	9873087.0
3	CPTu-03	825051.0	9872835.0
4	CPTu-04	825156.0	9873140.0

出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-44 土質試験内容 (Sibalaya)

(7) Lolu の調査

Lolu では 2 地点でボーリング調査・標準貫入試験、3 地点でコーン貫入試験、1 地点で電気式コーン貫入試験が行われた。調査位置は図 3-45 のとおりであり、試験内容は及び得られた *N* 値は図 3-46 のとおりである。



出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PALU REPORT

図 3-45 土質試験の調査位置 (Lolu)

SIGI boring				Depth (m)	N-SPT Value	
No.	Boring locations	UTM coordinate			BH-01	BH-02
		X	Y			
1	BH - 01	824730.0	9892614.0	1.55	19	2
2	BH - 02	824416.0	9892646.0	3.55	5	3
				5.55	9	10
				7.55	9	33
				9.55	16	25
				11.55	53	21
				13.55	74	23
				15.55	68	26
				17.55	20	100
				19.55	40	15
				21.55	34	100
				23.55	100	29
				25.55	37	55
				27.55	100	58
				29.55	100	58
				31.55	100	
				33.55	100	
				35.55	100	
				37.55	100	
				39.55	100	
				EOB	30.00 m	30.00 m

SIGI CPT			
No.	CPT locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	CPT Sigi-1	824716.0	9892604.0
2	CPT Sigi-2	824396.0	9892648.0
3	CPT Sigi-3	824177.0	9892564.0

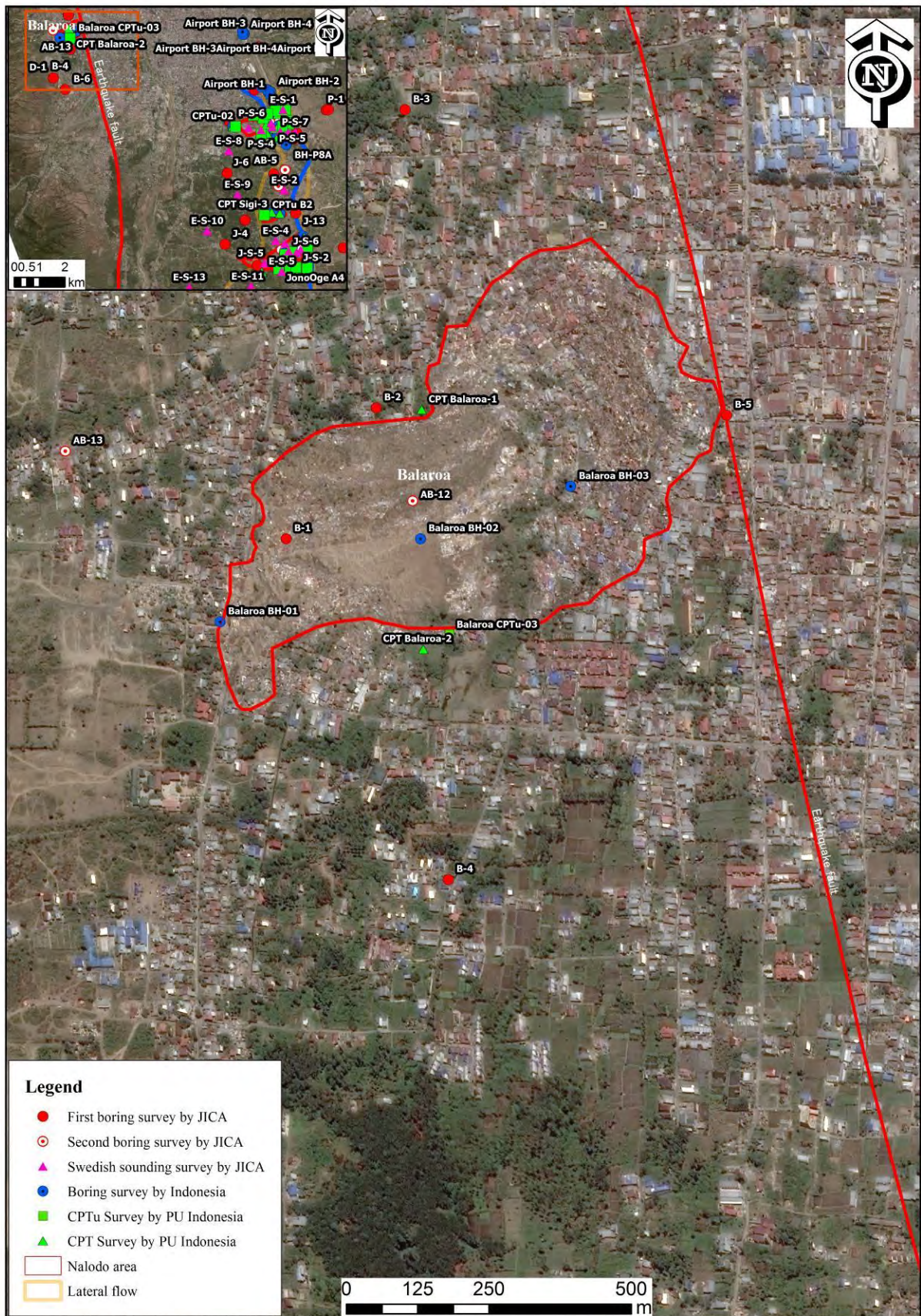
SIGI CPTu			
No.	CPTu locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	B2	824095.7	9892536.2

LOLU CPT			
No.	CPTu locations	UTM coordinate	
		X	Y
1	CPT-L1B	824095.0	9892536.0

*EOB = end of boring

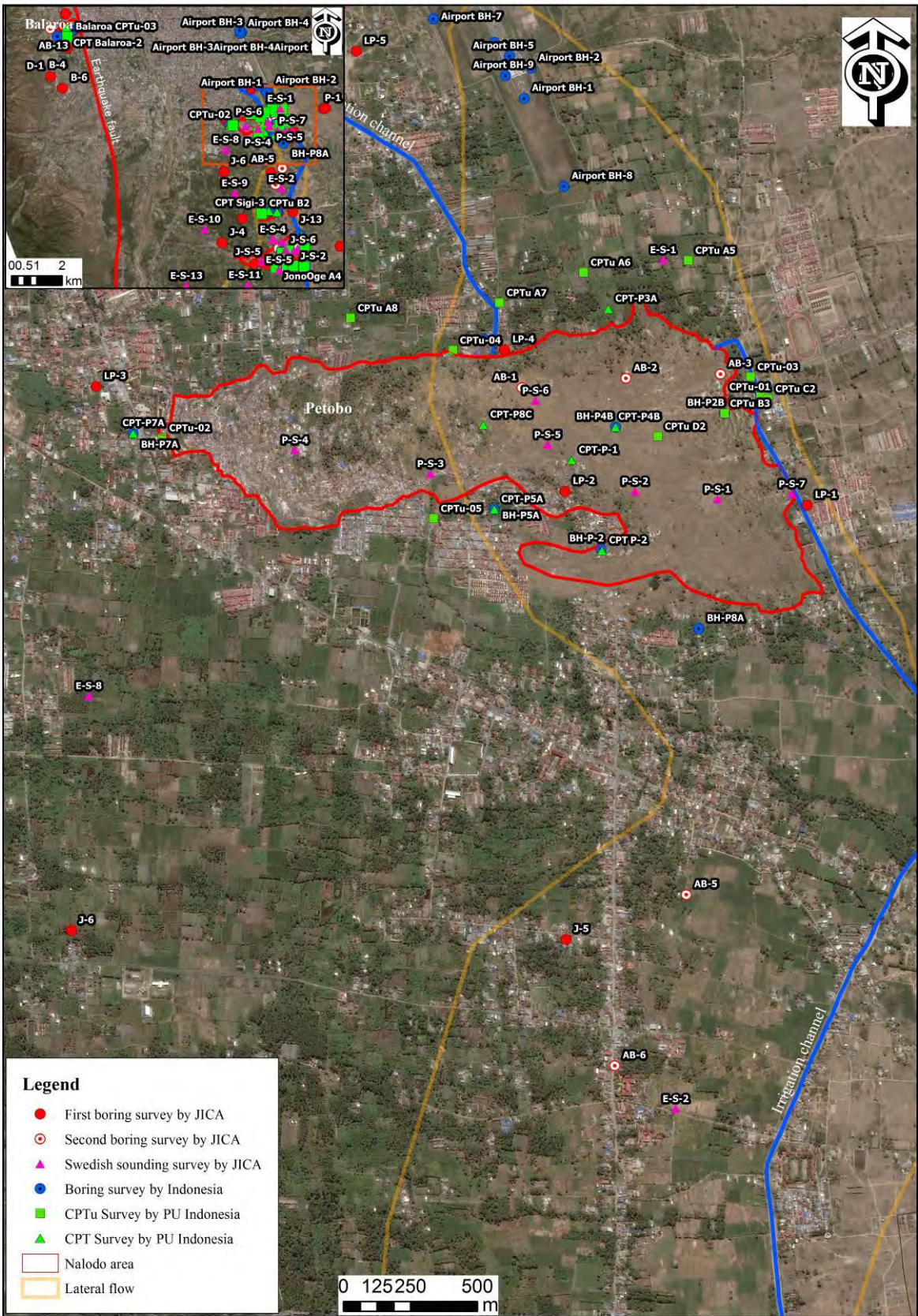
出典：PEKERJAAN PENYELIDIKAN TANAH PLAU REPORT

図 3-46 土質試験内容と *N* 値 (Lolu)



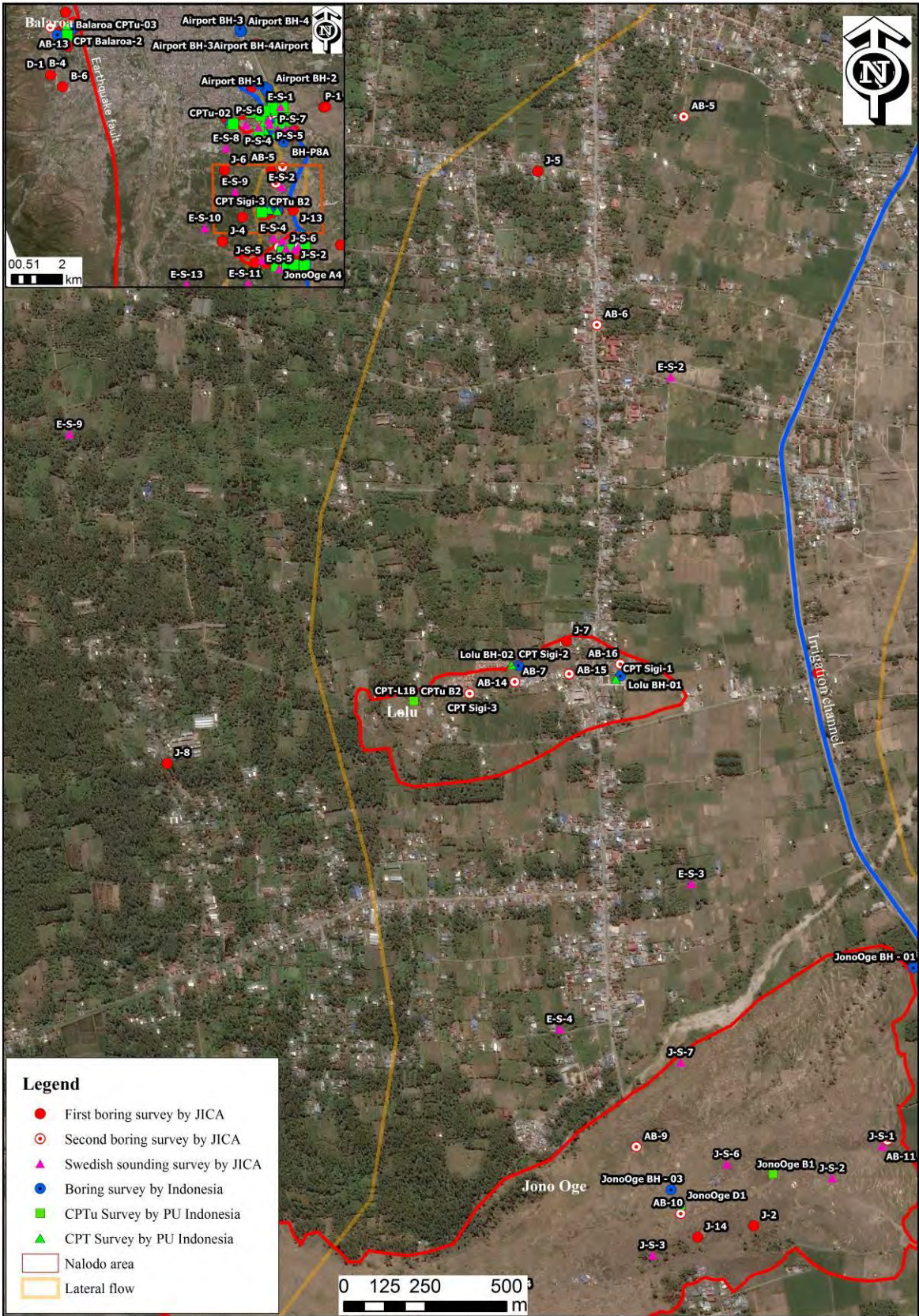
出典：JICA 調査団作成

図 3-47 JICA 調査と PuSGeN 調査位置 (Balaroa)



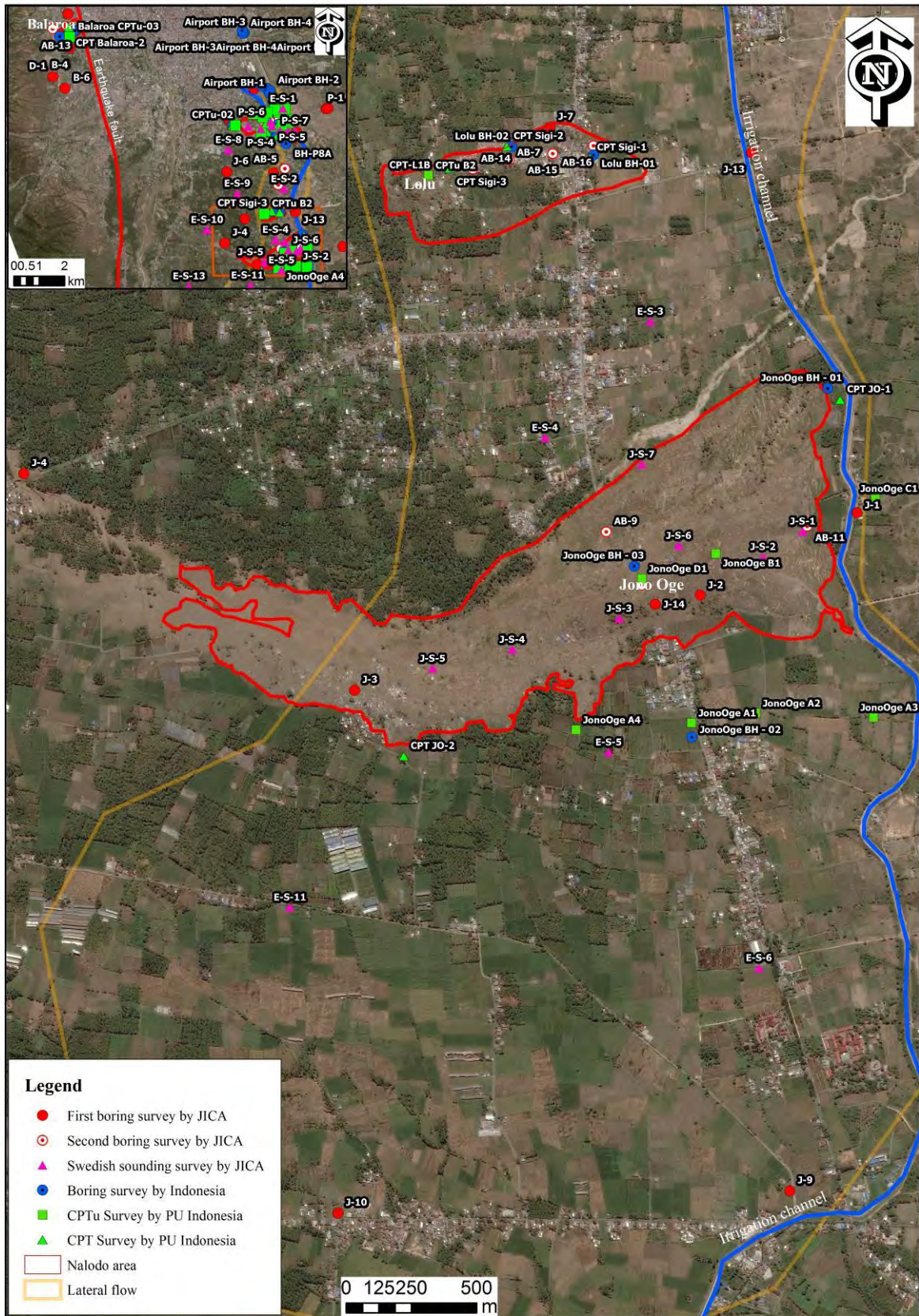
出典：JICA 調査団作成

図 3-48 JICA 調査と PuSgeN 調査位置 (Petobo)



出典：JICA 調査団作成

図 3-49 JICA 調査と PuSgeN 調査位置 (Lolu・Jono Oge)



出典：JICA 調査団作成

図 3-50 JICA 調査と PuSgeN 調査位置 (Jono Oge)

3-6 現場透水試験及び室内透水試験

(1) 目的と方法

現場透水試験及び室内透水試験は、地すべり発生後に生じた大量湧水の発生原因を検討するための基礎データとした。大量湧水の検討は、後述する2次元の浸透流解析で評価する。基礎地盤の透水性の評価は、砂質土・礫質土は現場透水試験を基本とし、薄層として挟まれるシルト層及び粘性土層は室内透水試験及び粒度分布からの想定を基本とした。

Nalodoの発生地域は、沖積の砂層・シルト層が表層（深さ10～15m）を覆い、深部には良く締まった洪積礫質砂層（ N 値30程度以上）から構成される。現場透水試験は、表層付近のルーズな場所では、区間長1～3mに限定したケーシング法（揚水の定常法・非定常法）の透水試験を行った。深部の良く締まった砂質礫層の区間は、孔壁が保持できる（3～10mの区間長）でできるだけ長い試験区間長を設定した。

揚水法の透水試験は、大型のポンプで孔内水を30分以上揚水（吸引）し、定常に達した時の孔内水位の低下量と揚水量の関係（定常法）及び揚水停止後の水位回復スピード（非定常法）から透水係数を算出した。

細粒土は、キャップ層となり得る細粒土層を乱れの少ない試料としてサンプリングし、室内透水試験を行った。室内透水試験を行った試料には、一部に砂質土となる試料も含まれた。

(2) 透水試験の方法

透水試験の方法は、単孔式の揚水法（定常法・非定常法）で行った。

試験は、ケーシングにより遮水区間を設定して、所定の水位低下が安定するまでポンプで水をくみ上げ、定常法による透水係数を算出する。その後、揚水を止め、孔内の水位変化（水位回復）を時系列で測定し、水位回復速度から透水性（非定常）を評価する。

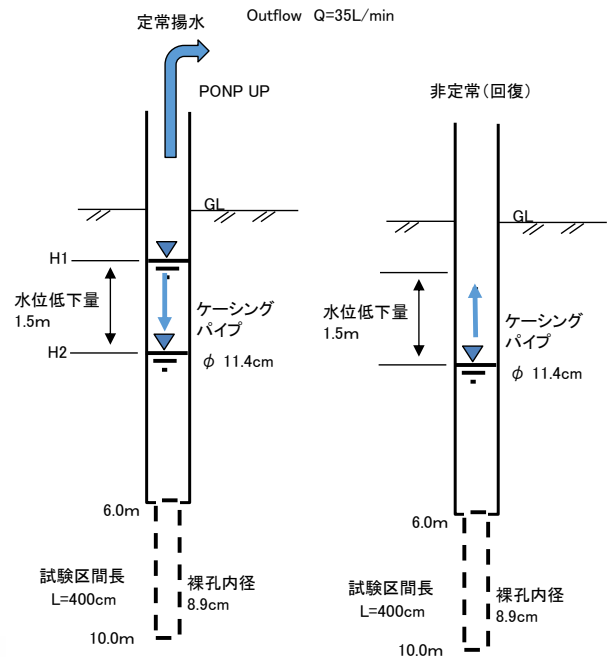
試験方法の概要と、試験データの整理事例を図 3-51 に示す。

単孔式（非定常）での透水係数は、水位の回復の片対数曲線（logS-t 曲線）の傾き a から次式で算出する（非定常法の算出式）。

$$k = \frac{(2.3d_e)^2}{8L} \log\left(\frac{2L}{D}\right) a \quad (L/D \geq 4)$$

ここに d_e ; 水位測定区間の孔径

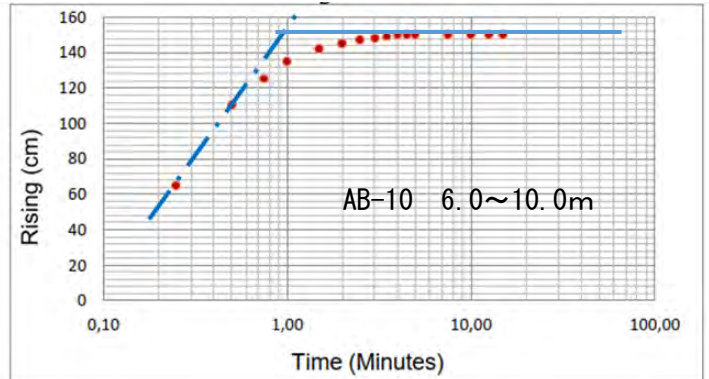
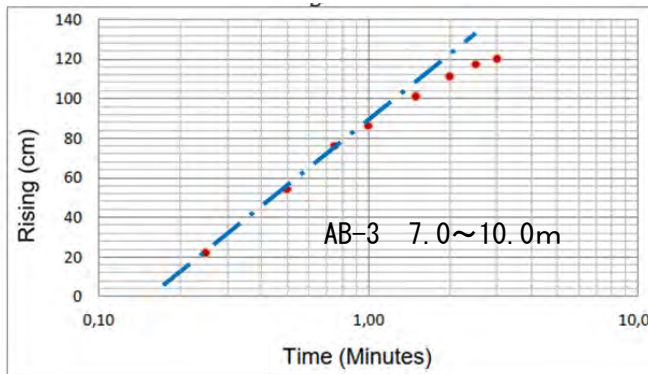
D ; 試験区間の孔径、 L ; 試験区間の長さ



透水試験の方法

孔内水をポンプアップし、定常時の水位低下量と揚水量の関係から透水係数を算出（定常法）

次に、ポンプを止めて、水位回復量と時間との関係から非定常の透水係数を算出する



出典：JICA 調査団作成

図 3-51 現場透水試験方法（ケーシング法）とデータ事例（AB-3、AB-10）

非定常法における水位上昇量と経過時間との関係（動水勾配の大ききな 1 分以内の水位変動データを採用）

【定常法での評価事例】

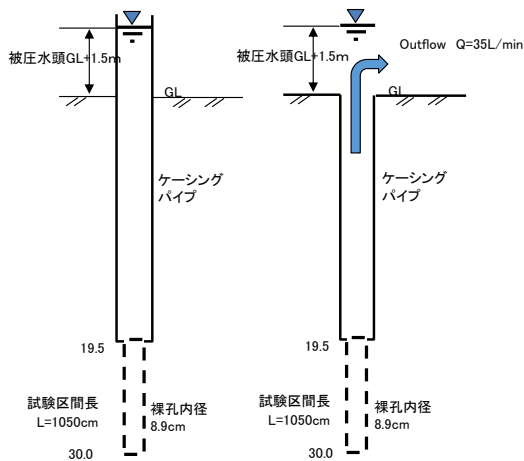
ある一定深度で被圧帯水層に入ると孔口から湧水が発生する場合がある。その場合には、単孔式定常法により透水係数を求める（表 3-16、図 3-52 参照）。試験区間の水頭を、ケーシングを立ち上げ湧水がなくなる高さから求める。ケーシングを地表付近にした場合の安定した湧水量 (Q) を求め、遮水区間と試験対象区間の深さ・孔径から透水係数を求める。

表 3-16 単孔式（定常法）による透水係数

ボーリング	評価区間	水頭	湧出量 (L/min)	透水係数 (cm/sec)
J-5 砂礫	GL-15~19.5m (4.5m)	GL+1.5m	35	6.3×10^{-3}
B-1 礫質砂	GL-19.5~30m (10.5m)	GL+1.95m	10	9.2×10^{-4}



B-1孔 19.5~30m
定常法（被圧）透水試験



$$k = \frac{2.3Q_u}{(2\pi s_0)L} \log_{10} \left(\frac{2L}{D} \right)$$

- K ; 透水係数
- Qu ; 定常流量 35L/min
- S₀ ; 水頭差 150cm
- L ; 試験区間長 450cm
- D ; 裸孔内径 8.9cm

単孔式（定常法）のモデル

出典：JICA 調査団作成

図 3-52 単孔式（定常法）による透水係数

(3) 透水試験結果

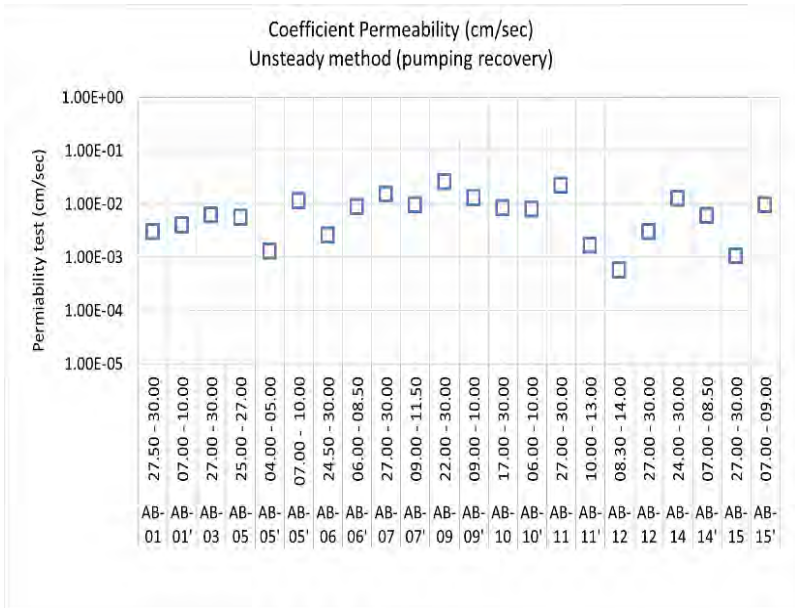
1) 現場透水試験

現場透水試験は、孔毎に深さ 5~10m 付近（流動化層直下の液状化層など）と深さ 20~30m の良く締まった礫質砂層（非液状化層）の透水性を調査した。試験結果は、浅層（深さ 5~10m 付近）と深部（深さ 20~30m 付近）で有意な違いは認められず、Nalodo の発生地域の砂質土層の透水性は $10^{-3} \sim 2$ (cm/sec) であることが判った（表 3-17、図 3-53 参照）。平均的に見ると、 8×10^{-3} (cm/sec) である。

表 3-17 現場透水試験結果（回復法非定常）

No	Hole Name	Depth (m)	Coefficient Permeability (cm/s)	Soil Layer
1	AB-01	27.50 - 30.00	2.96E-03	Silty SAND
2	AB-01"	07.00 - 10.00	3.93E-03	Gravelly SAND
3	AB-03	27.00 - 30.00	6.00E-03	Gravelly SAND
4	AB-05	25.00 - 27.00	5.44E-03	Gravelly SAND
5	AB-05"	04.00 - 05.00	1.26E-03	Gravelly SAND
6	AB-05"	07.00 - 10.00	1.11E-02	Gravelly SAND
7	AB-06	24.50 - 30.00	2.53E-03	Gravelly SAND
8	AB-06"	06.00 - 08.50	8.73E-03	Gravelly SAND
9	AB-07	27.00 - 30.00	1.49E-02	Gravelly SAND
10	AB-07"	09.00 - 11.50	9.43E-03	Gravelly SAND
11	AB-09	22.00 - 30.00	2.53E-02	Gravelly SAND
12	AB-09"	09.00 - 10.00	1.27E-02	Gravelly SAND
13	AB-10	17.00 - 30.00	8.31E-03	Gravelly SAND
14	AB-10"	06.00 - 10.00	7.78E-03	SAND
15	AB-11	27.00 - 30.00	2.19E-02	Gravelly SAND
16	AB-11"	10.00 - 13.00	1.65E-03	Silty SAND
17	AB-12	08.30 - 14.00	5.60E-04	Sandy GRAVEL
18	AB-12	27.00 - 30.00	2.94E-03	Coarse SAND
19	AB-14	24.00 - 30.00	1.23E-02	Gravelly SAND
20	AB-14"	07.00 - 08.50	5.89E-03	Gravelly SAND
21	AB-15	27.00 - 30.00	1.03E-03	Silty SAND
22	AB-15"	07.00 - 09.00	9.34E-03	SAND

出典：JICA 調査団作成



単孔非定常の現場透水試験は、直線勾配法により求めた。

$$k = \frac{(2.3d_e)^2}{8L} \log_{10} \left(\frac{2L}{D} \right) \frac{\log_{10}(S_1/S_2)}{t_2 - t_1}$$

d_e ; 水位測定箇所の内径(m)
 L ; 試験区間長(m)
 S ; 水位(m)
 t ; 時間 (sec)

出典：JICA 調査団作成

図 3-53 現場透水試験（非定常回復法）の結果

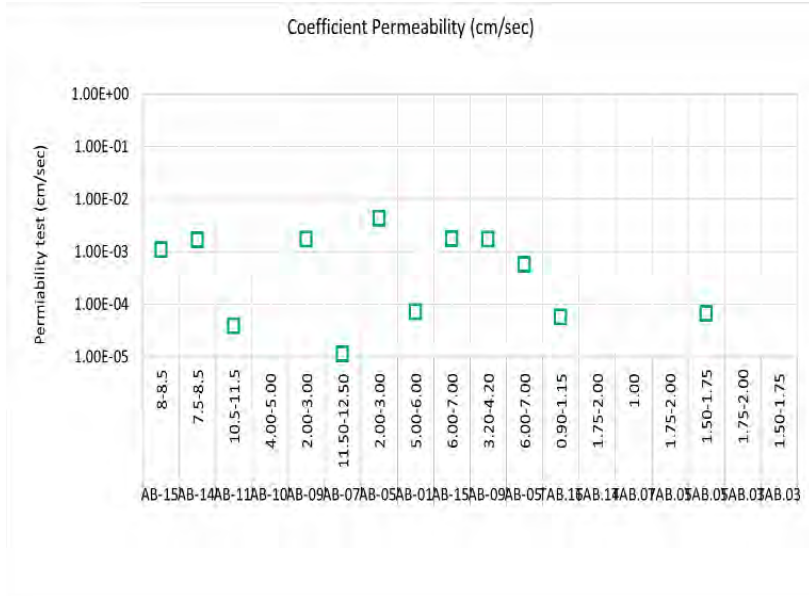
2) 室内透水試験

室内透水試験は、薄層として分布する細粒土層を対象に試験した。室内透水試験を行った試料の試験区間と得られた透水係数の一覧を表 3-18、図 3-54 に示す。一部の試料は砂質土も含まれるため大きな透水性を示すものもあったが、細粒土の試料はシルトあるいは粘土質シルトとして一般的な透水性である事を確認した。細粒土層の透水性は、平均的に見て $1 \sim 9 \times 10^{-5}$ (cm/sec) である。

表 3-18 室内透水試験結果（ボーリング UDS 乱れの少ない試料）

Lab test permeability (キャップレイヤーとなり得る細粒土層の透水試験)					
No		Hole Name	Depth (m)	Coefficient Permeability (cm/sec)	Soil Layer
1	Boring UDS sample	AB-15'	8-8.5	1.07E-03	
2		AB-14'	7.5-8.5	1.65E-03	
3		AB-11'	10.5-11.5	3.80E-05	
4		AB-10'	4.00-5.00	1.10E-06	
5		AB-09'	2.00-3.00	1.68E-03	
6		AB-07'	11.50-12.50	1.10E-05	
7		AB-05'	2.00-3.00	4.18E-03	
8		AB-01'	5.00-6.00	7.00E-05	
9		AB-15'	6.00-7.00	1.70E-03	
10		AB-09'	3.20-4.20	1.66E-03	
11		AB-05'	6.00-7.00	5.60E-04	
12	Test pit UDS	TAB.16	0.90-1.15	5.60E-05	
13		TAB.14	1.75-2.00	2.18E-06	
14		TAB.07	1.00	2.76E-06	
15		TAB.05	1.75-2.00	2.72E-07	
16		TAB.05	1.50-1.75	6.51E-05	
17		TAB.03	1.75-2.00	5.60E-06	
18		TAB.03	1.50-1.75	4.20E-06	

出典：JICA 調査団作成

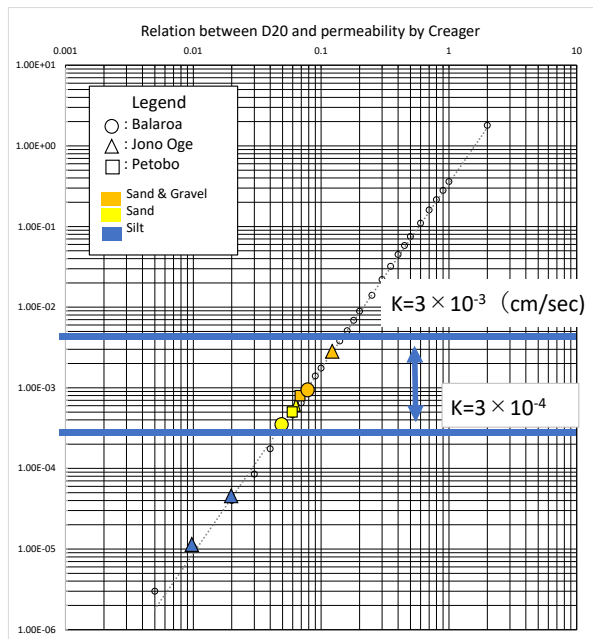


出典：JICA 調査団作成

図 3-54 乱れの少ない試料を用いた室内透水試験結果

3) 参考；粒度からの透水性

ボーリングコアの粒度 D_{20} から推定した平均的な透水係数は、 $3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$ (cm/sec)であるが、現場透水試験を優先して評価することとする (図 3-55 参照)。



出典：JICA 調査団作成

図 3-55 第 1 次ボーリング調査の粒度 D_{20} から推定される透水係数

3-7 地下水位観測（モニタリング）

（1）目的

ボーリング調査完了時の地下水位は表 3-6 に示したボーリング調査一覧表に整理している。東側の Nalodo 周辺では灌漑水路が被災し、灌漑水路からの水が途絶えたため、10m程度地下水位が低下していることが確認されている。液状化発生要因は地下水位が重要な要因であり、将来のハザード分析の重要なファクターである。地下水位は降水によって変動し、土地利用（特に灌漑水路の復旧）によっても変動する。地下水位のモニタリングは、第一次ボーリング調査及び第二次ボーリング調査で設置した観測孔を用いて、自記水位計を設置し継続的な地下水位の観測を行うことにより、地下水環境を調査し、Nalodo のハザード評価及び復旧が計画されている灌漑水路の管理計画に資するものである。

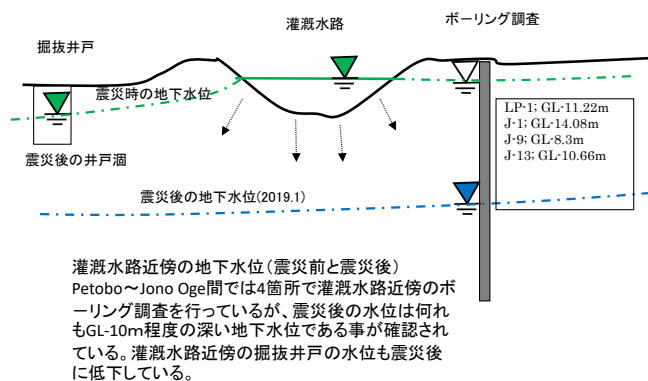
（2）実施内容と結果

地下水位のモニタリングはボーリング調査 20 箇所を選定し（図 3-58 参照）、2020 年 2 月末から自記記録を開始した。観測孔については、Nalodo 発生地域全体を網羅し、灌漑水路再建の影響評価を行える地点を選定した。孔内水位の計測は 1 時間毎に自動実施される。設置作業には、大学研究者及び学生も参加している。設置作業及び観測機器は図 3-57 に示したとおりである。

観測水位は、Petobo の頭部（AB-3 孔）で GL-6.3m まで低下し、Jono Oge の頭部（AB-11 孔）は GL-8m である。地震時の灌漑水路周辺地盤の地下水位は、民家などに設置された井川式井戸の水位が地表付近の GL-1～3m 程度であったことが判っており、震災後には井戸枯れが発生している（図 3-56 参照）。



Jono Oge 頭部 掘抜井戸（震災後）
住人からのヒアリングでは、GL-1～GL-3m に水位があったとの情報である。震災後は、井戸底まで水がなくなっている。
これ以外にも、Petobo・Sibalaya の井戸において同様の井戸枯れが確認されている



出典：JICA 調査団作成

図 3-56 震災前後の地下水位変化



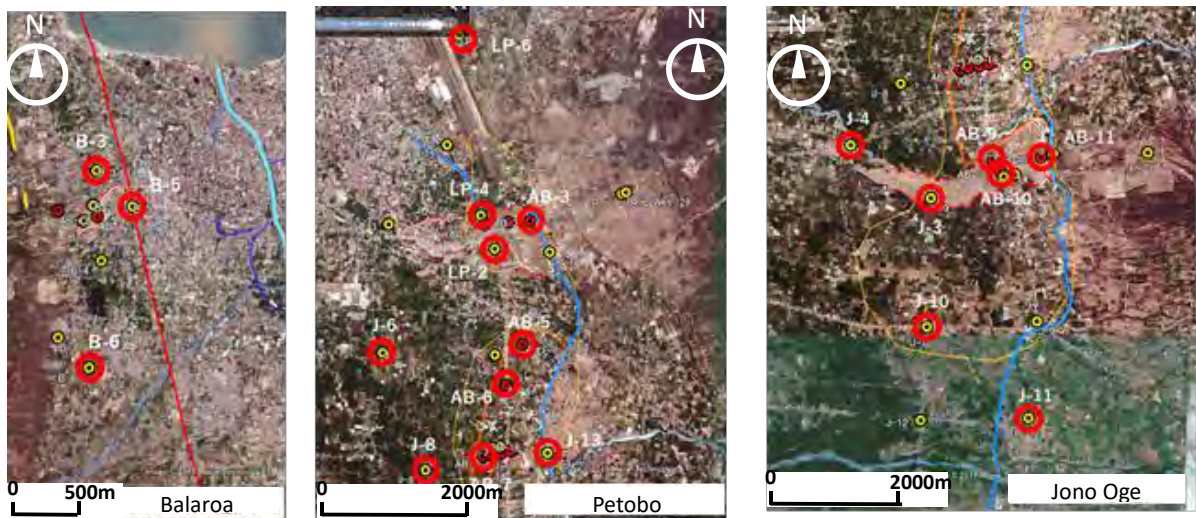
出典：JICA 調査団作成

図 3-57 観測孔と HOB0 社製ダイバー式の自記水位計及び自記雨量計

< 地下水位観測地点一覧 >

area	Name	Hole mouth elevation (EL.m)	boring is completed	2020/2/15	2020/2/26	2020/4/13	2020/5/13	2020/6/13	2020/7/13	2020/8/13	statistics	
			GWL (GL-m)	GWL (GL-m)	GWL (GL-m)	GWL (GL-m)	GWL (GL-m)	GWL (GL-m)	GWL (GL-m)	GWL (GL-m)	Highest water level(GL-m)	Lowest Water level GL-m)
Petobo	LP-6	96.50	19.98	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry	19.98	19.98
	LP-6 Atm pressure											
	LP-4	53.40	0.80	2.11	2.21	2.26	2.23	2.28	0.71	0.75	0.71	2.28
	AB-3	72.00	4.83	5.63	5.81	4.87	4.83	5.07	6.29	6.00	4.83	6.29
Boromaru /Lolu	LP-2	57.10	2.62	4.05	4.17	3.50	3.45	4.50	4.12	4.07	2.62	4.50
	AB-5	68.90	1.68	2.42	2.61	3.00	2.75	3.03	2.04	1.25	1.25	3.03
	AB-6	69.70	3.21	4.31	4.53	4.97	4.92	5.20	4.12	3.27	3.21	5.20
	J-6	37.20	0.00	1.07	2.13	2.27	2.15	1.92	1.16	0.45	0.00	2.27
	J-13	81.60	10.66	10.66	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry	10.66	10.66
	AB-7	65.00	4.10		5.40	5.82	6.78	6.23	5.54	4.88	4.10	6.78
Jono Oge	J-8	48.90	0.62	-0.25	2.30	2.02	2.52	2.39	1.78	0.95	-0.25	2.52
	AB-11	72.90	6.50	7.87	8.14	8.62	8.83	9.02	8.13		6.50	9.02
	AB-9	63.10	2.63	3.41	3.73	4.02	4.07	3.95	2.75	2.00	2.00	4.07
	AB-10	62.40	0.81	1.59	1.81	2.07	2.20	2.17	1.31	0.73	0.73	2.20
	J-3	53.30	3.63	0.70	2.21	2.35	2.35	2.36	2.18	1.56	0.70	3.63
	J-4	37.20	2.10	2.25	2.45	2.52	2.61	2.53	2.39	2.01	2.01	2.61
	J-10	66.10	5.83	9.12	9.30	9.70	9.95	10.12	9.88	9.75	5.83	10.12
Balaroa	J-11	66.10	8.49	8.59	8.58	8.33	8.58	8.56	8.58	8.58	8.33	8.59
	B-3	22.40	0.00	0.00	-0.17	-0.49	-0.30	-0.26	-0.29	-0.31	-0.49	0.00
	B-5	19.00	0.55	0.55	1.49	0.89	0.84	0.04	0.35	0.29	0.04	1.49
	B-6	73.80	16.91	16.91	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry	16.91	16.91

< 観測地点位置図 >



出典：JICA 調査団作成

図 3-58 地下水観測孔一覧と配置

3-8 室内土質試験

ボーリング調査の標準貫入試験試料を用いた室内土質試験は、液状化判定のための物理試験（粒度試験・土粒子密度試験・土の含水比・液塑性試験）を行った。トレンチあるいは三重管サンプラーを用いた乱れの少ない試料は、上記物理試験に加えて、湿潤密度試験・室内透水試験・液状化強度試験を行った。液状化試験については4章に結果を整理した。

なお、長距離流動の要因として、特殊な粒子形状や鉱物構成の可能性を検討するために、土粒子の構成鉱物分析および土粒子形状分析を行っている。

3-8-1 第一次ボーリング調査の土質試験の内容

第一次ボーリング調査では、標準貫入試験試料を用いて物理試験（粒度・土粒子密度・液塑性）を行った。試験は深さ20mまでの1m毎の貫入試験試料に対して実施することを基本とした。ただし、*N*値が大きく液状化しがたい層相の場合には、数mの同一層区間を代表して1試料の分析を行った。第一次ボーリング調査の室内試験数量は、延べ729回の標準貫入試験に対して339試験である（表3-19参照）。これらの試験結果は、液状化の簡易判定（*F_L*値算出）に用いた。

表 3-19 第一次ボーリング調査の室内土質試験数量

Location	Borehole Name	Length(m)	Ground Elevation(m)	SPT test	In-Situ Permeability test	Lab test Grain size	Lab test Liquefaction test	Groundwater observation hole	Ground water level(GL-m) (Water level after completion)	Ground water level(GL-m) (Water level at the Landslide)
Relocation area		11.0	141.7	11	0	0	0	1	11.00	11.00
		10.0	103.8	5	0	0	0	1	10.00	10.00
	o-1	10.0	149.0	6	0	0	0	1	10.00	10.00
		10.0	100.0	5	0	0	0	1	10.00	10.00
Balaroa		30.0	40.4	29	0	13	0	1	(1.95)	(1.95)
		30.0	35.4	26	0	11	0	1	2.10	0.00
		30.0	22.4	25	0	10	0	1	(0.30)	(0.30)
		30.0	32.8	18	0	15	0	1	(0.60)	(0.60)
		30.0	19.0	30	0	15	0	1	0.55	0.55
		30.0	73.8	30	0	13	0	1	16.91	16.91
Petobo		35.0	81.4	26	0	16	0	1	11.22	1.00
		32.0	57.1	32	0	16	0	1	2.60	0.50
		30.0	34.4	29	0	15	0	1	0.13	0.13
		30.0	53.4	30	0	16	0	1	0.80	0.80
		30.0	60.6	30	0	13	0	1	5.59	5.59
		27.0	96.5	26	0	15	0	1	20.00	20.00
JonoOge and Around it		30.0	83.7	30	0	13	0	1	14.08	1.00
		25.0	64.9	25	0	14	0	1	3.20	0.00
		30.0	53.3	30	0	13	0	1	0.70	0.70
		30.0	37.2	30	0	15	0	1	1.20	1.20
		28.0	62.0	28	0	14	0	1	(1.95)	(1.95)
		30.0	37.2	30	0	15	0	1	1.07	1.07
		30.0	67.8	30	0	14	0	1	3.71	0.50
		30.0	48.9	30	0	13	0	1	1.05	1.05
		30.0	81.7	19	0	7	0	1	8.30	0.50
		30.0	66.1	30	0	14	0	1	5.80	1.00
		30.0	66.1	30	0	13	0	1	8.50	1.00
		30.0	68.9	29	0	13	0	1	3.60	1.00
		30.0	81.6	30	0	13	0	1	10.66	1.00
	10.0	65.0	0	0	0	0	1	0.65	0.65	
	30	798.0		729.0		339.0				

出典：JICA 調査団作成

3-8-2 第二次ボーリング調査の土質試験

第二次ボーリング調査では、標準貫入試験試料を用いた物理試験（粒度・土粒子密度・液塑性）に加えて、三重管サンプリング試料の土質試験・トレンチ及びテストピットから採取した乱れの少ない試料の土質試験を行った。表 3-20 に試験試料の深さ・N 値・土質判定・試験項目の選定リスト事例を示す。ボーリング調査の室内試験は深さ 30m までの 1m 毎の標準貫入試験試料に対して実施することを基本とした。ただし、標準貫入試験試料の 45cm の中に細粒土と砂質土の複数種類が認められる場合には、層相に分けて SPT サンプルに対して 2 試験を行った。また、目視観察で細粒分が少ない砂質土・礫質土については、土粒子密度試験及び液塑性試験を省略した。物理試験は、三重管サンプル試料及びトレンチ採取試料についても同様に行った。

乱れの少ない試料を用いた液状化試験は、当初インドネシアの試験機関・大学等の研究機関で実施する計画を立てたが、液状化試験の実績などを考慮して、国内に乱れの少ない試料を運搬して液状化試験を実施することに変更した。トレンチから採取した乱れの少ない試料の液状化強度試験は、国内支援委員会の先生方の指導の下に、「基礎地盤コンサルタンツ株式会社」の試験室で実施した。試験結果は、国内支援委員会の安田名誉教授に整理いただいた（本報告書 4-3 に結果を整理した）。

表 3-20 第二次ボーリング調査の室内土質試験試料の選定事例（AB-7 孔の事例）

No	Borehole name	SPT code	Sample depth		SPT Value			Description	Laboratory Test Parameter Request *)														
			from (m)	to (m)	N1	N2	N3		Index properties						Index properties								
			1.01	1.02	1.03	1.04	1.05		1.06	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06								
1	AB-07	SPT-01	1.50	1.95	6	8	8	Sandy Silt / Gravely Sand	2	1	1	1					1	1	1				
		SPT-02	2.50	2.95	3	3	5	Gravely Sand	1	1													
		SPT-03	3.50	3.95	12	8	3	Gravely Sand	1	1													
		SPT-04	4.50	4.95	2	2	3	Sand	1	1	1	1											
		SPT-05	5.50	5.95	1	1	2	Sand	1	1	1	1											
		SPT-06	6.50	6.95	1	1	3	Sandy Silt	1	1	1	1											
		SPT-07	7.50	7.95	4	5	5	Sand	1	1	1	1											
		SPT-08	8.50	8.95	5	6	13	Sand	1	1	1	1											
		SPT-09	9.50	9.95	2	5	5	Gravely Sand	1	1													
		SPT-10	10.50	10.95	11	12	12	Gravely Sand	1	1													
		SPT-11	11.50	11.95	4	5	7	Gravely Sand / Silt	2	1							1	1	1				
		SPT-12	12.50	12.95	3	4	4	Sand	1	1	1	1											
		SPT-13	13.50	13.95	2	6	8	Silt / Sand	2	1	1	1					1	1	1				
		SPT-14	14.50	14.95	4	9	10	Sand	1	1	1	1											
		SPT-15	15.50	15.95	5	15	22	Gravely Sand	1	1													
		SPT-16	16.50	16.95	7	6	9	Gravely Sand	1	1													
		SPT-17	17.50	17.95	5	7	13	Gravely Sand	1	1													
		SPT-18	18.50	18.91	18	19	31/11	Sandy Silt	1	1	1	1											
		SPT-19	19.50	19.95	17	18	20	Sandy Silt / Gravely sand	2	1	1	1						1					
		SPT-20	20.50	20.75	22	50/10		Gravely Sand	1	1													
		SPT-21	21.50	21.85	18	35	15/5	Gravely Sand	1	1													
		SPT-22	22.50	22.95	8	18	20	Gravely Sand	1	1													
		SPT-23	23.50	23.95	11	13	7	Gravely Sand	1	1													
		SPT-24	24.50	24.95	20	14	18	Gravely Sand / silty sand	2	1	1						1	1	1				
		SPT-25	25.50	25.95	12	15	20	Gravely Sand	1	1													
		SPT-26	26.50	26.77	30	50/12		Gravely Sand	1	1													
		SPT-27	27.50	27.83	23	38	12/3	Gravely Sand	1	1													
		SPT-28	28.50	28.82	21	47	7/2	Gravely Sand	1	1													
		SPT-29	29.50	29.95	22	42	8	Gravely Sand	1	1													

出典：JICA 調査団作成

試験項目の Index は、1.01；粒度（沈降）＋土粒子密度 1.02 粒度（篩い） 1.03 液塑性試験をさす。

3-8-3 土粒子の構成分析と土粒子の形状

トレンチから採取した国内土質試験試料（流動化したと考えられる試料）を対象として特異な鉱物組成あるいは粒子形状であるかを判定することを目的として、土粒子の構成鉱物分析、形状分析を行った。試料は、Petobo、Jono Oge、Lolu 計 3 地点の国内の試験機関で液状化試験を行ったものから採取した。試験試料の採取位置と試料番号は、3-4 トレンチ調査を参照いただきたい。

(1) 土粒子の構成鉱物分析

1) 目的

試料の後背地には、変成岩（花崗片麻岩など）と変成岩起源の砕屑岩（新第三紀）が分布する。本分析の目的はトレンチから採取した流動化層（長距離流動を継続させた砂質堆積物）の構成鉱物を確認することである。

2) 試料選定・方法

土粒子の構成鉱物分析は3種の試料（Petobo 1-8-2、Lolu 1-9-1、Jono Oge 1-8-2）について、粒度ごとに以下の2種類の分析を行った。①X線回折分析（全岩）、②薄片を用いた顕微鏡観察（砂分）。X線回折分析では不定方位法X線回折分析を行い、試料中に含まれる主要な鉱物の種類を調べた。また砂粒組成分析では薄片を作成し、偏光顕微鏡下で200粒子のカウントをすることで組成を求めた。

3) 結果

X線回折分析、及び顕微鏡下での構成鉱物分析の結果は以下のとおりである。

① X線回折分析

分析結果を図 3-59に示す。量比の最強回折線の回折強度(cps)から定義し、多量、中量、少量、微量、及びきわめて微量という基準で判定した。すべての試料で多量の石英、少量の斜長石、微量のカリ長石及びきわめて微量の雲母鉱物・角閃石が含まれており、地域によって粘土鉱物や赤鉄鉱の有無など多少の違いがみられた。

試料名	検出鉱物								
	石英	カリ長石	斜長石	雲母鉱物	角閃石	斜フチロル沸石	カオリン鉱物	スメクタイト	赤鉄鉱
Petobo 1-8-2	◎	+	△	±	±	±	±		±
Kolu 1-9-1	◎	+	△	±	±		±		
Jono-Oge 1-8-2	◎	+	△	±	±			±	

量比

◎: 多量(>5,000cps)、○: 中量(2,500~5,000cps)、△: 少量(500~2,500cps)

+ : 微量(250~500cps)、±: きわめて微量(<250cps)

X線回折チャート上で使用したpdfデータの鉱物名

石英: quartz カリ長石: microcline 斜長石: albite 雲母鉱物: phlogopite

角閃石: magnesiohornblende 斜フチロル沸石: clinoptilolite カオリン鉱物: kaolinite

スメクタイト: montmorillonite 赤鉄鉱: hematite

試料番号はトレンチ実施場所、採取場所番号、試料番号、分割した試料の上下をさ

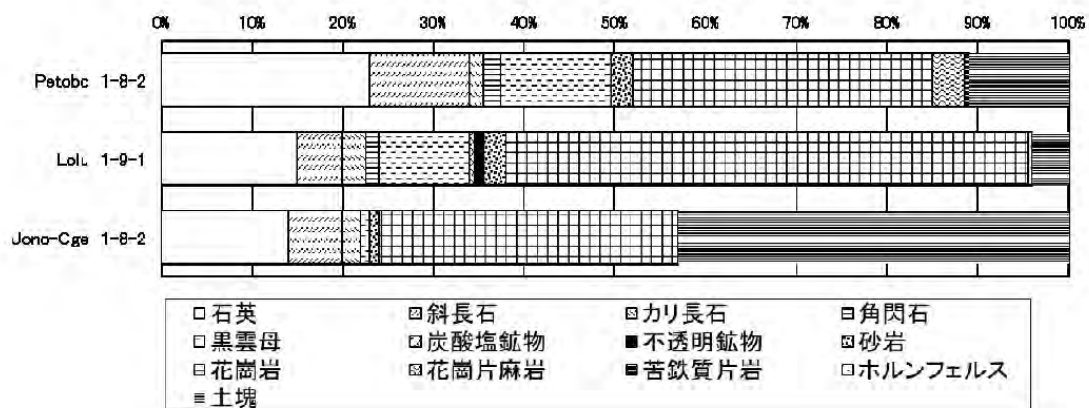
出典: JICA 調査団作成

図 3-59 X線回折分析による検出鉱物

② 砂粒組成分析

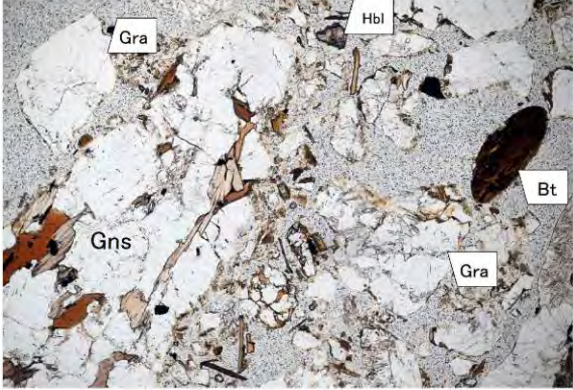
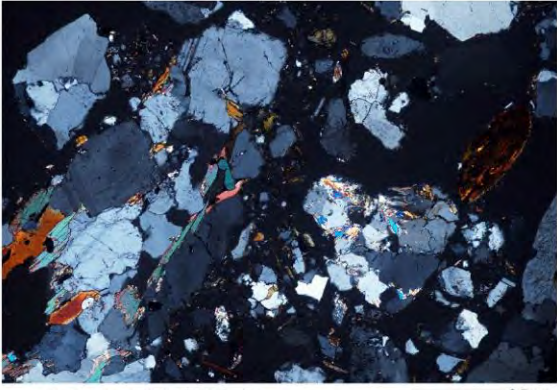
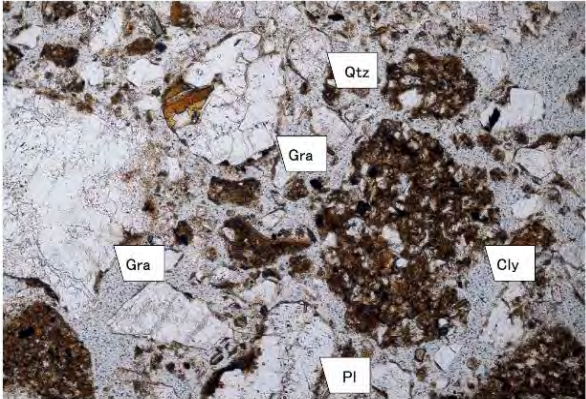
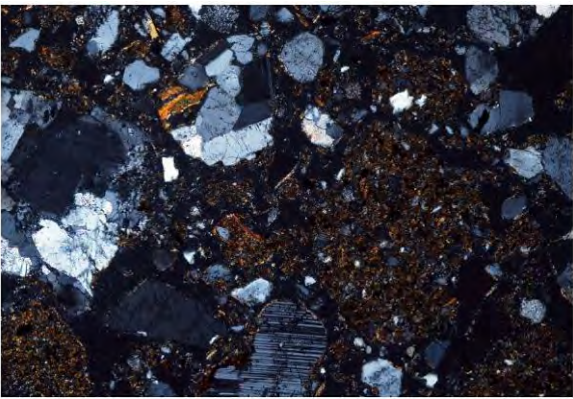

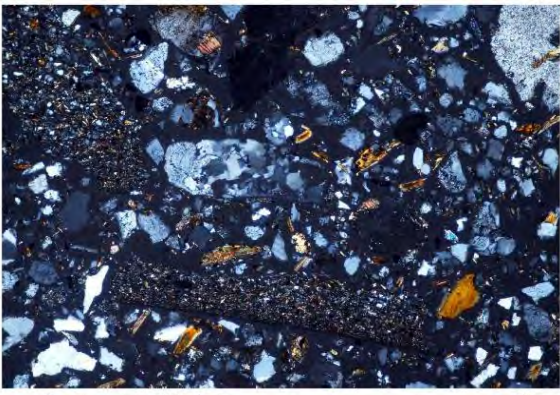
砂粒組成の分析結果を図 3-60 に、顕微鏡下における状況を図 3-61 に示す。Petobo 1-8-2 の試料では砂粒組成花崗岩及び石英を主体とし、斜長石、黒雲母、土塊を少量、カリ長石、角閃石、花崗片麻岩を微量、苦鉄質片岩をきわめて微量とした組成を示す。Jono Oge 1-8-2 の試料では砂粒組成は土塊及び花崗岩を主体とし、石英、斜長石を少量、カリ長石、黒雲母、砂岩を微量伴う組成を示す。Lolu 1-9-1 の試料では、砂粒組成は花崗岩片が卓越し、石英、斜長石、黒雲母を少量、カリ長石、角閃石、不透明鉱物、砂岩、土塊を微量、炭酸塩鉱物及びホルンフェルスをかきわめて微量とした組成を示す。

試料名	鉱物片							岩片					その他	合計
	石英	斜長石	カリ長石	角閃石	黒雲母	炭酸塩鉱物	不透明鉱物	砂岩	花崗岩	花崗片麻岩	苦鉄質片岩	ホルンフェルス	土塊	
Petobo 1-8-2	46	22	3	4	24			5	66	7	1		22	200
Lolu 1-9-1	30	10	5	3	20	1	2	5	115			1	8	200
Jono-Oge 1-8-2	28	12	4		2			2	66				86	200



出典：JICA 調査団作成

図 3-60 砂粒組成 (粒数)

Petobo 1-8-1	
単ポーラー	直行ポーラー
 <p>1. Petobo 1-8-2 下方ポーラー</p>	 <p>2. Petobo 1-8-2 直交ポーラー 0.5mm</p>
Jono Oge 1-8-2	
 <p>1. Jono Oge 1-8-2 下方ポーラー</p>	 <p>2. Jono Oge 1-8-2 直交ポーラー 0.5mm</p>
Lolu 1-9-1	
 <p>1. Lolu 1-9-1 下方ポーラー</p>	 <p>2. Lolu 1-9-1 直交ポーラー 0.5mm</p>
凡例	<p>Qtz: 石英 Kfs: カリ長石 Bt: 黒雲母 Opq: 不透明鉱物 Gra: 花崗岩 Hbl: 角閃石 Cly: 土塊 Gns: 花崗片麻岩</p>

出典：JICA 調査団作成

図 3-61 偏光顕微鏡下での観察

4) まとめ

Petobo、Lolu、Jono Oge のトレンチから採取した流動化層を対象とした X 線回折分析では、石英、カリ長石、斜長石、雲母鉱物、角閃石などが検出され、花崗岩質な組成を示している。粘土分として含まれていると考えられる鉱物としては、斜プチロル沸石、カオリン鉱物、スメクタイトが検出される。粘土鉱物のカオリン鉱物は、Petobo 1-8-2、Lolu 1-9-1 の 2 試料に含まれるのに対し、Jono Oge 1-8-2 ではカオリン鉱物は含まれず、スメクタイトが検出されるという違いが認められる。一方砂粒分を対象とした顕微鏡観察では、後背地の地質を反映して、3 試料ともに、花崗岩類、石英、長石類が多く含まれている。試料間における違いとしては、Petobo 1-8-2、Lolu 1-9-1 で黒雲母が多く、Jono Oge 1-8-2 では粘土分を含む土塊が卓越する。砂粒組成、粘土鉱物組成から、Petobo 1-8-2、Lolu 1-9-1 の 2 試料と、Jono Oge 1-8-2 では若干の違いがあると理解されるが、いずれの試料も花崗岩質な後背地を反映した一般的な組成であり、特殊な鉱物、岩片が卓越する状況は認められない。

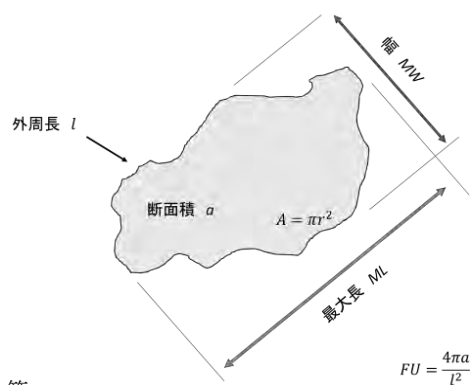
(2) 粒子形状計測

1) 目的

砂粒子の形状はせん断強さなどの工学的な性質に影響を与えることが指摘されている。本業務では長距離流動を発生させた要因分析の基礎情報を得ることを目的とし、土質試料の粒子形状を計測した。

2) 試料選定・方法

試料は国内土質試験に用いた Petobo1、Lolu1、Jono Oge1 の 3 試料（篩分け試料）を使用した。篩分けの粒径 0.5mm、1-2mm 及び 2-5mm を鏡下観察するとともに、全粒径の薄片試料を用いた偏光顕微鏡画像を観察した。水洗いしていない試料では、粒子の外周に細粒分が付着する場があり（1-2mm など）、凹凸計測には不適な場合がある。そのため容易に分離できる細礫分（2-5mm）を測定の対象とした。それぞれの試料について、20 粒子以上を外周が重ならないように撮影し、以下の吉村(1993)による要領で外周・面積・短径・長径を自動計測し、凹凸係数 FU を算出した（図 3-62 参照）。粒子形状解析の結果を図 3-63～図 3-65 に示す。

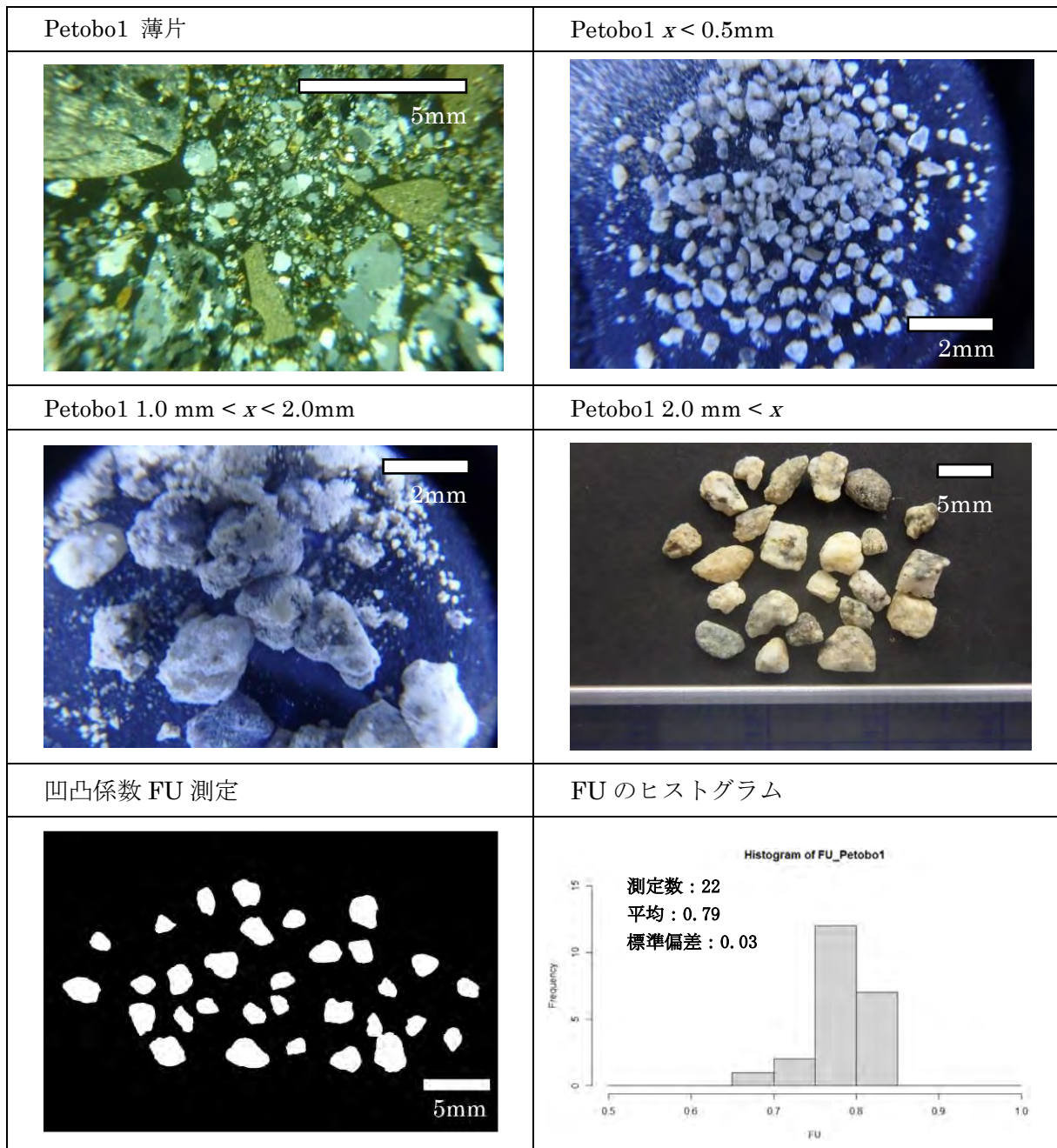


出典：吉村（1993）凹凸係数 FU の算
...

図 3-62 FU 値の測定方法

1) 結果

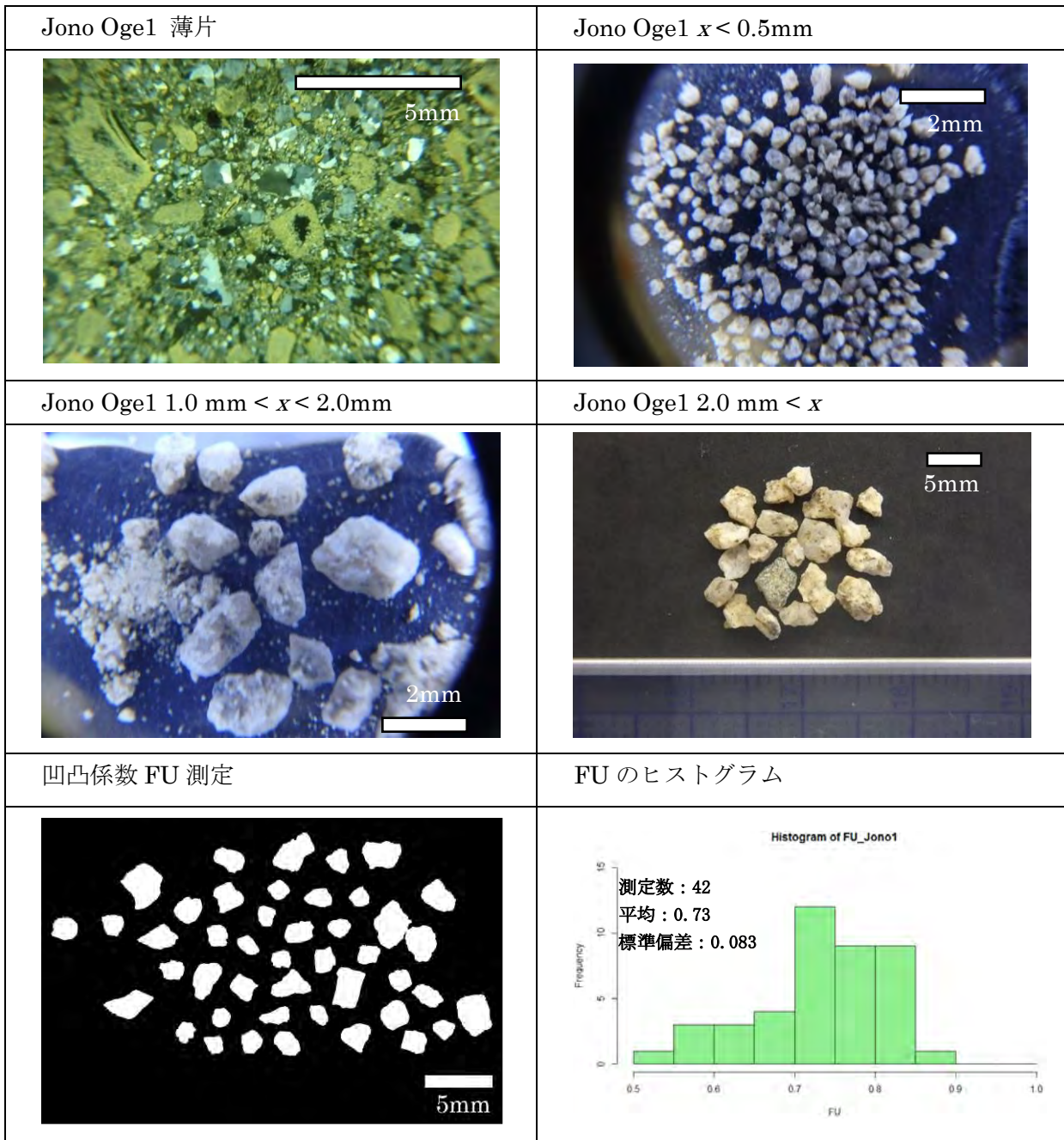
① Petobo



出典：JICA 調査団作成

図 3-63 粒子形状分析 (Petobo1)

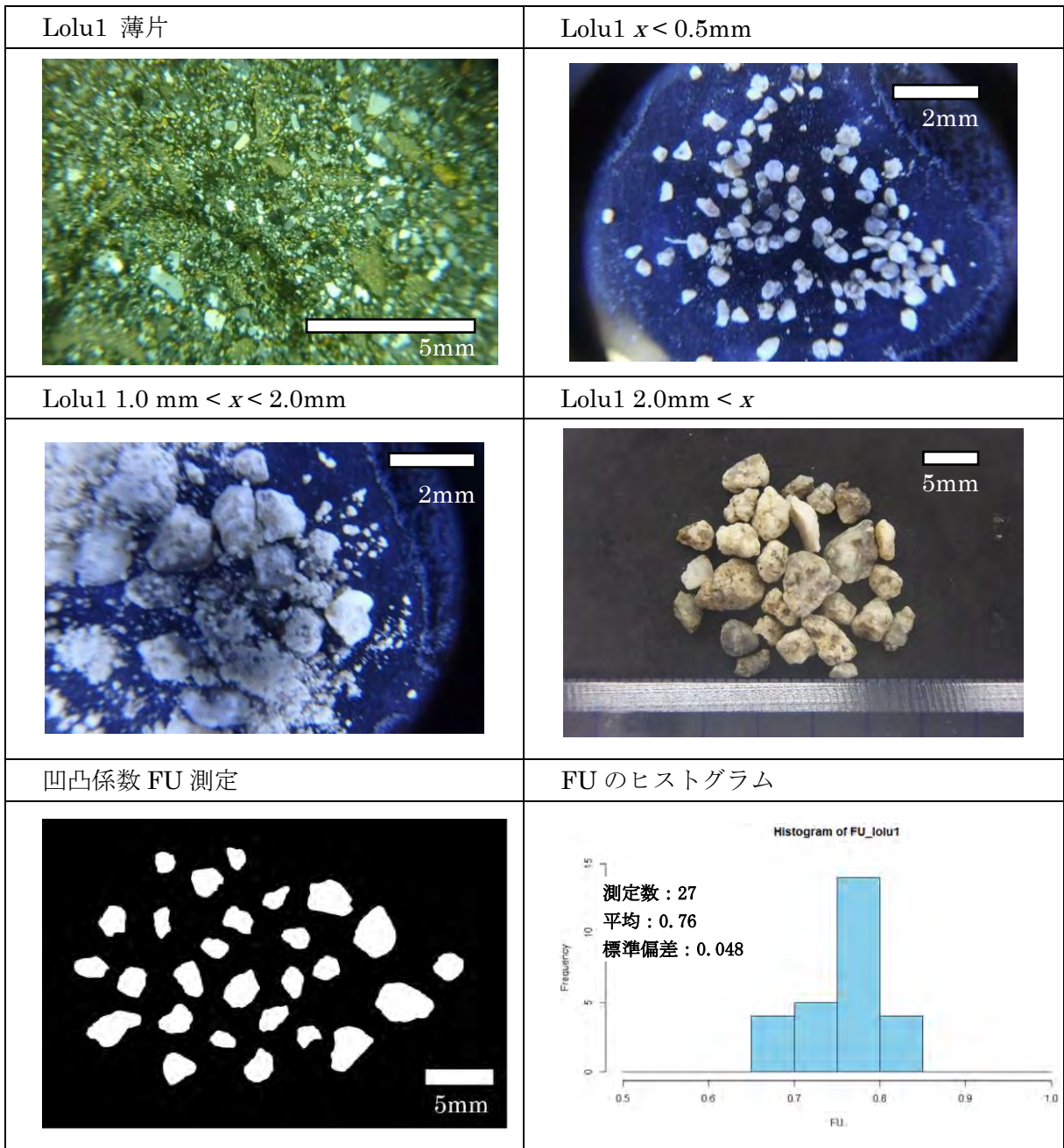
② Jono Oge



出典：JICA 調査団作成

図 3-64 粒子形状分析 (Jono Oge1)

③ Lolu



出典：JICA 調査団作成

図 3-65 粒子形状分析 (Lolu1)

4) まとめ

上記の結果より、当該地域のFU値は0.75程度であることが分かった。参考に日本における木曾川・長良川・揖斐川のFU値は、0.7～0.8にあることが一般的で、今回の結果もほぼ同様の結果である。また日本における川砂は、河口から遠ざかるほどFU値が小さく（凹凸度が高い）傾向を示すが、Paluの試料は給源が近いにもかかわらずFU値はやや高い。これは源岩の違いを反映している可能性がある（木曾三川の試料は堆積岩類由来であり、Paluの試料は花崗岩や花崗片麻岩由来である）。しかし粒子形状解析の結果から、総じてPaluの粒度化層の粒子形状に関して特異性は認められなかった。

3-9 PS 検層

(1) 目的

PS 検層は、地震計の基礎地盤評価及び Nalodo 発生地域の一次元地盤応答解析に資し、液状化解析の精度向上を目的とした。

(2) 実施場所と方法

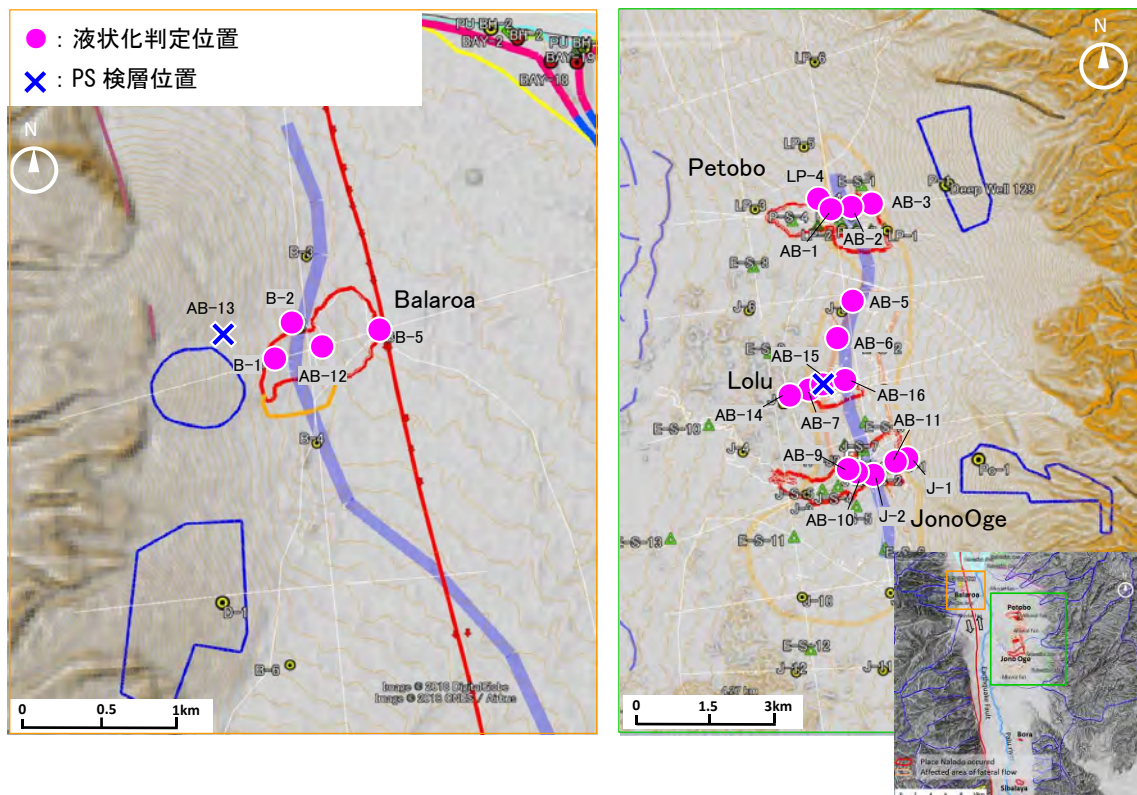
観測対象は、今次災害で唯一地震記録が取得できた地震計の基礎地盤と液状化地すべり発生箇所の子 2 地点（表 3-21 参照）を対象とした。

表 3-21 PS 検層の実施対象孔

ボーリング名称	検層対象	孔内水位	目的
AB-13	0.5~26.0m	GL-22.6m	地震計基礎の地盤評価
AB-15	0.5~29.0m	GL-6.6m	Lolu の Vs 評価

出典：JICA 調査団作成

検層は、単一のボーリング孔を用いて、地盤内を伝播する弾性波（P波及びS波）の速度を測定する方法（ダウンホール方式）を用いて、孔内受振点間隔は 0.5m とした。当初検層は、インドネシアの調査機関が実施したが、使用機材に課題があり、起震時間の正確なデータが正しく取得できなかったことから、日本人技術者が現地で測定を行った。検層の対象位置を図 3-66 に示す。



出典：JICA 調査団作成

図 3-66 PS 検層位置 (AB-13・AB-15)

(3) PS 検層結果

2 箇所で行った PS 検層の結果は次のとおりである。図 3-67～図 3-72 に検層結果を示す。

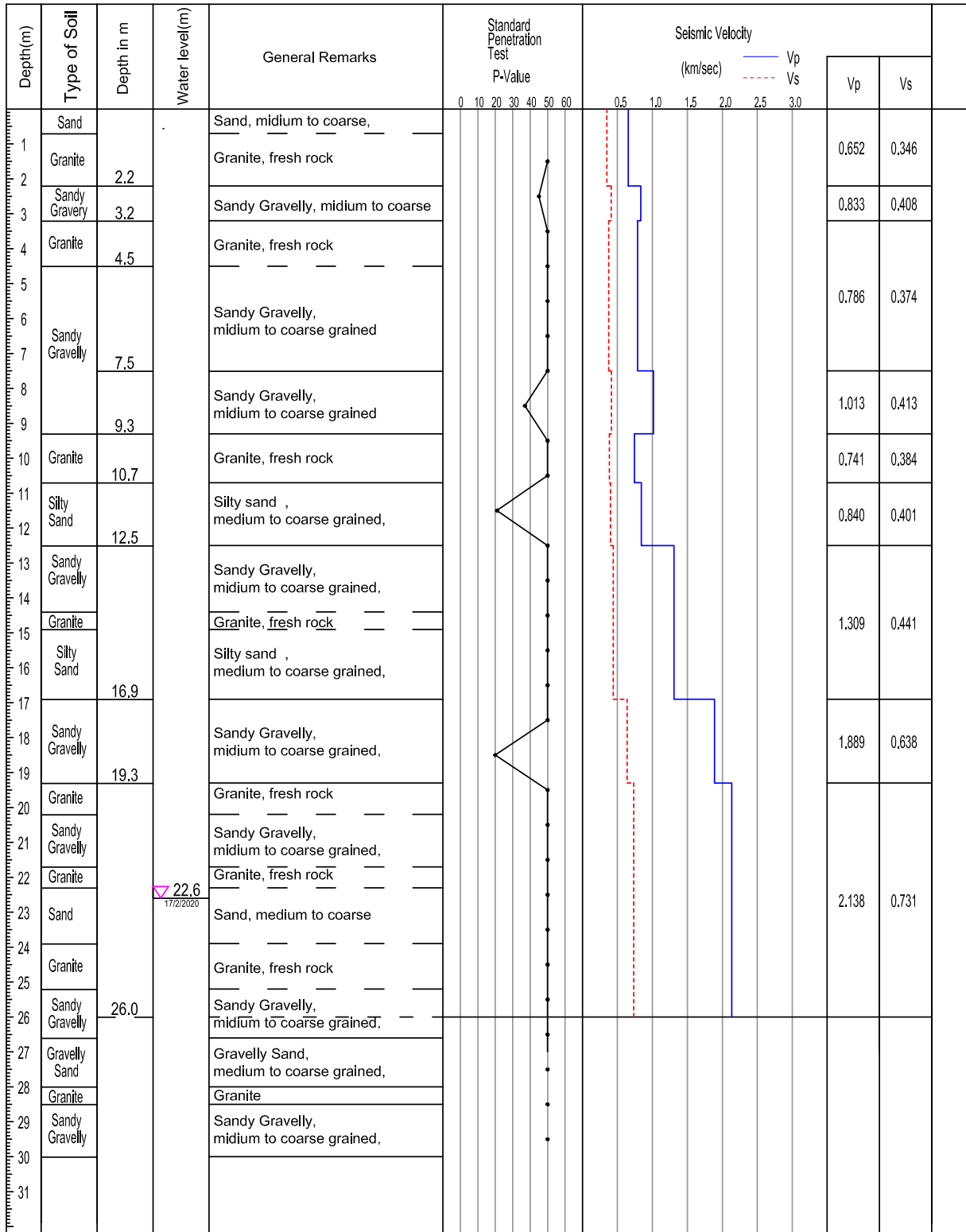
AB-13 孔の検層結果；地震計の設置地盤の S 波速度は、表層から 2.2m が 346m/sec、それより深部は 400m/sec 以上の S 波速度と測定された。一般に地震基盤は S 波速度 350m/sec 以上と言われており、地震計は深さ 3m 程度の地盤に設置されていることから、地震計の設置は適切に行われていると評価できる。

AB-15 孔の検層結果；S 波速度 200m/sec 程度は深さ 13.5m 以浅に分布し、S 波速度 350m/sec 以上の地震基盤は深さ 17.5m より深部に分布する。

N 値- V_s 関係； N 値との S 波速度の関係を見るために、最小間隔の 0.5m 毎に S 波速度を読み取り、 N 値との相関を検討した。結果は第 4 章の液状化解析（一次元地盤応答解析）に使用した。（図 3-73、図 3-74 参照）

PS-Logging Result Table

Hole Number: AB-13

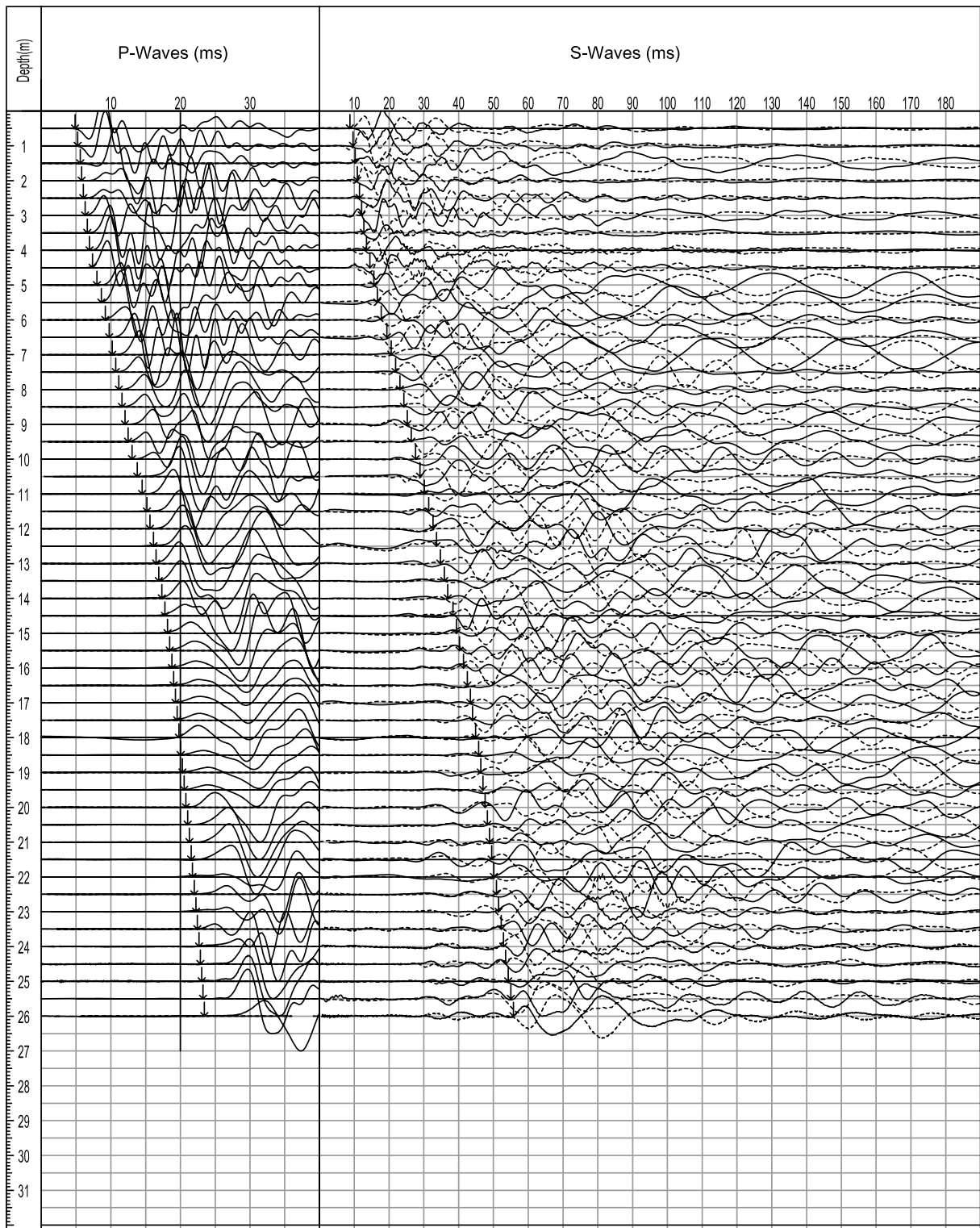


出典：JICA 調査団作成

図 3-67 PS 検層結果柱状図 (AB-13)

Waveform Records

Hole Number: AB-13

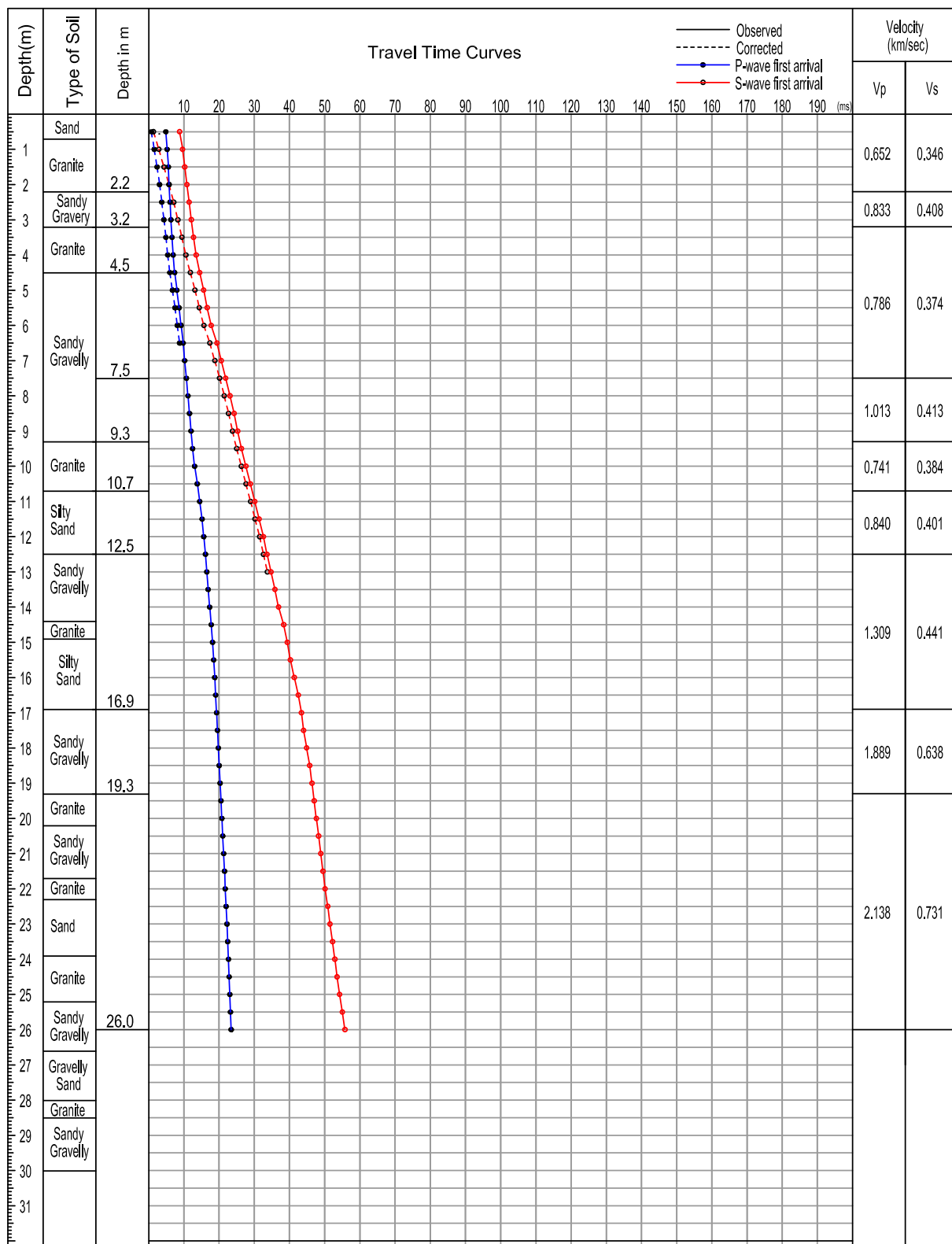


出典：JICA 調査団作成

図 3-68 PS 検層 (AB-13) 走時曲線

Travel Time Curves

Hole Number: AB-13

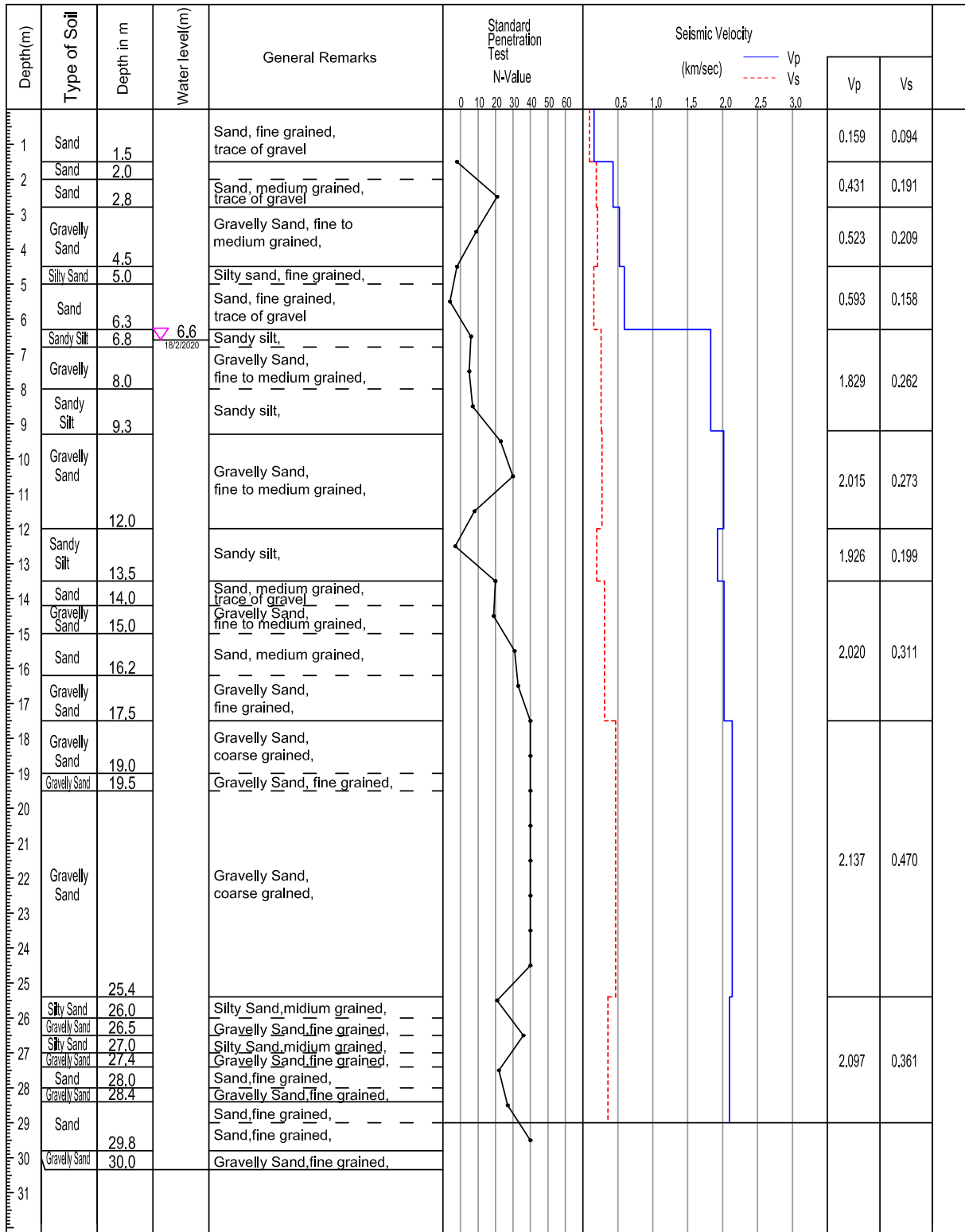


出典：JICA 調査団作成

図 3-69 PS 検層 (AB-13) P 波速度 S 波速度深度分布

PS-Logging Result Table

Hole Number: AB-15

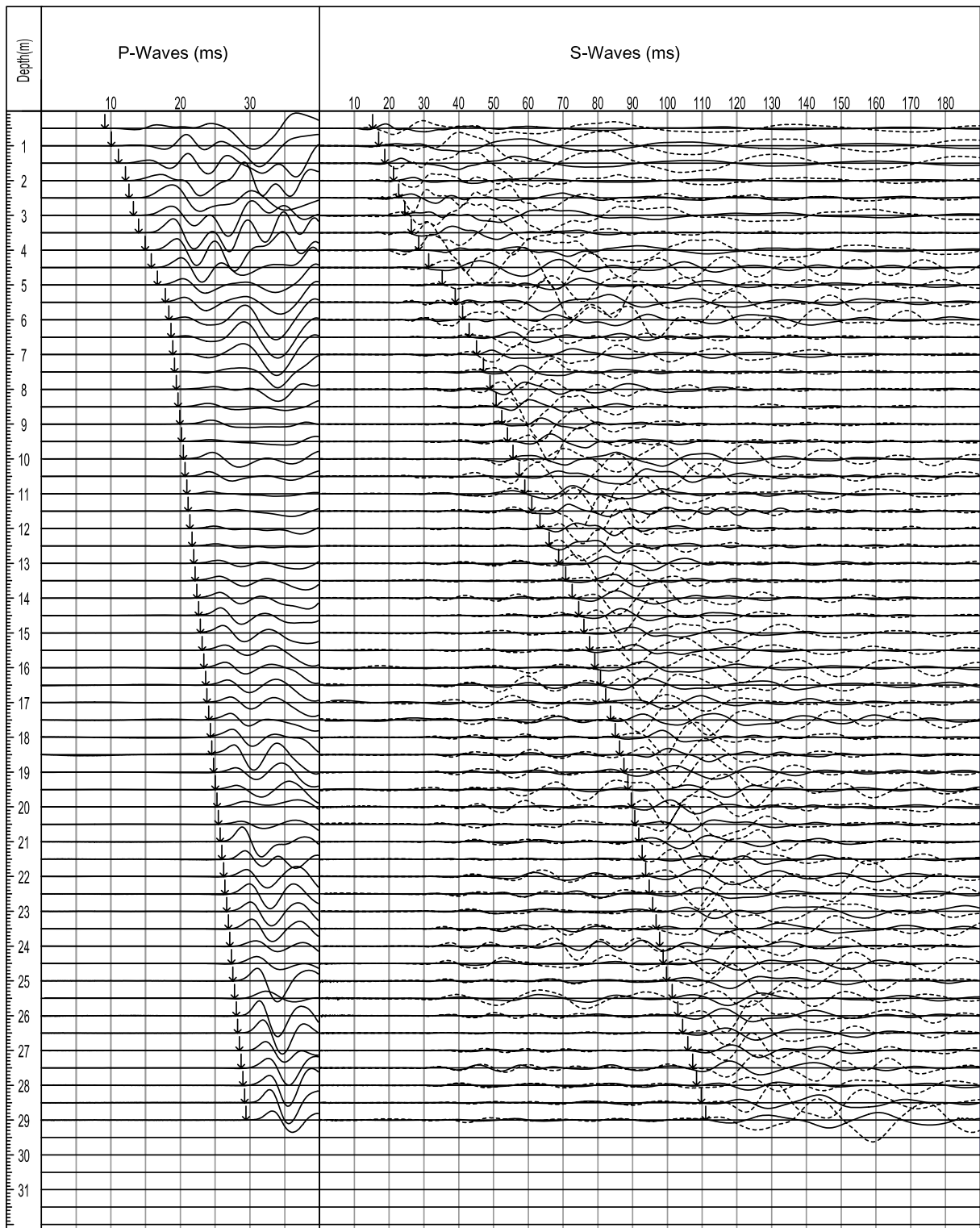


出典：JICA 調査団作成

图 3-70 PS 検層柱状图 (AB-15)

Waveform Records

Hole Number: AB-15

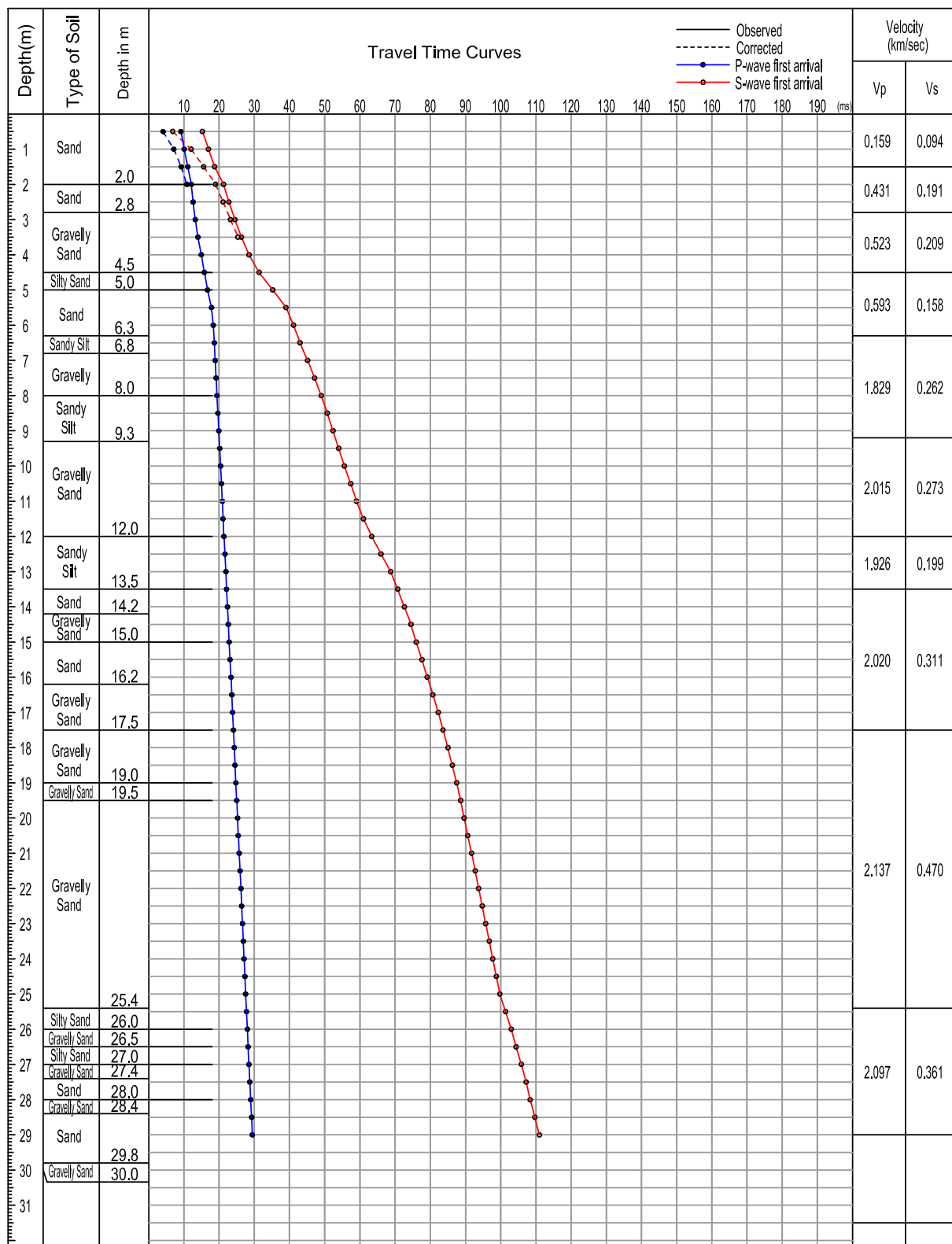


出典：JICA 調査団作成

図 3-71 PS 検層 (AB-15) 走時曲線

Travel Time Curves

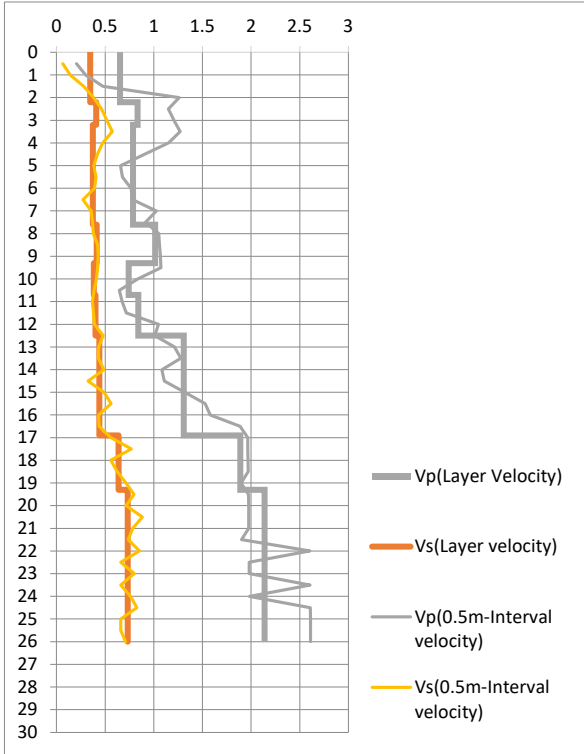
Hole Number: AB-15



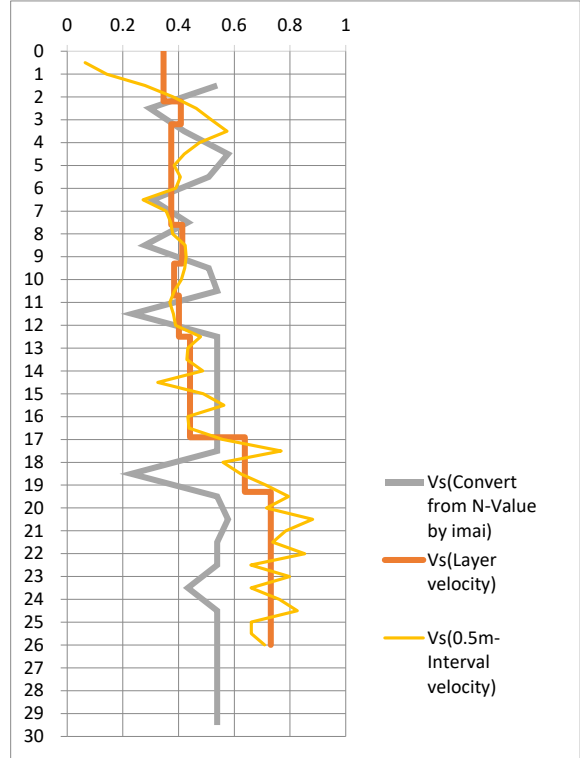
出典：JICA 調査団作成

図 3-72 PS 検層 (AB-15) P 波速度 S 波速度深度分布

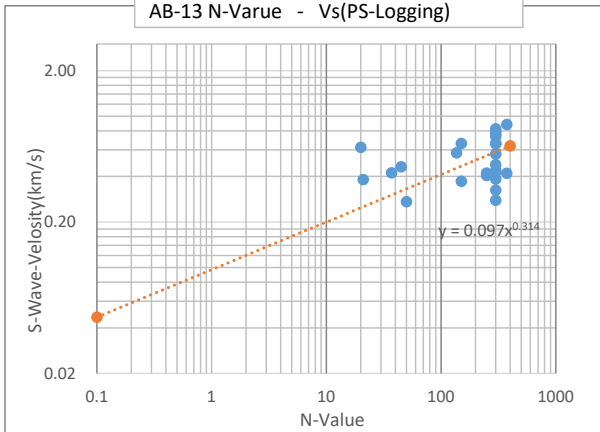
AB-13 Vp-Vs velocity
(Layer and 0.5m Interval velocity)



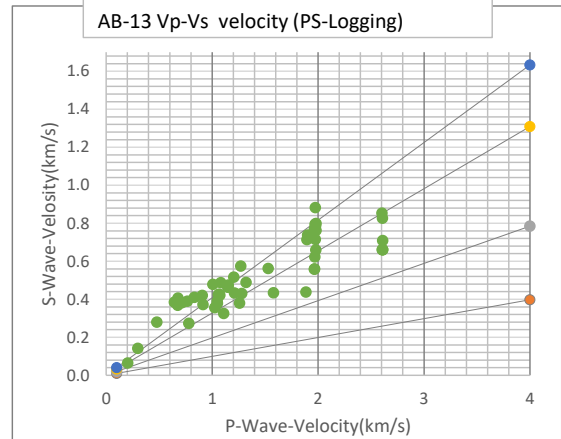
AB-13 Vs velocity
(Layer, 0.5m Interval velocity
Convert Vs From STP)



AB-13 N-Value - Vs(PS-Logging)

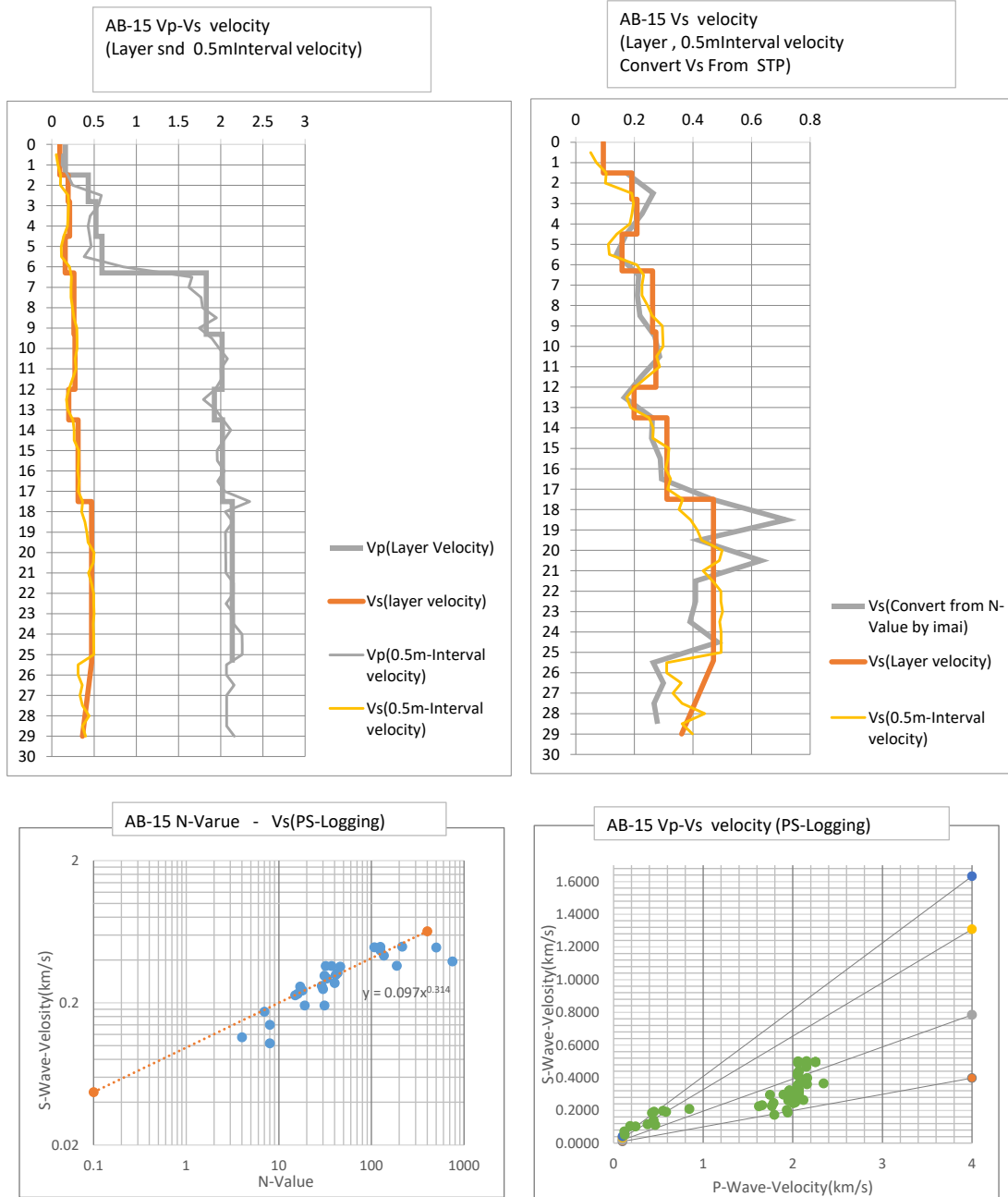


AB-13 Vp-Vs velocity (PS-Logging)



出典：JICA 調査団作成

図 3-73 N-Vs・Vp-Vs 関係 (AB-13)



出典：JICA 調査団作成

図 3-74 N - V_s ・ V_p - V_s 関係 (AB-15)

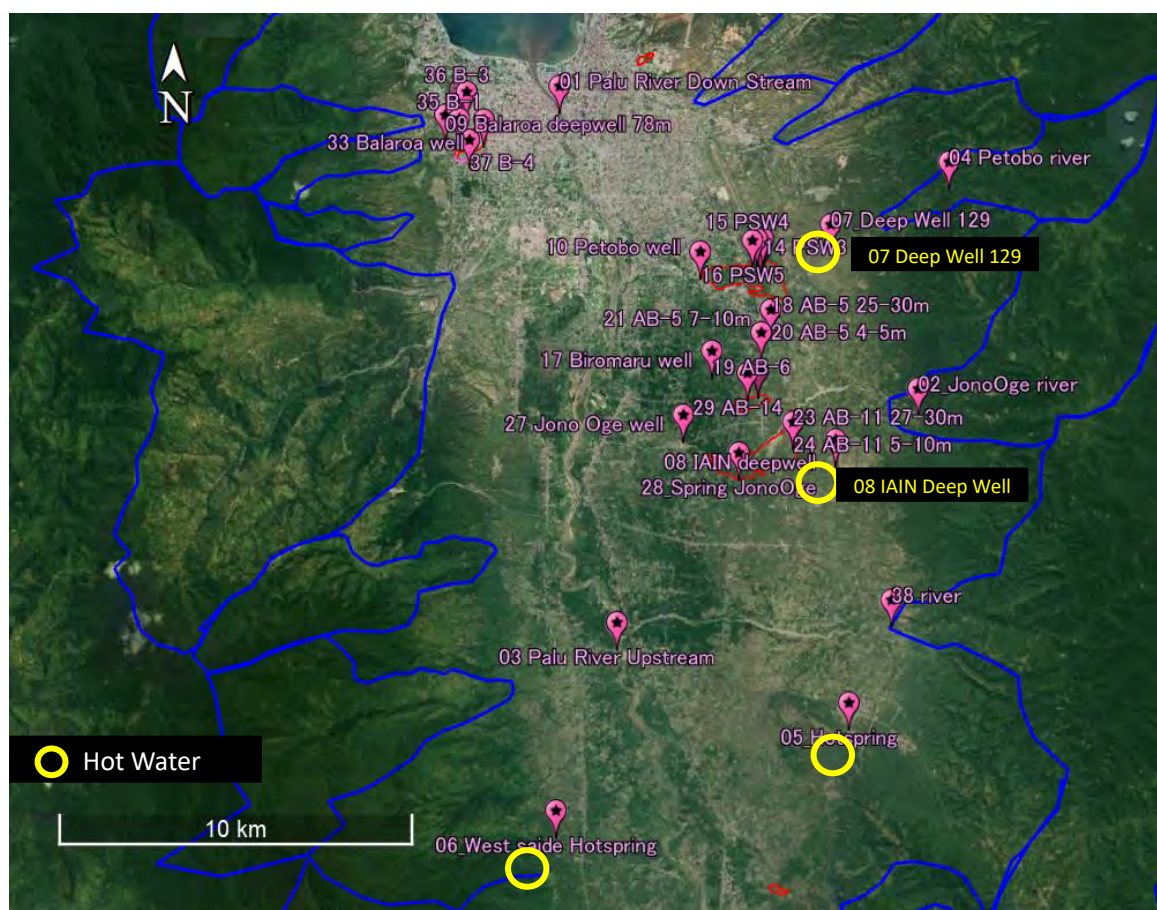
3-10 水質分析

水質分析は、主要イオン分析と水素酸素の同位体比を求める分析の2種類を行った。主要イオン分析は Palu にある衛生研究所で行った。もう一つの水素酸素同位体分析は、地下水の起源判定として日本では良く行われている手法であるが、現地の研究機関では実施できなかったことから日本の研究機関で行った。

3-10-1 主要イオン分析

(1) 水質分析の目的と採水位置

Nalodo 発生地域の湧水の起源の評価に資するため、Palu 地域の 29 箇所から水を採取して化学分析を行った。試料は、河川水 4 試料（本川 2 試料・支川 2 試料）、温泉保養地 2 試料、移転地域の深井戸 3 試料、浅井戸 3 試料、地すべり地内の湧水 11 試料、ボーリング揚水試験時の採水（深度別に複数試料）で延べ 37 サンプルである。このうち、温泉地の湧水 2 試料及び深井戸 2 試料の 4 試料は水温 40°C 以上の温水である。Palu 地域は新規の花崗岩が貫入しており、地温勾配が高いことが想定され、温泉が湧き出す条件にある（図 3-75、図 3-76 参照）。



出典：JICA 調査団作成

図 3-75 水質調査地点 (1/2)

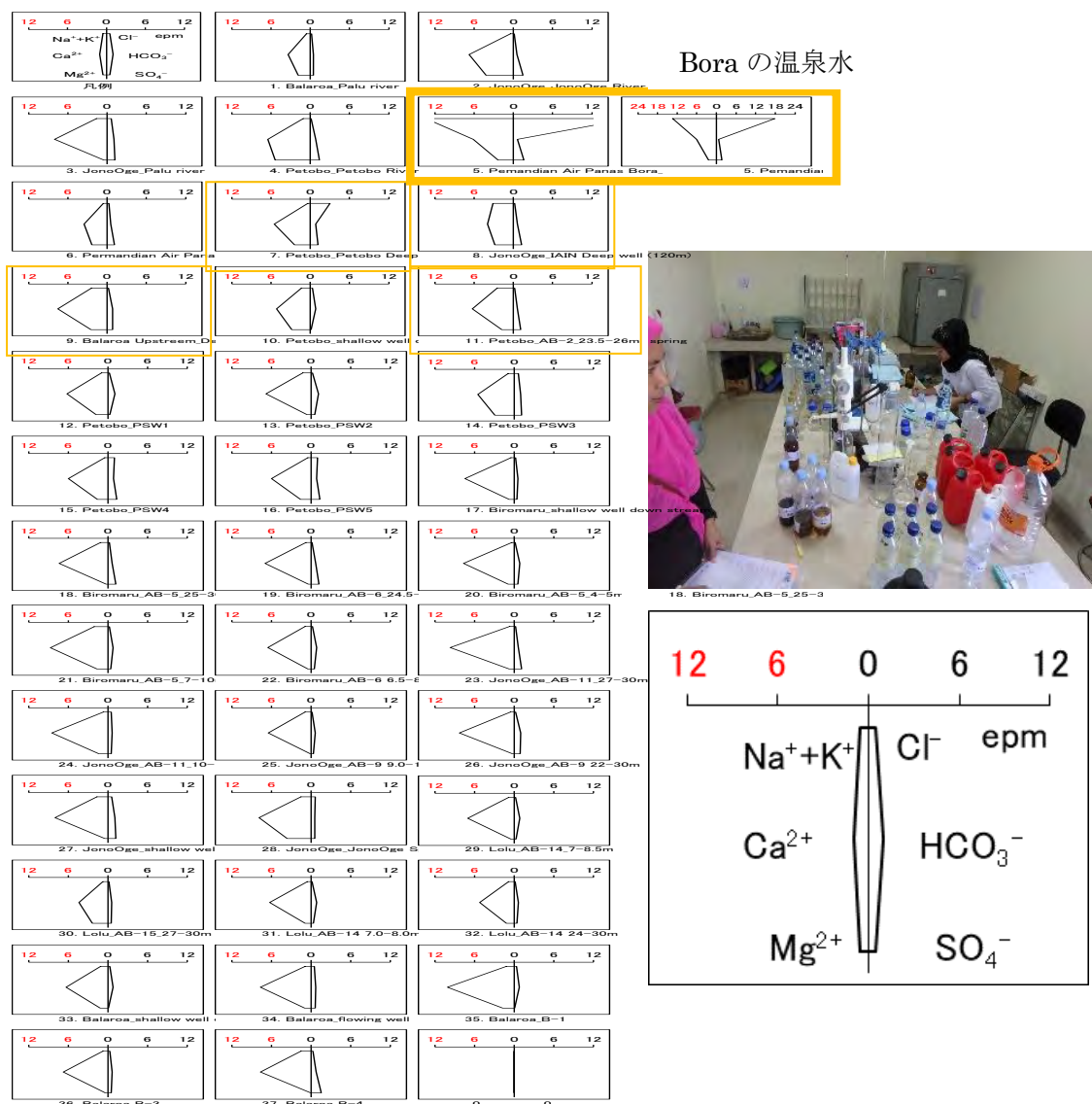


出典：JICA 調査団作成

図 3-76 水質調査地点 (2/2)

(2) 分析結果

Paluにある水質試験機関を利用して河川水・温泉水・地下水（湧水・ボーリング揚水・井戸）の水質分析を行った。分析の結果；No5（Bora 温泉施設）は高塩濃度（1.25g/l）、Na・Ca-Cl型の深層地下水に特徴的な水質を示した（図 3-77、表 3-22 参照）。これに対して、それ以外の 36 試料は塩濃度低め、Ca（・Na・Mg）-HCO₃・SO₄型で中性の水質であることが確認された。Ca・Naは斜長石の風化溶解によって地下水に添加され、一般的な浅い地下水の特徴（深さ 200m程度以浅）を示している。ただし、塩化物イオン濃度がやや高めの試料として No.7（Petobo deep well）、Ca²⁺に比べて Na⁺に富む水質として No.8（Jono Oge IAIN deep well）、No.9（Balara deep well）、No.11（Petobo AB-2Spring）などがあり、Bora 温泉で湧出している深層の地下水が混入していることが考えられる。なお、イオンバランスがおかしい現象は、重炭酸の揮発もしくは Palu 保険研究所での分析精度によるものと考えている。



出典：JICA 調査団作成

図 3-77 地下水中の主なイオン

表 3-22 地下水の主要イオン分析結果

地区名：Palu 液状化地すべり地域		Temp (°C)	pH	単位(mg/l)								(g/l)
No	Sample Name			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃	塩濃度
1	Balaroa_Palu river		7.77	9.23	5.72	67.89	21.98	7.98	30	22.00	0.12	0.18
2	JonoOge_JonoOge River		8.25	6.84	5.22	135.31	50.47	5.32	35	70.00	0.40	0.32
3	JonoOge_Palu river		7.32	35.64	3.51	160.55	5.65	21.80	65	57.00	0.01	0.40
4	Petobo_Petobo River (NGIA)		7.97	23.41	2.61	129.53	65.28	5.32	50	66.00	0.49	0.38
5	Pemandian Air Panas Bora_	45	7.27	277.50	50.25	122.57	28.53	632.78	40	77.00	0.39	1.25
6	Permandian Air Panas Mantikole_	47	8.63	11.50	1.72	70.19	28.39	10.64	35	55.00	0.27	0.24
7	Petobo_Petobo Deep well (129m)	52	8.16	7.44	1.14	110.30	28.82	108.35	50	58.00	0.74	0.43
8	JonoOge_IAIN Deep well (120m)	49	8.66	70.20	1.27	79.44	34.14	7.44	40	60.00	0.38	0.37
9	Balaroa Upstream_Deep Well BMKG 78m		7.09	54.32	2.04	150.34	29.58	7.44	50	40.00	0.01	0.41
10	Petobo_shallow well down stream		7.82	29.82	2.09	102.55	33.99	11.57	50	6.50	0.01	0.28
11	Petobo_AB-2_23.5-26m spring		7.50	53.65	4.77	124.94	21.41	7.97	40	55.00	0.84	0.36
12	Petobo_PSW1		7.96	20.40	2.40	123.91	21.6	7.98	65	16.00	0.33	0.29
13	Petobo_PSW2		7.70	25.90	4.16	135.78	7.31	9.04	70	29.00	0.13	0.32
14	Petobo_PSW3		7.88	18.97	1.31	109.18	35.47	23.66	60	55.00	0.22	0.35
15	Petobo_PSW4		7.82	8.68	2.08	119.96	18.75	35.36	55	66.00	0.11	0.36
16	Petobo_PSW5		8.08	8.78	4.21	8.08	14.81	21.27	60	30.00	0.50	0.19
17	Biromaru_shallow well down stream		7.44	7.60	4.94	148.99	9.02	7.44	35	20.79	0.01	0.26
18	Biromaru_AB-5_25-30m		7.13	24.02	2.14	147.89	2.89	7.98	40	57.00	0.85	0.31
19	Biromaru_AB-6_24.5-30m		7.09	15.00	3.58	138.79	4.61	6.38	45	60.00	0.18	0.31
20	Biromaru_AB-5_4-5m		7.08	4.85	3.54	152.95	10.92	6.38	55	29.00	1.29	0.29
21	Biromaru_AB-5_7-10m		7.09	45.52	3.66	174.56	19.89	8.51	50	22.00	2.06	0.36
22	Biromaru_AB-6_6.5-8.5m		6.98	13.97	9.70	130.32	5.5	7.97	55	23.50	0.83	0.28
23	JonoOge_AB-11_27-30m		7.21	13.77	3.90	193.23	9.02	7.97	40	55.00	0.01	0.36
24	JonoOge_AB-11_10-13m		7.41	11.22	5.64	170.52	16.71	18.61	40	24.50	0.61	0.32
25	JonoOge_AB-9_9.0-10m		7.26	19.54	1.43	129.22	1.38	5.85	40	17.00	0.11	0.25
26	JonoOge_AB-9_22-30m		7.12	10.90	2.41	166.09	3.42	7.97	60	45.00	0.01	0.33
27	JonoOge_shallow well down stream		7.32	35.64	3.51	160.55	5.65	21.80	65	57.00	0.01	0.40
28	JonoOge_JonoOge Spring		7.77	32.17	3.66	157.78	43.92	23.93	35	29.50	0.28	0.37
29	Lolu_AB-14_7-8.5m		7.60	18.51	1.42	140.84	5.65	8.51	55	16.00	0.01	0.28
30	Lolu_AB-15_27-30m		7.45	13.50	5.64	87.75	28.62	5.32	35	24.00	0.82	0.23
31	Lolu_AB-14_7.0-8.0m		7.27	10.83	1.17	124.63	10.49	6.91	55	17.50	0.25	0.26
32	Lolu_AB-14_24-30m		7.03	17.96	1.99	104.69	13.78	6.38	40	21.50	0.01	0.23
33	Balaroa_shallow well down stream		7.14	20.52	6.60	126.84	14.34	10.64	50	4.00	0.01	0.28
34	Balaroa_flowling well		7.90	16.44	6.94	153.59	11.73	18.08	45	30.00	2.42	0.33
35	Balaroa_B-1		7.38	23.10	7.24	202.17	20.65	13.29	50	6.00	0.31	0.37
36	Balaroa_B-3		7.91	14.27	4.05	135.39	4.42	10.64	40	25.00	1.71	0.27
37	Balaroa_B-4		7.40	31.60	5.86	153.75	0.43	11.69	50	75.00	0.42	0.38

出典：JICA 調査団作成

3-10-2 水素酸素同位体分析

(1) 目的

主要イオン分析の結果からは、Nalodo で発生した多くの地下水は、風化溶存イオン (Ca^{2+}) に富む浅い地下水の特徴を示すことが多いが、深井戸や深さ 20m 以深から湧き出している AB-2 孔などは、深層の地下水の特徴もあることが明らかとなった。地下水環境同位体の中でも、酸素及び水素の安定同位体は、水循環・地下水流動プロセスのトレーサーとして最も利用されている。 $^2\text{H}/\text{H}$ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ は、地下水の起源や混合・拡散を検討するための有用な指標で、それぞれ標準試料との差から δD ・ $\delta^{18}\text{O}$ として記述される。高い塩濃度を示した Bora の温泉は、主要イオン分析の結果からも他の水質と異なり、日本の有馬温泉に近い深層地下水 (スラブ脱水起源の地下水) と言われている。Nalodo 内の湧水は、地震発生時とサンプリングした時点では異なった環境にあるが、その兆候を確認するために、水素酸素同位体分析を行った。

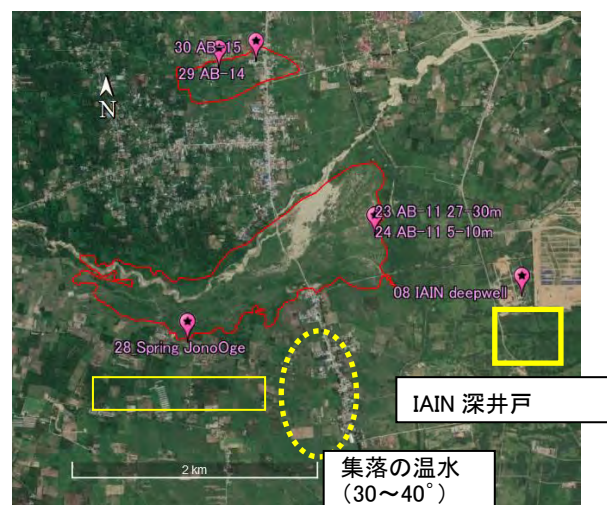
(2) 分析結果

日本で行った水質分析結果を表 3-23 に示す。酸素と水素の同位体比は、これまで蓄積されてきた地球規模でのデータから、傾きを 8 とする直線で近似されることが知られている。

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + d$$

地下水の流動過程において、地水中の $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD を変化させる要因としては、Bora に湧出している温泉などとのミキシングが考えられる。10 試料の酸素水素同位体分析の結果をプロットすると、Bora の地下水は天水起源の world meteoric line とはずれた位置にプロットされた (図 3-79 参照)。Bora の地下水は、天水起源ではない深層地下水の特徴を示している。また、試料番号 8 (IAIN 深井戸) と試料番号 28 (Jono Oge Spring) は、天水の標準線と Bora 温泉水との間にプロットされるため、Bora 温泉水と浅層地下水の混合しているものと推定される。試料番号 8 (IAIN 深井戸) は Jono Oge の高位にある深井戸で水温が高い (49 度) 特徴がある。また、試料番号 28 (Jono Oge Spring) 近傍でも水温 30~40° 程度の地下水が湧出している場所が知られている (図 3-78 参照)。

これ以外の Balaroa の湧水 (B-1・B-3・B-4)、Petobo の湧水は、河川水と同じ水素・酸素同位体の傾向を示した。ただし、水素酸素同位体分析を行っていない Petobo の深井戸や Petobo の深部からの湧水は、主要成分分析の特徴から深層地下水との混合の可能性があるとと思われる。



出典：JICA 調査団作成

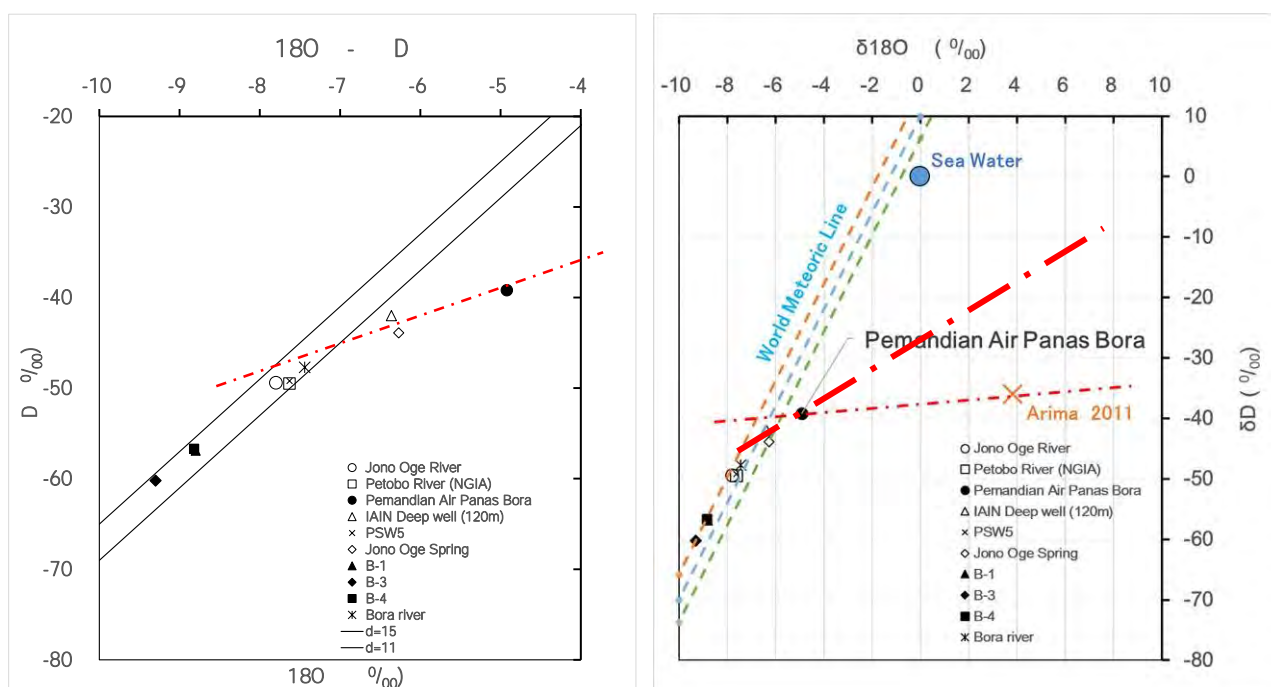
図 3-78 温水の分布 (Jono Oge)

表 3-23 日本で行った酸素水素同位体分析と Bora の主要イオン分析結果

Sample ID	Sample No	Sample Name	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	d-excess ‰	pH*	EC* mS/m	Na* mg/L	K* mg/L	Ca ²⁺ * mg/L	Mg ²⁺ * mg/L	F ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Remarks
29127-1	2	Jono Oge River	-7.8	-49.4	13.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	river water
29127-2	4	Petobo River (NGIA)	-7.6	-49.5	11.5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	river water
29127-3	5	Pemandian Air Panas Bora	-4.9	-39.2	0.2	7.4	302	552	42.2	48.2	3.62	7.45	681	0.20	149	365	Hot spring (hot water)
29127-4	8	IAIN Deep well (120m)	-6.4	-42.0	8.9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Deep well (hot water)
29127-5	16	PSW5	-7.6	-49.2	11.8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Spring water from ground
29127-6	28	Jono Oge Spring	-6.3	-43.9	6.3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Spring water
29127-7	35	B-1	-8.8	-56.9	13.5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Spring water
29127-8	36	B-3	-9.3	-60.2	14.2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Spring water
29127-9	37	B-4	-8.8	-56.7	13.9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Spring water
29127-10	38	Bora river	-7.4	-47.7	11.8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	river water

備考) $d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8 * \delta^{18}\text{O}$

出典： JICA 調査団作成



出典： JICA 調査団作成

※資料番号、位置は、図 3-76、表 3-26 を参照

図 3-79 水質調査結果 (地水中の $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD)

酸素同位体比と水素同位体比の関係図で、天水からはずれている 3 地点 (Bora 温泉、IAIN 深井戸、JonoOge 湧水を延長していくと、有馬型と古海水の間になり、完全な有馬型ではないようである。

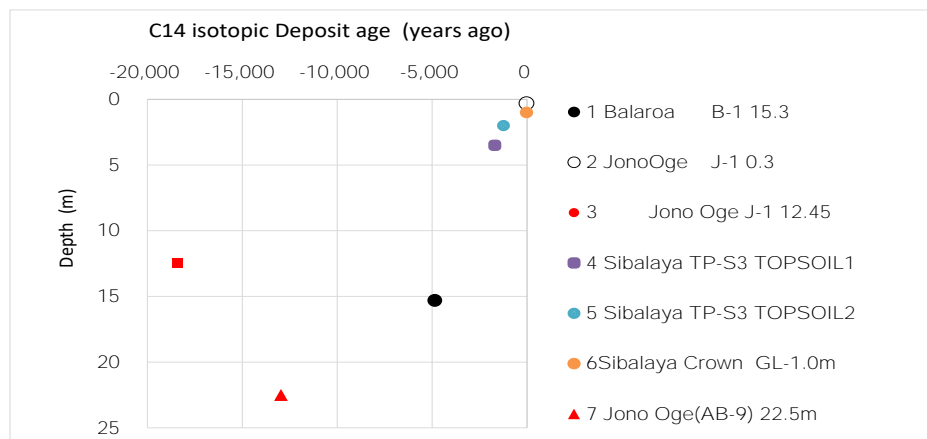
3-1 1 堆積物の年代分析 (C14)

Palu 川河口付近は、深さ 60m~30m に分布するシルト質粘土層基底面付近の堆積年代は BC8700 年、これを覆う厚さ 20~30m の礫質砂層の中央の堆積年代は BC6200 年の測定結果が得られている。堆積物の年代から見ると、Palu 川河口付近は約 2500 年の短時間で 40m 以上の堆積物が堆積し、浅海環境から陸化している。Nalodo 地域の堆積物から分析した C14 年代測定結果を表 3-24 に示す。内陸部の液状化地すべり地域での堆積物はいずれも過去 1 万年よりも新しいもので、深さ 10~20m 以浅はすべて完新世の扇状地（あるいは扇状地末端の氾濫原）堆積物からなる。特に深さ 1m 程度の浅い堆積物は現在から 100 年程度の間堆積した堆積物が主体をなす（図 3-80 参照）。このように完新世の圧密されていないルーズな堆積物が表層地質を構成する条件は、この地域の両岸山地から大量の碎屑物が供給され続けていることに起因している。

表 3-24 炭素同位体放射性年代測定結果 (Nalodo 地域)

試料名	type of material	Measured Radiocarbon Age		Conventional Radiocarbon Age (BP)		cal	13C	Technique Delivery	Pretreatment	判定
1 Balaroa 15.3m	organic sediment	4280	30	4240	30	95.4% probability(68%) 2911 - 2860 cal BC (4860 - 4809 cal BP) (24.2%) 2809 - 2756 cal BC (4758 - 4705 cal BP) (3.2%) 2720 - 2705 cal BC (4669 - 4654 cal BP)	-27.49	AMS-Standard	acid washes	Cal BC 2905 to 2780
2 Jono Oge 10.3m	organic sediment	107.13	0.39 pMC	105.5	0.39 pMC	95.4% probability(76.9%) 2006 - 2009 cal AD (-57 - -60 cal BP) (15.3%) 1956 cal AD (-7 cal BP) (3.2%) 2005 cal AD (-56 cal BP)	-17.49	AMS-Standard	acid washes	AD1950より新しい
3 Jono Oge 12.45m	organic sediment	14920	40	15080	40	95.4% probability(95.4%) 16352 - 16192 cal BC (18481 - 18141 cal BP)	-15.38	AMS-Standard	acid washes	Cal BC 16475 to 16300
4 Sibalaya TP-S3 TOPSOIL1	organic sediment			1720	30	95.4% probability(95.4%) 248 - 391 cal AD (1702 - 1559 cal BP)	-17.04	AMS-Standard	acid washes	Cal AD 240 to 395
5 Sibalaya TP-S3 TOPSOIL2	organic sediment			1240	30	95.4% probability(61.2%) 684 - 780 cal AD (1266 - 1170 cal BP) (6.5%) 787 - 876 cal AD (1163-1074 cal BP)	-14.73	AMS-Standard	acid washes	Cal AD 680 to 880
6 Sibalaya Crown GL-1.0m	wood	116.5	0.44 pMC	117.27	0.44 pMC	95.4% probability(88.9%) 1987 - 1989 cal AD (-38 - -40 cal BP) (6.5%) 1957 - 1958 cal AD (-8 - -9 cal BP)	-28.24	AMS-Standard	acid/alkali/acid	AD1950より新しい
7 Jono Oge AB-9 22.5m	organic sediment	10870	40	11030	40	95.4% probability(95.4%) 11077 - 10816 cal BC (13026 - 12765 cal BP)	-15.35	AMS-Standard	acid washes	11077 - 10816 cal BC
8 Palu河口 GA-8 52.4m	wood	9540	30	9480	30	95.4% probability(81.9%) 8843 - 8701 cal BC (10792 - 10650 cal BP) (5%) 9115 - 9078 cal BC (11064 - 11027 cal BP) (4.4%) 9056 - 9019 cal BC (11005 - 10968 cal BP) (4.1%) 8676 - 8645 cal BC (10625 - 10594 cal BP)	-28.80	AMS-Standard	acid/alkali/acid	8843 - 8701 cal BC
9 Palu河口 GA-9 9.2m	wood	7420	30	7370	30	95.4% probability(83.2%) 6367 - 6205 cal BC (8316 - 8154 cal BP) (10.1%) 6146 - 6100 cal BC (8095 - 8049 cal BP) (1.7%) 6170 - 6157 cal BC (8119 - 8106 cal BP) (0.5%) 6189 - 6185 cal BC (8138 - 8134 cal BP)	-28.01	AMS-Standard	acid/alkali/acid	6367 - 6205 cal BC

出典：JICA 調査団作成



出典：JICA 調査団作成

図 3-80 炭素同位体比を用いた堆積物の年代測定結果

3-1 2 被災者からのヒアリングと災害状況を記録したビデオ分析

Nalodo 発生原因を分析するためには、発生時に何が起こったのかを確認する事が重要である。このために、今回延べ 30 人近い被災者から貴重な状況証拠としてヒアリングを行うとともに、災害状況が記録されたビデオも入手し、これらの情報を整理・分析した。ただし、ヒアリングについては、半年以上経過した後の状況のものであるため、より客観性の高いビデオの分析結果も比較することとした。

以降では、①ヒアリングの目的と方法、②地震記録と周辺の震動被害の概要、③被災者からのヒアリング、④記録ビデオの分析、として取りまとめた。

3-1 2-1 ヒアリングの目的と方法

ヒアリングは Nalodo 発生地域の住民に対して、発生当時の状況を確認し地震発生時からの経時的な地盤の動きや地下水の湧出状況について確認することを目的とした。特に、発生後の地盤や地下水の科学的な調査だけでは世界的にも前例を見ない程度の大規模な側方流動現象に対して、その発生原因を特定することは困難と考えられ、国内支援委員会からもヒアリングの重要性が指摘された。

ヒアリングは、Nalodo 発生地域周辺の住民に対して個別訪問を行い、当時の状況を確認した。また、Nalodo 発生内の住民は避難キャンプや仮設住宅の仮住まいに居ることから、コミュニティの共用施設を訪問して被災者を集めたヒアリング会も実施した。更に、Nalodo 発生当時の状況を動画に記録したビデオオーナーからもヒアリングを行っている。ヒアリングの結果は個別のヒアリング記録シートとして附属書Ⅲ-3（データ集）に整理した。

ヒアリングは地質調査で滞在した 2018 年 12 月～2020 年 3 月にかけて、大きく 4 回に分けて行い、インドネシア語に堪能な現地スタッフと Nalodo の調査を担当した日本人技術者が行った。第 1 回目のヒアリング記録シートの代表事例を図 3-81 に、第 2 回目のヒアリング記録シートを図 3-82 に添付した。何れも地盤の動き・地下水や水の湧き出しに関する状況を時系列で記録したが、第 2 回記録の変更内容は地震動と地盤・地下水の動きに対して継続時間（発生時間）をできる範囲で正確に記録した。ヒアリングを行った住民の地震発生当時の場所を図 3-83 に示す。ただし、いくつかのヒアリング結果は、半日以上の間泥に浸かっていた方もおり、パニックになっている状況下で正確な時間ではないと思われるケースも見られた。そのため、ビデオ動画等の証拠と対比し、疑わしいデータについては、電話等による確認作業を行って、Nalodo 発生時の状況について整理を試みた。

被災者からのヒアリング結果は、被災者の位置と被災者が体験した地盤の動きや水の湧き出し状況について、タイムテーブルとして整理した。ヒアリングの時期は大きく 4 回に分けて行っているが、タイムテーブルは、地すべりの頭部・中央部及び末端部の順に整理した。タイムテーブルの時間は、強震を 20 秒として、地震記録から 20～40 秒を比較的強い地震動が発生した時間とした。

Kuesioner (Jono Oge dan sekitarnya)																	
Data Responden										Pelaksanaan Survei							
Nama: Ny. ULWIYAH										Nama: <input type="checkbox"/> Riri <input checked="" type="checkbox"/> Goldman <input checked="" type="checkbox"/> Dhika <input type="checkbox"/> Lainnya:							
Alamat: Jl. Poros Palu - Palolo										Tgl: December 26, 2018							
Kontak:										J2							
		Waktu setelah Gempa Bumi												Catatan			
		0	10 detik	1 mnt	2 mnt	3 mnt	4 mnt	5 mnt	10 mnt	30 mnt	1 Jam	2 Jam	Setengah Hari		1 Hari	2 Hari	
1	Earthquake occurred																
2	Ground cracked		✓														during earthquake occurred (±30")
3	House moved		✓														during earthquake occurred (±30")
4	House was rotated																
5	Wall fell down.		✓														during earthquake occurred (±30")
6	Ground began to flow		✓														during earthquake occurred (±30")
7	Ground wavered		✓														during earthquake occurred (±30")
8	Water spring up		✓														drainage damage area around house
9	Water flowed			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	caused of drainage damage area around house
10	Sand Boils																
11	became a flood																

Gambar: Durasi Gempa Palu, 29 Sept 2018	Posisi / Lokasi Responden (catatan: Tanda Peta dibawah)	Catatan
		Waktu: during earthquakes occurred land condition with houses around areas was up and down then damaged the house and land around

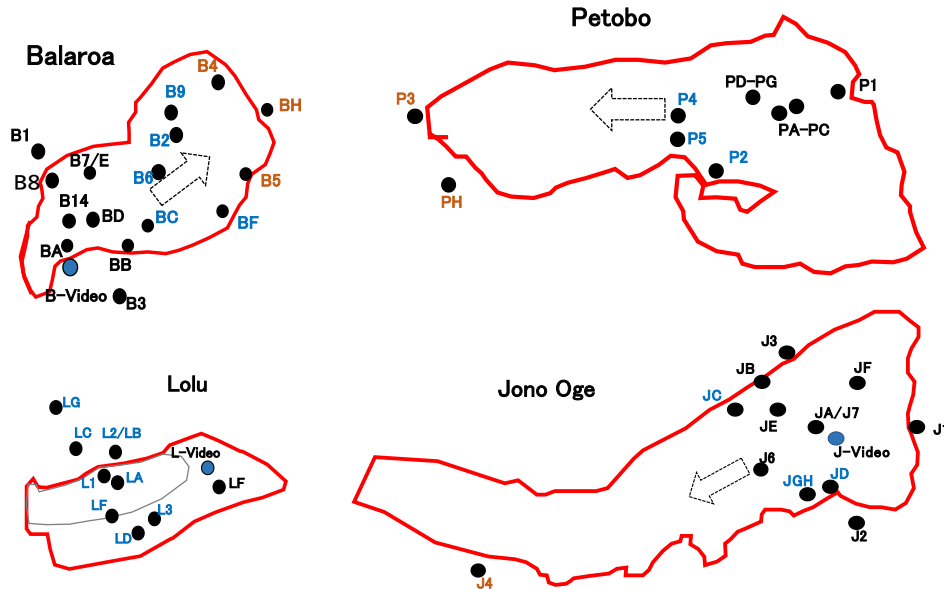
出典：JICA 調査団作成

図 3-81 第 1 回のヒアリング結果記録シート様式 (J2)

Table 1 Time sequence of events in the Sulawesi EQ JICA Survey team	
Time	
Record	
How feel of Shaking?	Horizontal shaking Vertical shaking
How feel of Ground movement?	- The ground was split and shifted. - Started to bumpy. - Lifted up to 10 m height, then down to 5 m height. - The ground rotated.
How feel of Ground water spring up?	Groundwater and mud Springs up from the split ground.
People moving	Evacuated to the east (irrigation canal)
Comment; Mr. Anto was lived at Jono Oge - Lolu border area. His house shifted to the West around 100 m.	
Lolu3	

出典：JICA 調査団作成

図 3-82 第 2 回のヒアリングシート結果記録シート様式 (Lolu3)



出典：JICA 調査団作成

図 3-83 ヒアリング全記録の住民配置

3-1 2-2 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 の近くで唯一本震の地震記録が観測されている。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 の北 80km の深さ 10km で発生した地震は、super share と呼ばれる S 波速度よりも速いスピードで地盤破壊が伝播し、Palu 市街地（西側）においても 4～5m 左横ずれの地表地震断層が出現した。Palu 市街地付近の地盤破壊は深さ 5km 以内の浅いところで発生したので、遠方（震源）からの P 波の到達後 3 秒程度で、直下にある地震断層の活動により強い鉛直動が生じ、それとほぼ同時か 1 秒程度遅れて強い水平動が生じている。強い地震動は 5 秒程度で完了し、その後 20 秒程度は 100gal 以内の振動が継続している。したがって住民の方々が強い揺れを感じたのは 10 秒間程度と思われる。その後 5 分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外側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。しかし、動画に記録された Palu 市街地の地震時の状況（図 3-84）では、駐車している 10 台程度のバイク全てが地震動によって転倒し、地震動におびえる女性は道路に座り込む状況があった。これ以外の動画には、プールおよび灌漑水路の水が地震動によって波打ちあふれ出している状況もあった。軟弱な沖積層の分布地域では 400～600gal 程度の地震動（4 章 1 項参照）が生じたと解析されていることから、Nalodo 発生地域では、観測記録よりかなり大きな地震動が発生した可能性が高い。ただし、低層家屋の被害は、軽い屋根構造（トタン屋根）もあって被災状況はほとんど無く、3 階以上の鉄筋構造建築物に地震動による被害が集中している。また、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る。



出典：BMKG 提供資料

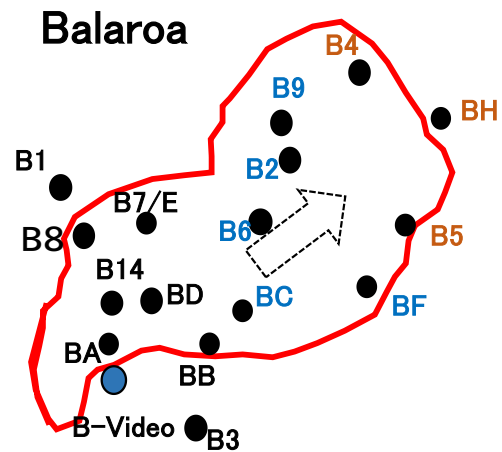
図 3-84 Palu 市街地の地震時動画のキャプチャー画像
 上；歩道に駐車したバイクは地震直後の強い横揺れで全てが転倒した状況
 下；地震直後におびえて道路上に座り込む人々

3-1 2-3 被災者からのヒアリング

(1) Balaroa (対象者：延べ 18 名)

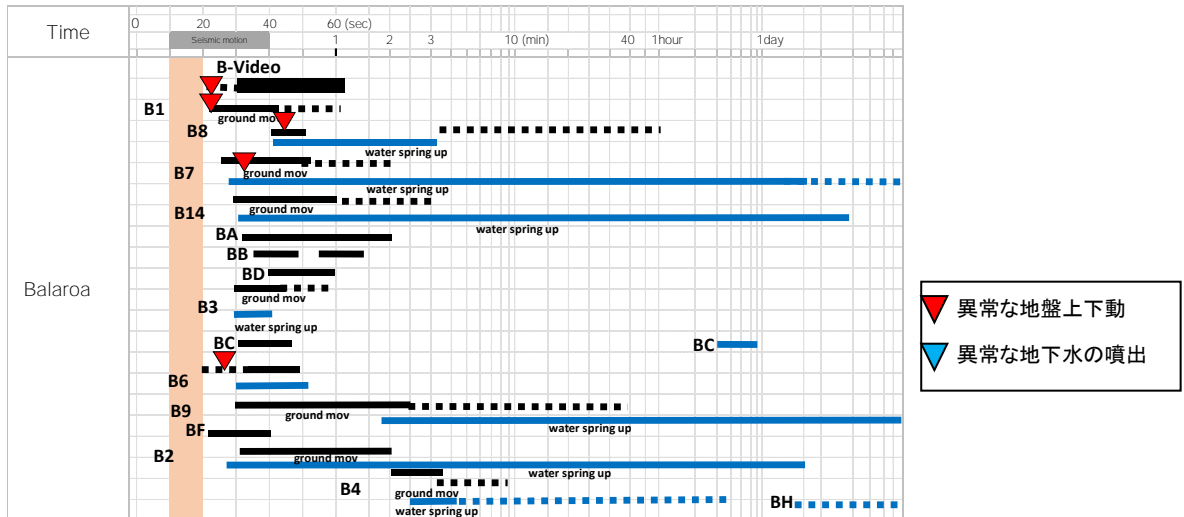
図 3-85 にヒアリング被災者の位置を、図 3-86 にヒアリングによるタイムチャートを示す。

対象者のヒアリング結果を、①震動に関する証言、②流動範囲から逃げた 3 名の証言、③流動範囲きわの住民からの証言 に分けてまず整理し、その後で考察を行った。



出典：JICA 調査団作成

図 3-85 Balaroa のヒアリング被災者の位置



出典： JICA 調査団作成

図 3-86 Balaroa のヒアリングによるタイムチャート

① 震動に関する証言

- ・ 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 と B8 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 は中央部に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

- ・ 流動範囲から逃げた 3 名のうち上流部の湧水帯近くにいる B7 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 は 300m ほど流されたとのことである。近くにいた B8 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 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。

Balaroa では、強震動とほぼ同時あるいは 20 秒程度以内に、地盤が破壊する轟く様な音が発生し、道はでこぼこになり、地盤流動が発生したと証言されている。多くの証言者は、強震動とほぼ同時に地盤破壊が発生したと回答しているが、B8 は強震動の 30 秒後に地盤の側方流動が開始したと証言している。ビデオ画像からは強震動の 20 秒は滑落崖が形成されていないことから、強震動後の 20～30 秒程度で滑落崖が形成されたことがより正しいと思われる。地すべりの中央部の B9 は、地震動によって家の倒壊が発生したが、地盤の地割れが発生は強震後 40 秒、地盤流動が開始するまでに 1 分以上たった後であったと証言している。地下水については、噴水のような高く噴き上がった証言はなく、地盤に亀裂が走り地盤流動開始前後で割れ目から泥と一緒に湧き出したと証言している。

特異な動きを感じた頭部付近の B7 では地震の上下動とほぼ同時に家が 10m 沈み、その 10 秒後に 20m の高さに持ち上がり、30 秒後には回転しながら流れた。地面はボコボコになった。地下水は、地面が動き始めてから泥を伴って湧き出した。そして時間とともに量が増えた。と証言している。B7 近傍の B1 及び B8 にも異常な上下動が証言されている。B1；地震とほぼ同時にガワリセ道路が凸凹になった。B8；地震の 30 秒後に家が回り、落ちたのを感じ、地面の中に埋まった。ガワリセ通りが崩壊して、砂や灰が噴き出した。そして水が湧き出した。最初の 10 分で家が北東に 75m 移動し、地下水が出てきた。と証言している。

サッカー場を撮影したビデオにはそのような状況はないため、ヒアリングを行った現地スタッフを通じて確認作業を行った所、「ビデオにあるサッカー場の亀裂発生時あるいは、ガワリセ道路が崩壊した頭部滑落崖の形成時の状態のどちらかであると思う」と回答している。また、地すべり中央部の B6 では、地震直後に地面が割れて、落ちて、その後 4～5m 持ち上がった。そして、泥が氾濫してすべてのものが流された。と証言している。B6・B7・B1 及びビデオは、地震の直後に亀裂が走り、沈んで隆起した状況が一致しており、場所も北側の頭部付近で一致している。一方、B8 は地震の 30 秒後であること、落ちたのを感じその後地盤流動になっている状況が B6・B7 とは異なる。これ以外の 13 名の方は、地震後すぐに地割れの轟く音がした後、地盤が凸凹になり、その後地盤が流れ始めたと言っている。また、流れている最中は何度も回転したと言っている。

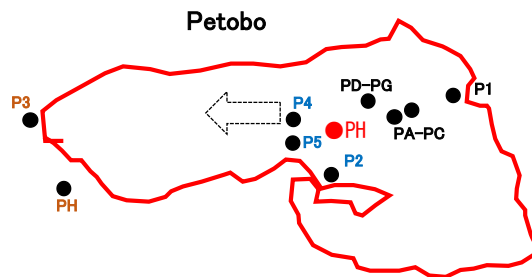
地盤の特異な上下動は、サッカー場のビデオに記録された強震動直後の地割れであるのか、強震動の 30 秒程度で発生した地すべり頭部の滑落崖の動きを感じているのかは判断できない。地下水は、地盤流動が開始された後に泥と水が混ざった状態で湧き出し、地盤の動きが止まった後も流れ続けたと言っている。末端付近の B9 は地すべりの 3 日後に大きなサッカー場くらいの池ができて家が沈んだと言っている。水の湧き出しは、地盤流動の発生と同時にしくはそれよりも先に水の湧き出しがあったと言った人は、北側の地すべり頭部に近い BE の方である。地盤流動が始まる前あるいは直後に、高さ数mの間欠泉のように水が噴き出したと言った人は Balaroa ではない。

Balaroa で特徴的なことは、地盤流動時間が末端の堆積域を除くと短時間の 1～2 分で完了していること、及び地下水の湧出が数週間継続し、地すべり発生後 1 月～1 年経過しても地すべり頭部の滑落崖付近から恒常的な湧水が発生している点である。

(2) Petobo のヒアリング (対象者 : 15 名の被災者)

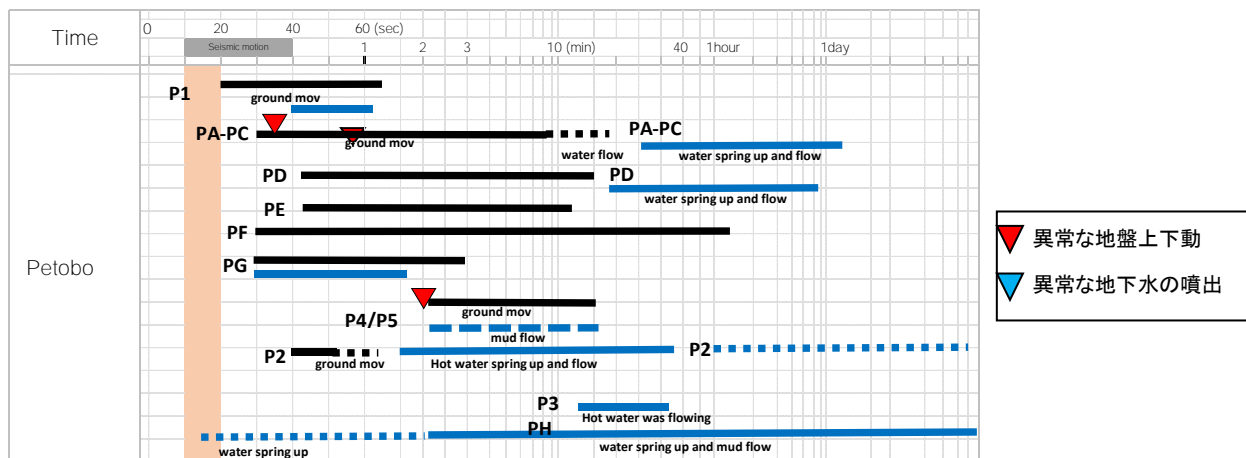
図 3-97 にヒアリング被災者の位置を、図 3-88 にヒアリングによるタイムチャートを示す。

対象者のヒアリング結果を、①震動に関する証言、②流動範囲から逃げた 2 名の証言、③流動範囲きわの住民からの証言 に分けてまず整理し、その後で考察を行った。



出典： JICA 調査団作成

図 3-87 Petobo のヒアリング被災者の位置



出典： JICA 調査団作成

図 3-88a Petobo のヒアリングによるタイムチャート

① 震動に関する証言

- ・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やや下流側の所にいた。

② 流動範囲から逃げた 2 名の証言

- ・2 人とも中央部のほぼ同じ所にいて、P4 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 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 Socharto 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。中央部の南端にいた P2 の人は、地震から 15~30 秒後に地盤が動き始め、暖かい水が 30 分後には湧き始めたと証言している (ただし、P2 の自宅は流れた泥流によって覆われたが、地盤は移動しない範囲である)

Petobo では、地すべりの滑動状況を記録した動画は確認されていない。唯一 WEB 上に公開された衛星画像のタイムラプス動画があるが、衛星から短時間の間に多数の写真が撮影されることは一般にはなく、また映像の投稿者自体も既に他界されたとのことなので、詳細は明らかではない。ただし、建物を指標とした移動量と動画を比べると動画が人為的に加工されたものが確かであるので、参考とはしないこととした。

12名からのヒアリングの結果では、頭部付近での地盤流動は、強震後 10～30 秒で開始している。中央付近の P4 及び P5 は、頭部付近よりも遅れ、強震後 1～2 分は何もなく、P4 は 1～2 分後に地盤の浮き上がりを感じた後に地盤流動したと証言し、P5 は 2 分後に地割れと地盤流動を感じている。地すべり末端の押し出し域にある P3 は強震後すぐに地盤の移動（押し出し）があったと証言している。

特異な動きを感じた PA は、ペトボの頭部に近い東西の幹線道路沿いにおり、周りの地盤が崩れ落ち、自分を含む幹線道路が持ち上がったように感じている。

新たに追加した PH（P4 の東側 50m）は、P4・P5・PA と類似した地盤の上下動を感じている。ただし、P4・P5 は地震発生後 1～2 分後と回答しているが、PA は地震後比較的すぐに発生したと回答している。被災者 PH の地震時の位置とヒアリング回答について示した。

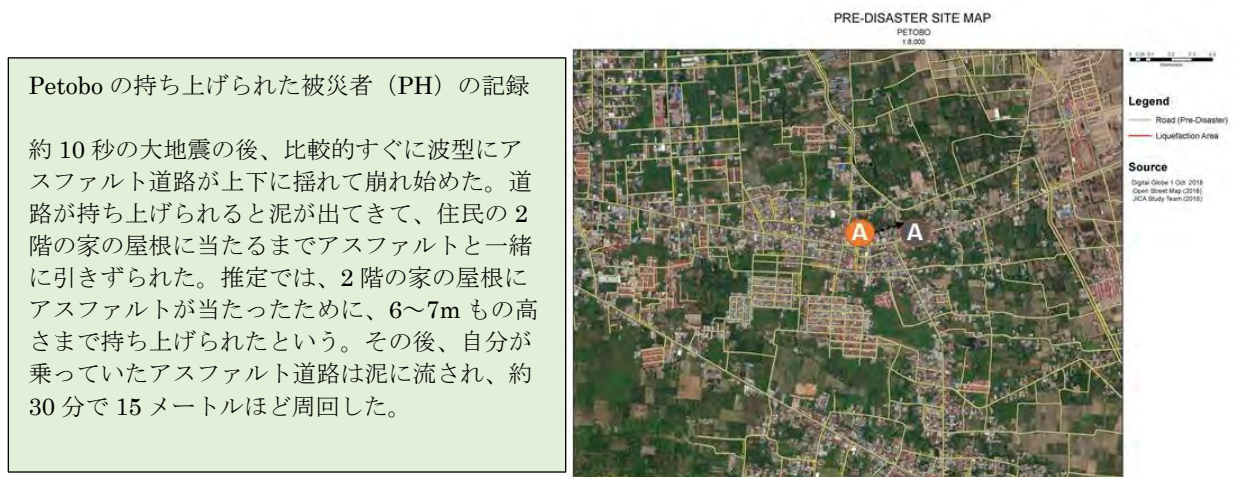


図 3-88b 被災者 PH の位置と当時の状況

水の湧き出しは、地盤流動と同時か地盤流動が落ち着いた後に、泥水として流れたと証言している。中央やや下側の P5 は、地震が発生し家を出た時には、家の前の通りに人が集まっていた。1-2 分ほどしてから道路と家々が動いたのを見て、その 2 秒後に突然泥の波が来て流された。泥の浪の高さは約 0.5m。彼女と彼女の子供は泥で覆われた。と証言している。

Petobo では流動層が 2 つに分かれているが、小規模な泥流が襲った南側 P2 では、地震後に泥流が覆い、温かい水も湧き出したと証言している。自宅の井戸からは地震前には自噴しなかった水が自噴するようになり、地震後数ヶ月は温かい水であったと証言している。また、地すべり末端の P3 においても温かい水に浸かったと報告している。Petobo と Jono Oge の高位扇状地にある深井戸は水温 50° の湯であることが判っている。高位扇状地の水が、

地すべりが発生したことにより地表に流出しやすい条件になり、水温が冷めない内に流出する現象は普通に考えられる。

なお、地震の約 10 秒後にアスファルト道路が 6～7m 程度も持ち上がって破壊した状況を含めて、全てのヒアリングを担当したローカルスタッフの意見を以下に示す。

Petobo ヒアリングをとおした地盤の異常な上下動に対する意見（ヒアリング実施者）

- (1) Balarooa・Lolu・Jono Oge では、地震の水平動と直後の上下動が発生しましたが、Petobo では少し異なり、10 秒程度遅れて地盤の大きな上下動が発生した様です。地表が持ち上げられて裂け目が形成されたとき、地面が鳴り、地面が壊れました。
- (2) 地震の水平動の終了と同時に、または約 2 分以内に、地下水が噴出または噴出した。地下水は広い範囲で均一ではなく、あちこちから噴き出していました。噴出した地下水の一部は温かい。
- (3) 地震の水平動の終了と同時に、または約 2 分以内にゆっくりと地下水が湧き上がった。地下水が広範囲にわたって均一ではなく湧き出て、湧き出てあちこちに流れてきました。井戸から湧き出る地下水の一部は暖かかった。

これらに基づいて、何が起こったかの考察は以下のとおりである。

- (A) Petobo では Nalodo 発生地域のごく一部が地震直後に地面の急な上下動を経験した。これはおそらく、活断層変位に関連する副断層などの圧縮隆起の形成によるものです。激しい上下運動は尾根が形成された場所でのみ発生し、他の地域では上下運動が発生していないようです。地下水は数メートル以上の高さまで噴出せず、地盤のみが変形していました。
- (B) その後、地盤が側方に流れ始め、流動中に回転、うねり、浮き上がりが発生しました。地盤流動の最中は、地下水はゆっくりと地面から流れ出ていました（Jono Oge ビデオ画像のように）。数メートルの高さまで噴出する水は見られませんでした。

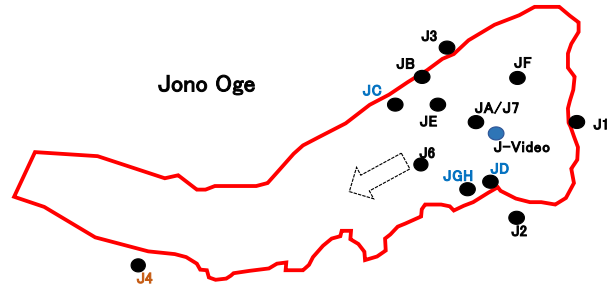
以上の意見を踏まえて、Petobo で発生した異常な上下動が、側方流動が開始される前の段階であるか、動いている段階であるかが確定出来ないと思われる。おそらく、広範囲の地盤流動がゆっくりと発生すると自分の位置が動いているかどうかも認識することが出来ないためである。地盤流動の最中には、地盤が分裂したり・のし上がったりしながら流動することが考えられ、局所的な上下動が発生しうる。

P4・P5 は、地震発生後 1～2 分経過した時点で異常な上下動を感じている状況は、地盤流動が発生した結果としての、異常な上下動。一方、PA・PH は地震直後であった状況は、地盤流動が発生する前の段階とも考えられる。

(3) Jono Oge のヒアリング (対象者: 14名の被災者)

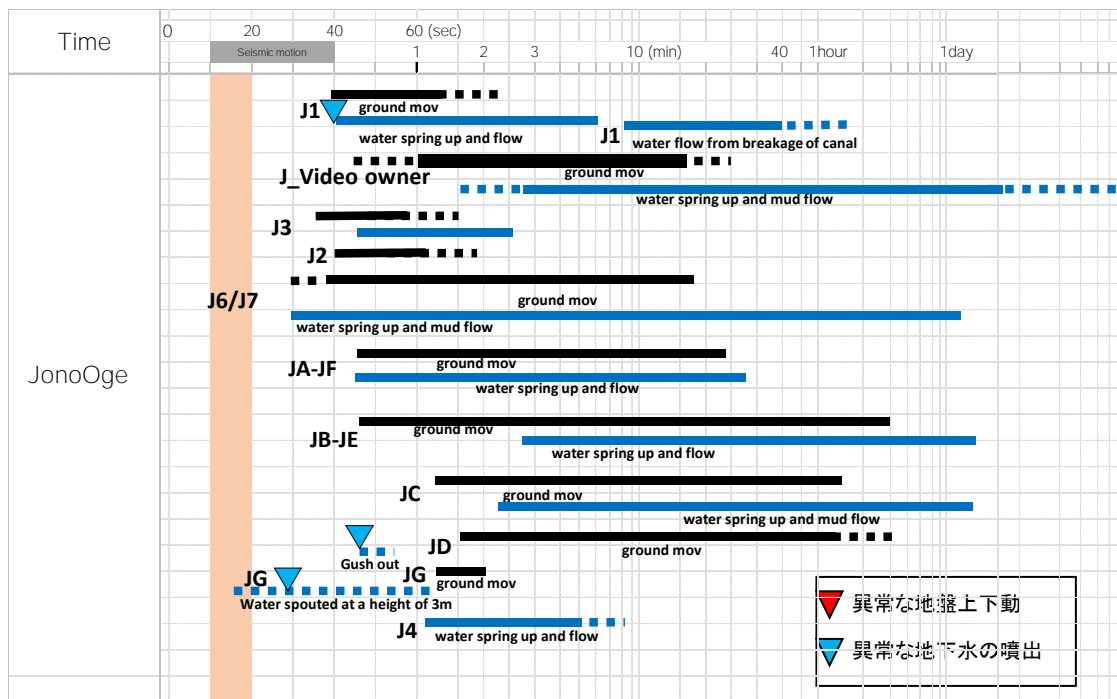
図 3-89 にヒアリング被災者の位置を、
 図 3-90 にヒアリングによるタイムチャートを示す。

対象者のヒアリング結果を、①震動に関する証言、②流動範囲から逃げた3名の証言、③流動範囲きわの住民からの証言 に分けてまず整理し、その後で考察を行った。



出典: JICA 調査団作成

図 3-89 Jono Oge のヒアリング被災者の位置



出典: JICA 調査団作成

図 3-90 Jono Oge のヒアリングによるタイムチャート

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は湧水帯の少し下流側、J7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は最初は不明でその後鉛直動を感じている。J7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およ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。

Jono Oge のビデオ動画は、地すべり頭部滑落崖から約 500m (Palu-Palolo 幹線道路よりも東側) の住人が家毎地盤流動した状況が公表されている。このビデオ撮影者とは撮影時の状況などをヒアリングし、タイムスタンプのあるオリジナルの動画ファイルを手に入れることができた。

動画ファイルは強震後 2 分～4 分 5 秒の記録が有る。動画開始時は元の家の位置から約 70 m 西南西に移動していた状況であり、強震時に家の外にいた撮影者は、地面が裂け、地面が動き出すと家が倒壊したため、その屋根上に飛び乗り撮影を開始した。動画撮影開始前には数 m の高さの水の噴き出しや異常な上下動は感じていない。動画開始時には、地盤が裂け、家の脇の地盤からはボイリングにより水が湧き出していることが確認できる。撮影開始後 17 秒には移動しなかった赤い屋根の家を追い越し、上下動を伴わないスムーズな移動であった。時間経過とともに周辺表層地盤の液化が進み、動画 1 分後には地盤がうねり、動画の 1 分 50 秒を過ぎると泥流状の地盤に変化している。ビデオ終了の撮影 2 分 5 秒で約 430m 移動している。

頭部に近い範囲 10 名程度の被災者からは、強震動の 10～40 秒後に地割れが発生し、地盤流動が始まったと証言している。また、地面が割れる時に轟く様な音が響き、地盤は凸凹になったと証言している。

水の湧き出しは地盤の動きはじめとほぼ同時か、少し遅れて発生した。この中で、灌漑水路の脇にいた J1 は地震発生とほぼ同時に遠くで水が噴き上がる（高さ 6m）のを見た。地震の 30 秒後には地面が動き始めた。と証言している。また、幹線道路沿いで地すべりの南側（JD・JG）の証言者は、地すべりが動き出す前に高さ 3m 及び 10m の噴き上げを証言している。ただし、後の確認作業を進めると、水の噴き出しは、1km 以上の遠方で発生し、霧や土煙であった可能性もあるとのことである。この 3 名以外の証言者からは、地すべり発生後に地盤から泥水が湧き出す状況を共通して証言しているが、水柱が立つ様な噴き出しは証言にない。当初公開された低品質の動画を見ると、水が地盤から噴き出す様子が見られたため、ヒアリング時に水が噴き上げた状況について確認したため、不正確な証言があった可能性がある。高精細の動画を見直すと、ビデオ画像には水の噴き出しでは無かった。

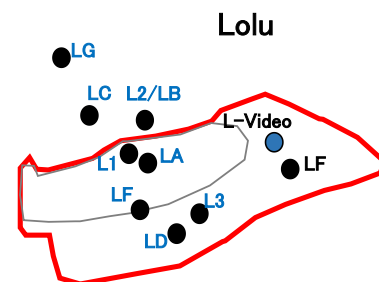
地すべり中央付近では、地震直後に地割れと轟くような音を証言している。J6；地震発生の直後に地面が凸凹になり、（地面の割れる）轟音が凄かった。そして地面が動き出した。地面が動き出すと同時に泥の浪が来て、泥が南西に流れた。と証言している。J7；地震直後に轟音が大きく、地面が爆発するような音がした。地面は割れてボコボコになっていた。10 秒ほどで泥がボイリングのように湧き出し、彼女は泥に沈んでしまった。そして、彼女は木と一緒に上下に溺れて、突然、泥の波の流れが彼女を南西に流した。このような地震直後に轟くような地盤破壊の音がし、地盤が凸凹になる状況は、Balaroa における地震直後のサッカー場の亀裂と噴煙と同じ状況と思える。

頭部からやや離れた側方崖に近い JC・JD・JG の証言者は、強震から 1 分～1 分 30 秒で地盤流動が始まったと証言している。地盤流動は数時間続き、水は数日間湧き出し続けている。

（4）Lolu のヒアリング（対象者：10 名の被災者）

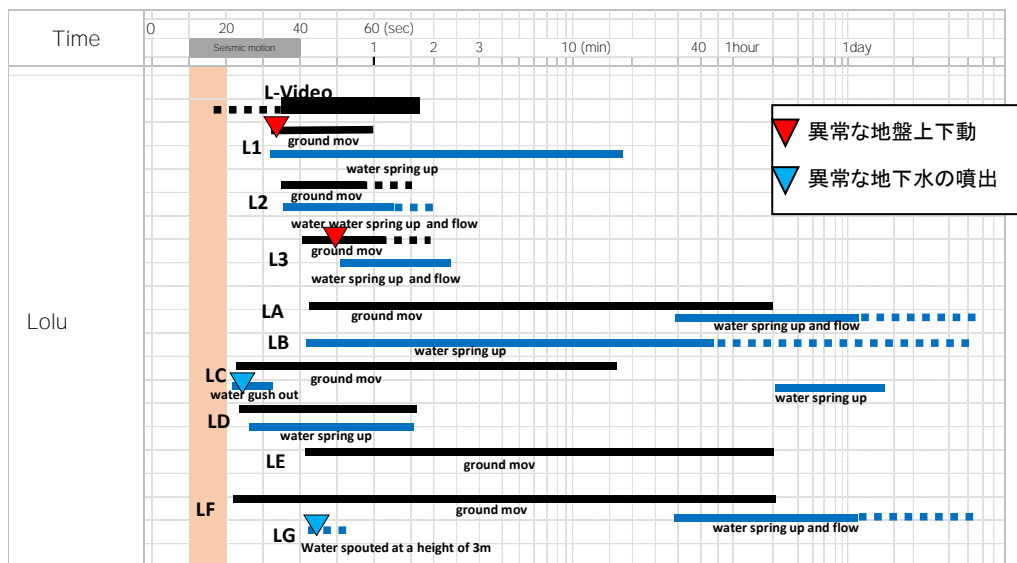
図 3-91 にヒアリング被災者の位置を、図 3-92 にヒアリングによるタイムチャートを示す。

対象者のヒアリング結果を、①震動に関する証言、②流動範囲から逃げた 3 名の証言 に分けてまず整理し、その後で考察を行った



出典： JICA 調査団作成

図 3-91 Lolü のヒアリング被災者の位置



出典： JICA 調査団作成

図 3-92 Lolu のヒアリングによるタイムチャート

① 震動に関する証言

- ・ 流動範囲から逃げた 3 名とも流動範囲の中央付近にいて、L1 と L2 は北側、L3 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

- ・ L1 は、地面は裂けて持ち上がり、地下水は家の前から 30 分ほど湧き出し、その高さは 0.3m であったと証言している。L2 は地面が裂け地盤が移動し、裂けた所から地下水と泥が湧き出したと証言している。
- ・ L3 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、移動中に 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。

Lolu のビデオは幹線道路沿いのガソリンスタンドの被災状況が克明に記録されている。ガソリンスタンドは、Lolu の側方流動の頭部に当たり、水平移動量は約 20m である。これよりも西側 100m では水平移動量が 100m を超える。ビデオの撮影開始時には、既にアスファルト道路に幅 10cm 程度の割れ目ができており、その 10 秒~20 秒でアスファルト道路の亀裂は拡大し、30~40 秒はガソリンスタンドのコンクリート舗装も 1m 弱の段差に拡大している。1 分~1 分 20 秒では身動きができない程度まで地割れが広がり、人々の叫びと地盤・家屋の破壊音が続いている。

1 分 30 秒以降は、地盤の破壊音がほぼ無くなっている。地割れが多数形成されるが、割れ目からの水の噴き上げや湧き出しは画像には写っていない。

10名のヒアリング結果によると地盤流動の開始は、強震後すぐ～40秒以内であると証言している。ビデオの撮影時間の詳細はわかっていないが、強震終了後すぐに撮影を開始したとすると、頭部付近では10秒程度で動きはじめ、1分～1分20秒が最も動きが激しいことになる。地すべり頭部は1分20秒で移動が完了しても、地すべり中央部付近の移動距離が大きい地域は、2分以上動いていたことが想定できる。LA、LC、LE及びLFの4名は10分～30分移動が継続したと証言している。

なお、強震後すぐに特異な上下動を感じた証言者はL1及びL3の2名である。

L1は、水平地震動の後にきた鉛直動とほぼ同時に、地面が割れ、持ち上げられ、家々が地面に落ちた。地下水が家の前の地面から30分間ほど湧き上がった。水の高さは0.3m。と証言している。

L3は、水平地震動・鉛直動のあとの水平動とほぼ同時に、地面が割れ、動いた。凸凹になり、10mの高さに持ち上がり、そして5m落ちた。地面が回転した。地面が割れ始めるとすぐに東側へ逃げた。地面が動いたのは1分間ほどだった。地下水と泥は、地面が割れた10秒ほど後に割れた地面から湧き上がった。と証言している。

L1・L3の地盤の異常な上下動は、Balarooとは異なり、地面が割れた後に地盤流動が起こり、持ち上がって、落ちたと証言していることにある。地盤移動量は最も大きいL1付近でも140m程度で、流動後に区画や道の形を残していることから、移動中にブロックがのし上がったりする状況とは思われない。

水の湧き出し状況について、地すべり範囲から外れたLCは、強震後すぐの地盤流動の開始と同時に高さ1.2m程度の噴き上がったと証言している。また、地すべりの頭部付近は、地盤流動に遅れて水の湧き上がりがあるが、地すべり中央部では地盤流動とほぼ同時期に水が湧き上がったと証言している。なお、湧水は一晚以上続き、強震12時間後の翌朝の状況が写真で確認できる。モスク脇の凸凹になった地盤は水田のように水に浸かっている。(図 3-93 参照)



出典： JICA 調査団作成

図 3-93 Lolu 震災翌朝の写真

(5) ヒアリング結果をふまえた地盤流動、地震動のまとめ

- 主要動とほぼ同時期に地割れと地盤破壊の轟く音が発生している。(Balaroo/Jono Oge)では、副次的な断層破壊が発生している。
- 地盤流動の開始時間は、地震後 20 秒～40 秒以内で、一般的な水膜形成よりも速い可能性がある (Balaroo・Petobo・Jono Oge・Lolu)。
- 地下水の湧出は、地割れが発生して地盤流動が起こるとほぼ同時に生じている。地震直後の地下水の噴き上がりは、Jono Oge・Lolu の地盤流動していない範囲で発生している可能性がある。流動範囲内では証言になく、大規模なものは発生していないと思われる。
- 震災時の地震動に関して、GEER (Geotechnical Extreme Events Reconnaissance) によれば水平動の後、鉛直動が起きたと報告されている (8 章 8-3-2(3)参照)。ただし、本調査におけるヒアリングの多くは、水平動、鉛直動をはっきりと識別した回答を得ることはできていない状況である。

3-1 2-4 記録ビデオの分析

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。

- Balaroo のサッカー場に始まり、それより南西側の地区で人々が逃げまどっている状況 (図 3-94 参照)
- Balaroo の北東端付近で、建物が倒壊し土煙を上げている状況 (地盤が移動集積している状況が記録されている)
- Lolu のガソリンスタンド付近で地割れが動いている状況 (図 3-96 参照)。Lolu での翌朝の地下水湧出状況の写真も入手されている
- Jono Oge で流されている家の屋根から流動状況を撮影 (図 3-99 参照)

(1) Balaroo サッカー場のビデオ

Balaroo (サッカー場) のビデオオーナーからは直接ビデオ撮影時の状況を確認した。しかし、オリジナルの動画は携帯を地震後に新しくしたため残っていないとのことであった。

地震発生時にサッカー場にいたビデオ撮影者は、急ぎサッカー場の南端に戻り・スマホで動画の撮影を開始した。その間約 10 秒であった。撮影時間 1 秒には既にサッカー場の北端に土煙が発生し地盤の地割れと局所的な隆起が認められる。すなわち、地震の発生後 11 秒には地盤の破壊が始まっていたことになる。このとき、水の噴き上げはなく、土煙が発生している。ビデオ時間の 2 秒では、サッカー場の北端付近に東西方向の亀裂が走っており、2 m 程度の隆起が発生していたように見える。隆起した地盤はビデオ撮影時間の 4 秒及び 9 秒でもほぼ同じ形・高さで大きな変化は認められない。身の危険を感じた人々は南側に逃げ、11 秒には巨木が倒れている。9 秒では地盤の大きな動きはなかったが、11 秒～15 秒には地盤の著しい破壊が進んでいる (おそらくこの間に頭部の滑落崖などが形成されたものと思われる)。15 秒付近で地面はすでに開口した亀裂が多く走っている (大きく地盤が動いている状況が推察される)。15 秒～55 秒は家の間の路地を必死に安全な地域を探しながら逃げている

る状況が写っている。(この間地盤が動き続け、亀裂も進行しているとみられる)。南側の地域は、ビデオ時間の10～50秒(地震発生から20秒～60秒)に地盤の破壊が進行した。この間、地盤の割れ目から湧水や噴水はビデオに映っていない。

ビデオ時間の55秒には、肩を寄せ合いながらボコボコに破壊した道をゆっくりと歩く被災者が写っている。ビデオ時間の50秒～3分は、地盤の主要な動きが止まり、身の安全を確保できたことに安堵しているように見える。3分からは、流動化した地すべりの状況を確認するために小走りに移動し、3分15秒で一度地すべり内部を遠目で確認している(手前の立木は動いておらず、頭部付近の地すべり滑動は完了しているように見える)。3分20秒～4分20秒にかけて場所を移動し、4分20秒にもう一度、地すべり内部の状況を確認している(このときにも、地盤の動きはほとんど認められない)。4分20秒～5分10秒にもう一度サッカー場付近まで戻り、地すべり主要部を遠目に確認している(地盤の動きは終了している)。5分43秒でビデオ撮影を終了している。

以上からすると、Balaoaの頭部地域では、地震動発生時の10秒以内にサッカー場北端付近の局所的な隆起と亀裂が形成され、砂煙が発生した。(副次的な断層が発生した可能性がある)。

その後、ビデオ撮影を開始して10秒程度は地面が引き裂けはじめるが大きな地盤破壊に到っていない。10秒程度の時間を置いて、ビデオ時間10秒～50秒(地震後20秒～60秒)で主要な地盤破壊(倒木・家の倒壊・地割れの拡大)が発生し、1分程度で落ち着いている。ビデオ撮影者は、3分15秒・4分20秒及び5分10秒に地すべり内部の状況を遠目で確認している。頭部付近の地盤流動は3分以内でほぼ完了している様である。



出典：JICA 調査団作成

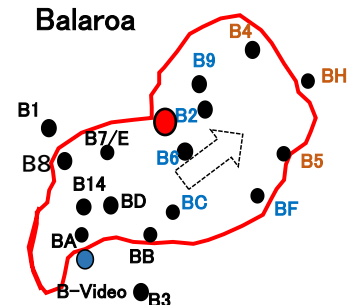
図 3-94 Balaroa 頭部のサッカー場のビデオキャプチャー画像

(2) Balaroa 北東側のビデオ

地震発生後に地盤が破壊する状況からビデオ撮影が開始されている。ビデオの開始から終了までずっと地盤が引き裂け家屋が崩壊する音が収録されている。撮影開始時には、家が音を出して壊れる状況が確認できる。ビデオ時間の4秒には土煙を上げながら建物が倒壊している。土埃の中を安全な場所に避難を開始するが、18秒には幅1m以上の地割れが各所に発生し、目の前の家が倒壊している。21秒には、撮影者の5m程度先から奥側の地盤に向かって左側に動き始め、数秒で完全に倒壊した(地すべりの動きから地すべりの北端にいたと判断できる)。家の動く速さは小走り程度。そのとき、地割れから噴水や水の湧き出しは写っ

ていない。地すべり土塊の移動・破壊の初期段階で、トラックや重機の駐車してあった場所のビデオは終了している(ビデオ時間 34 秒)。

以上からすると、Balaroo 地すべりの北東端付近（移動堆積領域）の地盤破壊状況は、撮影開始前から地盤が裂け始め・土煙と轟く音が各所で発生した。20 秒程度で地盤自体が側方に大きく動き始めている。住民からのヒアリングを含めると、地盤の側方移動が発生してから、2～3 分程度の間には大量の家屋などが集積していき状況が推察される。



出典：JICA 調査団作成

図 3-95 Balaroo 北東側のビデオキャプチャー画像

(3) Lolu のガソリンスタンドのビデオ

ビデオの撮影開始時には、既にアスファルト道路に幅 10cm 程度の割れ目ができている。ビデオ時間の 10 秒～20 秒でアスファルト道路の亀裂は拡大し、30～40 秒はガソリンスタンドのコンクリート舗装も 1m 弱の段差に拡大している。ビデオ時間 53 秒には地割れをジャンプして飛び越える状況が写っている。1 分～1 分 20 秒では身動きができない程度まで地割れが広がり、その場で立ちすくんでいる状況が見られる。撮影開始から 1 分 20 秒までの間は、人々の叫びと地盤・家屋の破壊音が続いている。

ビデオ時間の 1 分 30 秒～2 分は、地盤の破壊音がほぼ無くなり、人々も比較的落ち着いて周辺を観察している（地盤の動きは継続する）。ビデオ時間 2 分～2 分 30 秒で地割れをまたぎながら周辺を確認するように動いている（地割れの拡大が落ち着いた状況）。水の噴き上げや湧き出しは画像には写っていない。2 分 30 秒～3 分 50 秒は地割れした状況を落ち着いて観察している（地盤の動きはストップしている）。3 分 50 秒には、バイクが動き始めている。それから 5 分 6 秒まで、でこぼこに地割れしたアスファルト道路の状況と人の動きを撮影して終了している。

このビデオからは、撮影開始直前から地盤が動きはじめるが、1 分付近で最も地割れが拡大・成長し、2 分程度で地割れの動きがほぼ落ち着いた状況が確認できる。地割れからの水の噴き出し・湧き上がりは写っていない。

幹線道路の北側方向



Video time 0'03"

ガソリンスタンドの北側にいたビデオ撮影者は、地盤変状の初期段階から動画を撮影している。ビデオの20~40秒にかけてガソリンスタンドの南側に移動しながら撮影し、1分45秒以降はガソリンスタンドの状況を、2分5秒からはガソリンスタンドの前の道を歩きながら周辺の状況を撮影している。2分40秒以降は避難してきた人々が多く写っている。ビデオ画層からは、ビデオ開始前に亀裂が入り、すぐに道路は波状に変形し亀裂が拡大する。最も活発な動きはビデオ30秒~2分までの記録である。

白い弊と電柱を指標に同じ場所を見る。アスファルト舗装に20cm幅程度の亀裂がある



道はウエーブシク
亀裂は30~50cm

Video time 0'13"



1本であった亀裂が複数に増加

Video time 0'54"



割れ目の開口が拡大
電柱倒壊

Video time 1'15"



更に割れ目の開口が拡大
弊も倒壊

Video time 1'45"

幹線道路の南側方向

緑屋根の家を指標に同じ位置を見る



直線状の割れ目と斜め割れ目
(段差ほとんど無し)

Video time 0'07"



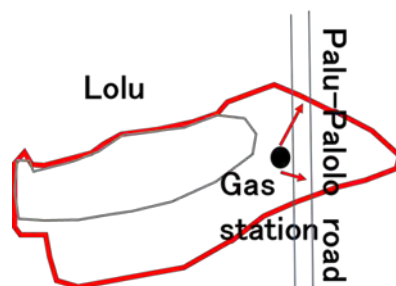
割れ目が開口し、段差が生じる

Video time 0'23"



割れ目の開口が更に拡大

Video time 1'33"



Lolu のビデオ撮影位置

出典：JICA 調査団作成

図 3-96 Lolu ガソリンスタンドからのビデオキャプチャー画像

(4) Jono Oge のビデオ

Jono Oge のビデオは、ビデオの撮影者から直接ビデオ撮影時の状況を確認するとともに、タイムスタンプの入ったオリジナルの動画を入手することができた。図 3-97 に撮影位置を示す。

撮影者の証言では、ビデオの撮影開始は地震発生後の 30 秒～1 分とのことであったが、ビデオのタイムスタンプは 18:04:50 にビデオが開始し、バラロアの地震記録が 18:02:50 に最大震度を与えていることから、2 分の時間差がある。Jono Oge が地震計 (Balaraoa) の南約 10km であることを考慮しても S 波の到達時間差は 3～4 秒であることから、地震到達後 2 分弱 (1 分 57 秒) でビデオ撮影を開始したこととなる (表 3-25 参照)。

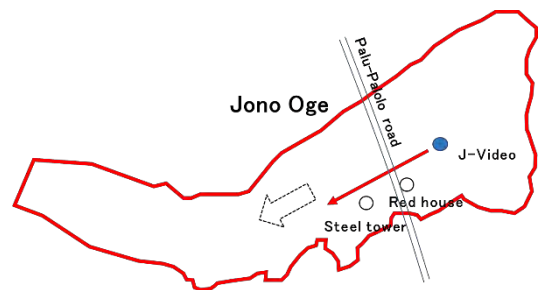
以下は、地震発生後の経過時間と周辺の状況 (動画記録含む) である。

表 3-25 Jono Oge ビデオオーナーのヒアリング結果と正確な時間

地震発生後の経過時間	0～60 秒	60 秒	90 秒	120 秒	120～240 秒	250 秒
動画記録とオーナーからのヒアリング結果	家の外で地震を感じる。周辺の地盤に変状は認められない	地盤に亀裂が入りはじめる	家の倒壊が始まる。倒壊した自分の家の屋根に登る	屋根の上でビデオ撮影を開始する。周辺地盤は液状化に伴うボイリングが発生している	赤い屋根の家の脇を通過 (140 秒) 電波塔の脇を通過 (186 秒) 水の湧き出しが激しく、小川が発生	撮影終了直前に地盤は激しくうねりを伴い、地盤が泥流化していく状況が確認できる。
ビデオ撮影				ビデオ撮影開始		ビデオ撮影終了

出典： JICA 調査団作成

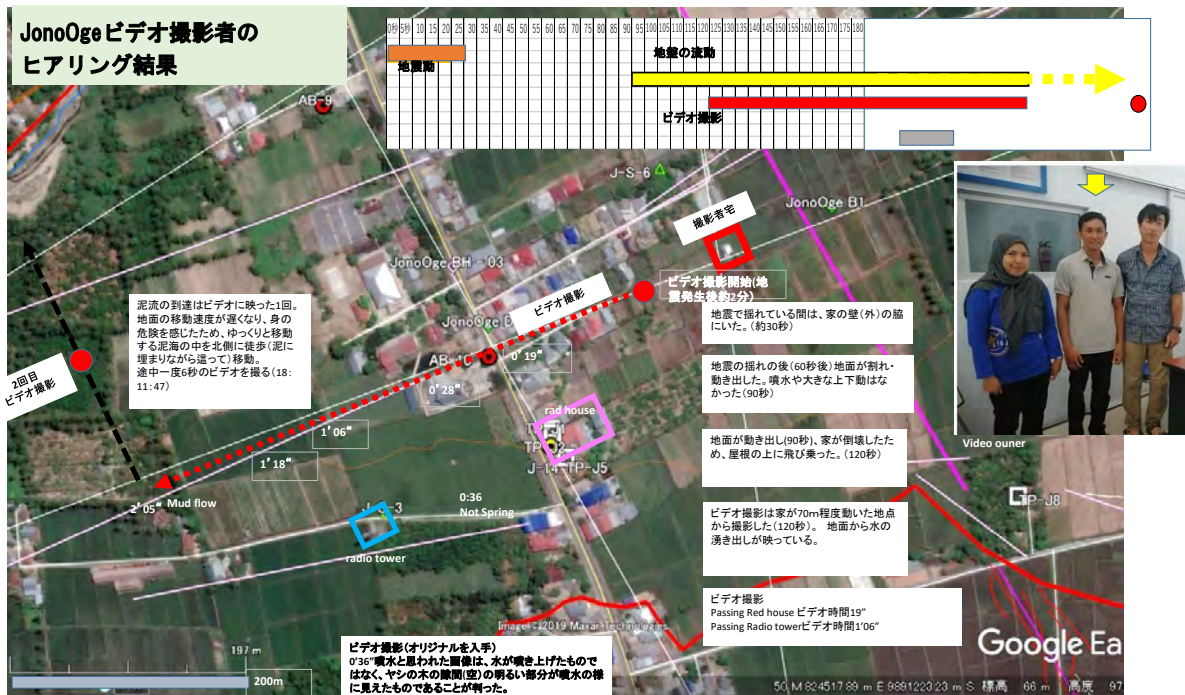
- 地震で揺れている間は、家の壁 (外) の脇にいた。(地震発生後約 60 秒まで)
- 地震動以外には、最初の 60 秒で地盤流動等の異常は感じない。
- 地震発生後約 60 秒で、地面が割れ・地盤と家が動き出した。
- 60 秒～90 秒では、噴水や地盤の大きな上下動はなかった。
- 約 90 秒後に自分の家が倒壊したため、屋根の上に飛び乗り、ビデオ撮影を開始した (地震後約 120 秒)。
- ビデオ撮影は家が 70m 程度動いた地点から撮影し、ビデオ撮影開始直後に、地面から水の湧き出し (ボイリング) が確認でき、地盤が激しく液状化した状況が映っている (120 秒)。
- ビデオ撮影開始 19 秒には、北側の赤い屋根の家を追い越し、ビデオ撮影時間 66 秒後には電波塔の脇を通過している。
- ビデオ撮影時間の 33 秒 (地震発生後約 150 秒) の画像には、水が 2 階屋根程度の高さまで爆発状に噴き出すように見える画像があるが、これはビデオオーナーから入手した高精細のオリジナルビデオでは木の隙間の明るい空であったことが確認できた。



出典： JICA 調査団作成

図 3-97 Jono Oge のビデオ撮影位置

- 地盤流動は、地震発生後 60 秒で開始し、2 分までの 60 秒間で約 70m 移動したことになる。次の 3 分までの 60 秒間では 250m 移動し、4 分までの 60 秒でも 250m 程度移動している。



出典： JICA 調査団作成

図 3-98 Jono Oge ビデオ撮影者からのヒアリング概要

ビデオ撮影者は Jono Oge の上部のほぼ中央付近の自宅脇（外）で地震を感じている。その後地面が割れ始め、側方流動が始まり、家が倒壊したため、倒壊した自宅屋根に飛び乗り動画撮影を開始した。

ビデオ撮影開始時には、地面は裂け目・凹凸が発生し、地面からは水の湧き出し（ボイリング）が認められる。パキパキと家か木などが裂ける音があり、いくつかの立木は倒壊している。ビデオ時間の 17 秒には、ヤシの木が立った状態で地盤と一緒に側方にゆっくりと流れ、赤い屋根の家を追い越して動いている（動きに上下動はほとんど無く、平滑なスケートリンクの上を流れているようにスムーズに移動している）。赤い屋根の家を追い越したビデオ時間 35 秒付近は地面の上に小川のような流れが発生している。立った木は大きく揺れながらもそのまま移動し、ビデオ時間 1 分 3 秒には鉄塔を追い越し移動している。このとき、流動している地盤は高低差 1~2m のうねりを伴って、1 分 30 秒付近ではほぼ地盤の表層までが形を保持した状態で液化した状況が見られる。1 分 50 秒を過ぎると泥流と化した地盤に高さ 1m ほどの波が襲いビデオは終了している。

このビデオからは、地震発生後 2 分~4 分の Jono Oge 地域の流動状況が克明に見ることができる。地震後 2 分で、地割れ・倒木が発生し、地面からはボイリング様の水の湧き出しが発生し、小川のように地面の表層を水が流れている。動きの始め（移動距離 70~350m 程度）は上下動やうねりが少なくスムーズに流れるが、次第に表層地盤の液化が進み、地盤が高低差 1~2m のうねりを伴って流動し、1 分 50 秒では泥流状の液化した状態に変化している。時間とともに水が添加され表層地盤の状態が変化している。地盤の移動速度は、100m 移動するのに 25 秒を要し、ビデオ終了の 2 分 5 秒で 430m 移動している（移動速度 4

m/sec 程度)。ビデオ撮影者は身の危険を感じたため、ビデオ撮影を終了し、北側に泥海と化した中を避難している。この地域は 1km 程度の移動があったことが建物の対比などから判っている。



出典： JICA 調査団作成

図 3-99 Jono Oge ビデオのキャプチャー画像

(5) ビデオ分析結果のまとめ

Balaroa ; 地すべり頭部 (サッカー場) のビデオでは、強震の発生後 10 秒から動画が始まる。ビデオ時間の 10 秒までには、頭部の滑落崖は形成されていない。また、頭部の南側地域を避難している最中はビデオ時間の 10~50 秒 (強震後 20~60 秒) に亀裂の拡大 (地盤流動) が発生している。ビデオ時間の 50 秒以降は、地盤流動の動きが落ち着いている。また、地震発生直後に平滑だったグラウンドに割れ目が走り、砂煙が舞った (1~2m の隆起)。

Lolu ; 主要道路沿いのガソリンスタンドのビデオは、後述するヒアリングの情報から強震後すぐに撮影が開始したと考えられる。撮影開始時にアスファルト道路に数 10cm の段差の亀裂が発生しており、その後、ビデオの 10 秒以降に亀裂の拡大・地盤の破壊音が轟き、ビデオ時間の 30 秒~80 秒に地盤破壊が著しく進行している。80 秒以降は、地盤の破壊音がなくなり、落ち着いている。

Jono Oge ; 地盤流動の状況を克明に記録したビデオは、強震後約 2 分で撮影を開始している。撮影開始時には、既に地面が割れ、側方流動が始まり、家が倒壊した状態である。ビデオは倒壊した自宅屋根の上から撮影している。ビデオ撮影開始時の強震後 2 分には、地面は裂け目・凹凸が発生し、地面からは水の湧き出し (ボイリング) が認められる。ビデオ時間の 17 秒には、ヤシの木が立った状態で地盤と一緒に側方にゆっくりと流れ、赤い屋根の家を追い越して動いている (動きのはじめの段階ではスムーズに水平移動している)。赤い屋根の家を追い越したビデオ時間 35 秒付近は小川のような流れが発生し、ビデオ時間 1 分 3 秒 (強震後 3 分) には鉄塔を追い越し、地盤は高低差 1~2m のうねりを伴っている。1 分 50 秒 (強震後 3 分 50 秒) を過ぎると泥流と化した地盤に高さ 1m ほどの波が南東側から襲いビデオは終了する。このビデオからは、時間に伴って表層の移動地盤の液化が進行している状況が確認できる。

以上をタイムテーブルに示すと表 3-26 に示すとおりである。

表 3-26 Video 画像分析による地盤破壊・地盤流動の時間

地震発生後の経過時	主要動 (強い上下・水平動) 0~5秒	主要動 5~20 秒	20 ~ 90 秒	90 ~ 120 秒	120 ~ 180 秒	180~ 240秒	250秒以降
Balaraoa	<p>ビデオ記録(5分43秒)</p> <p>地盤破壊</p> <p>地盤流動</p>						
	<p>地すべり頭部(サッカー場)のビデオでは、強震の発生後10秒から動画が始まる。ビデオ時間の10秒までには、頭部の滑落崖は形成されていない。また、頭部の南側地域を避難している最中はビデオ時間の10~50秒(強震後20~60秒)に亀裂の拡大(地盤流動)が発生している。ビデオ時間の50秒以降は、地盤流動の動きが落ち着いている。また、ビデオの撮影前にサッカー場は大きな地盤亀裂が発生しており、土煙が発生している。</p>						
Lolu	<p>ビデオ記録5分</p> <p>地盤破壊</p> <p>地盤流動</p>						
	<p>主要道路沿いのガソリンスタンドのビデオは、撮影開始時にアスファルト道路に数10cmの段差の亀裂が発生している。その後、ビデオの10秒以降に亀裂の拡大・地盤の破壊音が轟き、ビデオ時間の30秒~80秒に地盤破壊が著しく進行している。80秒以降は、地盤の破壊音がなくなり、落ち着いている。</p>						
Jono Oge	<p>ビデオ記録2分5秒</p> <p>地盤破壊(記録無し)</p> <p>地盤流動</p>						
	<p>地震後早い段階で、地盤に亀裂が入りはじめる。家の倒壊が始まる。倒壊した自分の家の屋根に登る。屋根の上でビデオ撮影を開始する(地震後120秒)。周辺地盤は液状化に伴うボイリングが発生している。赤い屋根の家の脇を通過(140秒)。電波塔の脇を通過(186秒)。水の湧き出しが激しく、小川が発生。撮影終了直前に地盤は激しくうねりを伴い、地盤が泥流化していく状況が確認できる。</p>						

出典： JICA 調査団作成