

APPENDIX III-1

津波に関する国内支援委員会 技術検討書

巻末資料-1

津波・液状化地すべり（沿岸部） に関する国内支援委員会

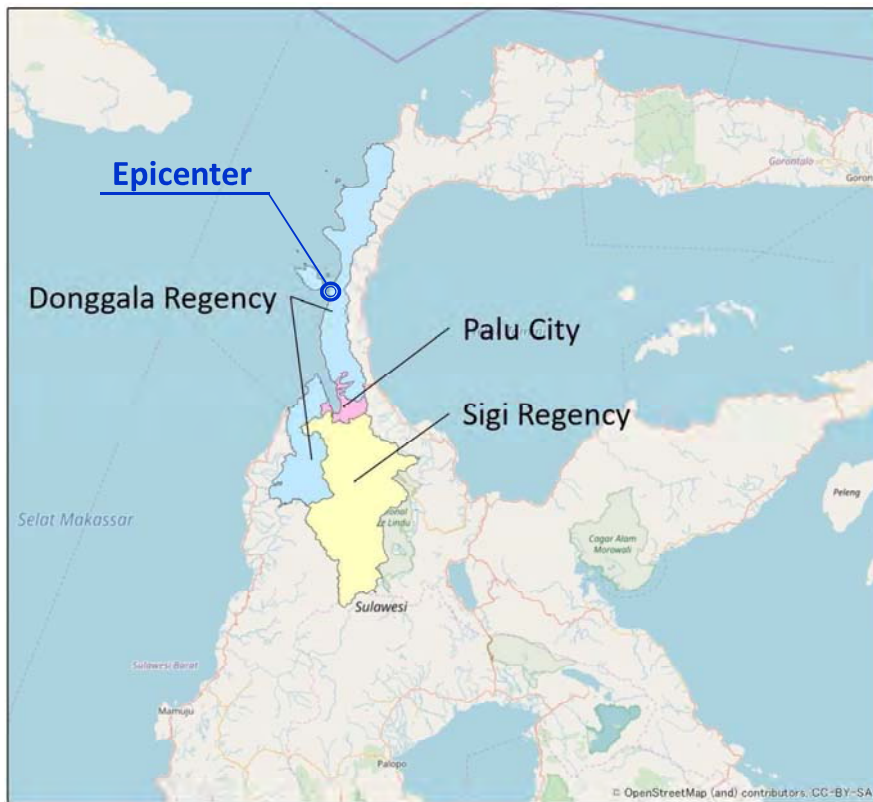
技術検討書

プロジェクト位置図

Location of Central Sulawesi Province and Epicenter



Location of Disaster Affected Area (Palu City, Sigi Regency and Donggala Regency)



巻頭写真



Collapsed Palu Bridge IV



Container Port near Lampowau (West Coast)



Damaged Buildings along Coast (Central East Coast)



Damaged Road along Coast



Palu Bay South Coast (East Side)



Palu Bay South Coast (West Side)

目 次

第 1 章	国内支援委員会設立の背景.....	1-1
1-1	本調査の背景と目的.....	1-1
1-2	国内支援委員会設立の目的.....	1-1
1-3	国内支援委員会メンバー.....	1-2
1-4	国内支援委員会の主な活動.....	1-2
1-5	報告書の構成.....	1-3
第 2 章	地形・地質概要.....	2-1
2-1	地形概要.....	2-1
2-2	地質概要.....	2-2
第 3 章	現地調査.....	3-1
3-1	調査概要.....	3-1
3-2	津波浸水深調査.....	3-1
3-3	マングローブ調査.....	3-5
3-4	地層年代調査.....	3-8
第 4 章	今次津波の特徴とハザードマップの作成.....	4-1
4-1	過去の津波被害調査.....	4-1
4-2	2018年津波発生メカニズムと特徴.....	4-3
4-3	津波ハザードマップの作成.....	4-9
第 5 章	津波対策の基本方針.....	5-17
5-1	設計対象津波.....	5-17
5-2	ハード対策による津波対策範囲の設定.....	5-17
5-3	基本方針の選定.....	5-20
5-4	許容浸水深の設定.....	5-22

第 6 章	嵩上げ道路計画（必要高の設定）	6-1
6-1	概要	6-1
6-2	道路設計条件	6-1
6-3	嵩上げ道路高の検討	6-2
6-4	嵩上げ道路平面配置計画	6-8
6-5	嵩上げ道路本体構造に対する配慮（案）	6-9
第 7 章	植生の津波軽減効果に対する検証	7-1
7-1	概要	7-1
7-2	津波軽減効果の検証方法	7-2
7-3	水理模型実験による検証	7-3
7-4	シミュレーション解析による検証	7-19
7-5	パル湾南岸部における津波対策（構造物対策）の推奨案	7-26
第 8 章	パル湾南部の津波対策計画概要	8-1
8-1	パル湾南岸 津波対策計画概要図	8-1
8-2	パル湾南部 津波対策完成予想図	8-3
第 9 章	避難計画の基本方針	9-1
9-1	概要	9-1
9-2	検討方針	9-1
9-3	避難計画の基本方針	9-2
第 10 章	今後の詳細設計、ローン事業に対する申し送り事項	10-1
第 11 章	参考資料	11-1
11-1	津波浸水深調査結果	11-1
11-2	水理模型実験（マングローブ調査、樹木計画）	11-71
11-3	水理模型実験（その他実験結果、データシート）	11-80
11-4	マングローブの生育環境	11-93

第 1 章 国内支援委員会設立の背景

1-1 本調査の背景と目的

2018年9月28日、インドネシア中部スラウェシ州の州都パル市の北80kmを震源とするM7.5の地震が発生、主に液状化に起因すると推測される内陸部での地すべり及び沿岸部での津波の影響により、甚大な被害が生じた。その他、中部スラウェシ州の中でも、パル市、シギ県、ドンガラ県を中心に、橋梁の崩壊、港湾施設の損傷、給水施設の損傷、灌漑水路の損傷、病院や学校等の公共施設の機能不全、等が顕著な状況となった。

この震災からの復旧・復興の実現に向け、インドネシア政府機関である国家開発企画庁（以下、「BAPPENAS」と呼ぶ）は戦略的タスクフォースを発動し中部スラウェシ州の災害復興に係るマスタープランを2018年12月に策定、その後、同マスタープランに基づき、具体的な各種復興計画を策定し、復興事業を実施することとなった。

これらの状況をふまえ、国際協力機構（以下、「JICA」と呼ぶ）は2018年10月15日以降、調査団を派遣し、復旧・復興支援に係る情報収集や、今後のシームレスな復旧・復興支援に係る協議を、BAPPENASをはじめとする関係機関と実施し、先方政府から我が国に対して、同震災からの復興への技術協力の要請がなされた。

本調査の目的は、インドネシアの中部スラウェシ州地震災害からの復興計画の策定及びその実施支援等を行うことにより、的確かつ円滑な復興事業の促進と、「より良い復興」(Build Back Better: 以下「BBB」)の具現化を図り、災害に強い社会の形成に寄与することにある。

1-2 国内支援委員会設立の目的

本調査では、地域の災害リスク低減のための強靱化計画を準備、実行することにより、地域を災害に対して強靱な街として形成することが求められた。そしてこれを実現するために、主に4つの成果（アウトプット）のための活動を進める方針とした。

- Output ① 災害リスクの検証とハザードマップの整備支援
- Output ② 災害リスクの検証をもとにした空間計画の整備支援
- Output ③ インフラ・公共施設の復旧・復興計画支援
- Output ④ 生計回復及びコミュニティ再生の実現のための支援

①～④のうち、Output①に関しては、今次災害発生要因を分析し、津波、液状化地すべり、地震、洪水、土砂災害等の複数の災害を対象とした災害ハザードの評価を行うことを目的とした。しかし、被災直後に実施した第一次調査を通じて、今回発生した津波の主因が一般的な断層のずれではなく、地震によりパル湾沿岸部で発生した複数地すべりによることが明らかとなった。

このように世界的に稀な主因の津波を扱う事となったため、この発生メカニズム、ハザードマップへの評価、ならびに Output③に関係するパル湾沿岸の津波対策の方針について、専門的知見から意見を頂くことを目的に、今村教授（東北大学）を委員長とした複数の学識経験者からなる「インドネシア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 津波・液状化地すべり（沿岸部）に関する国内支援委員会」を設立した。

1-3 国内支援委員会メンバー

国内支援委員会のメンバーは、下表に示す通り、今村教授を委員長とし、有川教授、佐々委員の3名にご参加頂いた。

表 1-1 インドネシア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
津波・液状化地すべり（沿岸部）に関する国内支援委員会メンバー

	氏名	所属
委員長	今村 文彦	東北大学 工学研究科 教授
委員	有川 太郎	中央大学 理工学部 教授
委員	佐々 真志	港湾空港技術研究所 海洋情報・津波研究領域 津波高潮研究グループ長

1-4 国内支援委員会の主な活動

委員会は下表に示す通り合計 5 回開催された。委員会では、JICA 専門家及び調査団が作成した調査方針、調査結果、発生メカニズム分析、ハザードマップやリスク軽減対策の方向性等に対し、支援委員の方々より多くの意見をいただいた。

なお、支援委員には、本調査開始前の震災直後の第一次調査段階から現地入りいただき、被災状況を確認、評価いただくなど、現地調査への多大なご協力もいただいた。また、有川教授におかれては、水理模型実験、解析において、先方研究者への指導や結果の照査、シミュレーション解析の実施などのご支援を頂いた。

表 1-2 委員会の主な討議内容（津波関連）

委員会	実施日	討議内容
国内支援委員会 (第1回)	2018/12/20	<ul style="list-style-type: none"> 復興マスタープラン策定に係るこれまでの状況、今後の調査予定について 津波被害のシミュレーションと沿岸リスク評価について
国内支援委員会 (第2回)	2019/1/29	<ul style="list-style-type: none"> 津波堤防のターゲットレベルについて 津波堤防の線形の考え方について 津波堤防の高さの設定方法について 模型実験に対する留意点について
国内支援委員会 (第3回)	2019/3/20	<ul style="list-style-type: none"> 今次津波の発生メカニズムと再現期間について インフラ計画の進め方について ハザードマップの扱いについて
国内支援委員会 (第4回)	2019/6/22	<ul style="list-style-type: none"> 堤防高設定のための津波痕跡調査の扱いについて マングローブの津波対策としての扱いについて
国内支援委員会 (第5回)	2020/9/14	<ul style="list-style-type: none"> パル湾津波対策の最終方針の確認 本委員会報告書の確認

1-5 報告書の構成

本報告書は下表に示す 11 章から構成されている。支援委員の方々よりいただいた意見、指摘を反映させ、報告書案を作成し、その内容について最終確認をいただいている。

表 1-3 委員会報告書 目次構成（津波関連）

章	タイトル	備考
第 1 章	国内支援委員会設立の背景	
第 2 章	地形・地質概要	
第 3 章	現地調査	
第 4 章	今次津波の特徴とハザードマップの作成	
第 5 章	津波対策の基本方針	
第 6 章	嵩上げ道路計画（必要高の設定）	
第 7 章	植生の津波軽減効果に対する検証	
第 8 章	パル湾南部の津波対策計画概要	
第 9 章	避難計画の基本方針	
第 10 章	今後の詳細設計、ローン事業に対する申し送り事項	
第 11 章	参考資料	調査、実験データ

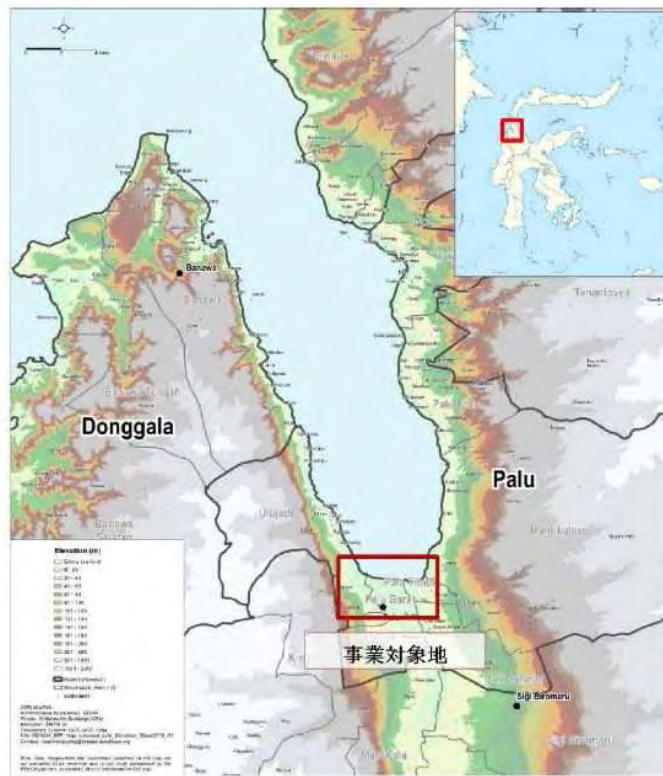
第 2 章 地形・地質概要

2-1 地形概要

インドネシア東部にあるスラウェシ島は、南半島、ミナハッサ半島（北部）、東半島と南東半島という四つ大きな半島で構成され、北東部のトミニ湾、南東部のトロ湾、南部のボネ湾で隔てられている。スラウェシ島の地形は山脈が卓越し、2,500m 以上の山が連なり活火山が多く存在する。南スラウェシ北部にあるランテマリオ山は、この地域の最も高い地点となる（3,440m）。スラウェシ島では平野部が少なく、山脈や湾および海によって隔てられ、海岸線に沿って平野部が点在している特徴がある。平野部は、スラウェシ島総面積の約 10%にも満たない。

本事業は、中央スラウェシ州の州都であるパル市、パル川の河口部周辺を対象地としている。事業対象地の標高は、平均海面から 5m 未満となる。スラウェシの季節は大きく二つに区分され、5 月から 10 月の乾季と 11 月から 4 月の雨季があり、1 月と 2 月に豪雨となることがある。中央スラウェシの山岳地帯では、年間降水量は 2,500mm を超える一方、パル市とその周辺の低地では、降雨量が少なくなっている（年間 1,600 mm 未満）。パル市は山脈に囲まれた窪地内に位置するため、気候の特徴として乾燥していることが挙げられ、年間降水量は約 600mm となる。

スラウェシ島は赤道が通過しており、低地の気温は 21℃～35℃で、年間平均気温は 27℃ である。



Source: <https://reliefwb.int/>

図 2-1 中部スラウェシおよびパル市の地形概要図

2-2 地質概要

インドネシア東部のスラウェシ島は、ユーラシア、インド、オーストラリア、及び太平洋プレートの合流点に位置し、今も活発な沈下と衝突が起きている複雑な地域である。パルーコロ断層に沿った第三紀以降の構造運動は、東西圧縮に伴う左横ずれと新第三系花崗岩の貫入に伴う隆起が構造岩石学に基づいて確認されている。現在、南北拡張／東西圧縮が続いている。

パル湾南岸部の土質は主に粘土質、シルト質、砂質の沖積堆積物で構成され、東側及び西側境界は、砂利の扇状地堆積物で形成される。西側境界の砂利は、片岩系の花崗岩破屑物である一方、東側の砂利は片岩、火成岩および堆積岩からなる。

西側の断層崖北部の地盤は花崗岩と花崗閃緑岩からなり、南部はフィライト質片岩である。

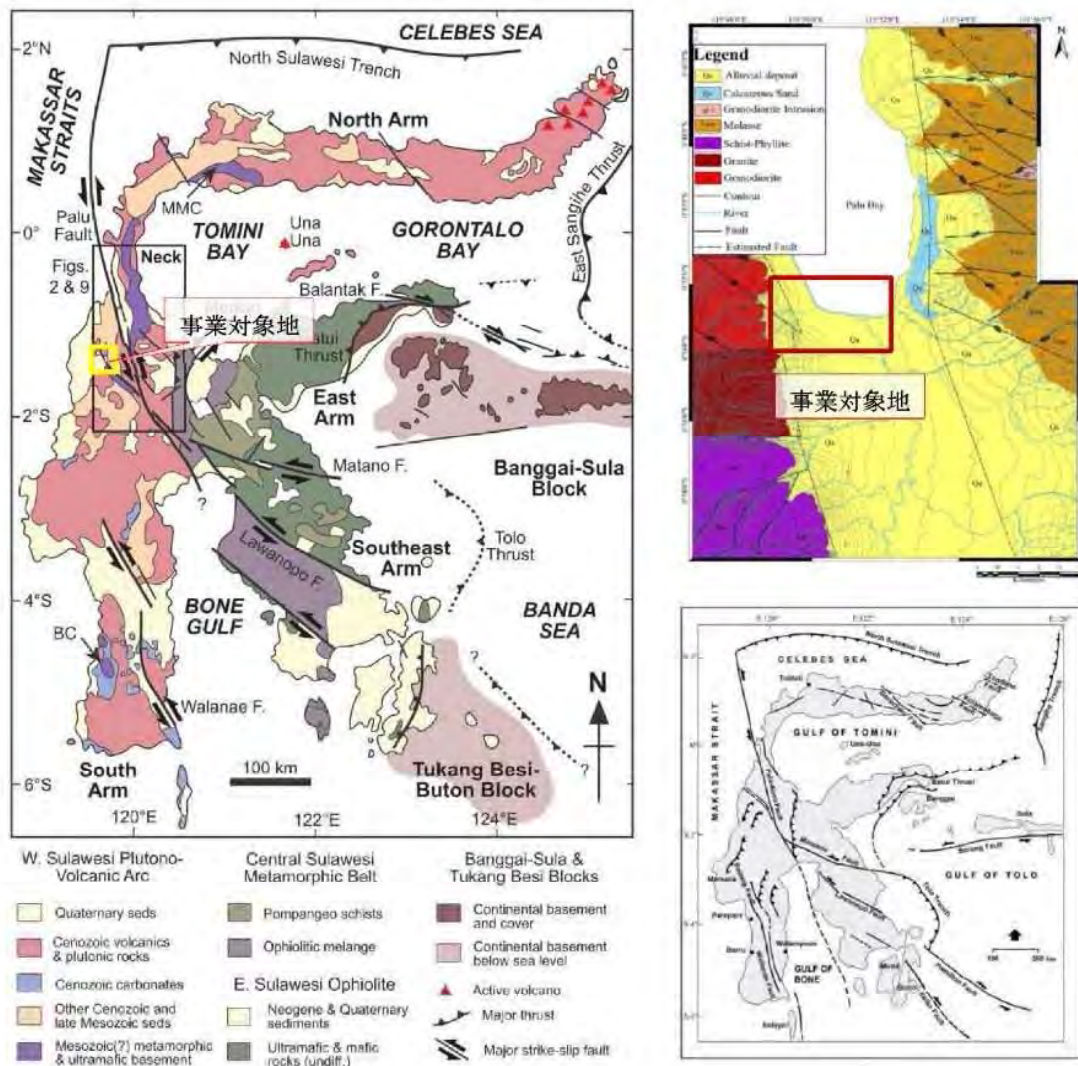


図 2-2 中部スラウェシおよびパル市の地形概要図

第 3 章 現地調査

3-1 調査概要

津波対策に係る現地調査は、表 3-1 に示す通り津波浸水調査、マングローブ調査、津波発生履歴調査を行った。

表 3-1 JICA 調査団による現地調査リスト（津波関連）

調査項目	調査内容と数量等
津波浸水深調査	津波浸水災害を受けた沿岸地域の調査（浸水深及び浸水範囲調査）
マングローブ調査	沿岸部植生効果を考慮した津波対策実験、シミュレーション用の密度、寸法調査
地層年代調査	地層に含まれる有機物の放射性年代測定試験。Palu 湾南東低地（津波再現期間を確認）。

Source: JICA Expert and JICA Study Team

上表の各調査概要を以下に示す。

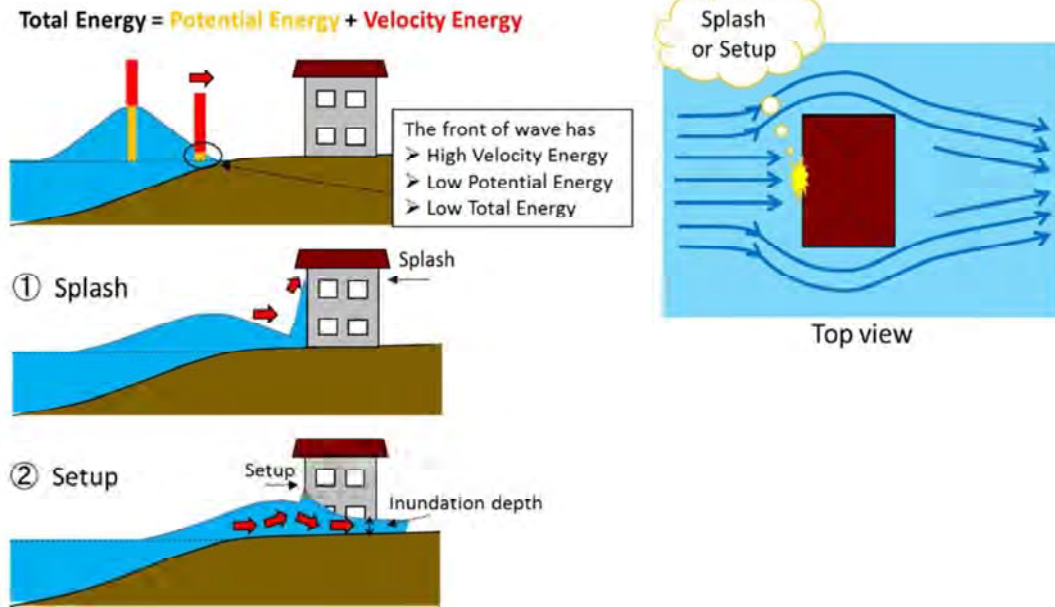
3-2 津波浸水深調査

3-2-1 概要

津波の浸水深については、津波発生直後に多くの関係機関が現地調査に入り、その時に得られたデータが公開された。しかし、調査密度が粗い箇所が見受けられるほか、スプラッシュやセットアップなどの影響も混在して計測されていたため、正確な津波高を再調査する必要があった。

津波のエネルギーは、位置エネルギーと速度エネルギーで構成される。津波が建物を通過すると、速度エネルギーが建物の正面（海側）でスプラッシュまたはセットアップとして形成される（図 3-1）。このため、津波の実際の位置エネルギーを測定するには、海側を避けて浸水深を測定する必要がある。実際の計測では、建物の内部や建物の 2 つの側面、および建物の裏側の津波痕跡の深さを測定した。併せて地元住民へのインタビューを実施し、本情報も、津波深を特定する際の参考とした。

本調査結果は、津波対策の一つである嵩上げ道路の必要高算定のほか、津波ハザードマップの作成に利用した。



Source: JICA Study Team

図 3-1 津波遡上によるスプラッシュとセットアップ

3-2-2 調査結果

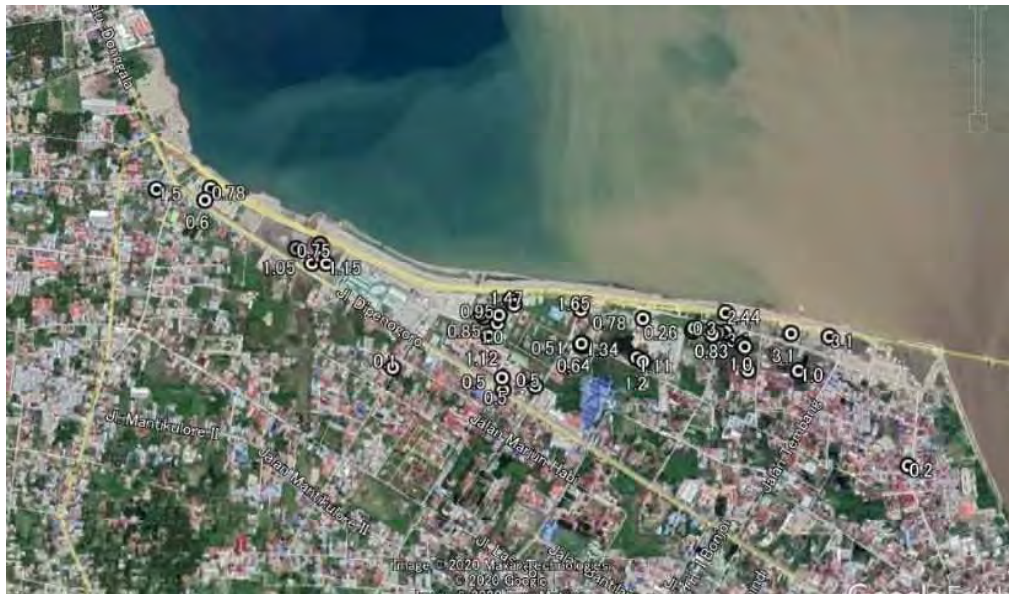
図 3-2 に調査状況を、図 3-3、図 3-4 にはパル湾南岸部の調査概要を示す。本調査の詳細結果については 1 1-1 に示す。



Source: JICA Study Team

図 3-2 津波浸水深の調査状況

● Inundation depth which is not including splash or setup



Source: JICA Study Team

図 3-4 津波浸水深調査結果（パル湾南西部）

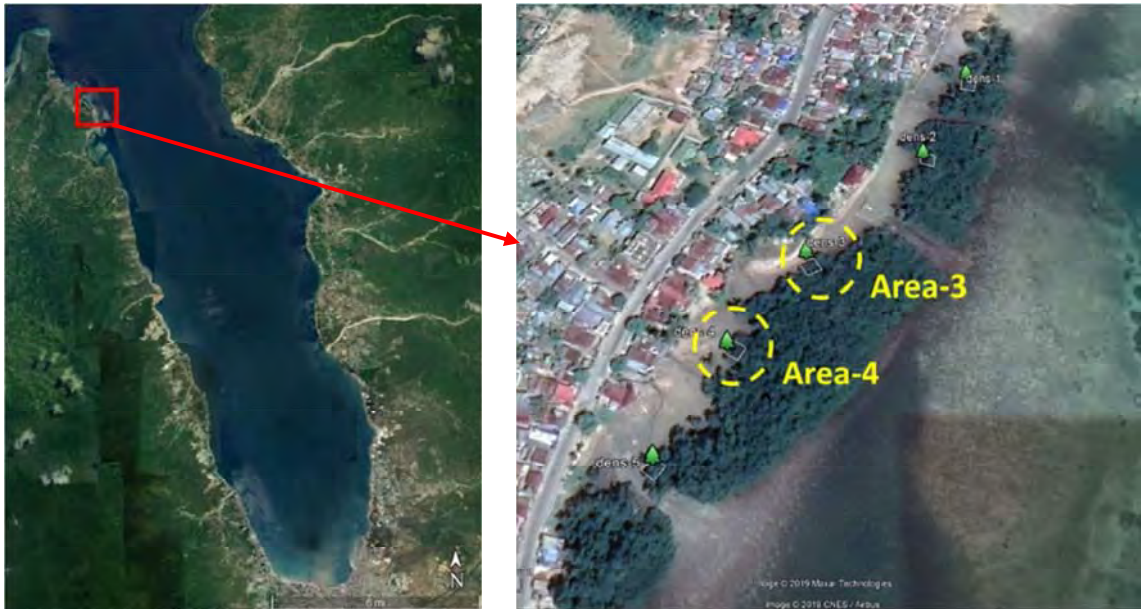
3-3 マングローブ調査

3-3-1 概要

インドネシア政府との協議において、津波対策に植生を組み合わせることを要望された。これを受けて、植生による津波軽減効果を検証するための模型実験やシミュレーション解析のための基礎情報として、パル湾に育成するマングローブについて調査を実施した。本調査では、マングローブの幹径と育成密度を計測した。

3-3-2 調査結果

本調査位置を図 3-5 に、調査対象としたマングローブ密度、幹径に対する調査結果の抜粋を次頁以降に示す（詳細結果を 11-2 に示す）。



Location	Inventory Survey	Diameter Survey
Area-3	2 points	20 points
Area-4	1 point	3 points

Source: JICA Study Team

図 3-5 マングローブ調査位置

(1) マングローブ密度調査概要

図 3-6 にマングローブの幹間隔について調査した結果の概要を示す。



Location	Inventory Survey	Density result (trees/m ²)
Area-3	Point 1	0.166
Area-3	Point 2	0.140
Area-4	Point 1	0.142

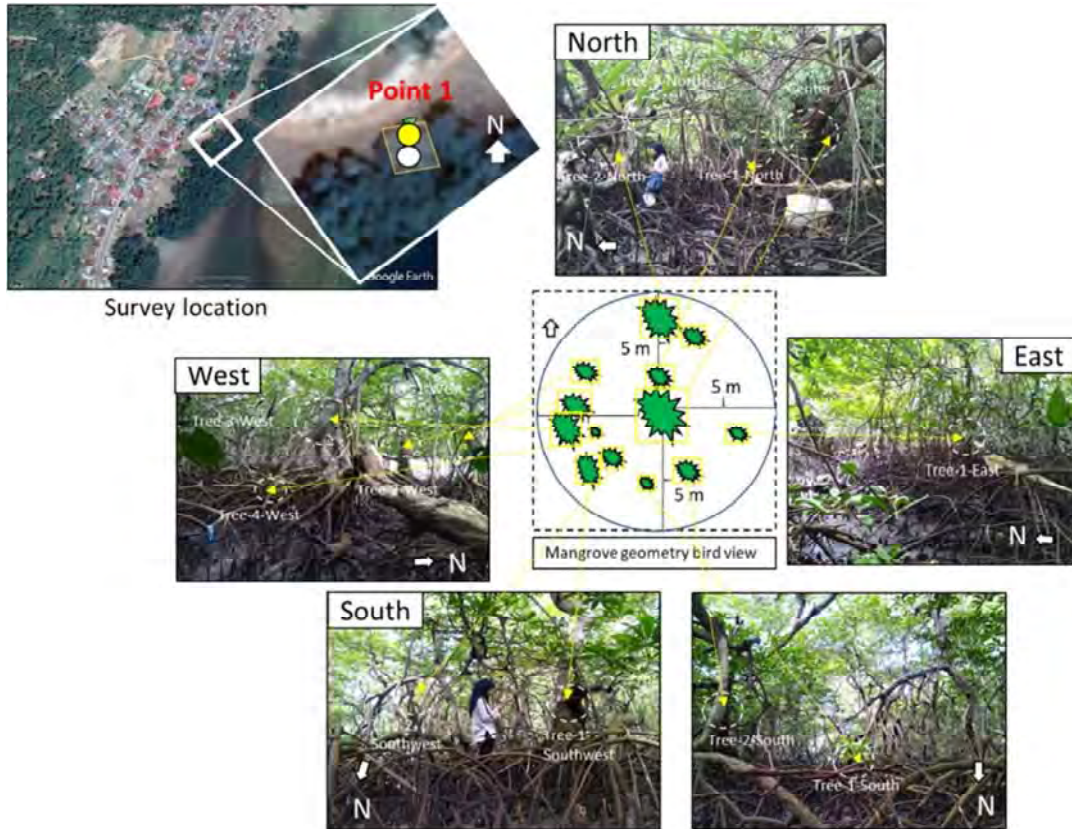
平均密度 : 0.149 tree/m²

Source: JICA Study Team

図 3-6 マングローブ調査結果 (密度調査)

(2) マングローブ幹径調査概要

図 3-7 にマングローブの幹間隔について調査した結果の概要を示す。



Area-3, Point1

No.	Area	Diameter at Breast Height (m)	Total Height (m)	Min Diameter (m)	Max Diameter (m)
Area3-1	Area-3, Point 1	0.87	10.5	NA	NA
Area3-2	Area-3, Point 1	0.15	3.0	0.02	0.06
Area3-3	Area-3, Point 1	0.12	5.0	0.02	0.05
Area3-4	Area-3, Point 1	0.4	3.0	0.02	0.05
Area3-5	Area-3, Point 1	0.1	4.0	0.01	0.03
Area3-6	Area-3, Point 1	0.9	3.0	0.02	0.07
Area3-7	Area-3, Point 1	0.25	7.0	0.018	0.04
Area3-8	Area-3, Point 1	0.9	7.0	0.04	0.08
Area3-9	Area-3, Point 1	0.6	6.0	0.01	0.055
Area3-10	Area-3, Point 1	0.15	6.0	0.03	0.011
Area3-11	Area-3, Point 1	0.35	6.0	0.03	0.08

平均幹径 : 0.338 m

Area-3, Point2

No.	Area	Diameter at Breast Height (m)	Total Height (m)	Min Diameter (m)	Max Diameter (m)
Area3-12	Area-3, Point 2	0.65	8.0	0.03	0.07
Area3-13	Area-3, Point 2	0.25	6.0	0.05	0.1
Area3-14	Area-3, Point 2	0.07	3.0	0.03	0.06
Area3-15	Area-3, Point 2	0.1	4.5	0.03	0.055
Area3-16	Area-3, Point 2	0.02	1.1	NA	NA
Area3-17	Area-3, Point 2	0.12	3.0	0.025	0.05
Area3-18	Area-3, Point 2	0.15	8.0	0.05	0.1
Area3-19	Area-3, Point 2	0.07	2.0	0.02	0.05
Area3-20	Area-3, Point 2	0.05	5.0	0.02	0.05

平均高 : 5.75m

Source: JICA Study Team

図 3-7 マングローブ調査結果 (幹直径)

3-4 地層年代調査

3-4-1 概要

津波堆積物は、過去の津波発生時期に関する情報を得るために重要となる。過去にパル湾で発生した津波歴の把握を目的に、インドネシア政府で実施された調査結果を踏まえ地層年代調査を実施した。

3-4-2 LIPIによる過去の津波調査概要

LIPI (インドネシア科学院) の研究チームは、パル湾 Talise 東部にて津波堆積物の調査を実施した。図 3-8 は地元新聞による報道を示す。また、LIPI による調査個所を図 3-9 に示す。

本調査の結果、表 3-2 に示す過去の津波による堆積物の候補となり得る 5 層が確認された。第 1 層 (厚さ 8 cm の堆積) は、最新津波 (2018 年 9 月 28 日) による堆積層と推定された。上部に細砂と海中に生息していたサンゴなどが含まれていたが、堆積年代を特定することができる放射性年代測定試験は、予算の関係から実施されていない状況にあった。



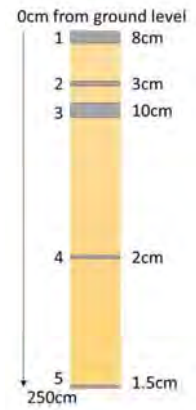
Source: Kompas Newspaper edition November 12th 2018

図 3-8 2018 年津波の堆積物調査に関する新聞記事

表 3-2 津波による堆積層 (LIPI)

Layer	Depth	Maximum Thickness	Possible Tsunami Event
1	8cm	8cm	28 Sep 2018
2	30 - 40cm	3cm	—
3	50 - 60cm	10cm	—
4	160cm	2cm	—
5	250cm	1.5cm	—

Source: LIPI, JICA Study Team



Source: LIPI

図 3-9 津波による堆積層調査状況 (LIPI)

3-4-3 JICA 調査団による年代試験

JICA 調査団は、パル湾南で LIPI が実施した調査と同様に、津波による堆積層を確認した。各地層材料の特徴から、LIPI によって報告された 30～40cm の深さに位置する層が、2018 年の津波により堆積した地層位置であると判定した。そして、地層年代試験のために 5 つの層から有機物をサンプリングした。



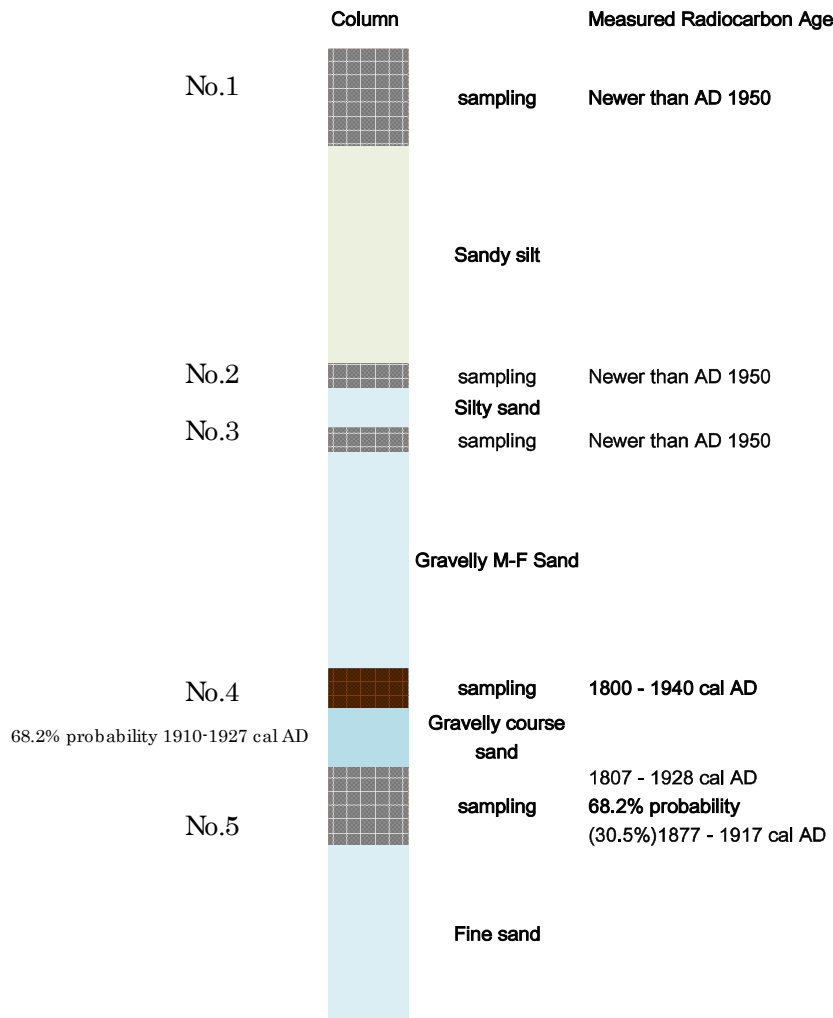
Source: JICA Study Team

図 3-10 JICA 調査団による津波堆積層のサンプリング

放射性年代測定試験の結果を表 3-3 および図 3-11 に示す。この結果、サンプル No.4 は 1927 年に発生した津波で堆積したと判定された。また、本試験の結果、LIPI が確認した津波堆積物下の有機質土壌層も同様であるため、LIPI の調査による 2 番目の層も 1927 年の津波で堆積したと判定した。以上より、今次津波の再現期間は約 100 年と推定した（図 3-12、表 3-4）。

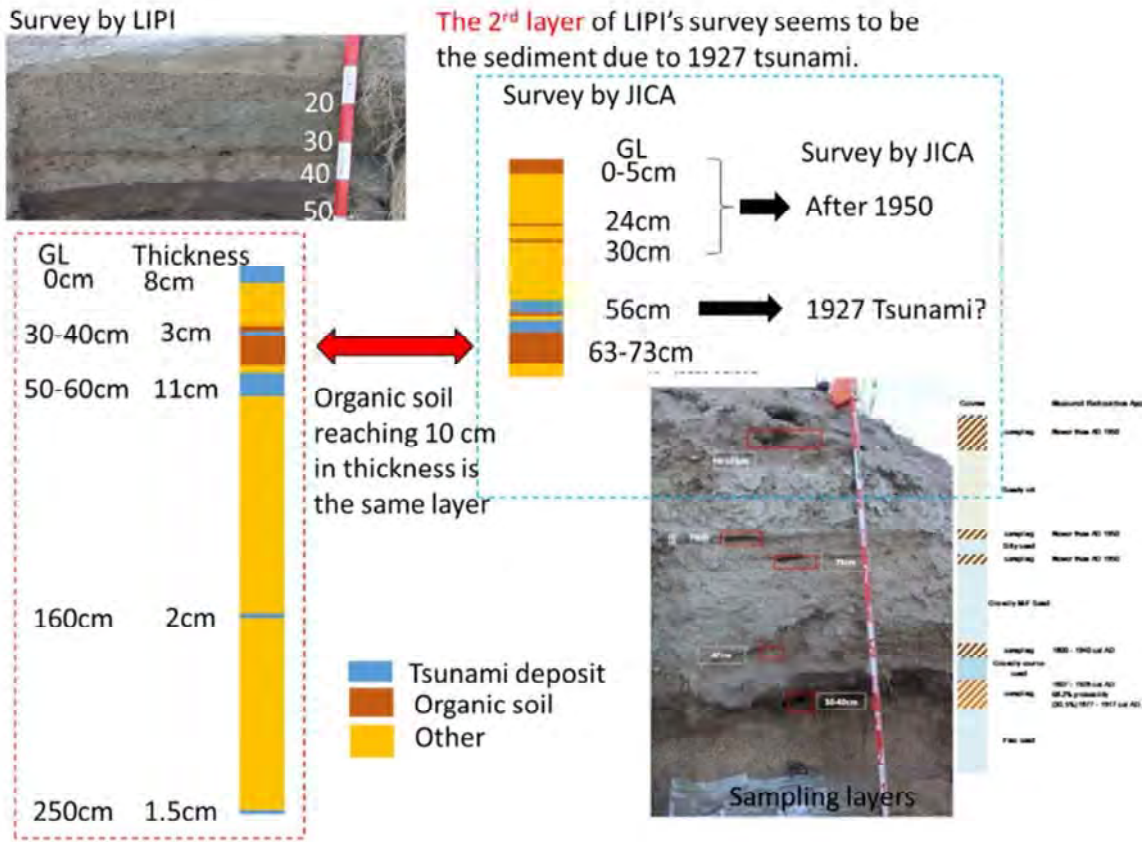
表 3-3 年代調査結果 (JICA 調査団実施)

Sample No.	Depth from GL	Results of Test	Assumed Event
1	0-5cm	After 1950 (2000-2002)	—
2	24cm	After 1950 (1976-1978)	—
3	30cm	After 1950 (1955)	—
4	56cm	1910-1927	1927 tsunami
5	63-73cm	1877-1917	—



Source: JICA Study Team

図 3-1 1 JICA 調査団による放射性年代測定試験結果



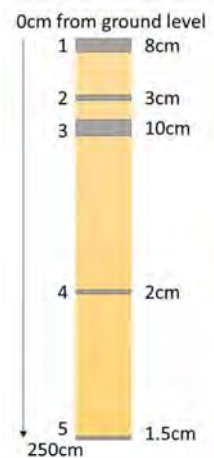
Source: JICA Study Team

図 3-1 2 Image of Tsunami Sediment Layers based on Radio Active Analysis

表 3-4 LIPI による津波堆積層と JICA 調査団による年代試験

Layer	Depth	Maximum Thickness	Possible Tsunami Event
1	8cm	8cm	28 Sep 2018
2	30 - 40cm	3cm	After 1950
3	50 - 60cm	10cm	1927 (from dating test)
4	160cm	2cm	----
5	250cm	1.5cm	----

Source: JICA Study Team



第 4 章 今次津波の特徴とハザードマップの作成

4-1 過去の津波被害調査

一般に津波のハザードマップを作成する際は、統計資料（過去の浸水被害）に基づいて対象津波の規模や発生頻度を設定し、シミュレーションにより浸水範囲の予測を行う手順となる。そこで、過去の津波被害、観測データについて調査を行った。

4-1-1 インドネシアで発生した主な津波被害

インドネシア周辺では過去 100 年だけでも 24 回の津波被害が発生している。表 4-1 に過去 30 年間におけるインドネシア周辺で発生した津波被害の概要を示す。このうち、1990 年から 2018 年の期間では、2004 年 12 月にスマトラ島北西部のインド洋で発生した M9.1 の地震により発生した津波が最大として記録されている(図 4-1)。この津波により 30 万人を超える死者・行方不明者とインド洋沿岸の広範囲に住む 5 百万の人々に影響を与えた。



Source: JICA Study Team

図 4-1 スマトラ沖地震の震源

表 4-1 インドネシア周辺での主な津波被害

No.	Date	Region	Source	Comments
1	22 Dec 2018	Sunda Strait	Volcano	Dead: more than 400 people
2	28 Sep 2018	Sulawesi (Palu)	Earthquake (7.5)/ Landslide	Dead: more than 3,000 people
3	25 Oct 2010	Sumatra (Mentawai)	Earthquake (7.8)	Dead: more than 400 people
4	30 Sep 2009	Sumatra (Padang)	Earthquake (7.6)	Dead: more than 1,000 people
5	17 Jul 2006	Jawa	Earthquake (7.7)	Tsunami height: 5-7m
6	26 May 2006	Jawa	Earthquake (6.3)	Dead: more than 5,000 people
7	26 Dec 2004	Sumatra	Earthquake (9.1)	Dead: more than 165,000 people
8	2 Jun 1994	Java	Earthquake (7.8)	Tsunami height: max 11m
9	11 Dec 1992	Flores	Earthquake (7.8)	Dead: more than 2500 people

Source: EM-DAT (The Emergency Events Database website), Mercy Corp website

4-1-2 スラウェシ島で発生した主要な津波

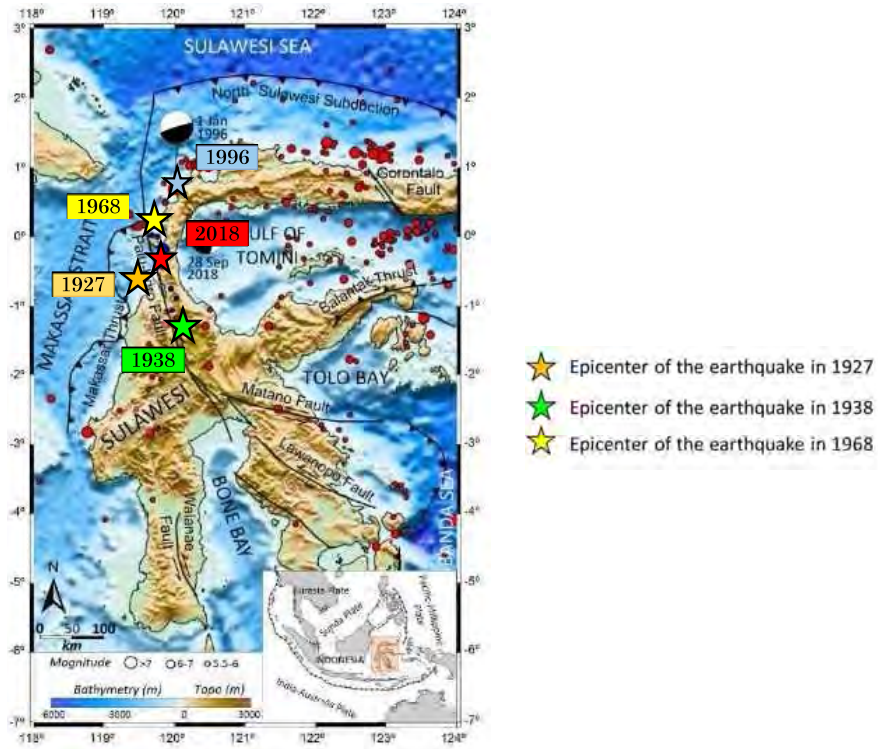
スラウェシ島で発生した津波調査を行った結果、1820 年以後には計 14 の津波到来が確認されている。このうち地震規模が大きい津波を表 4-1、図 4-2 に示すが、1927 年の Donggala で報告されている高さ 15m の津波は震源が湾内か湾外かの位置が不明であり、また津波被害エリアも不明な状況であった。また、1968 年も高さ 10m の大きな津波が報告されているが、Tambu はパル湾より北方 60km 以上離れ、浸水深、津波高に関する記録は少ない状況であり、1938 年、1996 年の震源もパル湾から遠く、確認された津波高は 3m 程度であった。以上のように、2018 年以前にパル湾で発生した津波は、津波高、浸水深、被害範囲といった数値解析で再現確認できる精度の記録が存在しない状況であった。

表 4-2 過去調査による津波発生歴

Year	Magnitude (M)	Wave height (m)	Place
1927	6.3	15	Donggala
1938	7.6	3	Nambu
1968	7.4	10	Tambu
1996	7.7	3.4	Tonggolobibi
2018	7.5	1 – 9	Palu Bay

※2018年津波の観測位置を4-2-3に示す

Source: Hamzah et al. (2000), Pelinovsky et al. (1997), JICA Study Team



Source: Omira et al. (2019), JICA Study Team

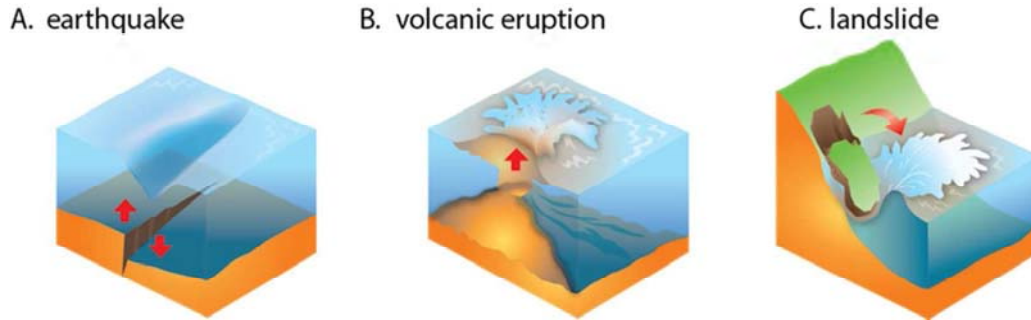
図 4-2 スラウェシ島周辺で発生した主な地震の震源位置

4-2 2018年津波発生メカニズムと特徴

4-2-1 2018年津波の原因と評価

NOAA（アメリカ海洋大気庁）によれば、津波は地震、海底火山噴火、地すべりによって引き起こされる一連の波と定義されている。津波の発生源を図4-3に示す。パル湾での2018年の津波は主に地すべりを原因として発生したことが確認されている（図4-3-C）。

2018年の津波では、複数の地すべり発生が動画や写真で確認されており、その概要を図4-4に示す。



Source: University of Hawaii website

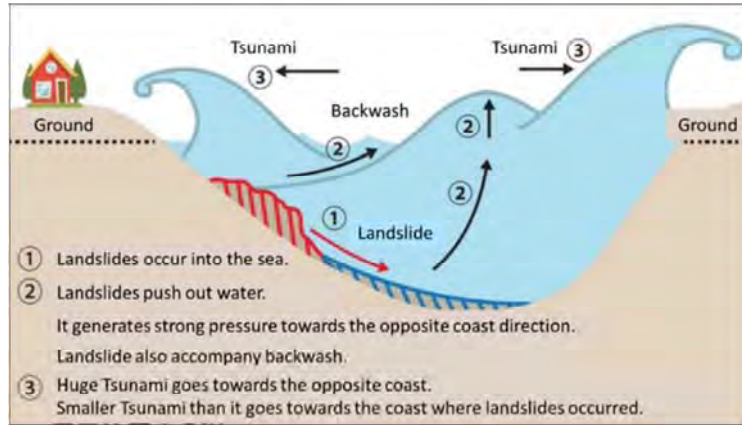
図 4-3 津波の原因



Source: JICA Study Team

図 4-4 パル湾における地すべり（2018年）

地すべりによる津波の発生メカニズムを図 4-5 に示す。最初発生した津波は地すべりが発生した湾の反対側に到達する。その後、地すべりが発生した海岸に向けて発生時より小さい津波が戻ってくることを示している。



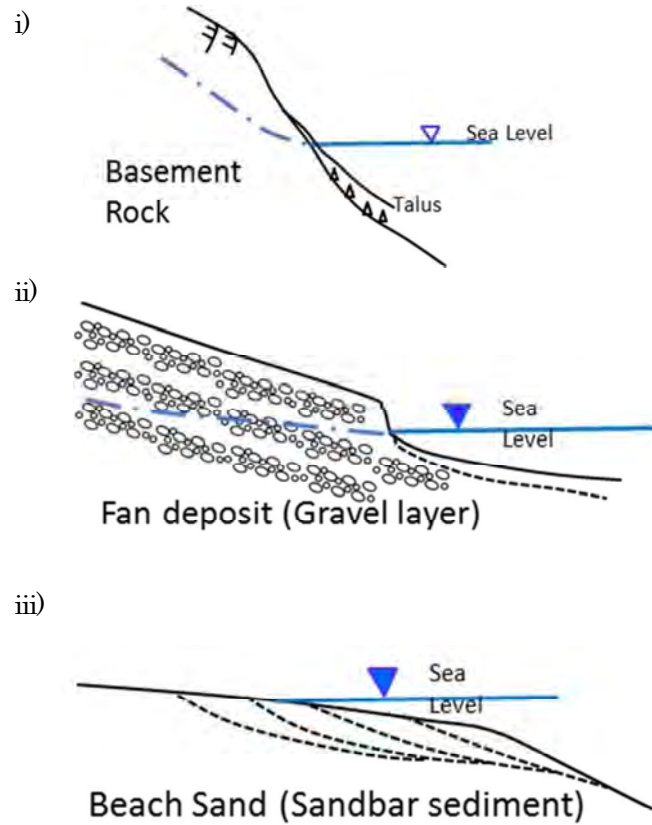
Source: Jakarta Shinbun

図 4-5 地すべりによる津波のメカニズム概要

パル湾の海底地形は、水深 500m より深い海底谷が南北に連なり非常に急峻であることに加え、パル川などの主要河川からは大量の碎屑物がパル湾に供給されていることから、将来も地すべりを発生させる環境にある。活動度の非常に高い palu-koro 断層が 2018 年と同一規模の地震を発生させると同一規模の津波が発生するリスクは高いと考えられる。

4-2-2 2018年地震における地すべりの特徴

2018年に発生した津波は、いくつかの地すべりによって発生している。一般に、沿岸地域の地形的条件は、図 4-6 に示す i) 基盤岩、ii) 扇状堆土（砂利層）、iii) 浜砂（砂州堆積物）の3タイプに分類される。



Source: JICA Study Team

図 4-6 地すべり区分

現地調査の結果、地すべりはパル湾周辺の16箇所で確認された（表 4-3 のA～P地点）。すべての地すべりは河口の砂州堆積物（上図区分のiii）に該当して発生しており、河川からの流出によって運ばれた砂、砂利は、地震動によって液状化または流動化したと考えられる。

表 4-3 パル湾の地すべり箇所と区分

Points	i) Basement Rock	ii) Fan deposit	iii) Sandbar sediment at the estuary	Comments
A			✓	
B			✓	
C			✓	
D			✓	
E			✓	
F			✓	
G			✓	
H			✓	Palu river
I			✓	Palu river
J			✓	
K			✓	
L			✓	
M			✓	
N			✓	
O			✓	
P			✓	
Total			16	



Source: JICA Study Team

Locations of Coastal Landslides

先に述べた通り、今次津波は河口部に堆積した土砂の地すべりが原因と推定される。このため、今実津波を再現する目的から、沿岸部の河川流域を推定した結果を図 4-7 に示す。ただし、この図と降雨強度から河口部の堆積土砂量の試算を試みたが、津波規模に影響する地すべり発生の順序を特定することができず、本手法による今実津波の再現には至らなかった。

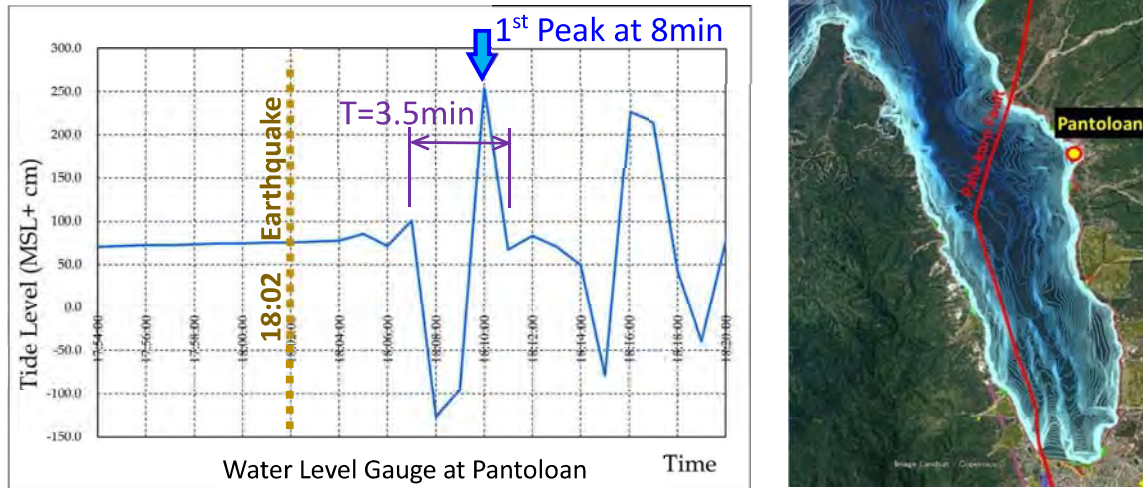


Source: JICA Study Team

図 4-7 パル湾に流入する河川とその流域

4-2-3 2018 年津波の潮位観測データ

パル湾東側の Pantoloan 港に設置されている潮位観測所で計測された、2018 年津波発生の水位データを図 4-8 示す。津波周期は約 3.5 分、地震の揺れが始まってから最初の津波高のピークは約 8 分後に記録されている。



Source: Balai Pantai

図 4-8 Pantoloan 観測所での 2018 年被災時水位

4-2-4 2018 年津波の浸水範囲

2018 年津波における浸水範囲を調査した結果、図 4-9 に示すパル湾南岸にて最大浸水距離 (約 350m) が確認された。



Source: JICA Study Team

図 4-9 パル湾での津波浸水エリア

4-2-5 2018 津波の特徴

2018年にパル湾で発生した地すべりによる津波の特徴は、海溝型地震による津波と異なる。下記および表 4-4にこの2つの津波の特徴を示す。

- 地すべりによる津波（今次津波）
 - ✓ 地震発生後、3～5分と比較的早い時間で海岸線に到着すると想定される。
 - ✓ 短い期間の地すべり津波は壊れやすく、流速は早い。
 - ✓ 津波周期が短いため、海溝型地震による津波と比較して浸水域は広くない。
- 海溝型地震による津波の特徴
 - ✓ マカッサル海峡は、Donggala から約 70km、パル市から 100km の距離に位置する。この津波は地震発生から 20 分以上経過してパル湾の海岸線に到着すると想定される。
 - ✓ 長波周期の津波でその周期は徐々に増加し、波の勢いは維持され、壊れにくい。

表 4-4 2018 年津波の特徴

	Cause of Tsunami	
	Coastal Landslides	Fault Rupture
Time of Arrival	Quick → Difficult to Evacuate	Slow
Wave-Length	Short → Easy to Reduce Energy of Tsunami	Long

Source: JICA Study Team

4-3 津波ハザードマップの作成

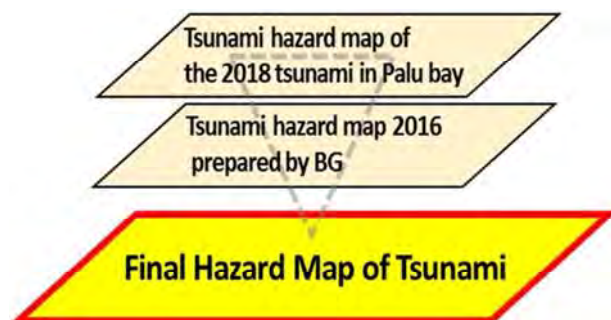
4-3-1 津波ハザードマップの作成方針

地震の震源からの揺れから発生する津波のハザードマップ※を作成する際は、過去の浸水被害に基づいて対象津波の規模や発生頻度を設定し、シミュレーションにより浸水範囲の予測を行う。しかし、スラウェシ島では4-1に示したように、2018年以前に発生した津波に関して、先のシミュレーションに必要なデータが存在していない状況であった。

このため、現地調査結果を基にした今次津波の浸水深データを基礎資料として津波ハザードマップを作成した。なお、この浸水深データの扱いについては、国内支援委員会の委員である有川先生（中央大学教授）より、調査当初の浸水深データにスプラッシュやセットアップ効果が含まれていることをご助言頂き、再度、浸水深確認調査を実施した。浸水深調査で得られた各ポイントの浸水深データを基に等深線図を作成し、沿岸エリアの面的な浸水深を内挿した上でハザードマップを作成した。なお、標高取得のための地盤データは、パル湾南岸部エリアはドローン測量、その他沿岸エリアはデジタル衛星情報（AW3D、2mメッシュ）を用いた。

一方、海溝型地震により発生する津波のハザードマップは、BG（地質庁）が2016年にマカッサル海峡を震源としたものが作成済の状況であった。そしてBGとの協議より、JICA調査団作成の地すべりによる津波ハザードマップと、BG作成の海溝型地震による津波ハザードマップを重ね合わせることを要望を受け、図4-10に示すイメージで本作業についても実施した（マップの重ね合わせについては4-3-3に示す）。

なお、BGが作成したハザードマップは、AusAID（オーストラリア国際開発庁）が2013,2014年にProbabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA)モデルを用いてシミュレーションを実施して作成されており、解析結果の信頼性は確保されているものと判断した。



Source : JICA Expert, JICA Survey Team

図 4-10 津波ハザードマップの重ね合わせ作業イメージ

※ハザードマップについて：

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

(1) JICA 調査団による浸水調査

2018 年津波後にパル湾で実施した津波浸水範囲を図 4-1-1 に示す（調査概要を 3-2、詳細調査結果を 1-1-1 に示す）。



Source: JICA Study Team

図 4-1-1 JICA 調査団による現地調査ポイント

(2) 津波ハザードマップの評価と作成

日本のガイドラインに従って被害レベル（人と建物の被害）をまとめた結果を表 4-5 に示す。地すべりによる津波については、以下の理由により、表 4-6 に示す基準に基づいて津波ハザードマップを作成することとした。

- ✓ 浸水深さが 0.3 m 未満の場合、建物に小さな損傷が発生し、この状況では徒歩での避難が容易となる。
- ✓ 浸水深が 1m を超えると、徒歩での避難が困難になり、構造の弱い建物の一部が倒壊する原因となる。
- ✓ 浸水深さが 3m を超えると、上層階が水没し、構造の弱い建物のほとんどが倒壊することが想定される。
- ✓ 今次津波が発生した場合、2 階に避難できれば、深さ 3 m の浸水に対して避難することが可能となる。したがって、ハザードレベル（HL）3、4 の閾値は 3m に設定する。

表 4-5 Summary of Damage Status during Tsunami

Inundation depth	Damage Status	
	People	Buildings
—3.0m—	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Only People on the upper floor can survive 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Almost all Buildings with weak structure like wooden houses would collapse ➢ Upper floors would submerge even if buildings remain
—2.0m—		<ul style="list-style-type: none"> ➢ More than half of buildings with weak structure would collapse ➢ Ground floor would submerge
<u>1.0m</u>	<ul style="list-style-type: none"> ➢ People cannot evacuate on foot ➢ Some people cannot survive on the ground floor or outside 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Some of buildings with weak structure would collapse
—0.3m—	<ul style="list-style-type: none"> ➢ People can evacuate on foot, but with difficulty ➢ People can evacuate on foot with ease 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Buildings would have miner damage

Source: Source: 内閣府（防災担当）：南海府トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）追加資料、2012

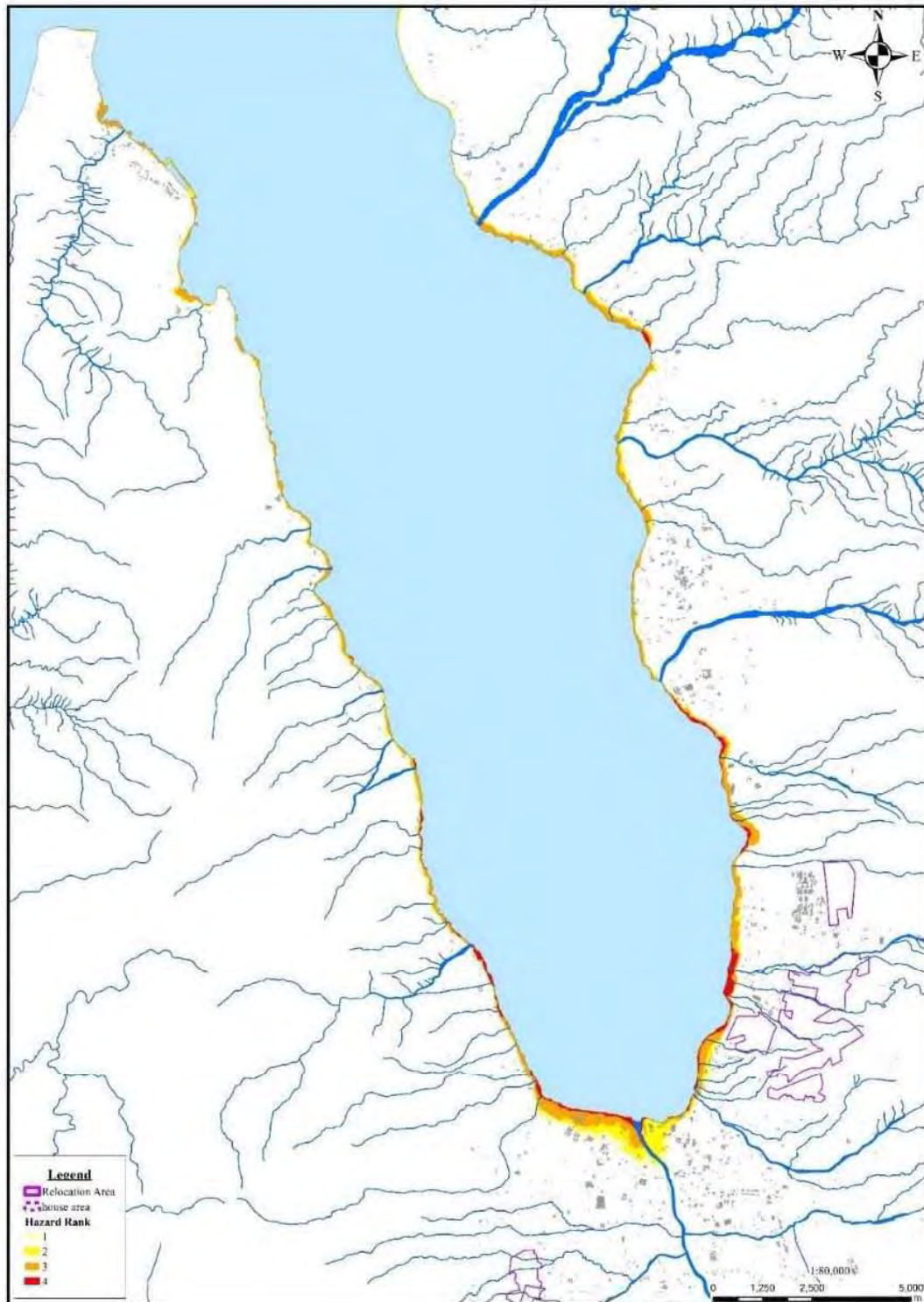
表 4-6 Classification of Tsunami Hazard Map Proposed by JICA Study Team

Hazard Level		Inundation depth
4	Extremely High	> 3m
3	High	1-3m
2	Medium	0.3-1m
1	Low	0-0.3m

Source: JICA Study Team

4-3-2 JICA 調査団によるハザードマップ

JICA 調査団が作成し今次津波のハザードマップを図 4-1 2 に示す。



Source: JICA Study Team

図 4-1 2 津波ハザードマップ (JICA、2018)

4-3-3 BGにより作成された津波ハザードマップとの重ね合わせ

2016年にBGがマカッサル海峡の海溝型地震による津波ハザードマップを作成するにあたり、AusAIDが実施したシミュレーションの概要を図4-13に、これをもとにBGが作成したパル湾の津波ハザードマップの概要を図4-14に示す。この結果より、海溝型地震による津波の再現期間は2500年となる。

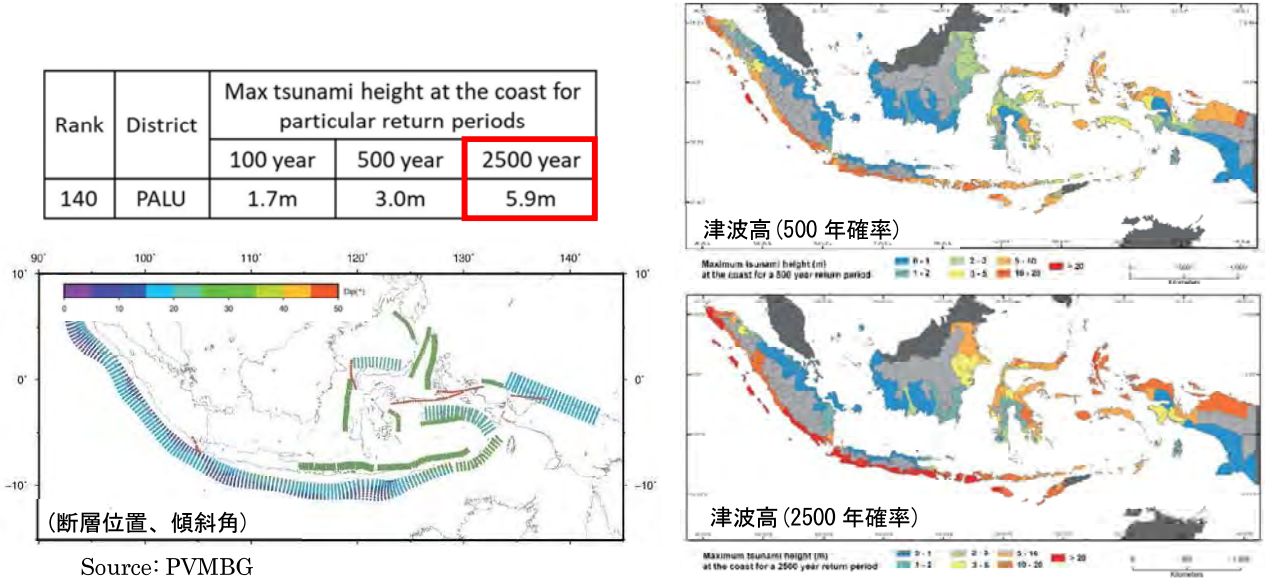


図 4-13 AusAIDによる津波シミュレーション概要

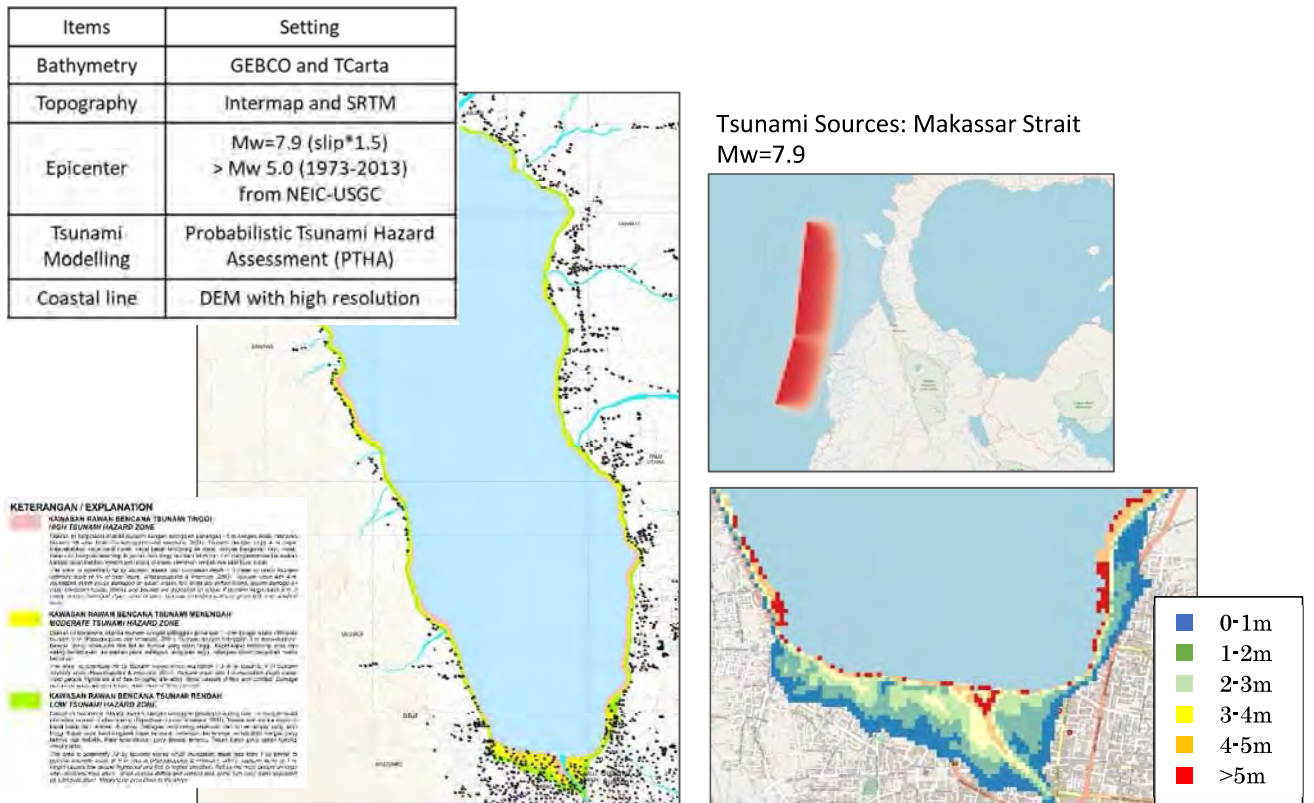


図 4-14 BGによるパル湾の津波ハザードマップ概要

BG の要望より 2016 年のハザードマップを JICA が作成した 2018 年津波のハザードマップへ重ねる作業を実施した。ここで、BG が作成したハザードマップは表 4-7 に示すように浸水深 3m、1m を閾値とした 3 段階に分類されていた。

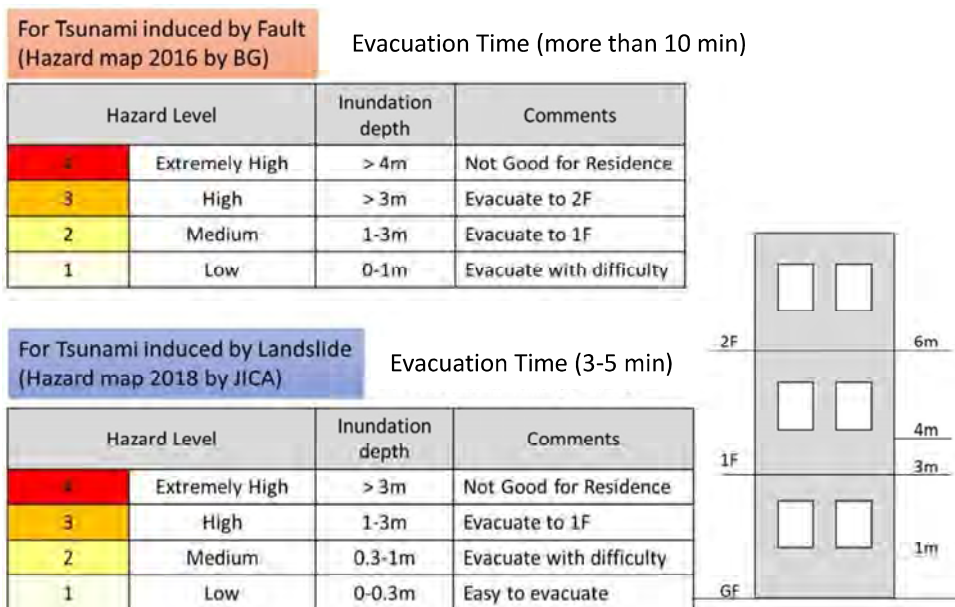
表 4-7 BG が作成したハザードレベル区分 (3 段階)

Hazard Level	Definition by BG
High	Inundation depth: more than 3m Intensity scale: VII or more
Medium	Inundation depth: 1m to 3m Intensity scale: V- VI
Low	Inundation depth: less than 1m Intensity scale: V or less

Source: JICA Study Team

そこで JICA 作成のハザードマップと同じ 4 段階とするため、以下の方針で見直しを行った (図 4-15)。

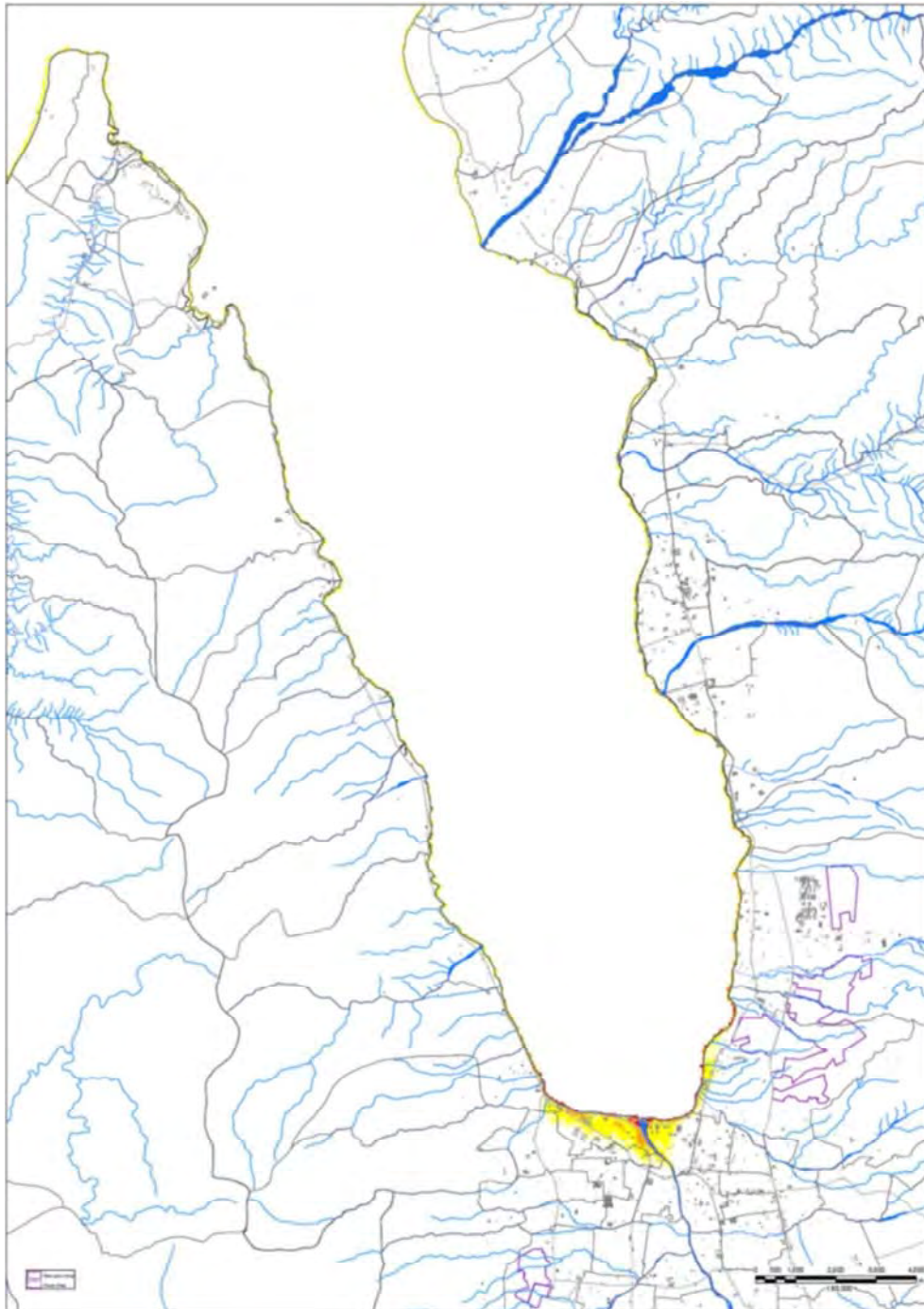
- ・最も危険としていた 3m 以上の浸水深に 1 ランク上の 4m を新たな閾値として設定する。
- ・今次津波と比較して津波到達までの時間が長い場合、同じ浸水深であっても、より長い避難時間を確保できる海溝型地震の津波は、今次津波よりハザードレベルを下げる。
- ・上記のように BG のハザードレベルを 4 段階に分類した上で、JICA 作成のハザードレベルと異なる箇所はレベルの高い方を採用する。



Source: JICA Study Team

図 4-15 2016 年ハザードマップのハザードレベルの変換

BG が 2016 年に作成した海溝型津波に対するハザードマップを図 4-16 に示す。

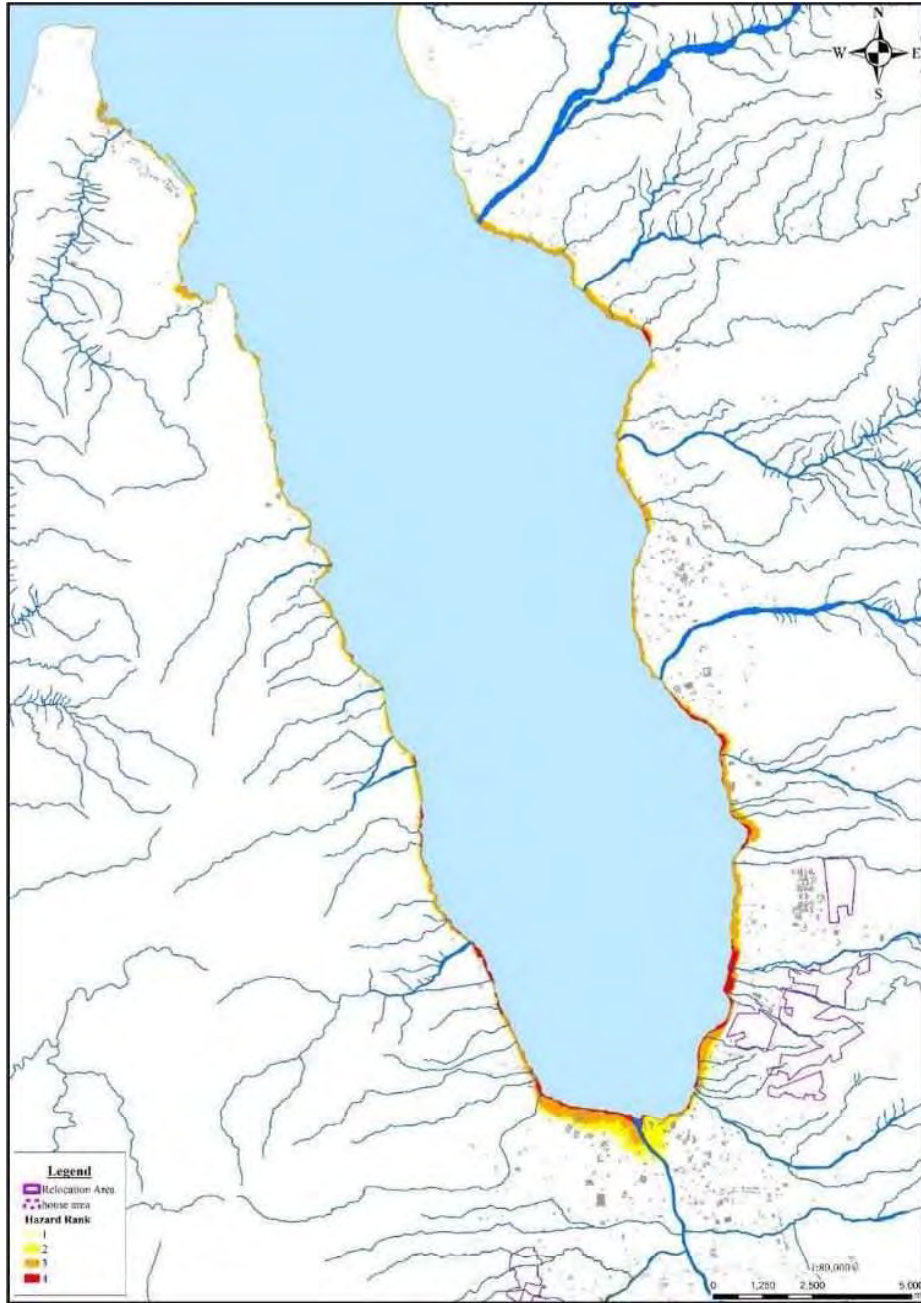


Source: PVMBG

図 4-16 津波ハザードマップ (BG 作成、2016)

4-3-4 JICA と BG を重ね合わせた津波ハザードマップ

JICA が作成した対策前の津波ハザードマップと BG が 2016 年に作成した津波ハザードマップを重ね合わせたマップを以下に示す。



Source: Prepared by JICA Study Team

図 4-17 津波ハザードマップ (JICA、BG 重ね合わせ後)

第 5 章 津波対策の基本方針

5-1 設計対象津波

津波対策には一定の予算を要することから、下記に示す条件を踏まえて設計対象津波を決定する必要がある。

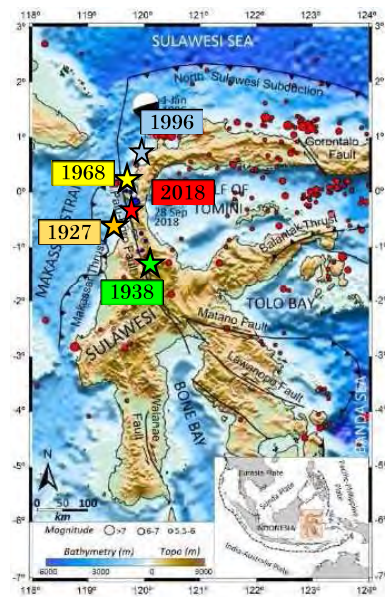
＜設計津波選定条件＞

- ・一定精度の観測データを有する津波から選択する。
- ・高～中程度の発生頻度の津波から選択する。

上記条件に対して、4-1に記載したように、スラウェシ島で比較的大きな津波が報告されている1927年、1968年については、震源位置が不明確なほか、震源がパル湾から遠く離れていたり、津波高、浸水深、津波被害などの正確な記録も残っていない状況であった（2018年を除くほかの津波についても同様）。また3-4で示した地層年代調査結果より、今次津波の再現期間が約100年程度と発生頻度が比較的高いと判断できることを踏まえ、条件に適合する「2018年9月28日に発生した津波（今次津波）」を設計対象津波とした。

Year	Magnitude (M)	Wave height (m)
1927	6.3	15
1938	7.6	3
1968	7.4	10
1996	7.7	3.4
2018	7.5	1-9

- ★ Epicenter of the earthquake in 1927
- ★ Epicenter of the earthquake in 1938
- ★ Epicenter of the earthquake in 1968



Source: Omira et al. (2019), JICA Study Team

図 5-1 スラウェシで発生した地震・津波履歴

5-2 ハード対策による津波対策範囲の設定

パル湾沿岸は、地形的特徴や土地利用（人口分布）の条件が地域によって異なる状況にある。

ハード対策による津波対策をパル湾沿岸全てに対策を講じることは予算面、工期面で困難であるため、優先対策範囲を選定した。津波対策の優先範囲は下記条件に適合することを条件として、図 5-2、図 5-3を参考に「パル湾南岸部の4km区間」を選定した。

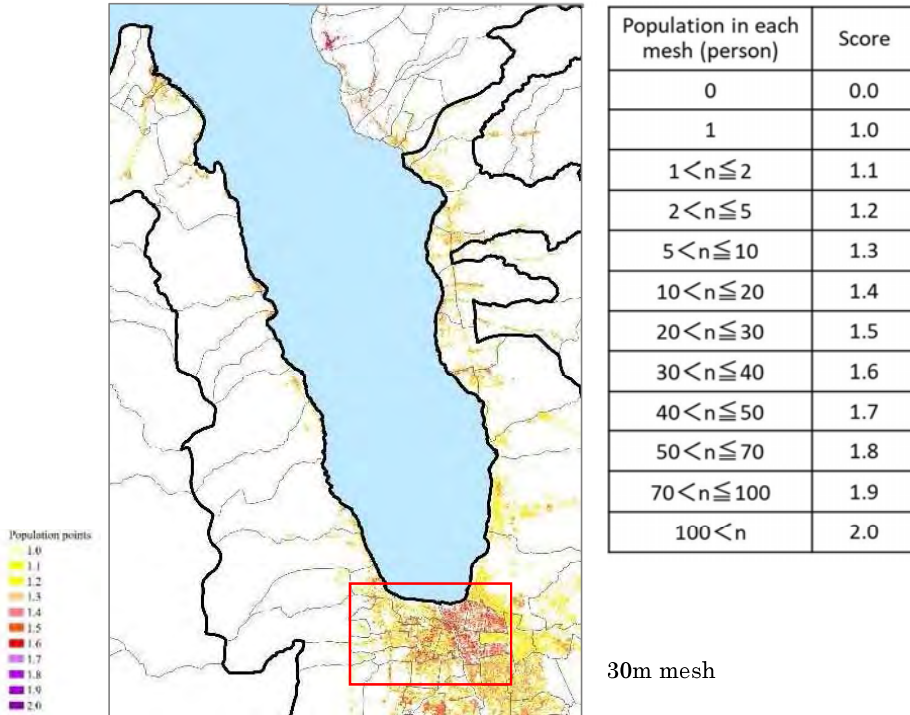
＜津波対策範囲設定条件＞

- ・人口、建物（資産）分布が高いこと（対策による受益者が多いこと）
- ・津波による浸水深が深く、浸水範囲が広いこと

なお、4-3に示した津波ハザードマップで、BGが対象としている海溝型地震による津波は、今次津波よりも再現期間が長く（約2500年）、津波規模も大きい。このため本津波に対しては、社会経済活動とのバランスを考慮した日本の津波対策に倣い、住民の避難を軸に、土地利用、避難施設の整備などソフト・ハードを総動員する「多重防御」の発想による防災・減災対策を基本とする。避難計画の基本方針は第9章を参照のこと。

以下に、災害リスクマップを作成する際に整理した人、建物（資産）分布マップを示す。これよりパル湾南岸に人、建物が多く分布していることが分かる。

Population Distribution Map



Asset (Building) Distribution Map

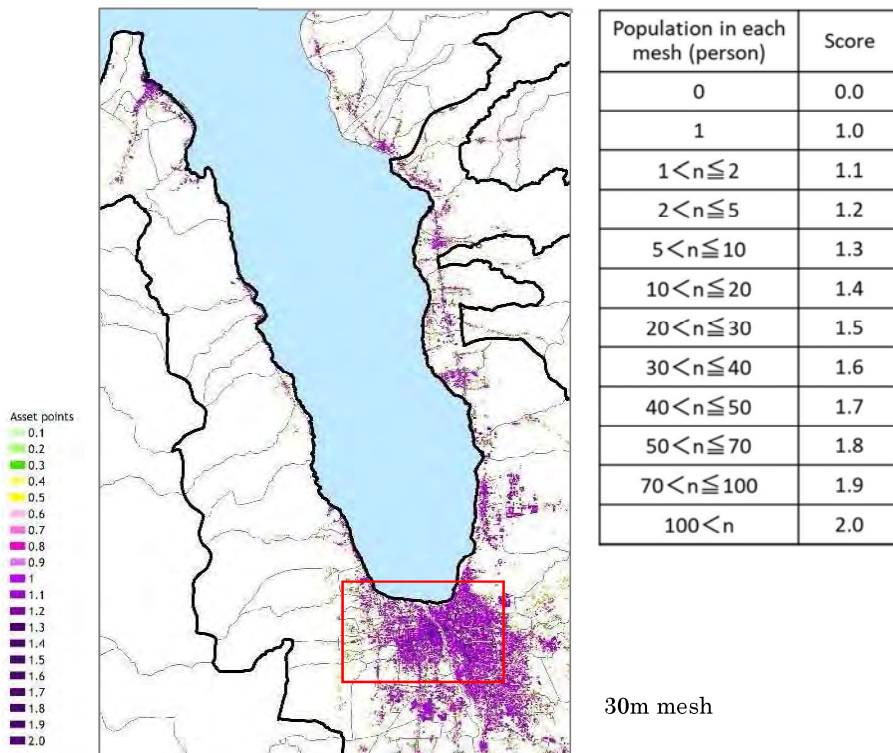
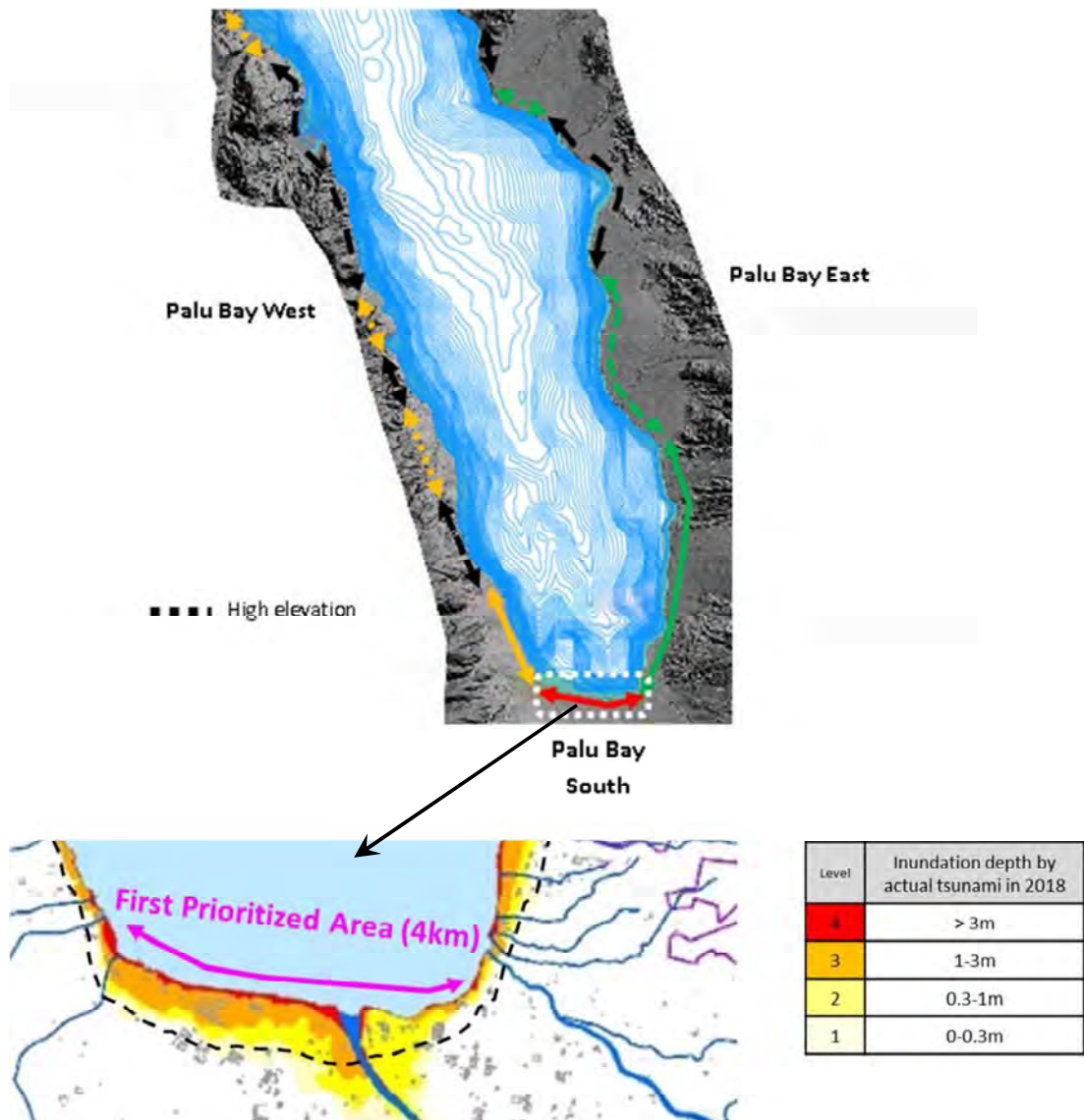


図 5-2 人、建物（資産）分布マップ

Terrain characteristics		Flat, wide beach			Narrow beach		
Land use (population)		Low	Medium	High	Low	Medium	High
		■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■	---
Applicable countermeasure	Inland forest, Mangrove planting	✓ ✓	✓	✓			---
	Relocation	✓ ✓	✓	✓	✓ ✓	✓	---
	Elevated road		✓	✓ ✓		✓	---
	Building code	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	---



Source: JICA Study Team

図 5-3 パル湾沿岸の特徴と津波対策範囲の選定

5-3 基本方針の選定

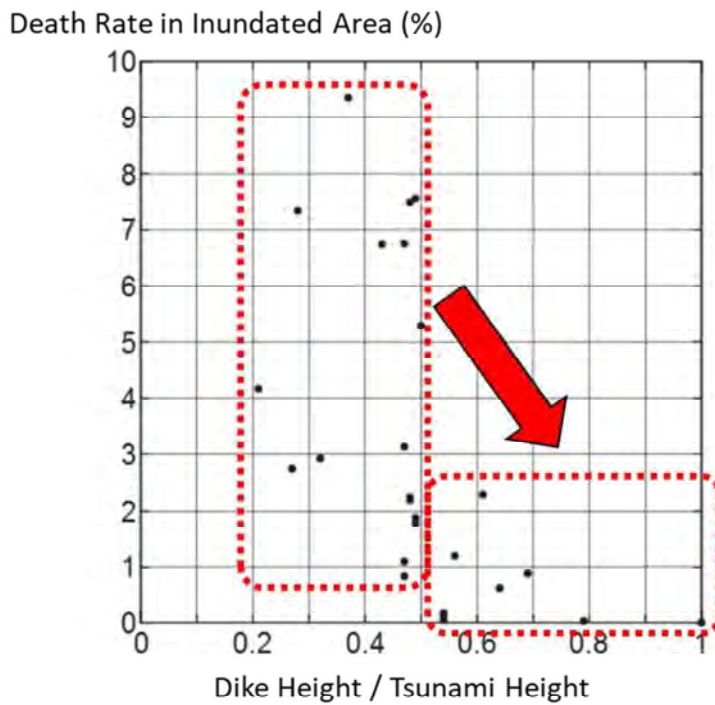
津波対策には大きく分けて、堤防などの構造物（ハード）対策と土地利用規制などの非構造物（ソフト）対策の2つに大別される。

ここで、日本における津波対策では明治以降、構造物対策としての堤防を中心とする対策を講じてきたことで、人的被害の軽減に加え、経済被害の軽減にも対応してきた(表 5-1、図 5-4)。この経験を踏まえ、インドネシア側と協議した結果、パル湾における津波構造物（ハード）対策は堤防構造を基本とした。

表 5-1 日本三陸沿岸部の津波人的被害の違い

	(A) Tsunami in 1896	(B) Tsunami in 2011	(B) / (A)
Magnitude	8.3	9.0	↑
“Number of Dead and Missing” / “Whole Population in Inundated Area”	20.3%	3.6%	↓

Source: Motoyuki Ushiyama and Saki Yokomaku, “Characteristics of Human Damage”, Disaster Information, No.10, 2012



Source: Taro ARIKAWA, Toru NOJI, Hiroaki HIRAANO and Masato ENDO, “Consideration of Seawall Effect on Tsunami Evacuation”, Collection of Papers by JSCE, 2016

図 5-4 津波高、堤防高と人的被害の関係

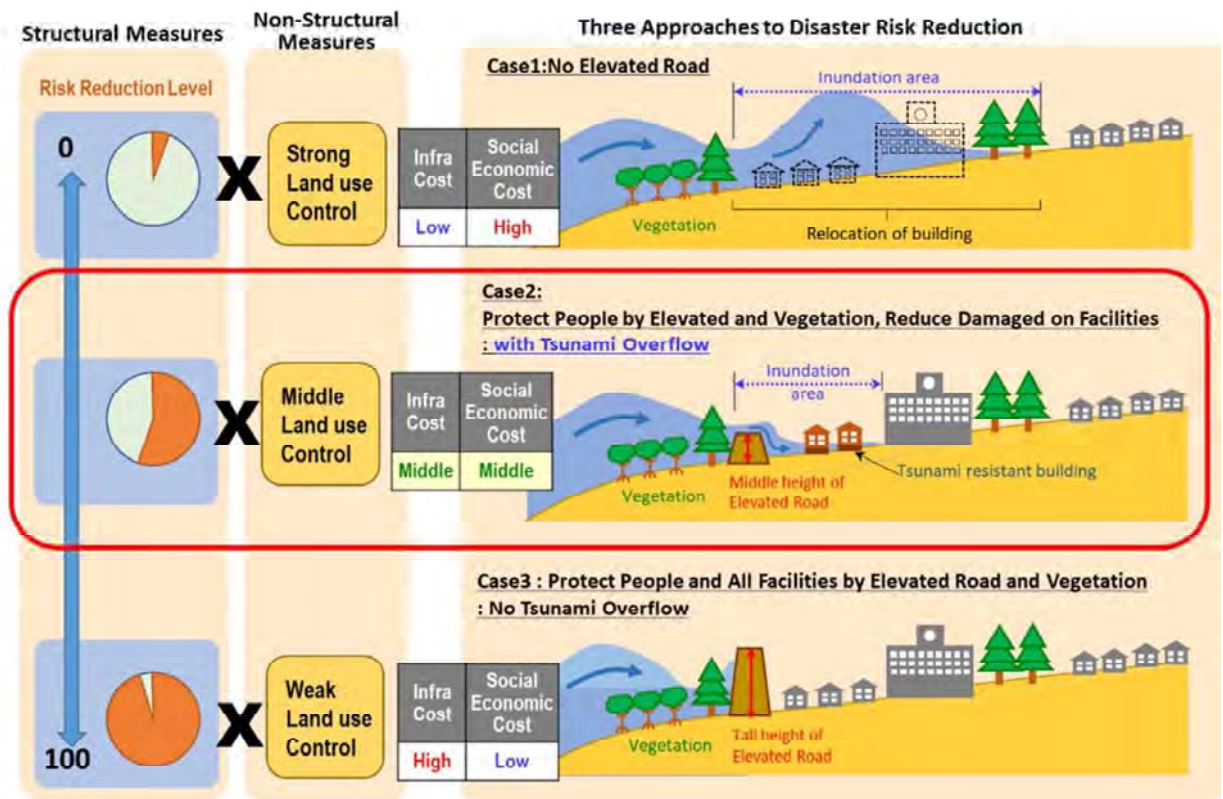
構造物対策と非構造物対策の組合せとして考えられる3案の概要とコスト評価を図 5-5に示す。

上段の構造物対策（堤防）のみで対策しようとした場合、構造物費用が高くなりすぎる課題があり、これに対して下段の非構造物対策のみで対応しようとするると既存家屋の移転などの社会的コストが高くなりすぎる課題がある。

以上より、構造物、非構造物対策の中間案として、中段に示す対策を津波対策の基本方針として選定した。

＜パル湾南岸部における津波対策基本方針＞

- ・ 構造物対策は嵩上げ道路だけでなく、植生も組合せた計画を基本とする（先方要望事項）
- ・ 日本における津波対策の実績より、堤防のような構造物対策は津波による死亡率を大幅に減じることが確認されている。したがって沿岸には道路ネットワークの再建に合わせて道路を嵩上げすることで堤防機能を付加する（嵩上げ道路と呼ぶ）
- ・ 嵩上げ道路は、対象津波（今次津波）に対して越流することを許容することで嵩上げ道路高を抑制する（コスト縮減、先方政府要望）
- ・ 津波対策は、より良い復興（BBB）の実現に寄与するために、構造物（ハード）対策として嵩上げ道路と植生による外力軽減と、非構造物（ソフト）対策としてハザードマップを基に浸水深に応じた建築規制による避難強化を組合せることで、多重防御の考えを取り入れた災害に強い都市形成を目指す



Source: JICA Expert, JICA Study Team

図 5-5 構造物対策、非構造物対策の組合せによる津波対策

図 5-6 は、パル湾南岸部の津波対策と土地利用規制の概要図であり、海側より嵩上げ道路を含む住居禁止区域、その背面には浸水深に応じた建築規制を設定している状況を示す。



Source: JICA Expert, JICA Study Team

図 5-6 パル湾南岸部の津波対策概要

5-4 許容浸水深の設定

5-3の基本方針に示した通り、嵩上げ道路は越流を許容する方針であり、その許容浸水深は津波に関する日本規準を参考に、建物被害を抑えることができる「1m以下」として設定した(表 5-2)。

表 5-2 津波浸水深に応じた住民、建物への影響

Inundation depth	Tsunami Impact behind Tsunami Dike	
	People	Buildings
—3.0m—	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Only People on the upper floor can survive 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Almost all Buildings with weak structure like wooden houses would collapse ➢ Upper floors would submerge even if buildings remain ➢ More than half of buildings with weak structure would collapse ➢ Ground floor would submerge
—2.0m—	<ul style="list-style-type: none"> ➢ People cannot evacuate on foot ➢ Some people cannot survive on the ground floor or outside 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Some of buildings with weak structure would collapse
—1.0m—	<ul style="list-style-type: none"> ➢ People can evacuate on foot, but with difficulty 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Buildings would have miner damage
—0.3m—	<ul style="list-style-type: none"> ➢ People can evacuate on foot with ease 	

Source: 内閣府(防災担当):南海府トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)追加資料、2012



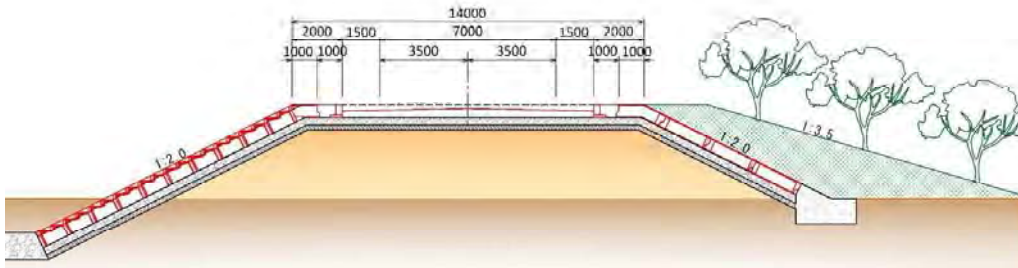
第 6 章 嵩上げ道路計画（必要高の設定）

6-1 概要

第 5 章で津波対策として選定した構造物対策としての嵩上げ道路について、前提条件を満足する必要道路高の設定を行った。なお、インドネシア政府との協議により、今回の津波対策は植生と嵩上げ道路の組合せを基本とすることが要望されており、最終的な構造高は、第 7 章における植生の津波軽減効果の検証結果を踏まえて決定した。

6-2 道路設計条件

嵩上げ道路の標準断面を図 6-1 に、また幾何構造、設計津波に対する条件を表 6-1、表 6-2 に示す



Source: JICA Study Team

図 6-1 嵩上げ道路標準断面

表 6-1 嵩上げ道路設計（幾何構造条件）

Item	Unit	Criteria	Adopted Value	Remarks
Design Speed	km/hr	60	60	
Cross Section				
- Carriageway	m	3.50	3.50	
- Left Shoulder	m	1.50	1.50	
- Sidewalk	Bridge	m	1.00	
	Road	m	1.00	
- Frontage Road	m	4.00	4.00	If necessary
- Shoulder of Frontage Road	m	0.50	0.50	If necessary
Horizontal Alignment				
- Standard Minimum Radius	m	150	TBD	
- Desirable Minimum Radius	m	200	TBD	
- Minimum Radius for Normal Cross-fall (i=2.0%)	m	2,000	TBD	
- Minimum Curve Length	m	100	TBD	
- Standard Minimum of Transition Sections	m	50	TBD	
- Standard Minimum Radius not Requiring Transition Section	m	600	TBD	
- Widening of Lanes	m	0.25	TBD	- less than R=160 - per lane

Source: JICA Study

表 6-2 嵩上げ道路設計（津波条件）

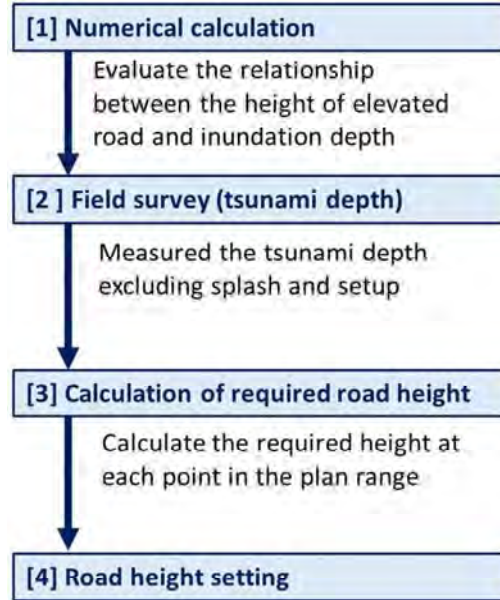
Item	Unit	Adopted Value	Remarks
Design Tsunami Height	m	MSL+5.5	based on 2018 Tsunami
Wave Period	min	3.5	ditto
Tide Level	m	MSL+0.7	ditto
Overflow for Elevated Road	—	Allow	basic concept for measures
Inundation Depth	—	Less than 1.0m	ditto

Source: JICA Study

6-3 嵩上げ道路高の検討

6-3-1 検討フロー

嵩上げ道路の高さは、図 6-2 のフローに従って検討の上、設定した。



Source: JICA Study Team

図 6-2 嵩上げ道路高さ検討フロー

以下に各フローの検討概要とその結果を示す。

6-3-2 数値解析

嵩上げ道路の高さは、表 6-2 に示すように越流後の浸水深を 1m 以下に抑えることを条件として設定した。設計区間の複数個所でこの条件を満足する高さを検討するため、嵩上げ道路高と津波高との関係を定式化することを目的として数値解析を行った。

(1) 解析条件

以下に本数値解析の条件とその結果について示す。

表 6-3 数値解析条件

Items	Values or Method to Set
Input waves	<ul style="list-style-type: none"> • Sin-curve modelled by the wave period recorded in the Pantoloan tide station • Input waves at MSL-10m same as that of Pantoloan tide station • Input wave height is calibrated with the results of post survey (i.e. water mark)
Tide	<ul style="list-style-type: none"> • MSL+0.7m (the tide at Pantoloan during 2018 tsunami)
Region	X: from -5000m to +1000m Z: from -10m to +15m
Grids	DX: from 0.2 to 50m DZ: from 0.1 to 0.5m

Source: JICA Study Team

(2) 解析断面

数値解析を実施する断面に関して、パル湾南岸部の海底地形は図 6-3 に示すように東側と西側で大きく異なる。したがって、それぞれにおいて代表断面を抽出した。

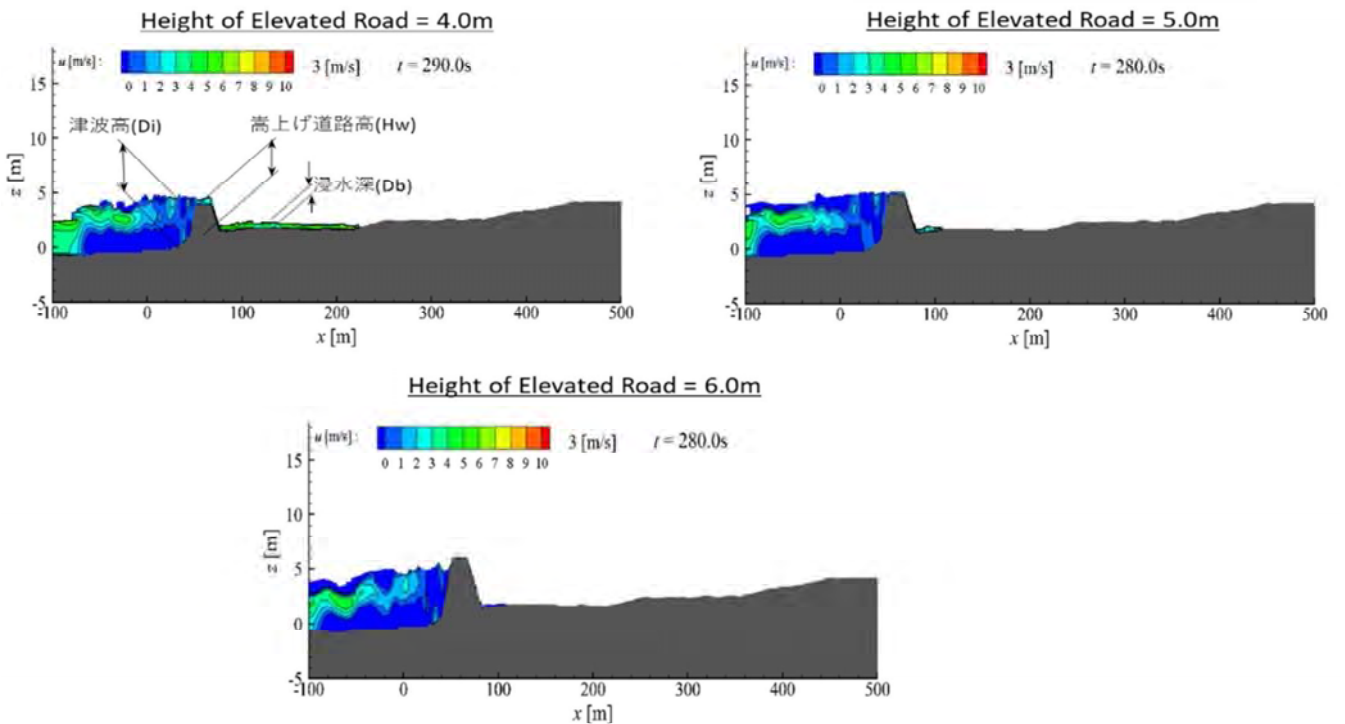


Source: JICA Study Team

図 6-3 数値解析断面の設定 (上段: 海底地形標高線入)

(3) 解析結果

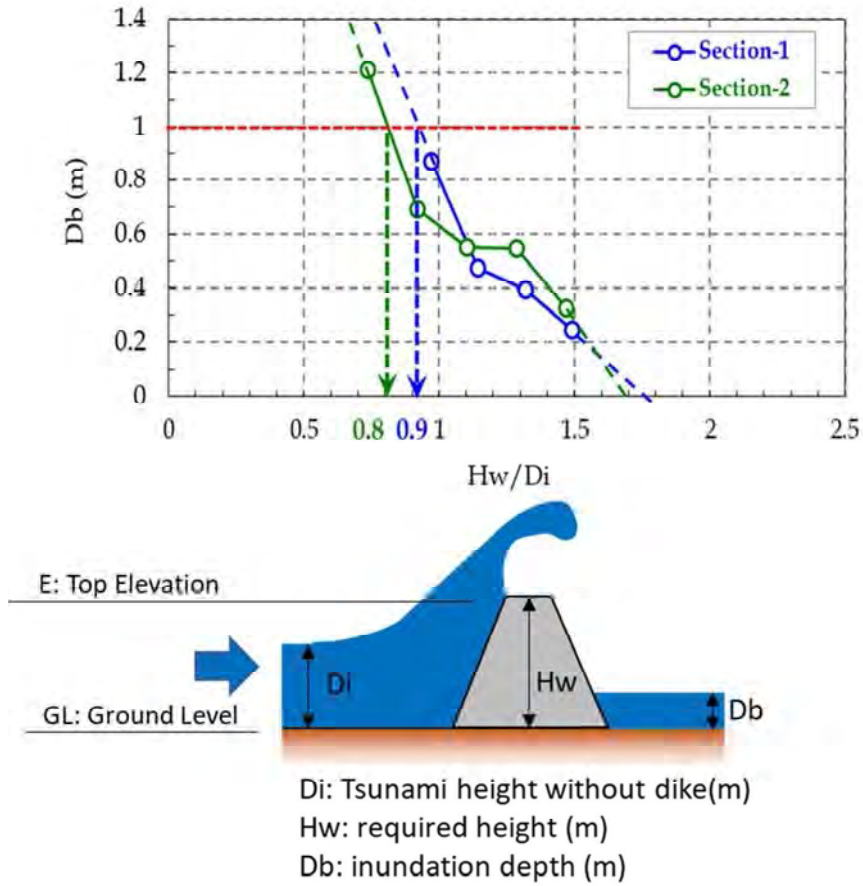
図 6-4 に Section-1 断面において、嵩上げ道路高を 4m、5m、6m と変化させた場合の数値解析結果を示す。



Source: JICA Study Team

図 6-4 数値解析結果 (Section-1)

先に示した嵩上げ道路高を変えた数値解析を他ケースおよび Section-2 断面についても実施し、この結果から得られた浸水深(Db)と嵩上げ道路高(Hw)に対する津波高(Di)の比 (Hw/Di) の関係について整理したものを図 6-5 に示す。



Source: JICA Study Team

図 6-5 数値解析結果（浸水深と嵩上げ道路高/津波高の関係）

この結果より、浸水深が 1m となる嵩上げ道路高と津波高の関係を定式化するための係数 C を表 6-4 に示す。

$$Hw = C * Di \quad (C: \text{constant})$$

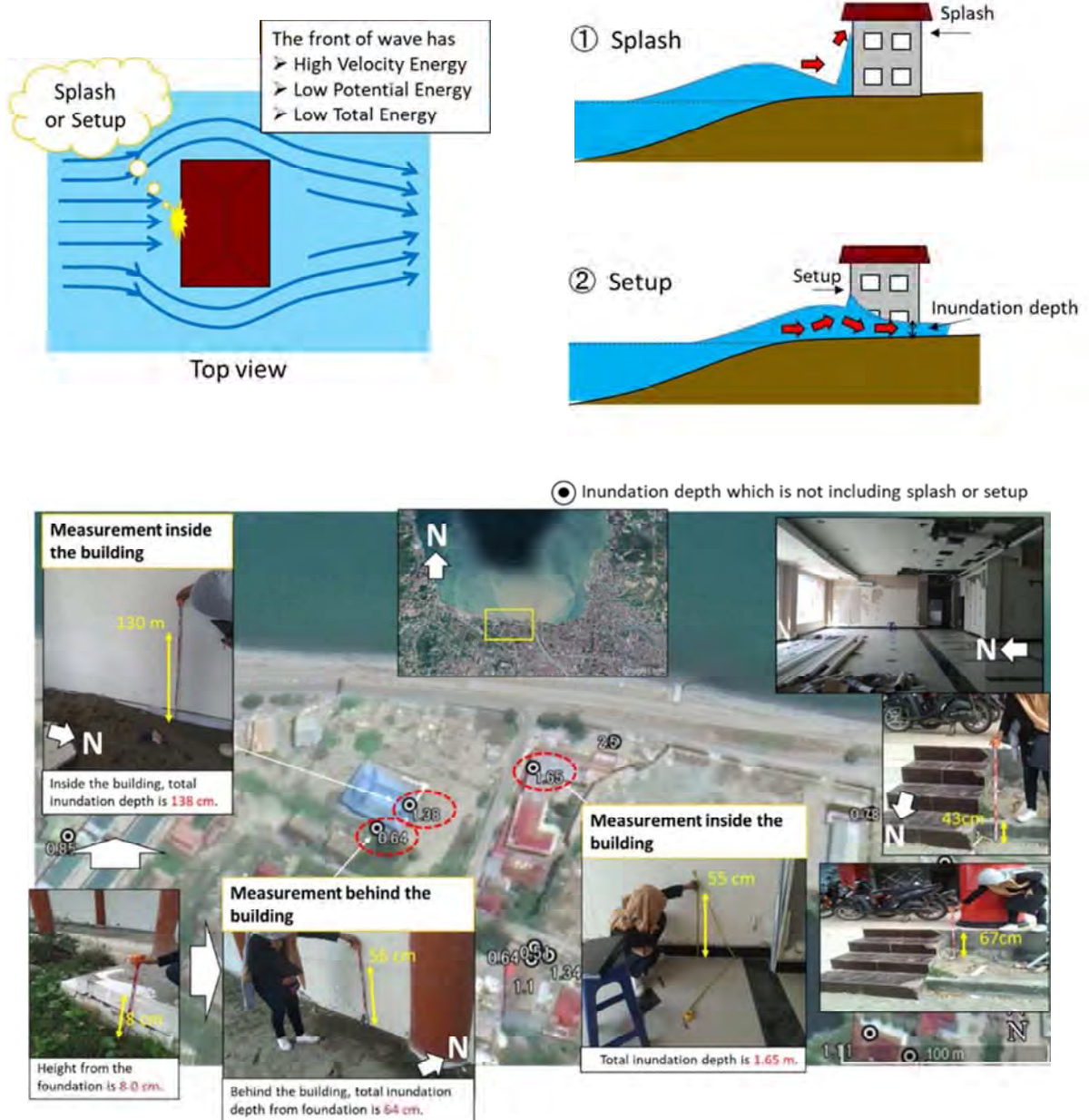
表 6-4 嵩上げ道路高と津波高の関係定式化のための係数 C（浸水深 1m）

Section No.	C
Section-1	0.91
Section-2	0.80

Source: JICA Study Team

6-3-3 津波浸水深調査

必要となる嵩上げ道路高の設定には、対象津波の正確な津波高が必要となる。津波高の調査は被災後にインドネシア政府で実施されていたが、計測値にスプラッシュやセットアップなどの影響が混在して計測されていた。このため計測方法の基準を確認の上、本調査を再度実施した(図6-6)。本調査の概要を3-2に、詳細調査結果を11-1に示す。



Source: JICA Expert, JICA Study Team

図 6-6 津波浸水調査 (上: スプラッシュとセットアップ、下: 調査状況)

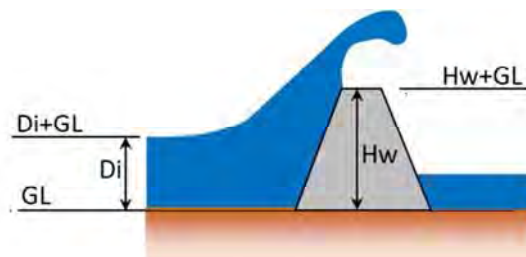
6-3-4 必要嵩上げ道路高の算定と設計嵩上げ道路高

嵩上げ道路計画区間の 4km 内に検討ポイント（全 14 点）を設定し、先の津波浸水深調査から得られた津波高を抽出した。これに対して先の数値解析による津波高と嵩上げ道路高の関係式から、必要となる嵩上げ道路高を算定した結果を表 6-5 に示す。

表 6-5 各検討ポイントにおける必要嵩上げ道路高の集計

No	Block Distance (m)	Distance (m)	Tsunami Depth	Ground Level	Tsunami Depth	Coefficient C	Di x C	Require Level of Elevated Road
			Di	GL(MSL+)	Di' (MSL+)			Hw
No 1	350	2,310	3.9	1.8	5.7	0.91	3.5	5.3
No 2	188	1,960	2.2	2.4	4.6	0.91	2.0	4.4
No 3	222	1,772	2.0	2.2	4.2	0.91	1.8	4.0
No 4	305	1,550	1.5	2.8	4.3	0.91	1.4	4.2
No 5	200	1,245	1.9	3.6	5.5	0.91	1.7	5.3
No 6	236	1,045	2.9	3.6	6.5	0.91	2.6	6.2
No 7	267	809	2.5	3.2	5.7	0.91	2.3	5.5
No 8	170	542	2.7	3.0	5.7	0.91	2.5	5.5
No 9	877	372	2.6	2.6	5.2	0.91	2.4	5.0
No 10	325	-505	1.0	2.4	3.4	—	—	—
No 11	310	-830	2.2	3.4	5.6	0.80	1.8	5.2
No 12	135	-1,140	1.1	4.0	5.1	0.80	0.9	4.9
No 13	325	-1,275	2.6	1.2	3.8	—	—	—
No 14	-	-1,600	3.5	1.2	4.7	0.80	2.8	4.0

Regarding the tsunami depth, No.10 and No.13, which are clearly smaller than others, are excluded from the data for setting the elevated road height.



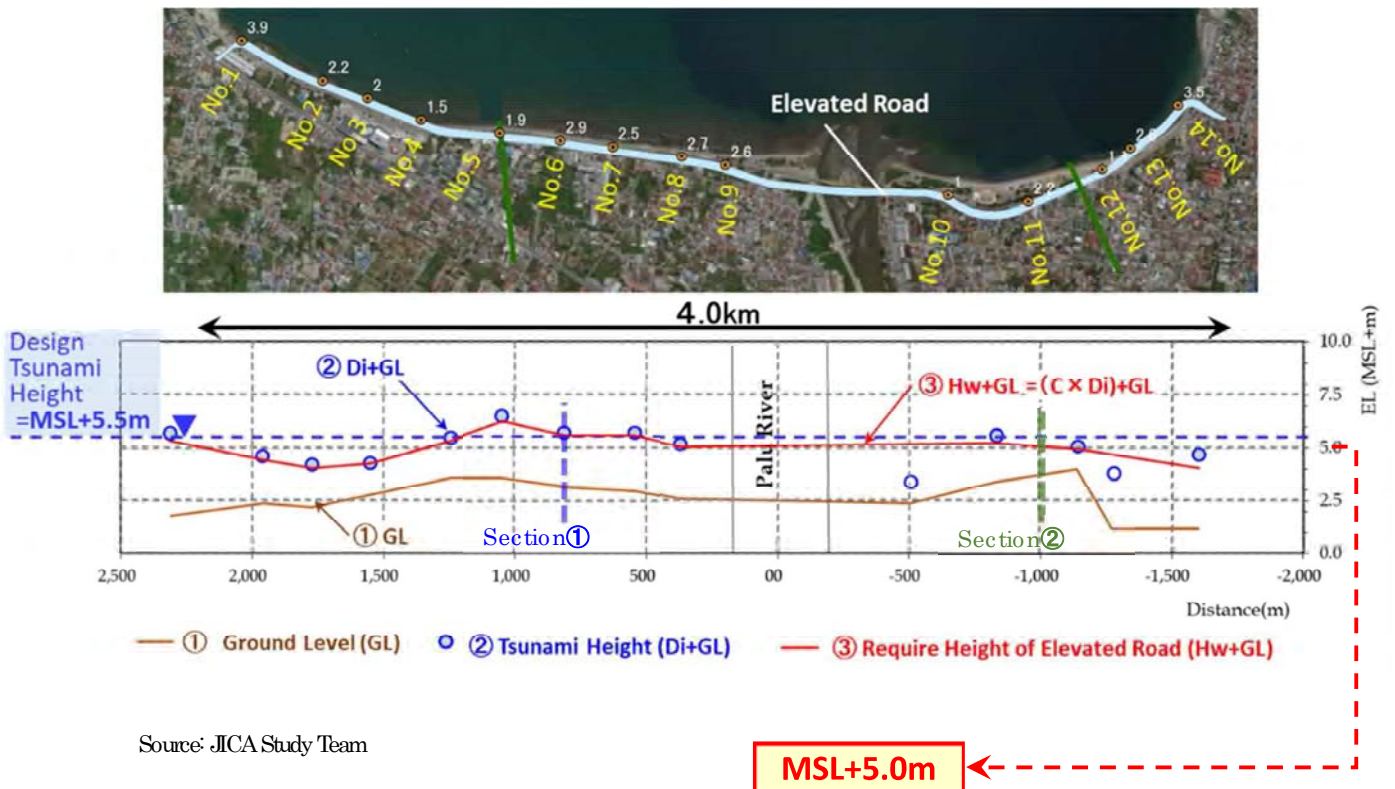
Source: JICA Study Team

設計嵩上げ道路高は、面的に津波に抵抗する構造から、各ポイントの必要嵩上げ高を距離平均し、「MSL+5.0m」に設定した（表 6-6、10cm ラウンド、植生の影響含んでいない）。

表 6-6 設計嵩上げ道路高の設定

No.	Require Level of Elevated Road (MSL+)	Average Height (MSL+)	Distance (m)	Block Distance (m)	Area (m ²)	Sumation (m ²)	Area Distance (m)	Level of Elevated Road	
								Average (MSL+)	Design (MSL+)
No 1	5.3	-	2,310	-	-	19,480.4	3,910.0	4.98	5.0
No 2	4.4	4.9	1,960	350	1,698				
No 3	4.0	4.2	1,772	188	790				
No 4	4.2	4.1	1,550	222	910				
No 5	5.3	4.8	1,245	305	1,449				
No 6	6.2	5.8	1,045	200	1,150				
No 7	5.5	5.9	809	236	1,381				
No 8	5.5	5.5	542	267	1,469				
No 9	5.0	5.3	372	170	893				
No 10	-	-	-	-	-				
No 11	5.2	5.1	-830	1,202	6,130				
No 12	4.9	5.1	-1,140	310	1,566				
No 13	-	-	-	-	-				
No 14	4.0	4.5	-1,600	460	2,047				

Design Height of Elevated Road set to MSL+ 5.0m



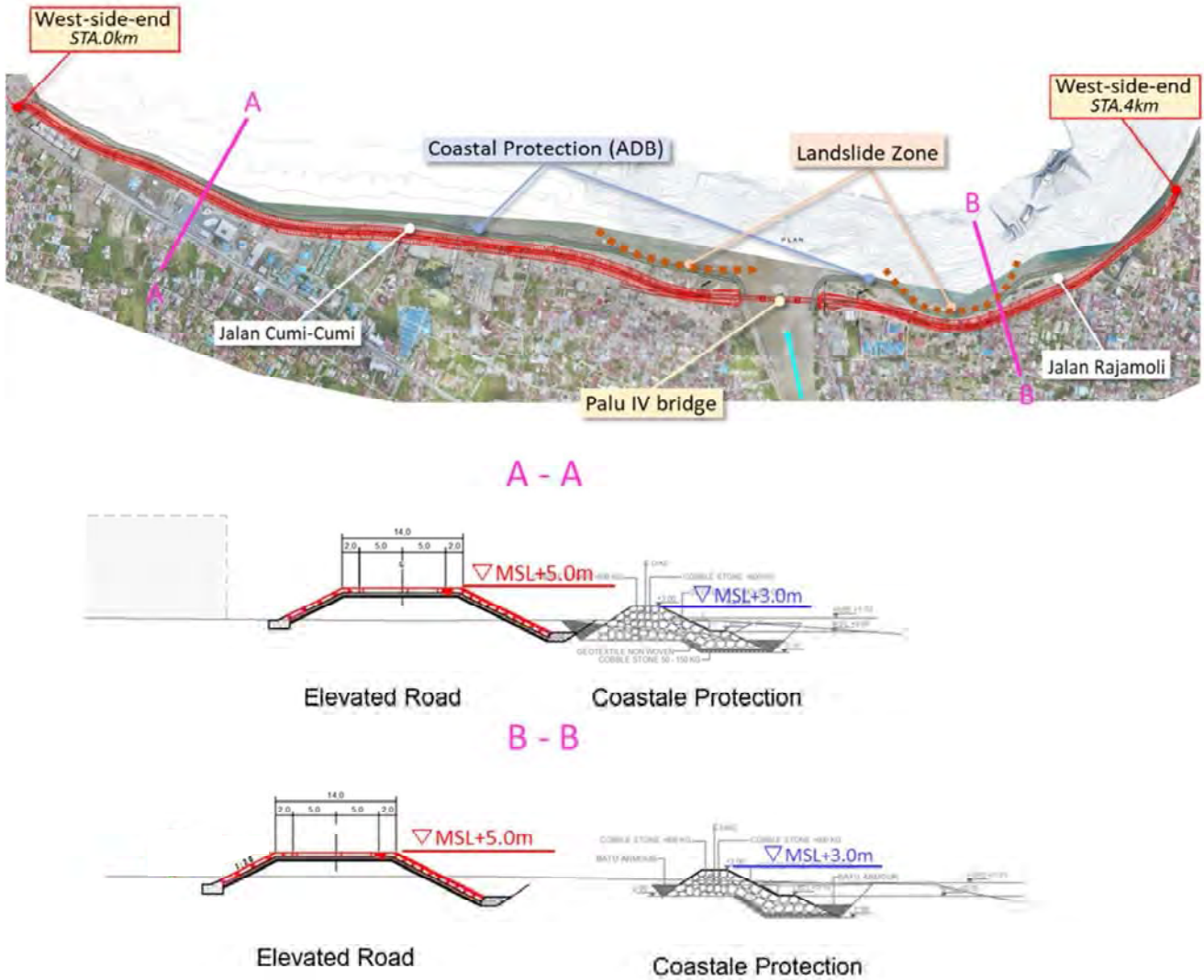
Source: JICA Study Team

なお、設計上の津波高については、観測された津波高が高いパル川より西側において、数値解析断面（Section①）の近傍値である「MSL+5.5m」に設定した。

6-4 嵩上げ道路平面配置計画

先の検討結果を踏まえた嵩上げ道路の概略平面図と断面図を図 6-7 に示す。
ここで、嵩上げ道路の平面線形は、以下を考慮して設定した。

- ✓ 嵩上げ道路前面（海側）に計画されている石積み護岸（ADB 支援）に干渉しない
- ✓ 今次災害で確認されている沿岸地すべり箇所を避ける
- ✓ 極力建物の移転を最小とする



※嵩上げ道路の地上からの高さは 2.5m～3.0m 程度となる

Source: JICA Study Team

図 6-7 嵩上げ道路計画概要図

6-5 嵩上げ道路本体構造に対する配慮（案）

2011年3月11日に発生した東日本大震災では沿岸部に甚大な被害が生じた。これを受けて開催された中央防災会議では、設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できる構造の考え方が報告されており、この中で海岸堤防等の構造上の工夫の方向性が示された。

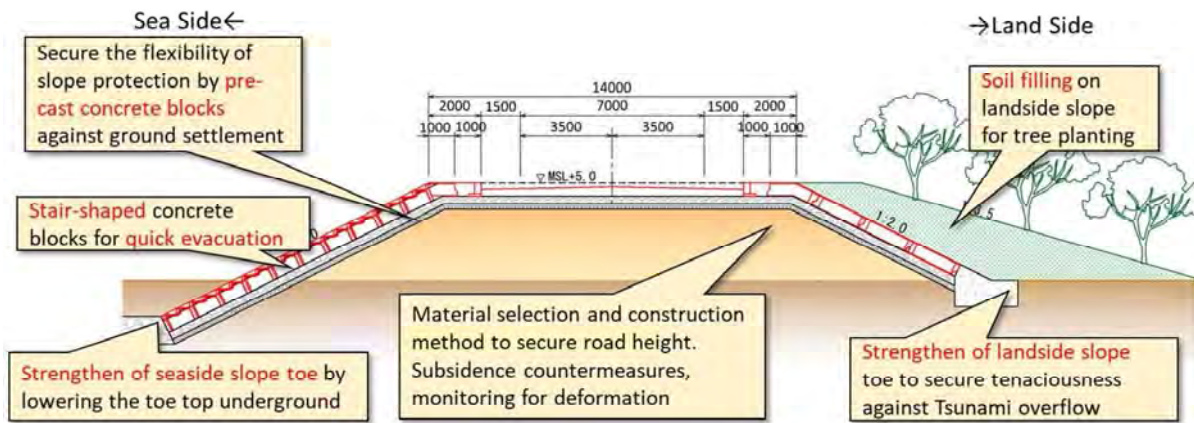
パル湾に計画する嵩上げ道路も越流を許容することを条件としているため、先の中央防災会議で推奨される「粘り強く効果を発揮できる構造」に対応することが BBB としても有効と考えられる。嵩上げ道路の本体細部構造については、今後のローン事業で検討される予定であるが、表 6-7、図 6-8 に本体計画における留意事項を示す。また津波の越流による堤防の破壊メカニズム例を図 6-9 に示す。

表 6-7 嵩上げ道路本体構造の留意事項と対応案

項目	留意事項、対応案
[1]天端、裏法部	越流時に流速が高速となり被覆工が流出することが懸念される →覆工を厚くする、部材間連結の強化
[2]法尻	越流時に流速が高速となり裏法尻部洗堀が懸念される →盛土による保護、※植生も育成可能
[3]法肩	越流時に圧力が低下して被覆工流出が懸念される →法肩は独立した構造とせず天端等と一体化を図る
[4]法面構造 *	海側にいる人の避難 →短い避難時間に対応した階段配置計画（計画箇所の追加など）
[5]嵩上げ道路本体 *	地震時に嵩上げ道路高を確保できる盛土材料の選定と施工管理方法の検討。施工基盤の沈下対策、圧密沈下による動態観測、クラック発生等に対する継続的なモニタリングの実施

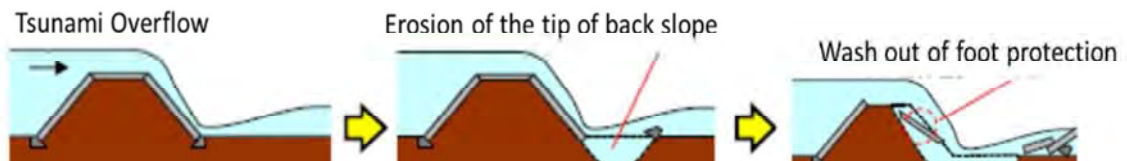
Source: JICA Study Team

* : パル湾の特性を踏まえた対応項目を示す



Source: JICA Study Team

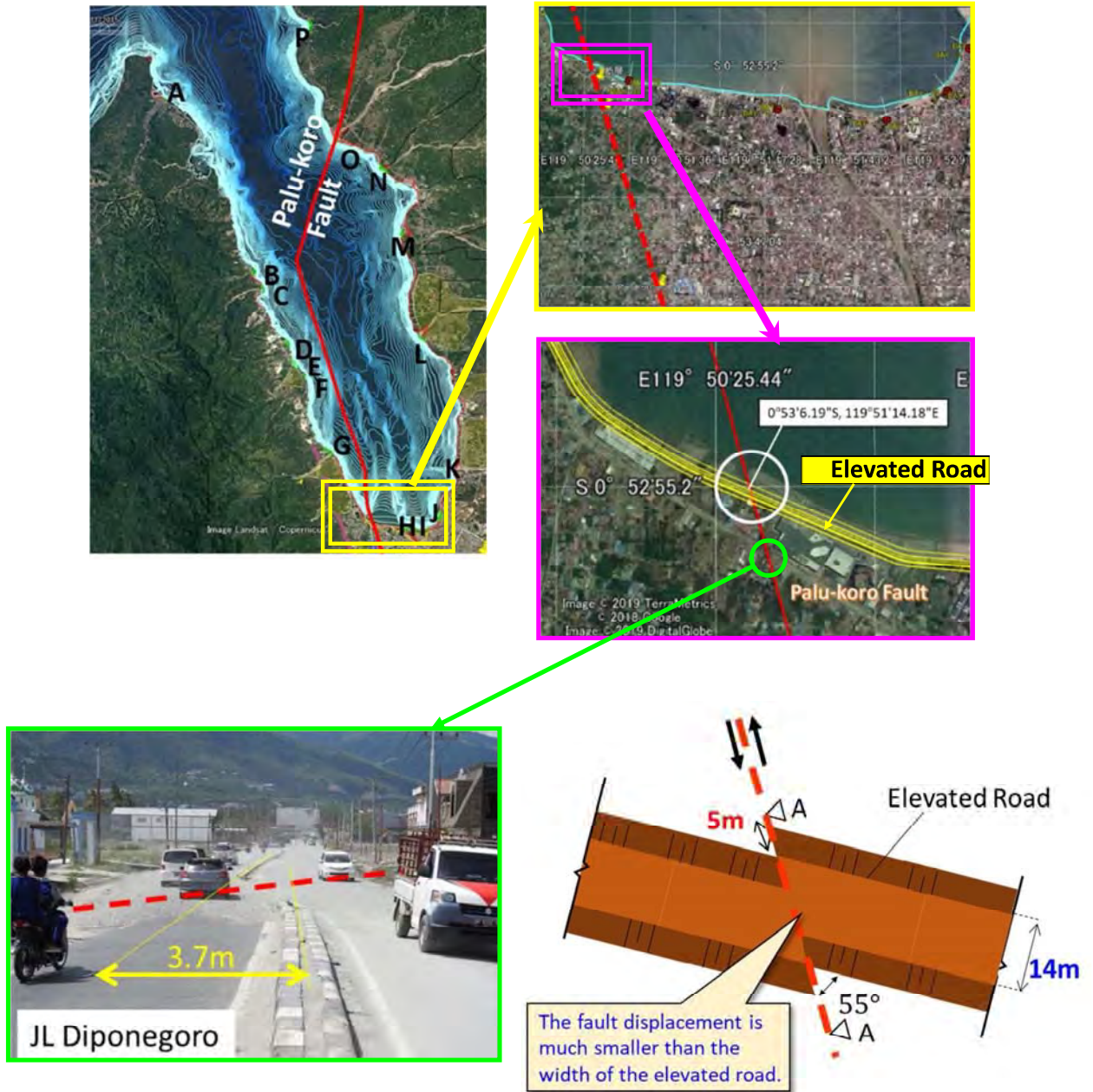
図 6-8 嵩上げ道路 本体構造対応案



Source: Marine Stair, NIKKEN KOGAKU CO.,LTD.

図 6-9 津波の堤防越流による損傷メカニズム

なお、表 6・7の[5]に記載した Palu-koro 断層は、図 6-10に示すようにパル湾を横断する位置関係にあり、これを避けることは不可能である。ただし、本断層は 2018 年に最大 5m ずれたと報告されているが、計画道路幅は 14m の高幅員で計画されるため、仮に嵩上げ道路建設後に同じ断層のずれが生じた場合でも緊急車両の通行は確保できるものと考えられる。



Source: JICA Study Team

図 6-10 パルコロ断層位置と 2018 地震による被害状況

第 7 章 植生の津波軽減効果に対する検証

7-1 概要

津波対策としてパル湾南沿岸部に計画する津波対策は、6-1に記載した通り、先方政府の要望から植生と嵩上げ道路の組合せを基本とする方針である。

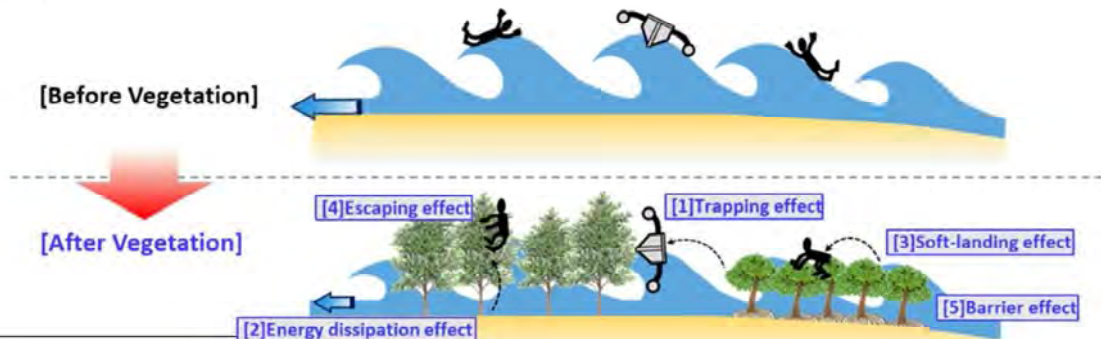
ここで沿岸部に配置される植生帯の一般的な効果を表 7-1 に示す。このうち[2]に該当する植生による津波軽減効果に関しては、これまでに被災地調査結果などから確認された事例があり、そのうち Selvam V.¹⁾によればスマトラ沖地震によるインド南東部の海岸を調査した結果、200m～1100m 幅のマングローブが植生していた地域では人的被害が少なかったとの報告がある。しかし、この植生による津波軽減効果は、植生の幅だけでなく、津波の特徴や地形条件などの影響も受けると考えられる。

したがって、2018 年にパル湾で発生した津波を対象に、沿岸部に配置する植生の津波軽減効果の検証を行った。そして本検証結果を踏まえ、嵩上げ道路の最終的な構造高の設定を行うこととした。

表 7-1 沿岸部における植生帯の効果

Vegetation Effect	Contents
[1] Trapping effect	the effect to stop driftwoods (fallen trees, etc.), debris (destroyed houses, etc.) and other floatage (boats, etc.)
[2] Energy dissipation effect	the effect to reduce water flow velocity, flow pressure and inundation water depth
[3] Soft-landing effect	the effect to provide a life-saving means for people to catch tree branches when carried off by tsunamis
[4] Escaping effect	the effect to provide “a way” of escaping by climbing trees from the ground or from the second floor of a building
[5] Barrier effect	the effect to collect wind-blown sand and raise dunes which act as natural barriers against tsunamis
[6] Good landscape effect	the effect to provide a scenic moisture and peace
[7] Habitat environment improvement effect	the effect to providing coastal fauna and flora habitat and breeding environment

Source : ISSN 0386-5878 Technical Note of PWRI No.4177
 Planning and Design of TSUNAMI-MITIGATIVE COASTAL VEGETATION BELTS, ICHARM Publication No.18, August 2010
 JICA Study Team



¹⁾Selvam, V.(2005)-Impact assessment for mangrove and shelterbelt plantation, Tsunami for Tamil Nadu Forestry Project, M.S. Swaminathan Research Foundation, New Delhi, India.

7-2 津波軽減効果の検証方法

植生による津波軽減効果は、表 7-2 に示す水理模型実験のほか、シミュレーション解析により検証を行うこととした。

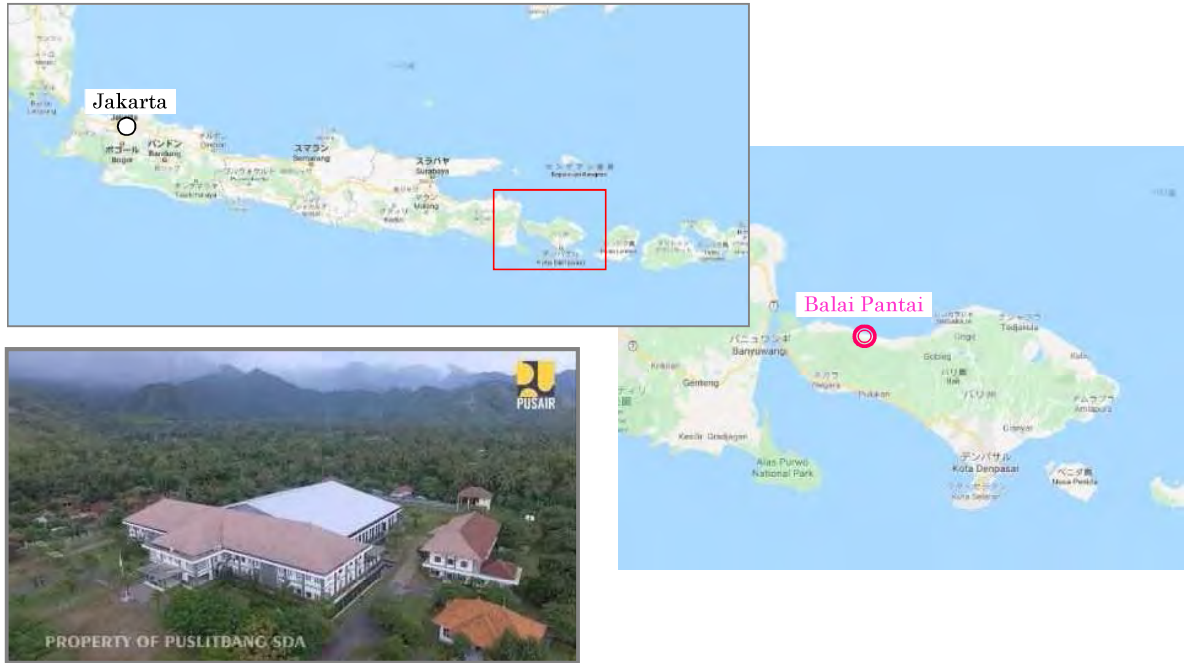
表 7-2 植生による津波軽減の検証方法

Verification Method	Content	Executing Agency
1. 水理模型実験	実験水槽内に地形、嵩上げ道路、植生の模型を配置のうえ、人工的に波を作用させた時の水理現象を計測して植生の効果を確認する	インドネシア Balai Pantai (沿岸研究センター)
2. シミュレーション解析	水理模型実験では再現できない今次津波の特徴(周期)をシミュレーションで再現して植生の効果を確認する	中央大学 有川研究室

Source: JICA Study Team

7-3 水理模型実験による検証

水理模型実験は、インドネシア側との協議により、バリ島北西部にある Balai Pantai(沿岸研究センター)の施設(図 7-1)、研究者の主導で実施するものとした。ただし、本研究センターでは津波実験に関する経験が無いため、中央大学有川教授、JICA 調査団によりサポートを行う体制とした。

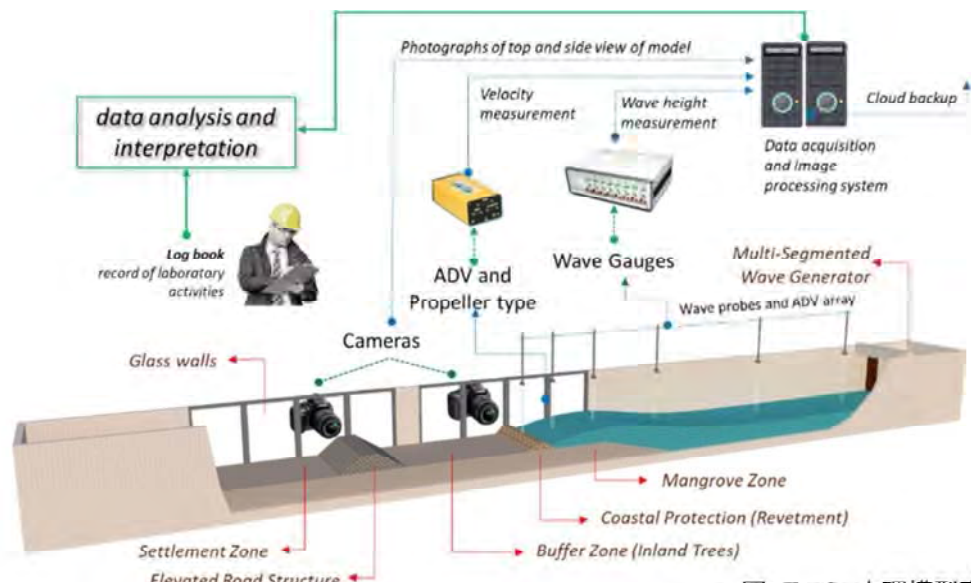


Source: Balai Pantai 図 7-1 Balai Pantai 施設の位置と全体写真

7-3-1 実験計画

(1) 実験水槽

今回水理模型実験に使用する水槽の概要図と写真を図 7-2、図 7-3に示す。

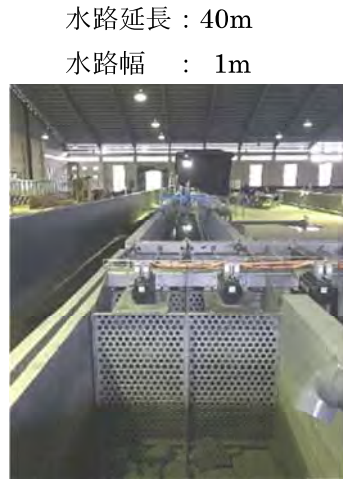


Source: Balai Pantai

図 7-2 水理模型実験装置概要図



側面写真（左側に模型設置）



水路方向写真（手前が造波側）

Source: JICA Study Team

図 7-3 水理模型実験装置 全体写真

(2) 計測機器

実験装置には水位と流速を計測するため、表 7-3 に示す種類の計測機器を配置した。

表 7-3 水理模型実験で使用した計測機器

Target of measurement	Item	Symbol	Remarks
Water Depth	Probe Sensor	WP	水深の深い箇所に適用
	Camera	WP	水深の浅い箇所に適用、画像解析を用いて計測
Flow Velocity	Acoustic Doppler Sensor	ADV	水深の深い箇所に適用
	Propeller	Prop	水深の浅い箇所に適用、中央大学 有川研究室から機器借用（最終は別機器を供与）

Source: JICA Study Team

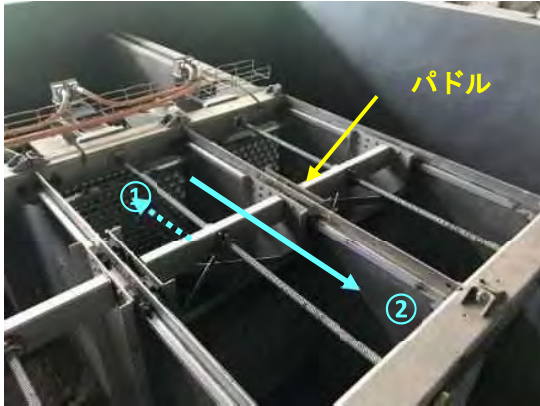


Source: JICA Study Team

図 7-4 流速計(Propeller タイプ) 配置状況

(3) 造波装置

施設の造波装置は、図 7-5 に示すパドル式造波装置である。目標とする波高は、装置中央のパドルの水平移動距離を調整して設定した。



※①→②の順でパドルが移動

本装置による波は孤立波で、周期は約 9.5 秒・実物換算で約 1 分程度となる。2018 年津波の観測データによる周期は 3.5 分であり、実験の周期はこの約 1/3 となる

Source: JICA Study Team

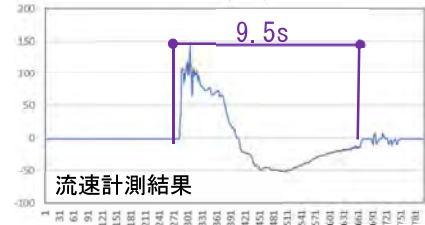


図 7-5 研究センターの造波装置

(4) 模型の縮尺とフルードの相似則

模型の縮尺は、実験装置の造波性能（造波可能な波高）から 1/50 に設定した。各諸量の縮尺比はフルードの相似則から表 7-4 の通りとなる。

表 7-4 フルードの相似則による模型縮尺比

Parameter	Symbol	Scale
Gravity Acceleration	n_g	1
Slope	n_s	1
Length	n_L	50
Horizontal Length	$n_B=n_L$	50
Vertical Length	$n_d=n_L$	50
Velocity	$n_v=(n_L)^{0.5}$	7.1
Wave Period	$n_P=n_v$	7.1
Wave Length	$n_W=n_L$	50
Wave Height	$n_H=n_d$	50

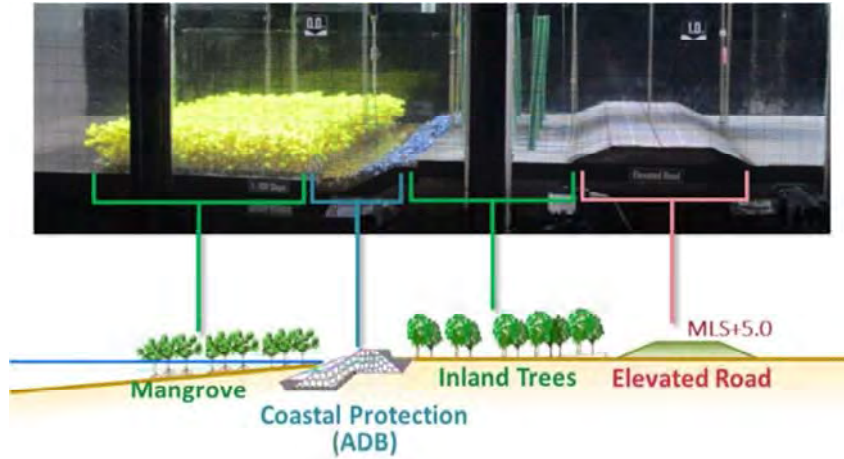
Source: JICA Study Team

(5) 実験模型計画

1) 模型の基本計画

パル湾沿岸部の実計画を踏まえ、実験模型の基本配置を図 7-6 に示す。

- ・ マングローブ
- ・ 沿岸護岸 (ADB 支援)
- ・ 樹木
- ・ 嵩上げ道路

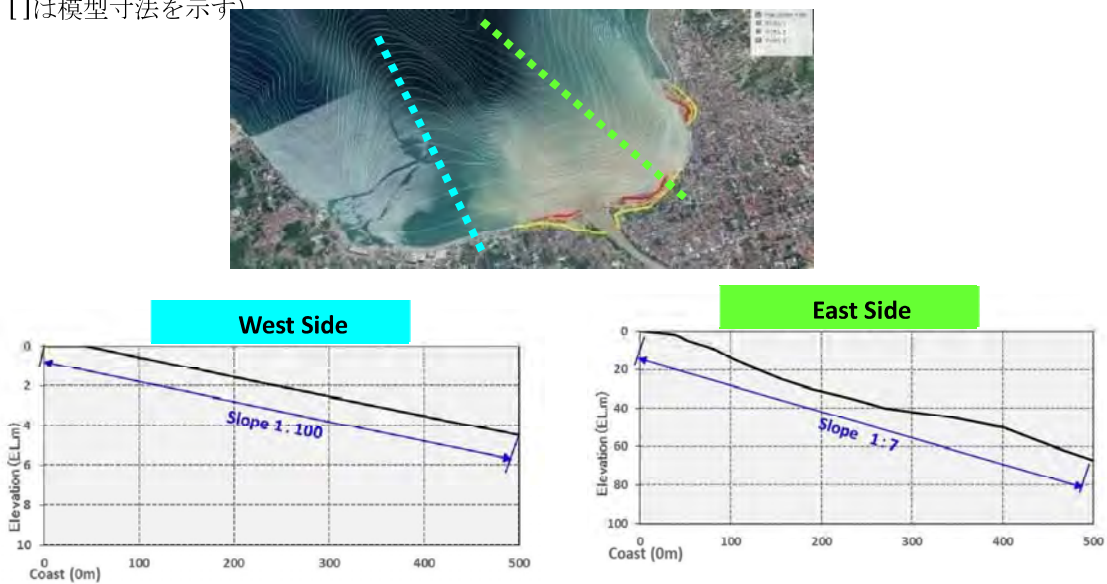


Source: JICA Study Team

図 7-6 実験模型の基本配置

2) 海底地形

沿岸部から海底までの傾斜は、パル湾南岸のうち傾斜が緩い西側の勾配 (1/100) に設定した (図 7-7)。なお、水槽の最大水深は実物換算で約 20.7m[0.414m]*とした (*以後 []は模型寸法を示す)



Source: JICA Study Team

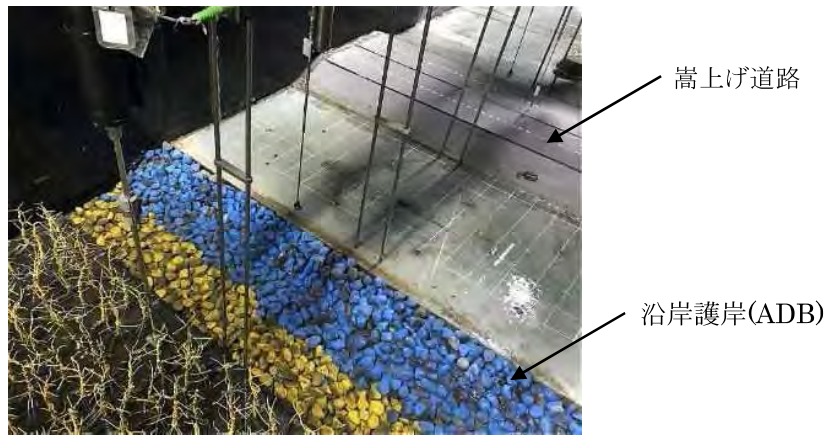
図 7-7 パル湾南岸の海底地形

3) 嵩上げ道路

嵩上げ道路は、第6章で計画した、幅 14m[28cm]、路面高 MSL+5.0m (GL:MSL+2.5m、GLからの高さ:2.5m[5cm])とした。なお、海底地形、嵩上げ道路ともに模型は木板で製作した(図 7-8)。

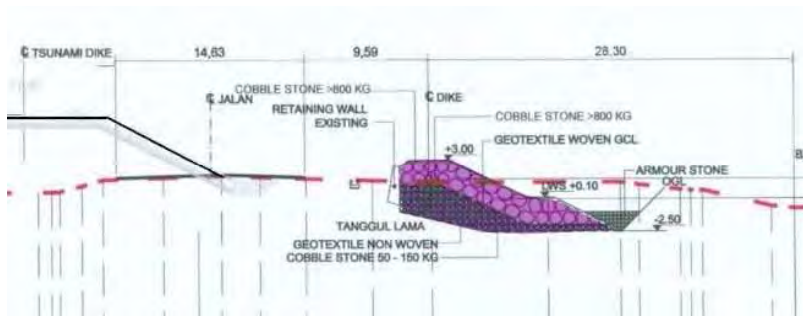
4) 沿岸護岸

ADBの支援で嵩上げ道路前面に計画される沿岸護岸は、SDAから受領した計画図面を参考に、石材料を用いて模型を作成した(図 7-8)。なお、本実験では、この護岸に対する安全性確認は目的としてないため、小石の底面は接着剤で固定した。



Source: JICA Study Team

図 7-8 嵩上げ道路と沿岸護岸の模型



Source: JICA Study Team

図 7-9 沿岸護岸計画

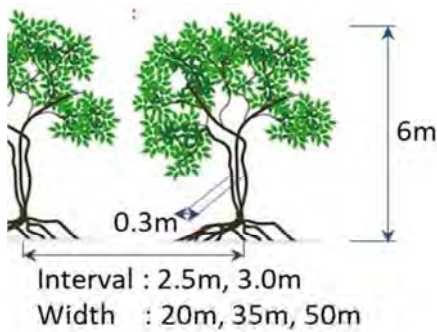
5) 植生—マングローブ

マングローブ模型は、3-3に示すマングローブ調査に基づいて、幹寸法、間隔、高さを設定した。ここで、密度（間隔）については1 1・2に示す現地調査から以下の通り設定した

- ・実物マングローブ密度：6.71m²/本 →2.59m×2.59m
- ・模型密度（1/50）：[5.18cm×5.18cm] →[5cm] ※実物 2.5m

また、植生環境が悪い場合を想定してこれより広い3.0m[6cm]についても計画した。また、マングローブの設置幅は、パル湾南岸の植生条件を踏まえ、20m、35m、50m[40cm、70cm、100cm]の3タイプを計画した。

マングローブ模型の主材料は、インドネシア BPPT による実験²でも使用していた針金を主材料として作成した（図 7-1 0）。



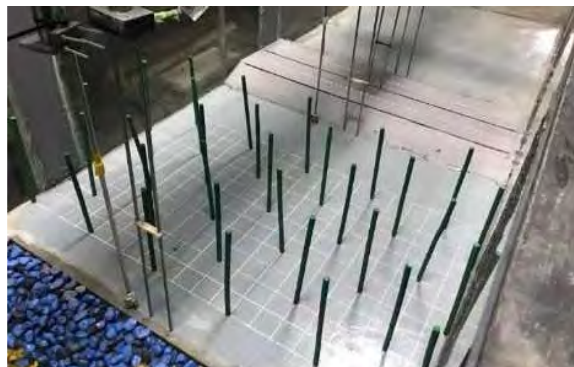
- ・マングローブ 幹径：現地調査から 0.338m→0.3m[6mm]に設定
- ・マングローブ 高：現地調査から 5.75m →6.0m[12cm]に設定

Source: JICA Study Team, Balai Pantai

図 7-1 0 植生—マングローブ模型

6) 植生—樹木（一般）

樹木の模型は、インドネシアに育成する Ketapang 種を想定し、幹直径 1m[2cm]、間隔は樹幹を 10m と想定した時の植栽間隔として、「公園における樹木の量・密度についての検討、札幌市」を参考に 7.5m[15cm]として計画した。また樹木の幅は沿岸護岸と嵩上げ道路の位置関係から平均値として 24m に設定した（図 7-1 1）。



Source: JICA Study Team, Balai Pantai

² BPPT, Research on Tsunami Hazard and Its Effects on Indonesia Coastal Region

図 7-1 1 植生—樹木模型

7) 植生—樹木 (巨木)

BNPB (国家防災庁) 長官が、津波対策として巨木の植林を要望されたことを受け、今回の実験においてこの樹木についても検証する計画とした。具体の樹種については提示されていなかったため、インドネシアで育成する Palaka 種を想定し、幹径 14m[28cm]、間隔は幹径と密度の関係から 50m[1m, 1 本のみ]として計画した (図 7-1 2)。

6)に示した樹木模型、本巨木模型を計画する上での参考資料を 1 1-2 に示す。



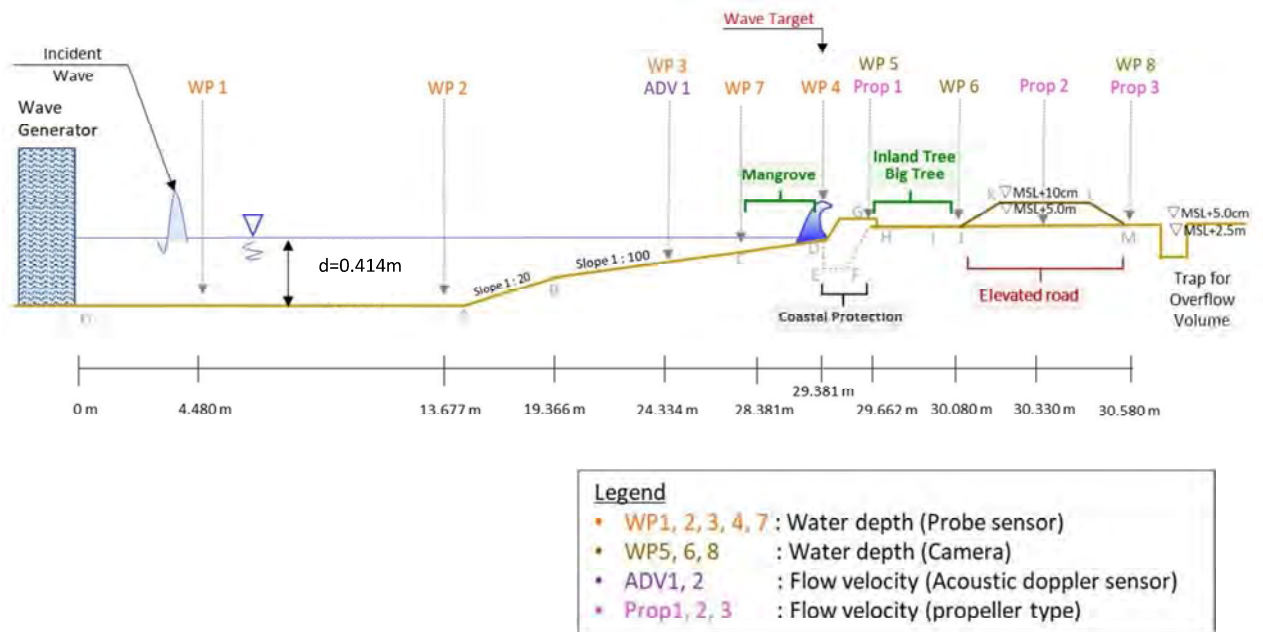
Source: JICA Study Team, Balai Pantai

図 7-1 2 植生—巨木模型

8) 模型装置 全体側面図

模型実験装置の側面図と具体の計測機器の基本配置を図 7-13 に示す。

なお、津波高は汀線位置(図中 Wave Target)で所定の高さとなるよう調整した。



Source: JICA Study Team, Balai Pantai

図 7-13 模型装置 側面寸法図と計測機器配置

(6) 実験ケース

本模型実験では、植生による津波軽減効果を確認するため、各種植生を配置した実験結果（マングローブについては幹間隔、配置幅を変化）と、植生無しの実験結果の計測値を比較することで植生の津波軽減効果を確認することとした。

設計対象の津波条件で行った実験ケースを表 7-5 に、植生配置イメージを図 7-14 に示す。同表に示すように、植生個々の津波軽減効果を確認することを目的に、また実験期間が限られていることも踏まえ、植生を組み合わせたケース（例えば、マングローブと樹木など）は実験ケースから除外した。

なお、検証対象の津波高、潮位の条件は、前項に示したようにそれぞれ MSL+5.5m、MSL+0.7m とするが、参考として波高、潮位を変えた実験も合わせて実施した。本実験結果の概要については 11-3 に示す。

表 7-5 模型実験ケース (津波条件：今次津波)

	Wave Height	Tide Level	Vegetation		
			Type	Interval(m)	Width(m)
1	MSL+5.5m	MSL+0.7m	—	—	—
2			Mangrove	2.5m	20m
3					35m
4					50m
5			3.0m	20m	
6				35m	
7				50m	
8			Inland Tree	7.5m	—
9			Big Tree	50m	—

Source: JICA Study Team, Balai Pantai

植生無し



植生有り (マングローブ)



植生有り (樹木)



植生有り (樹木・巨木)



Source: JICA Study Team

図 7-1 4 模型実験ケース 概要図

(7) 実験工程

本模型実験に係る作業工程を表 7-6 以下に示す。

表 7-6 津波実験に係る作業工程

	2019		2020						
	11	12	1	2	3	4	5	6	7
Balai Pantai									
実験準備	■								
確認実験・データ整理		■							
本実験・データ整理				■	■	■	■		
補足実験・データ整理								■	■
供与試験機搬入・調整		■	■	■					
有川先生・JICA 調査団									
データ受領・整理			■	■	■	■	■	■	■
植生軽減効果確認				■	■	■	■	■	■
国内協議		■	■		■	■	■	■	■
先方研究所訪問・協議	■		■	■					

7-3-2 実験結果

(1) 嵩上げ道路に対する越流状況確認

表 7-7、図 7-15 は、各実験ケースにおける嵩上げ道路 (MSL+5.0m) の越流状況を確認した結果を示す。この結果より、植生を配置した場合でも、植生を配置しない場合と同様に越流する結果となった。

表 7-7 嵩上げ道路に対する越流状況

Wave Height , m	Without Vegetation		
MSL+5.5m		YES	

Wave Height , m	Mangrove		
	Width (m)	Interval (m)	
		2.5m	3.0m
MSL+5.5m	20	YES	YES
	35	YES	YES
	50	YES	YES

Wave Height , m	Inland Tree		
	Width (m)	Interval (m)	
		7.5m	-
MSL+5.5m	25	YES	-

Wave Height , m	Inland Tree (Big Tree)		
	Diameter (m)	Interval (m)	
		50m	-
MSL+5.5m	14	YES	-

Legend
 YES - Overflow , NO - Not Overflow



植生無し

植生有り (マングローブ)
 間隔 2.5m、幅 50m

Source: JICA Study Team, Balai Pantai

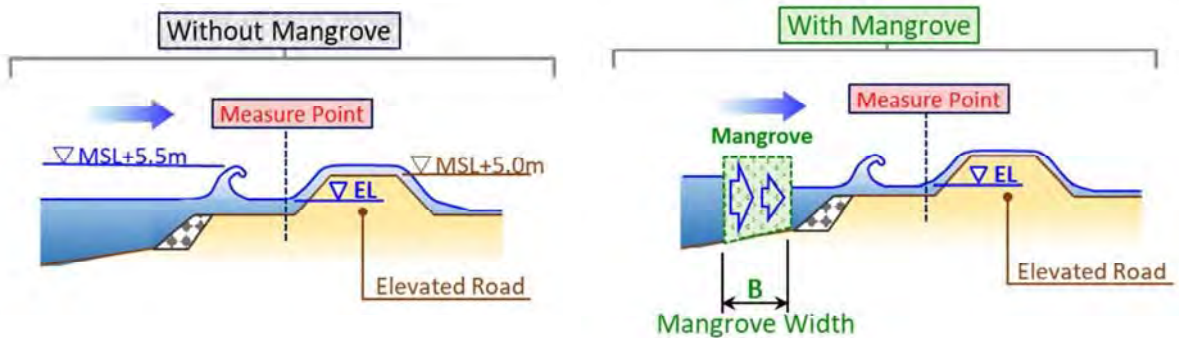
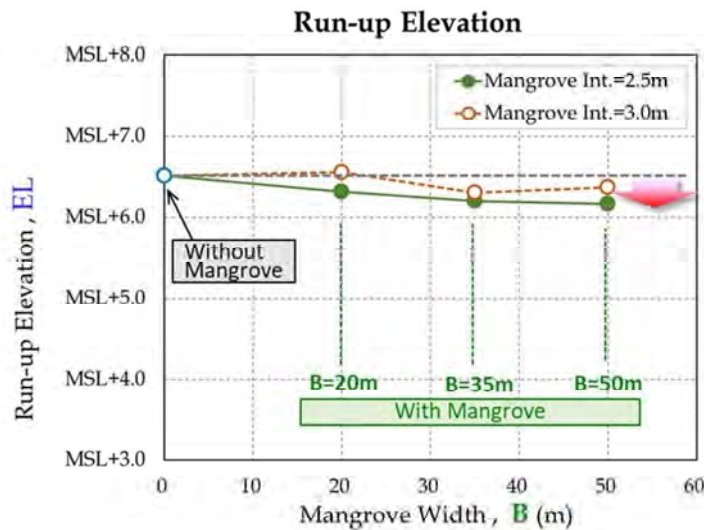
図 7-15 実験結果 —嵩上げ道路に対する越流状況—

(2) 植生—マングローブ—による津波軽減効果（遡上高）

植生としてマングローブを配置した実験ケースのうち、嵩上げ道路前の遡上高に着目した結果を図 7-16 に示す。このグラフは、マングローブの幅、密度を変えた時の、マングローブ通過後の遡上高について計測した結果をまとめたものであり、結果の数値は実物大換算した値を示す（以後の実験結果も同様）。なお、縦軸上のプロットは、マングローブ無しの結果を示す。

実験結果の傾向として、マングローブ幅が大きくなるほど遡上高が抑えられると想定されたが、今回実験のマングローブ範囲ではその低減率（軽減効果）は、マングローブ間隔 2.5m で最大 5%、間隔 3.0m で最大 2% 程度の低下となる。

なお、マングローブ間隔 2.5m と 3.0m の結果を比較した場合、密配置となる 2.5m（緑丸）の方が 3.0m（白抜き丸）より低減効果が大きく、遡上高が低くなると想定される。今回実験結果もその差にバラツキはあるものの想定通りの結果となった。



Source: JICA Study Team, Balai Pantai

図 7-16 実験結果 —マングローブの津波軽減効果（遡上高）—

なお、マングローブ無で計測された遡上高約 MSL+6.5m は、動画確認の結果、嵩上げ道路によるせり上がりだけでなく、嵩上げ道路からの反射波によりこの値まで達していることを確認した。各計水位計測位置と時間の関係図（マングローブ無）および代表時間における波通過イメージを図 7-17 に示す。

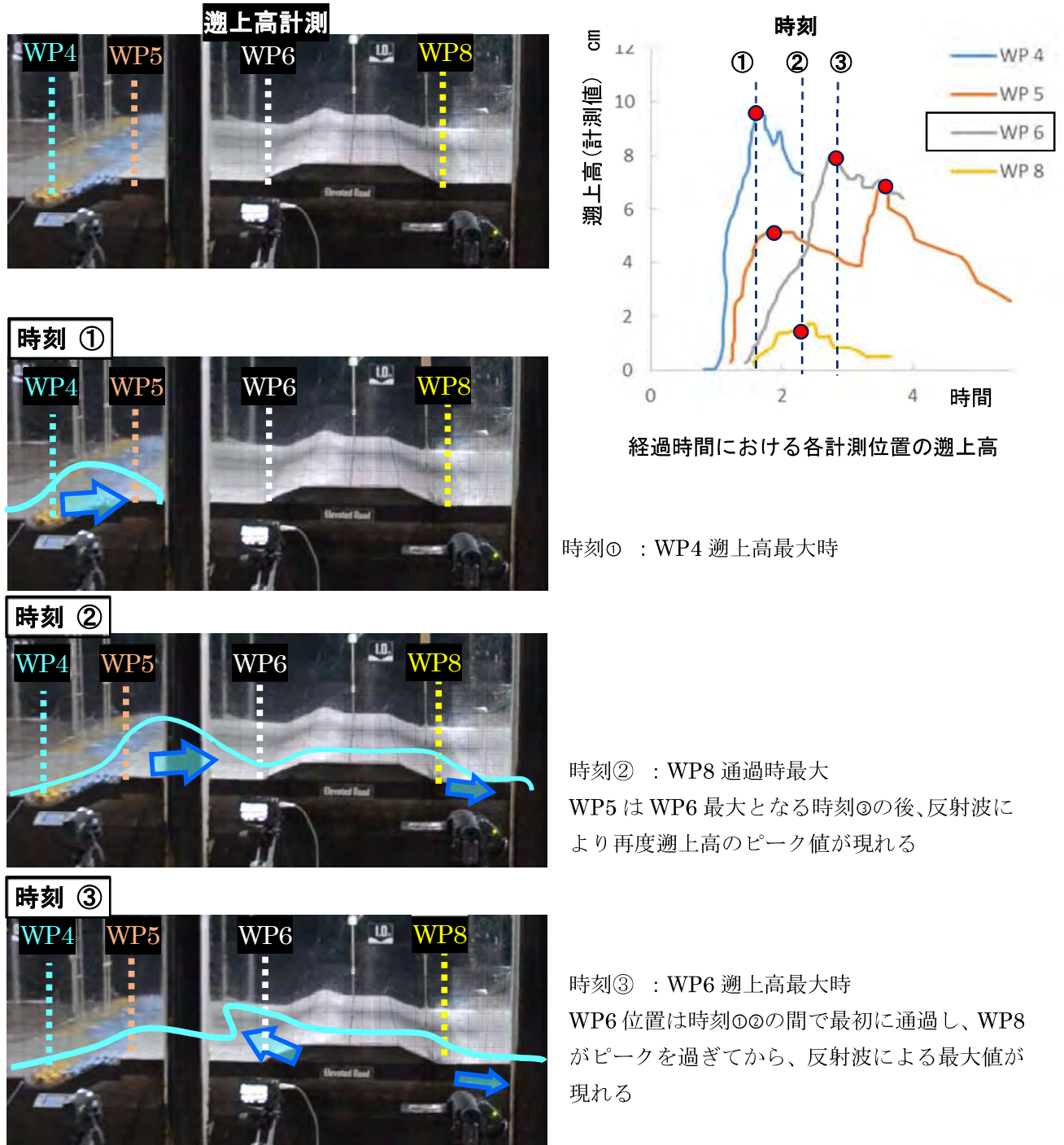


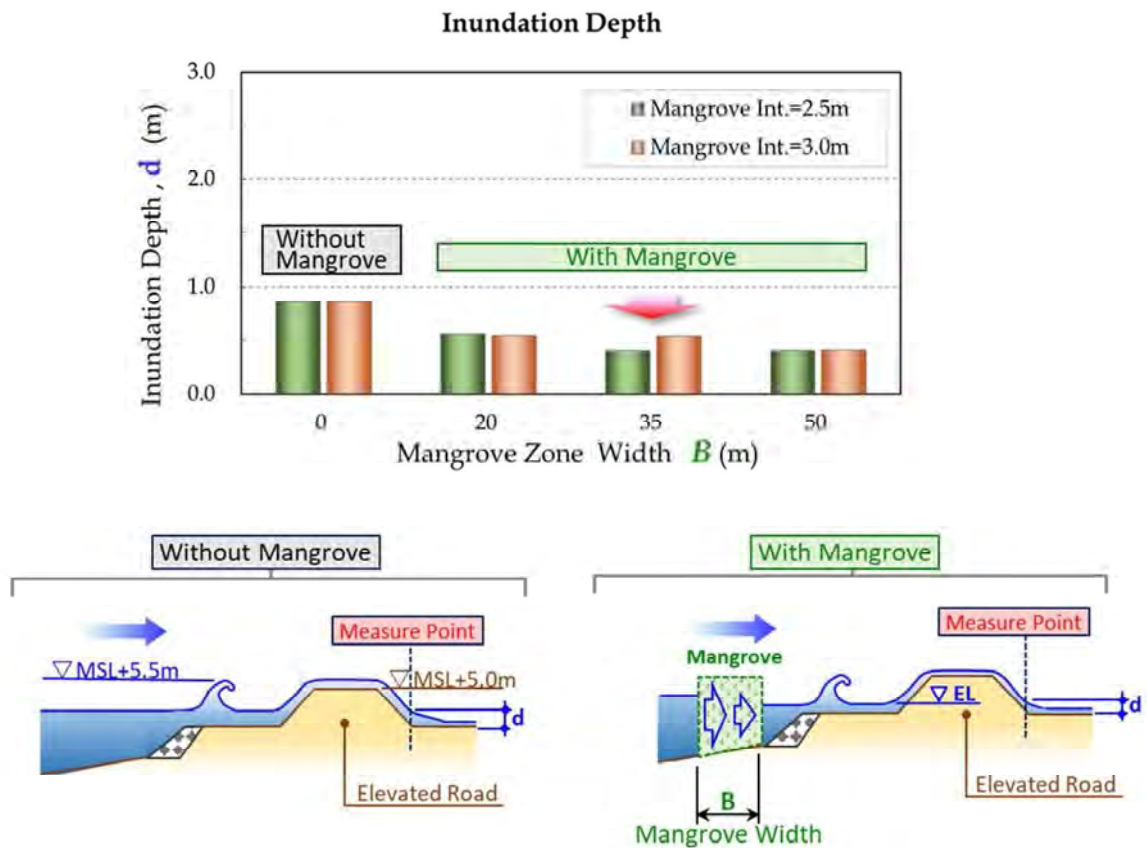
図 7-17 遡上高の時間経過水位

(3) 植生—マングローブ—による津波軽減効果（越流後の浸水深）

(2)と同じくマングローブを用いた実験のうち、嵩上げ道路越流後の浸水深に着目した結果を図 7-18 に示す。

マングローブを配置した場合、配置幅の増加とともに低減効果が大きくなり、浸水深は低下する傾向にある（マングローブ幅 50m の低減率は約 50%）。なお、マングローブ無に対する浸水深の低下量は 40cm 程度で、(2) の嵩上げ道路前面での遡上高における低下量とほぼ同じとなる。

また、マングローブ無の場合、嵩上げ道路前面の浸水深は(2)で確認した通り、嵩上げ道路によるせり上がりと反射波により約 MSL+6.5m まで上昇するものの、越流後の浸水深は、嵩上げ道路高設計の前提条件として設定した 1m 以下になることを確認した。したがって、第 6 章における嵩上げ道路高の設定の考え方、および嵩上げ道路の津波対策効果について、本実験で確認できた。



Source: JICA Study Team, Balai Pantai

図 7-18 実験結果 —マングローブの津波軽減効果（浸水深）—

(4) 植生—樹木—による津波軽減効果

植生として樹木を用いた実験結果を図 7-19 に示す。

このグラフは、先に示したマングローブを用いた実験結果と同様に、道路前面での遡上高についての計測結果を示しており、樹木無しが青線、樹木有りが緑線を示す。

この結果から、樹木についても、植生無と比較して遡上高の低下（軽減効果）が見られ、その低減率は約 5%であった。

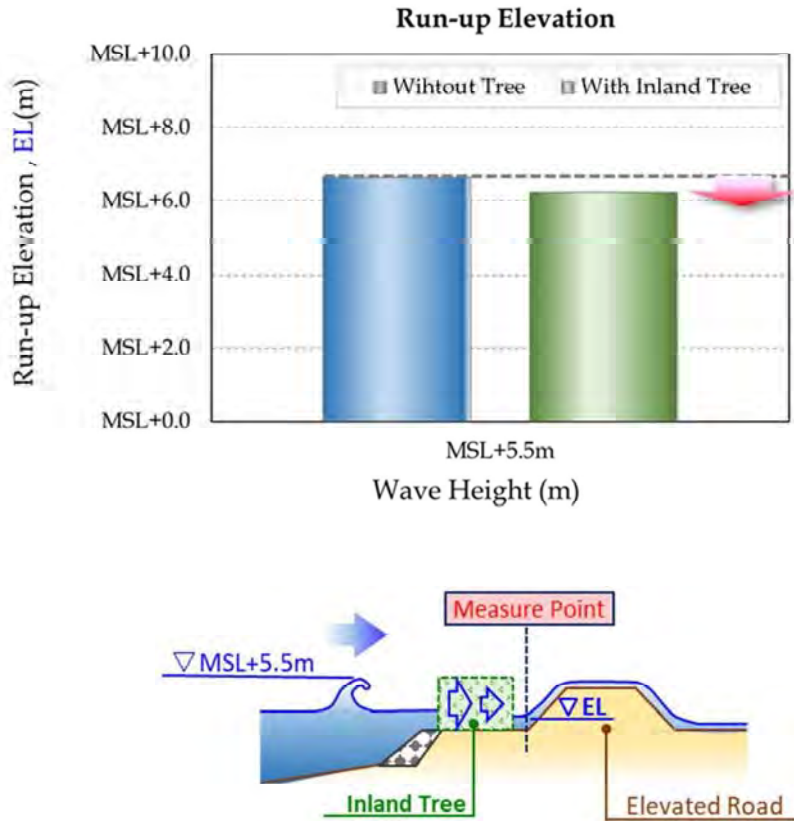


図 7-19 実験結果 —樹木の津波軽減効果（遡上高）—

(5) 植生—巨木—による津波軽減効果

植生模型のうち、巨木を用いた実験結果を図 7-20 に示す。

本実験では巨木の存在により、下図の平面図に示すように、波の流れが巨木背面で大きく割れる状況となったため、マングローブや樹木のように嵩上げ道路前面での計測値で評価するのが困難であった。このため本ケースでは、嵩上げ道路背面の中央と側面に流速計を2箇所配置し、この平均値で評価することとした。

図 7-20 のグラフは、上記の通り嵩上げ道路背面の流速についての計測結果を示しており、樹木無しが青線、樹木有りが茶色線を示す。この結果より、巨木については、流速の明らかな低下（軽減効果）は見られなかった。

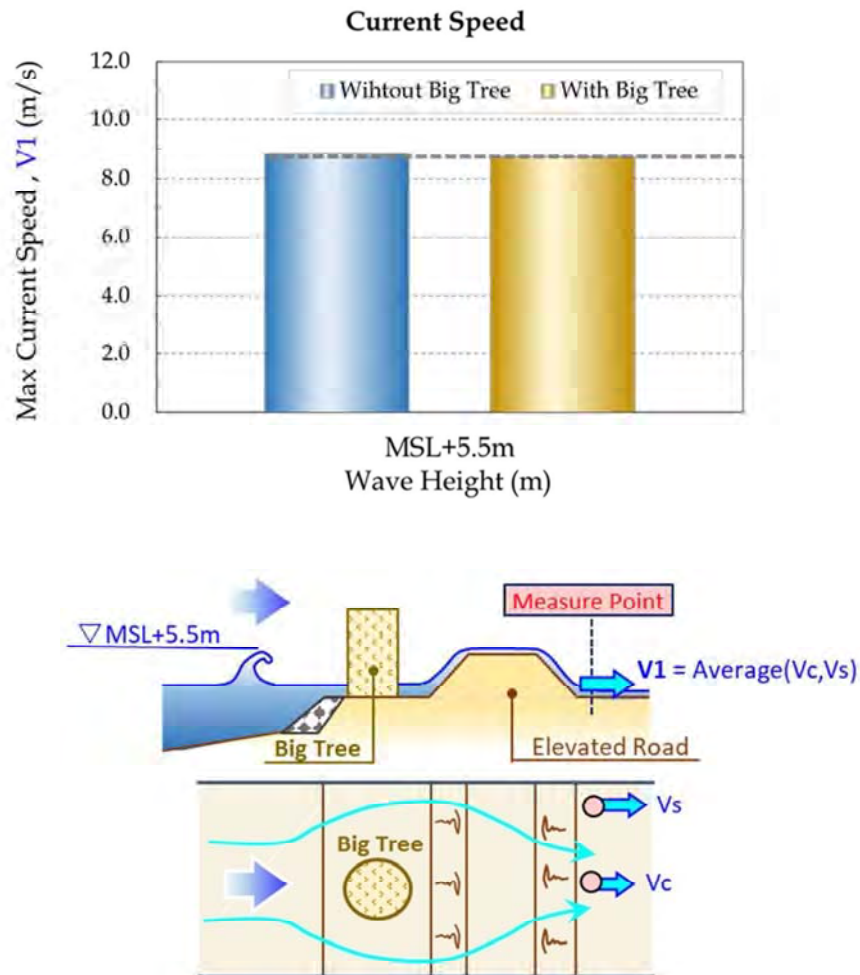


図 7-20 実験結果 —巨木の津波軽減効果（流速）—

7-4 シミュレーション解析による検証

7-4-1 概要

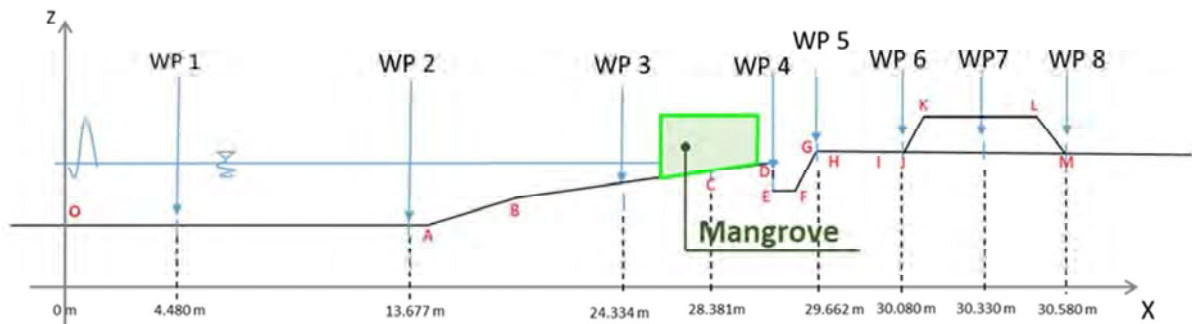
7-3-1 (3) で示したように、水理模型実験における波の周期は造波装置の能力により決定され、2018年の津波で観測された周期の3.5分に対して、その約1/3の1分程度（実物換算）の周期で実験を行った。一般に波の周期が長くなるほどエネルギーは大きくなることから、本条件により植生の津波軽減効果にも影響すると想定される。

以上より、ここではシミュレーション解析を用い、今次津波相当の周期をもつ波を与えた時の植生に対する津波軽減効果について検証を行った。併せて嵩上げ道路前面に計画される石積護岸に津波が作用した時の安定確認も行った。

7-4-2 シミュレーション解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルは、水理模型実験との整合確認も行うため、図 7-2 1 に示す寸法とした。解析格子サイズ、格子数等の条件についてもあわせて以下に示す。



	範囲[m]	格子サイズ[m]	格子数	総格子数	26,600,000
x	0~26.6	0.01	2,660	地形格子数	5,181,000
y	0~1.0	0.01	100	計算格子数	21,419,000
z	0~1.0	0.01	100	CPU	36
POROUS LIM			0.01	1CPUあたりの格子数	594,972

Source: Chuo University Arikawa Lab.

図 7-2 1 シミュレーション解析モデル条件

また、津波高とマングローブの条件は水理模型実験と合わせることを基本として、以下に示す条件とした。

- ・縮尺：1：50
- ・津波高：MSL+5.5m（水理模型実験と同じ）
- ・マングローブ条件：間隔 3.5m 相当・・・空隙率：98%（模型実験モデルを参考に設定）

※解析には相当の時間を要するため間隔 2.5m、3.5m のうち 1 ケースのみを選定

(2) 数値解析方程式

今回用いる解析プログラムの基礎方程式には、図 7-2 2 に示す 3 次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式及び Navier-Stokes 方程式をポーラスモデルについて拡張した式が用いられている。

連続式

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p$$

Navier-Stokes 方程式 (x 方向)

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \\ & - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned}$$

t : 時間, x, y : 水平方向座標, z : 鉛直方向座標, u, v, w : x, y, z 方向の流速成分,
 p : 圧力, ρ : 規準密度, ρ^* : 浮力を考慮する密度, ν_e : 分子動粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和,
 g : 重力加速度, γ_v : 空隙率, $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: x, y, z 方向の面積透過率,
 D_x, D_y, D_z : エネルギー減衰帯のための係数, S_p, S_u, S_v, S_w : 造波ソースのためのソース項

解析プログラム名: CADMAS-SURF/3D

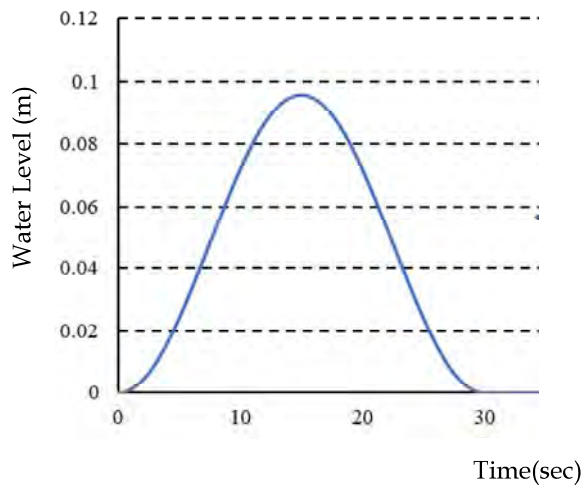
Source: Arikawa, T, Chida, Y., Seki, K., Takagawa, T. and Shimosako, K. (2019) Development and Applicability of Multiscale Multiphysics Integrated Simulator for Tsunami, J. Disaster Res., Vol.14, No.2, pp. 225-234

図 7-2 2 解析プログラムの基礎方程式

(3) 入射波

シミュレーション解析における入射波は、以下の 2 タイプを設定した。

- 入射波 1: 水理模型実験波・・・実験計測値より調整
- 入射波 2: 今次津波相当波・・・パル湾 Pantoloan 港における潮位観測データより設定
 観測津波周期: 210s(3.5min)
 模型縮尺周期: 210/7=30s (表 7-4 の相似則を参照)



(4) シミュレーション解析ケース

今回実施するシミュレーションを表 7-8 に示す。入射波 1、入射波 2 に対し、植生として今回解析で対象とするマングローブの幅を変えた合計 8 ケースの解析を行った。

表 7-8 シミュレーション解析ケース

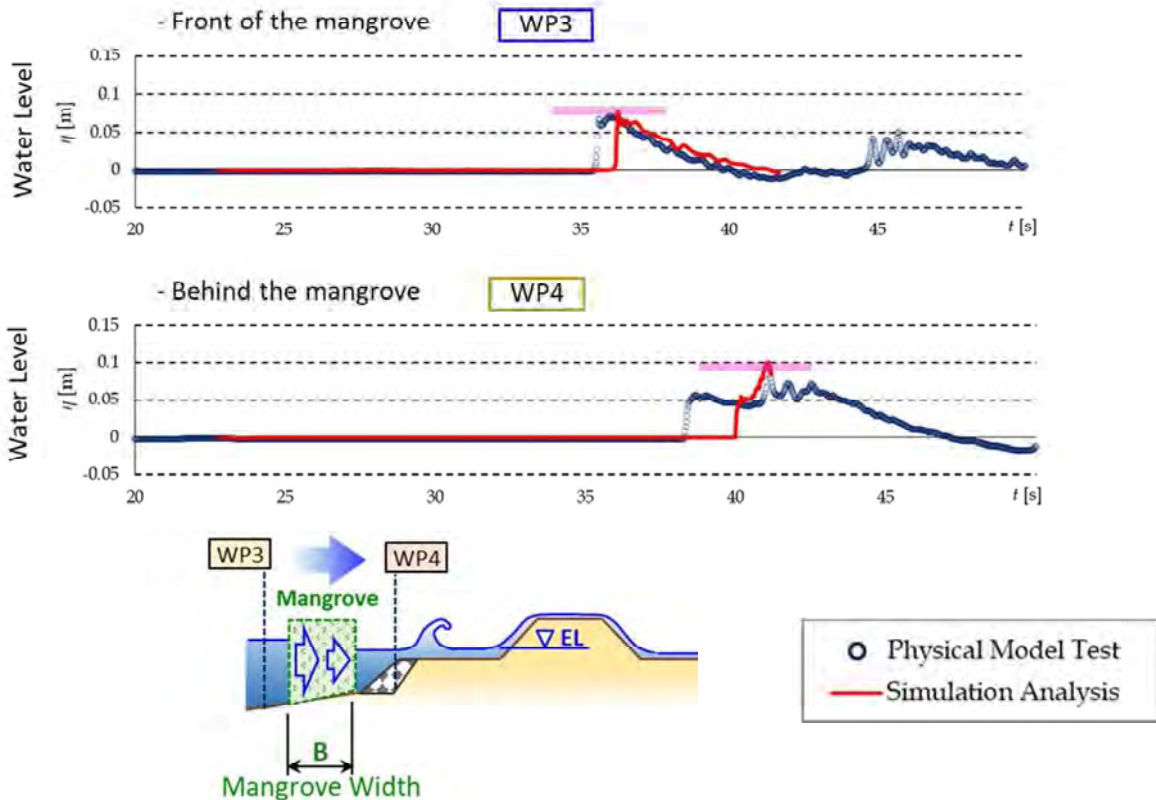
Scenario	Incident Wave	Mangrove Width [m]	Scenario	Incident Wave	Mangrove Width [m]
1	Incident Wave-1: Physical Model Test Wave	0	5	Incident Wave-2 2018 Tsunami Wave	0
2		20	6		20
3		35	7		50
4		50	—		—

Source: JICA Survey Team

7-4-3 シミュレーション解析結果

(1) 入射波 1 (水理模型実験波) の解析結果

表 7-8 に示す解析ケースの内、Scenario-2 における計測位置 WP3 (マングローブ手前)、WP4 (マングローブ背面) での水位変化を水理実験の結果と合わせて図 7-2 3 に示す。この結果より、シミュレーション解析による到達水位は実験結果と概ね近い値となり、実験を再現できていることを確認した。

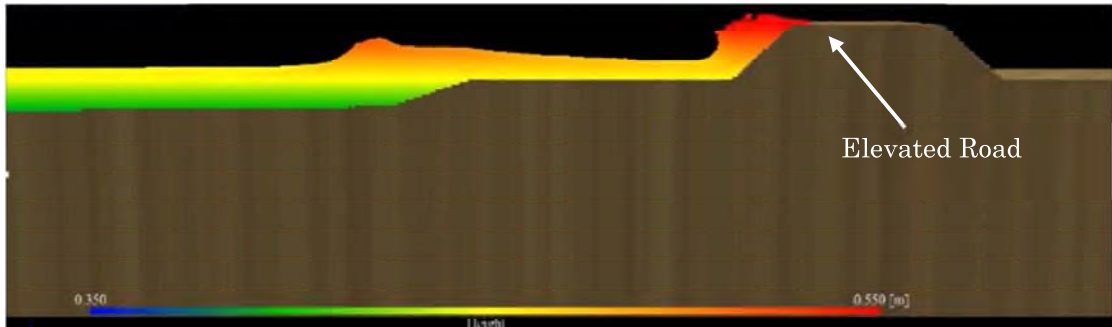


Source: Chuo University Arikawa Lab.

図 7-2 3 解析結果—入射波 1・水位変化 (WP3、WP4) —

入射波 1 のシミュレーション解析において、遡上高に着目したアニメーションを図 7-2 4 に示す。

Scenario-1 : 植生無し



Scenario-2 : マングローブ幅-20m

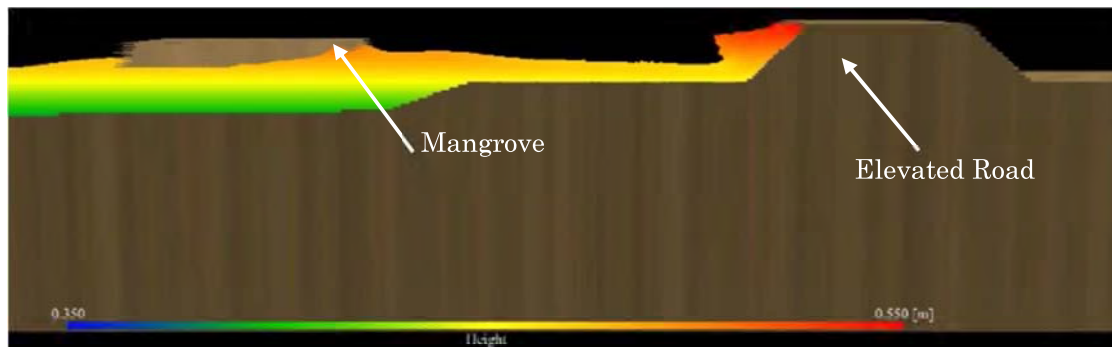


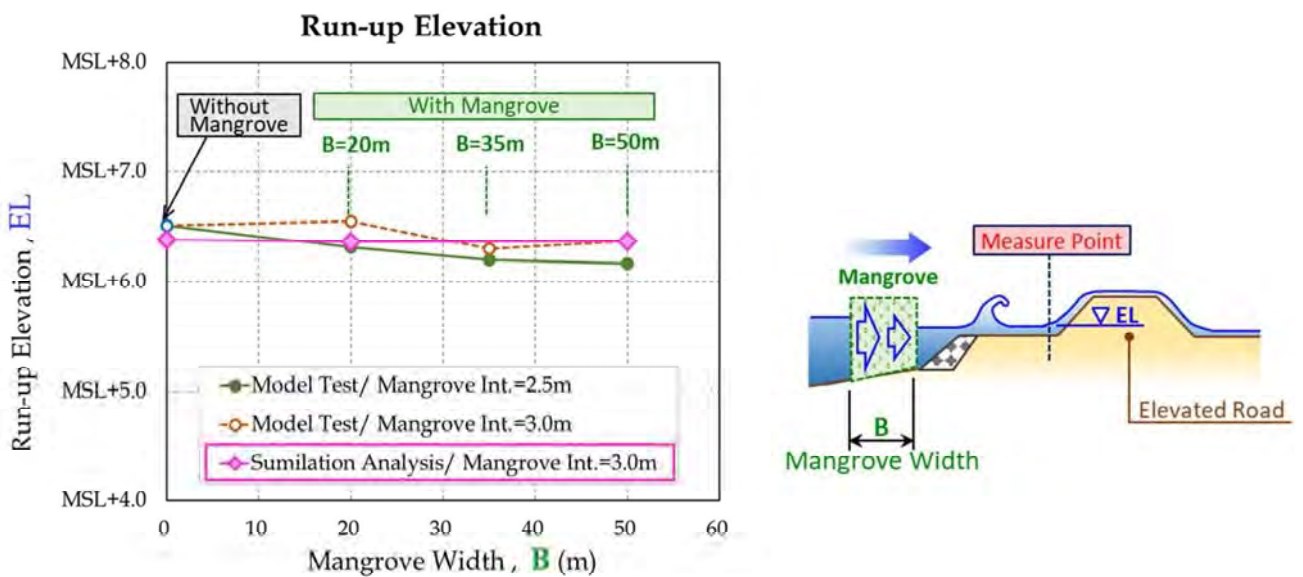
図 7-2 4 解析アニメーション —入射波 1—

(2) 入射波2（今次津波相当波）による津波軽減効果の確認

水理模型実験でも整理した嵩上げ道路前面での遡上高について、入射波2（今次津波相当波）によるシミュレーション解析から得られた結果を図 7-25に、遡上高の時間変化（模型縮尺）を図 7-26に示す。

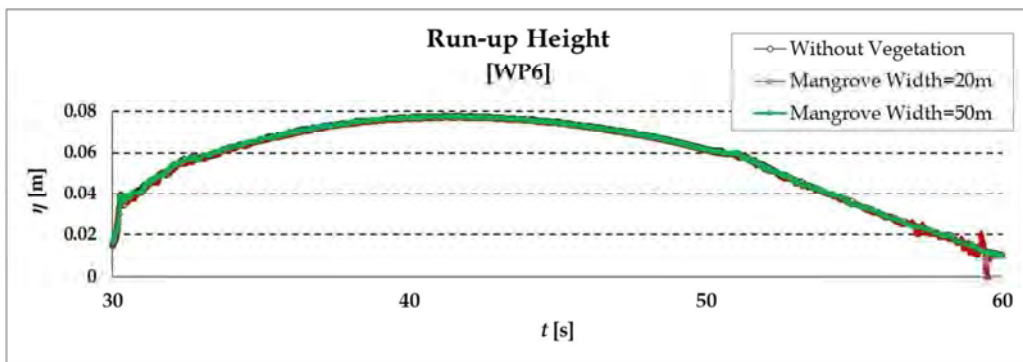
水理模型実験ではマングローブ幅の増加に伴い、遡上高は低下する傾向が確認されたが、今次津波の周期を再現した波を用いたシミュレーション解析では、マングローブ幅を変えた場合でも明確な遡上高の低下を確認する事はできなかった。

これは波の周期が長くなることにより波自体のもつエネルギーが増大し、植生による津波軽減効果が薄まったことが要因と考えられる。



Source: Chuo University Arikawa Lab.

図 7-25 解析結果 —マングローブの津波軽減効果（遡上高）—

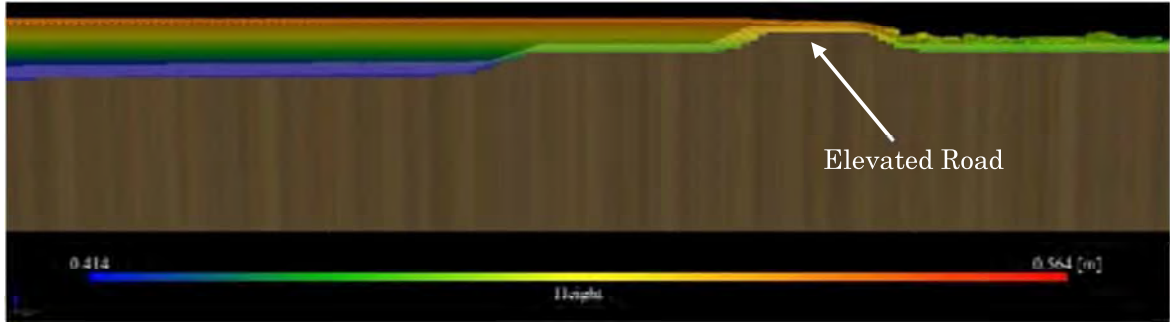


Source: Chuo University Arikawa Lab.

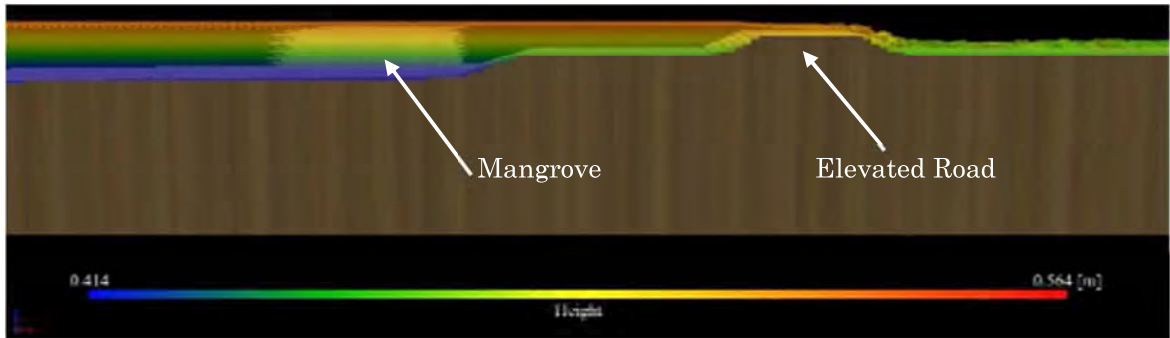
図 7-26 解析結果 —遡上高の時間変化—

入射波 2 のシミュレーション解析において、遡上高に着目したアニメーションを図 7-2 7 に示す。

Scenario-5 : 植生無し



Scenario-6 : マングローブ幅-20m



Source: Chuo University Arikawa Lab.

図 7-2 7 解析アニメーション —入射波 2—

7-4-4 嵩上げ道路前面の石積護岸に対する安定照査

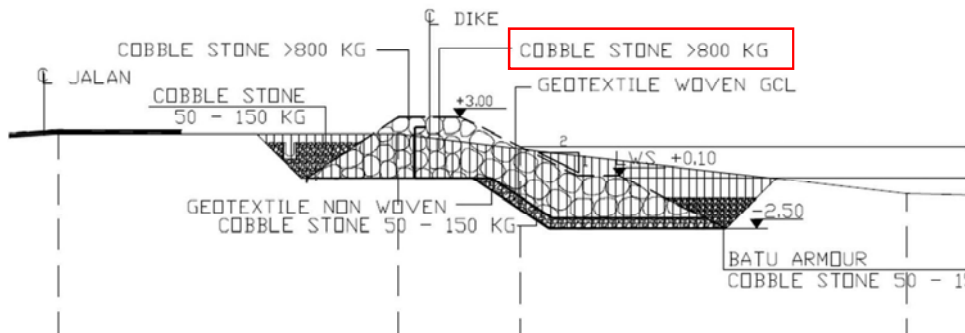
嵩上げ道路前面には、6-4で示した通り波浪対策としての石積護岸がADBの支援で計画されている。昨年6月に開催された津波パネルでは、津波による石積護岸への影響（飛散による第三者被害等）について懸念する意見があったことから、今回のシミュレーション解析結果を用いて本石積護岸の安定について評価を行う。

石積護岸の安定評価は、日本の港湾基準を参考にイスバッシュ(Isbash)による式³を用いるものとする。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 (y)^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}$$

- M : 捨石当の重量 (t) -0.8t (ADB 護岸設計図面より、図 7-28)
- ρ_r : 捨石の密度 (t/m³) -2.6t/m³
- U : 捨石上面における水の流れの速度 (m/s)
- g : 重力加速度 (m/s²) -9.8m/m²
- y : イスバッシュの定数、露出した石 -0.86 (露出した捨石条件)
- S_r : 指定し等の水に対する比重 - ρ_r / ρ_w
- θ : 水路床の軸方向の傾斜勾配 -26° (傾斜部、沖側がマイナス)

具体的な安定評価方法としては、上式より石積の重量、密度、イスバッシュ定数等から求まる限界流速を算定し、この値とシミュレーション解析における石積み護岸付近の流速と比較を行う。



Source: SDA

図 7-28 石積護岸断面図

³ 港湾の施設の技術上の基準・同解説、(公社)日本港湾協会

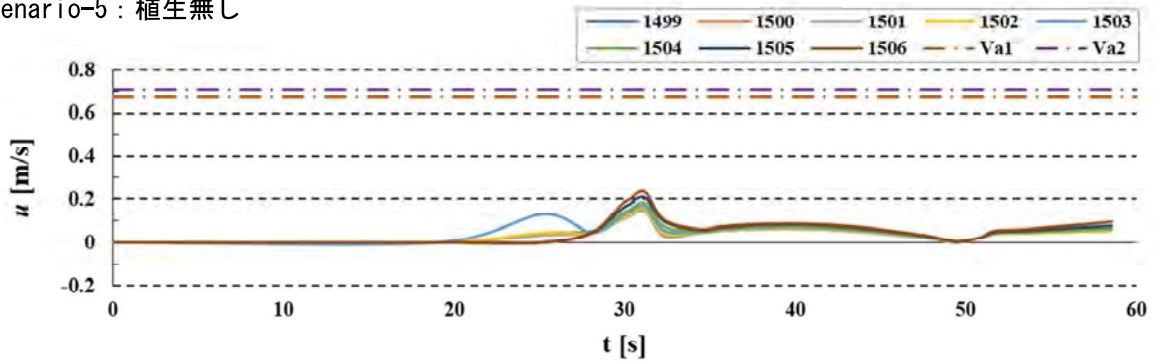
イスバッシュの式による石積護岸天端部と斜面部それぞれの限界流速算定結果を算定した結果を以下に示す。

天端部限界流速 Va1 — 実物スケール：4.7m/s、模型実験スケール：0.67m/s

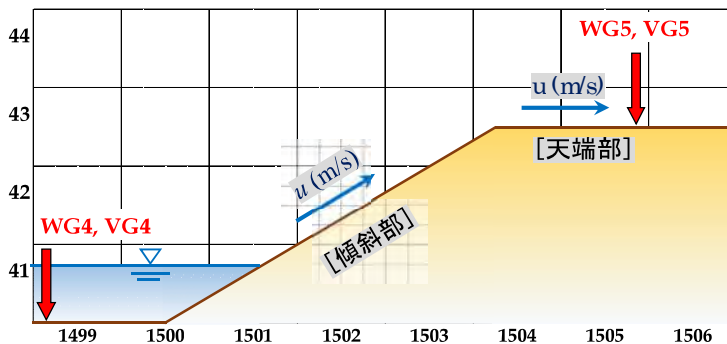
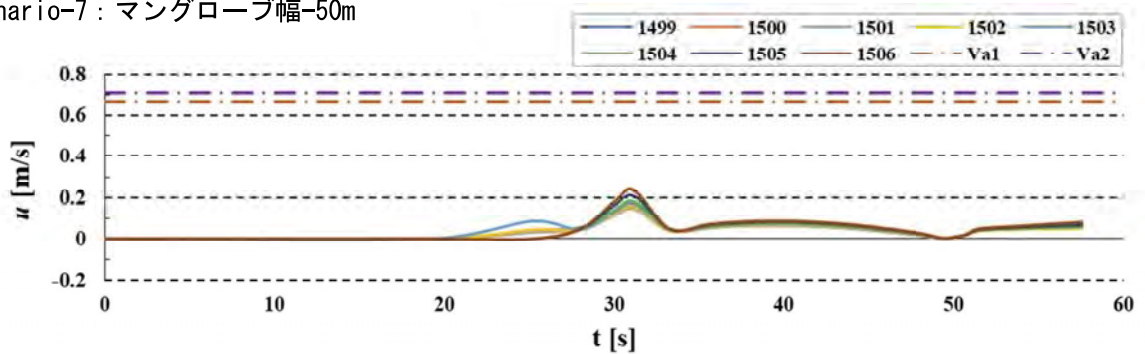
傾斜部限界流速 Va2 — 実物スケール：5.0m/s、模型実験スケール：0.71m/s

一方、シミュレーション解析による石積護岸周辺の流速の時間変化について、Scenario-5、Scenario-7の結果を図 7-29に示す。

Scenario-5：植生無し



Scenario-7：マングローブ幅-50m



*上のグラフ中の流速値は左図の 1499~1506 断面平均値を示す。Va1、Va2はそれぞれイスバッシュ式により算定した石積天端部、傾斜部の限界流速を示す。

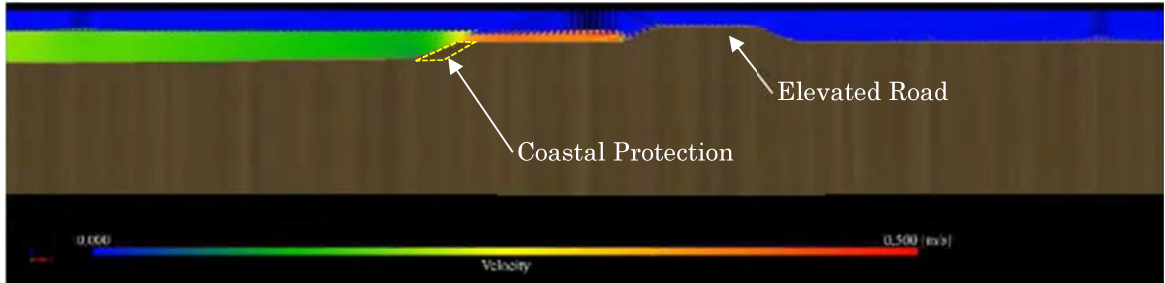
Source: Chuo University Arikawa Lab.

図 7-29 シミュレーション解析による石積護岸付近の流速算定結果

また、シミュレーション解析の流速に着目したアニメーションとして、Scenario-5における嵩上げ道路到達前と越流後の状況を図 7-30 に示す。

Scenario-5：植生無し

(1) 嵩上げ道路到達前



(2) 嵩上げ道路越流後

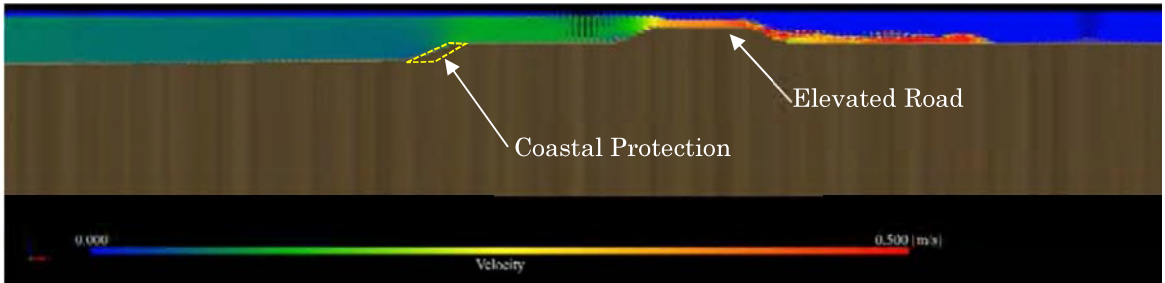


図 7-30 アニメーションによる流速表示 (Scenario-5)

図 7-29 に示した結果より、石積護岸周辺で流速が最大となるのは護岸天端となる。また流速の値は、嵩上げ高と同様にマングローブ無し、有りによる明確な違いは確認できなかった。

本シミュレーション解析で石積護岸周辺に発生する流速は、イスバッシュ式から算定した限界流速に対して約 1/3 程度となる。また、流速のピークは図 7-29、図 7-30 を見ても分かる様に津波到着付近で最大となり、それ以後は 1/2 程度に低下する傾向となる。以上の結果より、今次津波に対して石積護岸は動かないものと想定される。

ただし、実際に工事で配置される石積重量は均一ではなく、本照査で設定した石積の重量よりも軽いものが配置されていることも想定される。このような今回の評価条件との相違等により、石積が動く可能性を排除できないが、図 7-31 に示す背面の嵩上げ道路や樹木により堤内への移動は抑制されるものと考えられる。

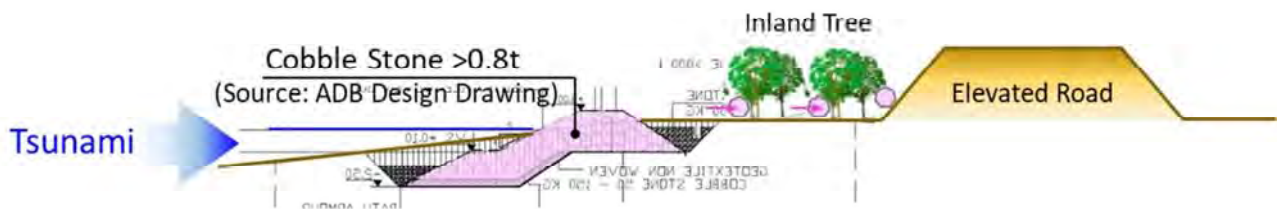


図 7-31 石積護岸と嵩上げ道路、樹木の位置関係

7-5 パル湾南岸部における津波対策（構造物対策）の推奨案

本章7-3、7-4の植生による津波軽減効果の検証結果、および以下に示すパル湾南岸部の周辺条件を考慮した結果より、津波対策としての嵩上げ道路に関して、植生による津波軽減効果を期待してその高さを低くすることはせず、6-3で設定したMSL+5.0mとすることを推奨する。

<理由>

(1) 模型実験、シミュレーション解析による津波軽減効果の検証結果

- 水理模型実験では、マングローブ、樹木で一定の津波軽減効果が確認された。
- 今次津波の周期を再現したシミュレーション結果では、水理模型実験より津波軽減効果は小さくなる傾向が確認された。

(2) パル湾南岸部の周辺条件

- 図 7-3 2 に示すように、パル南岸部の東側は海底が急傾斜となり、マングローブの植生候補地が西側のみに限定され、その延長は嵩上げ道路区間の沿岸延長の約 50%、また、マングローブ幅を 50m 以上(最大 61m)配置できるのは約 16%程度となる。従って、植生効果を津波対策範囲全体に期待することは出来ない。

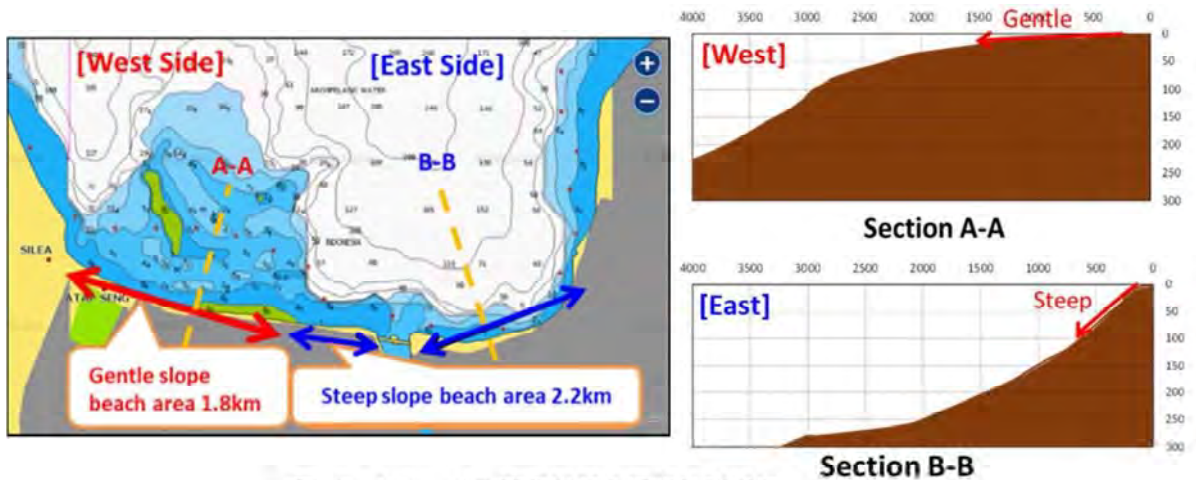
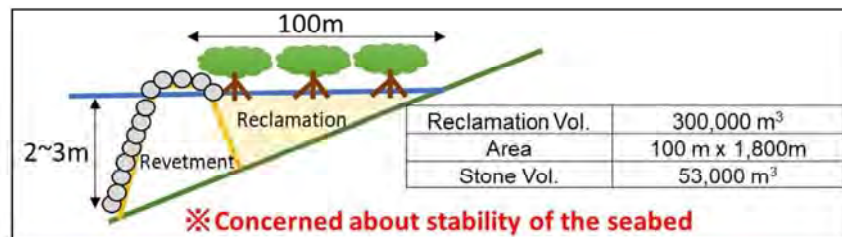


図 7-3 2 パル湾南岸部の海底地形状況

- 植生可能な西部でも、マングローブによる津波軽減効果を確実に期待するためには、ある一定の幅を配置する必要があると考えられるが、このためには図 7-3 3 のように海中への盛土が必要となり、更なる海底地すべりの発生とコスト増が想定されるほか、環境への影響も懸念される。



7-1 に示した過去調査文献を踏まえ最低 100m の植栽幅が必要と仮定

図 7-3 3 マングローブ植生地確保のために要する概算数量(幅 100mm)

- マングローブの育成には最低でも 10 数年かかると言われており、またその育成は周辺環境により様々影響を受けるため、育成の確実性が課題となる。特にパル湾南岸エリアは比較的波が高い状況も確認されており(図 7-3 4)、マングローブの育成環境としては厳しいと考えられる(ヒアリングによれば被災前に周辺で確認されたマングローブは陸上側に近い一部のみであった)



図 7-3 4 パル湾南岸部の波状況 (2019 年 1 月末撮影)

- パル湾南岸の西側は、被災前には漁船が多数停泊しており、被災後の現在も周辺では海産物を扱う商売が行われている。このため周辺の沿岸は漁船の停泊施設や航路との調整が必要と考えられ、植生範囲に制約を受ける可能性がある(図 7-3 5)。

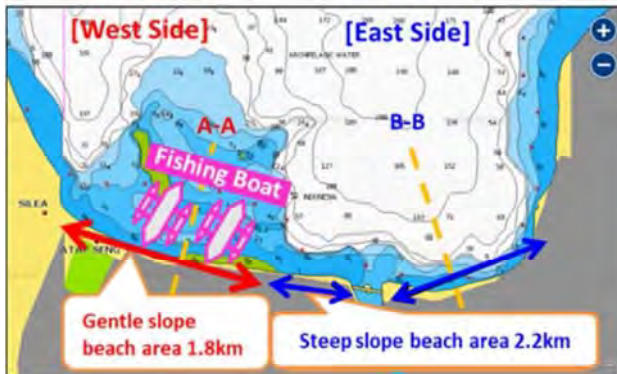


図 7-3 5 パル湾南岸部 漁業関係者との調整 (左は 2019 年 3 月撮影)

ただし、表 7-1 に提示したように沿岸部の植生には津波軽減以外にも、被災時の二次被害防止、人命救助に寄与する効果が多数あることから、植生可能な範囲にはこれを推奨する。

第 8 章 パル湾南部の津波対策計画概要

8-1 パル湾南岸 津波対策計画概要図

前章までの検討結果を踏まえ、パル湾南岸部における植生と嵩上げ道路の組合せによる津波対策の計画概要図を図 8-1、図 8-2 に示す。なお、植生に関しては JICA ローンの対象外であり、詳細については、今後インドネシア側で検討される予定である。

8-1-1 パル湾南岸西部

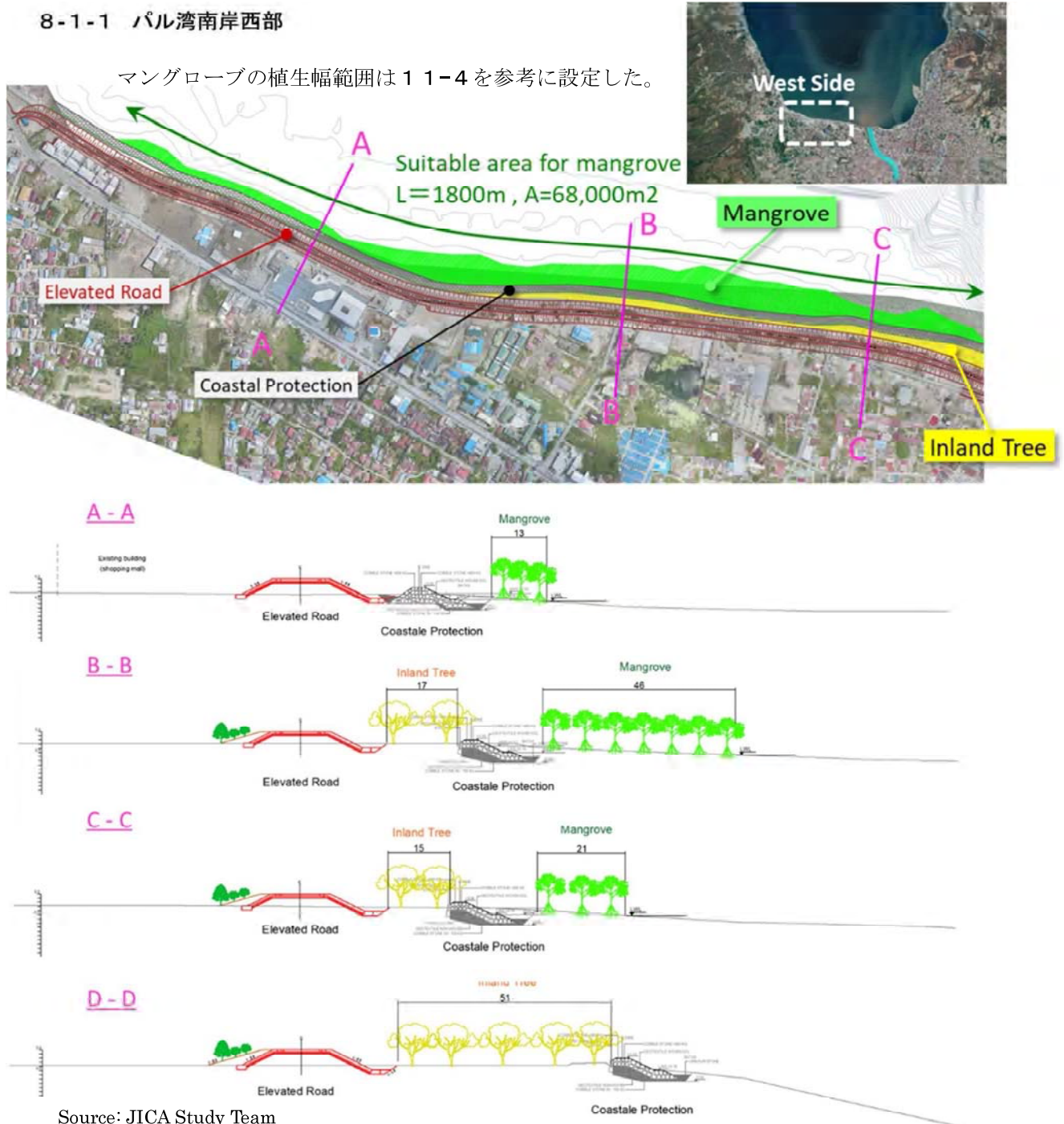
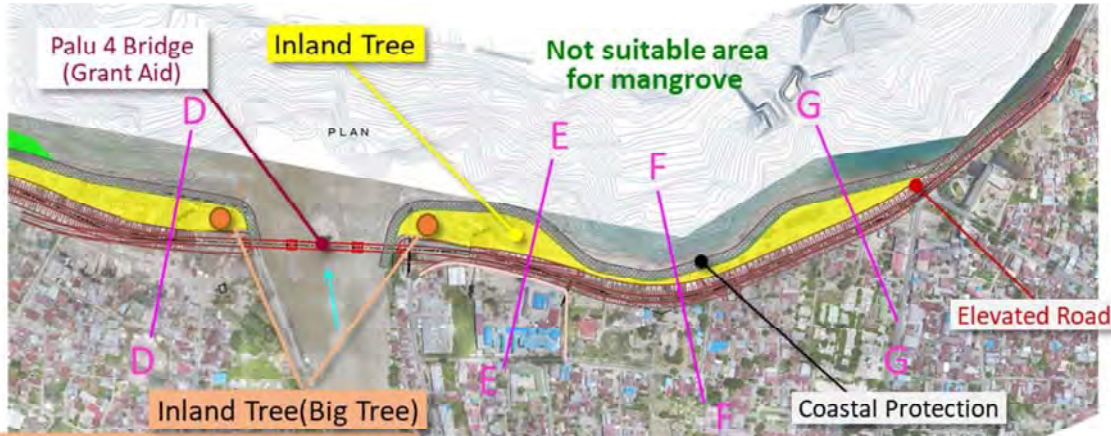


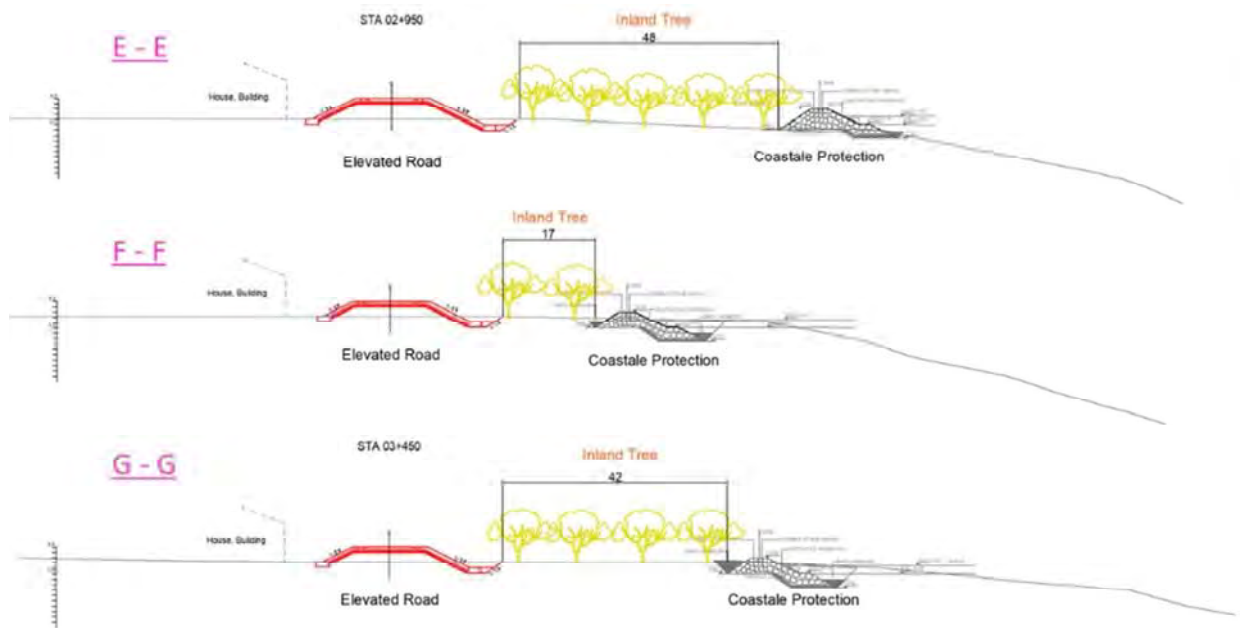
図 8-1 津波対策計画平面図（パル湾南岸西部）

8-1-2 パル湾南岸東部

パル川河口に公園を整備する計画があるとの情報から、BNPB 長官要望の巨木は、無償支援の Palu 4 橋とともに周辺のマニユメント的要素となることを考慮して、河口部両岸に配置※することを計画した。



As a park monument with Palu 4 Bridge



Source: JICA Study Team

※:巨木は Palu4 橋の橋台部に比較的近くなるため、津波による漂流物（船、倒木等）からの構造物保護にも寄与すると考えられる

図 8-2 津波対策計画平面図（パル湾南岸東部）

8-2 パル湾南部 津波対策完成予想図

植生、嵩上げ道路、沿岸護岸および JICA 無償援助対象の PaluIV 橋について現時点の情報を反映した完成予想図を図 8-3、図 8-4 に示す。



図 8-3 パル湾南岸部完成予想図（1）



Source: JICA Study Team

図 8-4 パル湾南岸部完成予想図（2）

第 9 章 避難計画の基本方針

9-1 概要

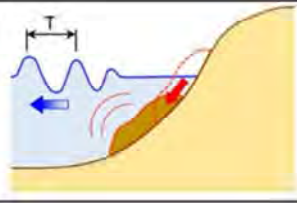
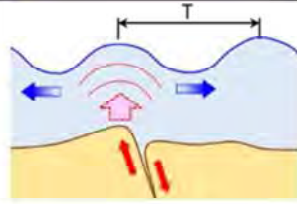
本章では第 4 章で作成した津波ハザードマップに基づいて、パル湾で想定される津波を踏まえた避難計画の基本方針についての検討を行う。なお、本避難計画の最終的な計画については、今後インドネシア側でも検討の上、決定される必要がある。

9-2 検討方針

以下に本避難計画の基本方針を検討するにあたっての方針を以下に示す。

- ✓ 津波ハザードマップでは、今次津波である沿岸地すべりを原因としたもの、マカッサル海峡の断層ずれを原因としたものが作成されている。したがって、避難計画の策定では、この 2 つの津波を対象に検討する。この 2 つの津波は表 9-1 に示す通り、今次津波は到達時間が非常に短く、海溝型津波は湾外から到達するため多少時間がかかるという特徴がある。
- ✓ 避難計画は、嵩上げ道路が計画されているパル湾南岸部と、それ以外のパル湾東西沿岸部の 2 つの検討エリア分けして検討する。

表 9-1 パル湾で想定される津波の種類と特徴

		Couse Image	Wave Length (T)	Tsunami Arrival Time	Evacuation Time
Type of Tsunami	Coastal Landslides (Sep. 2018)		Short	Quick Approx. 5min	Short
	Fault Rupture		Long	Slow Approx. 20min	Long

Source: JICA Survey Team

9-3 避難計画の基本方針

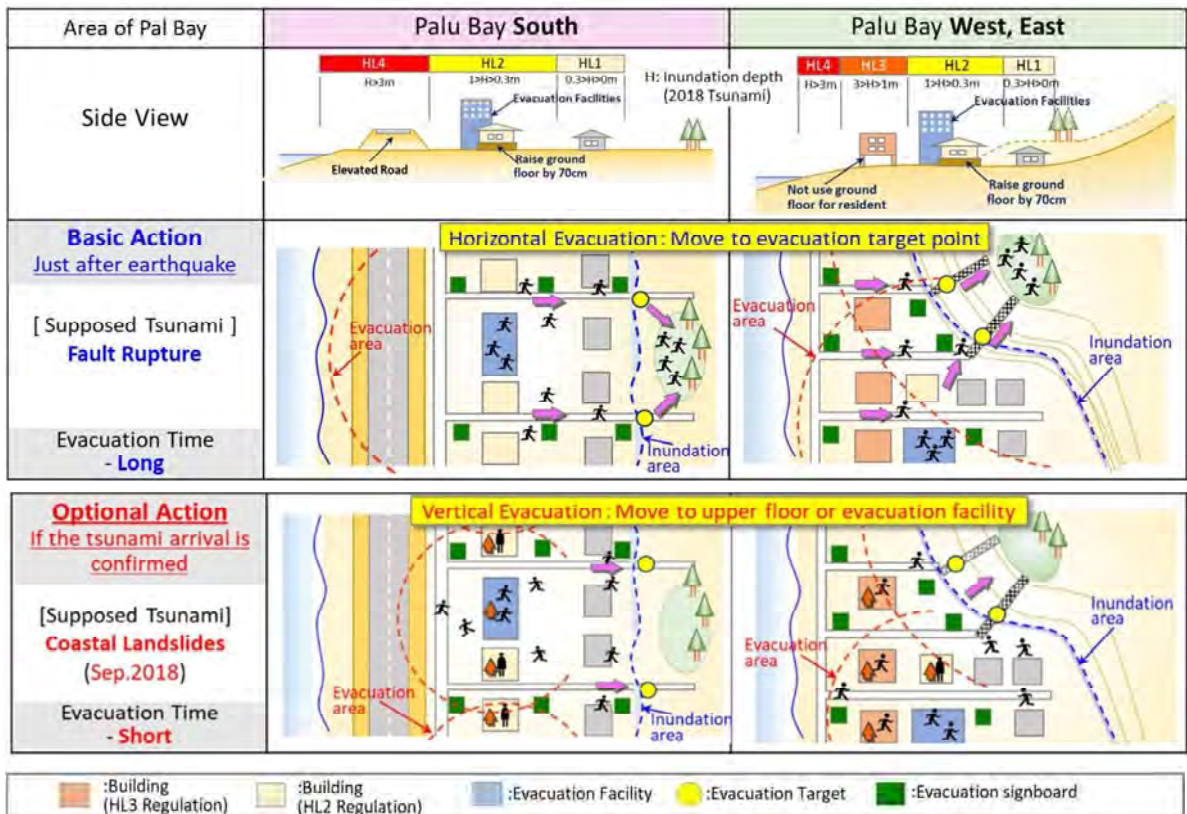
図 9-2 に検討エリアの分類を、図 9-1 に各検討エリアに対する避難計画の基本方針を示す。側面図における HL1~HL4 は今次津波の浸水深に対するハザードレベルを示しており、津波対策の嵩上げ道路が建設されるパル湾南岸部では、越流後の浸水深が 1m 以下に抑えられるため、HL3（浸水深が 1m~3m の範囲）は無い。一方、東西沿岸部は、浸水深に応じて HL1~HL4 のエリアに分けられる（海溝型津波と今次津波の HL 区分については 4-3-3 を参照）。

今次津波に対する HL3、HL2 のエリアの新築建物には以下の建築規制を設定する計画である。

- HL3：コンクリート構造物で 2 階建て以上。居室は 2 階以上に設ける
- HL2：居室は地表から 70cm 以上高く設定する

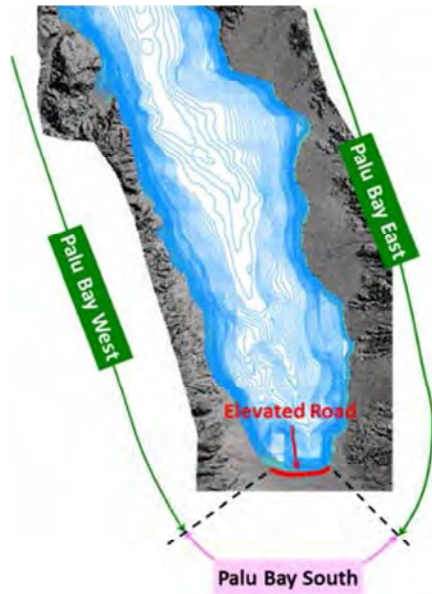
先に示した対象津波の特徴を踏まえ、以下に避難計画の基本方針を示す。

- ◆ 基本避難行動：地震発生後、最大津波である海溝型地震を想定した水平方向の避難行動を行うものとし、避難看板に従って指定の避難目標地点を目指す。
- ◆ オプション避難行動：避難行動の早期、もしくは途中で津波の到来が確認された場合（=到達時間の早い今次津波を想定）、今次津波に対する建築規制に準拠した建物の上層階への垂直方向避難を行う。



Source: JICA Survey Team

図 9-1 パル湾の津波避難計画（案）



Source: JICA Survey Team

図 9-2 避難計画検討エリアの分類

避難設備の参考として、以下に我が国の津波避難施設および避難救命艇の事例を図 9-3 に示す。



Source: <http://www.town.yoshida.shizuoka.jp/3173.htm> , <http://www.fj-i.co.jp/tunami2/tawa1.htm>



Source: <http://www.cajs.or.jp/02detail.html?id=95>
<https://toyokeizai.net/articles/-/199464>

図 9-3 国内の避難施設、避難救命艇事例

第 10 章 今後の詳細設計、ローン事業に対する申し送り事項

パル湾の津波対策に関する検討を踏まえ、今後の詳細設計、ローン事業に対する申し送り事項を以下に記載する。

➤ ADB 護岸との調整

ADB 護岸は現在工事中との情報を得ているが、2018 年災害で沿岸部の複数個所で地すべりが発生していることから、現場対応で計画の見直しがされている可能性がある。また、これまでに受領している図面では、既設排水設備の復旧等も計画しているようであり、最終図面を確認の上、必要に応じて嵩上げ道路との調整が必要と考えられる。

➤ 嵩上げ道路

本嵩上げ道路は越流を許容する構造のため、今後の詳細設計では BBB (Build Back Better) のコンセプトからも、日本の津波被害を踏まえた施設の効果が粘り強く発揮できる構造を具体的に計画に反映することが望ましい。本業務を通じた留意点、対応案を 6-5 に取りまとめている。特にパル湾南岸の津波対策として、今次津波による浸水深を 1m 以下とするには、嵩上げ道路高を地震時に担保することが条件となるため、設計段階の盛土材料の選定、施工段階の管理方法の検討のほか、施工基盤の沈下対策、圧密沈下による動態観測、クラック発生等に対する継続的なモニタリングなどが必要と考えられる。

➤ 植生計画

津波対策は、植生と嵩上げ道路との組合せを基本とすることをインドネシア側から要望されているが、植生に関してはインドネシア側で計画、実施する計画である。第 6 章に示した嵩上げ道路の基本断面計画では、山側の法面を覆土してここも植生することを想定しており、詳細設計段階では本計画を含めてインドネシア側の植生計画との調整が必要と考えられる。

➤ 避難計画

避難計画は今実津波だけでなく、マカッサル海峡での海溝型地震による津波も対象とすることを想定している。本計画を詳細に進める場合、最大津波となる後者の津波による浸水範囲を確認の上、避難可能範囲や避難目標地点などを設定する必要があるが、2016 年に作成したこのハザードマップがインドネシア全域を対象としたものであったため、パル湾沿岸の浸水域の精度が粗く、本プロジェクトにてスージングを行っている。また、業務期間中に、本ハザードマップを作成した BG へ前提となる解析条件の情報提供を依頼したが、結果として受領できなかった経緯がある。このため、避難計画を実施する前に BG で作成したハザードマップの条件、精度について確認しておくのが望ましい。

第 9 章の避難計画では、2 タイプの津波が想定されるため、これに対応すべく 2 タイプの避難行動を設定した。しかし、本委員会討議の中では、「2 つの避難行動を設定した場合、住民がどちらの行動をとれば良いか迷うのではないか」との意見もあった。避難計画については、当事者であるインドネシア側（政府、地元）で議論のうえで、最終的に決定する必要がある。そして本方針決定後、必要となる避難施設や地元住民の避難訓練等へ反映する必要がある。

なお、地すべり型の津波は到達時間が短いため、地震発生直後に垂直避難を行うには、この津波を予測・検知できるのかが課題であり、これに対応するには今後の技術開発が必要である。

第 11 章 参考資料

11-1 津波浸水深調査結果

TSUNAMI INUNDATION DEPTH SURVEY

JICA PROJECT TEAM

REPORT Palu Bay, Central Sulawesi

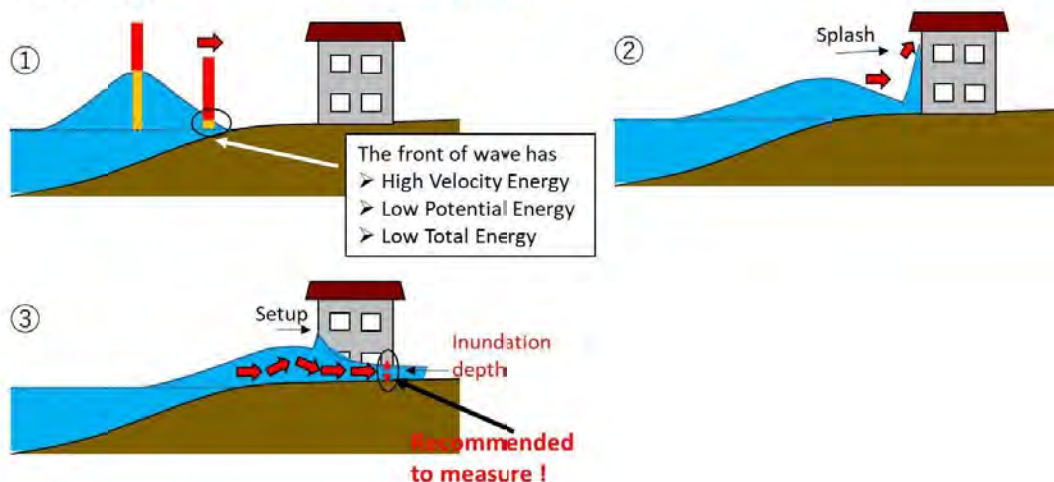
Palu, December 2019

METHODOLOGY

What is the inundation depth ?

- Tsunami energy has 'Potential Energy' and 'Velocity Energy'.
- When tsunami wave passes through a building (or some artificial structures), part of the tsunami energy forms as Splash or Setup at the front side (seaside) of the building.
- In order to measure real body of the tsunami record (inundation depth), we are recommended to measure inside or side or behind part of the building.

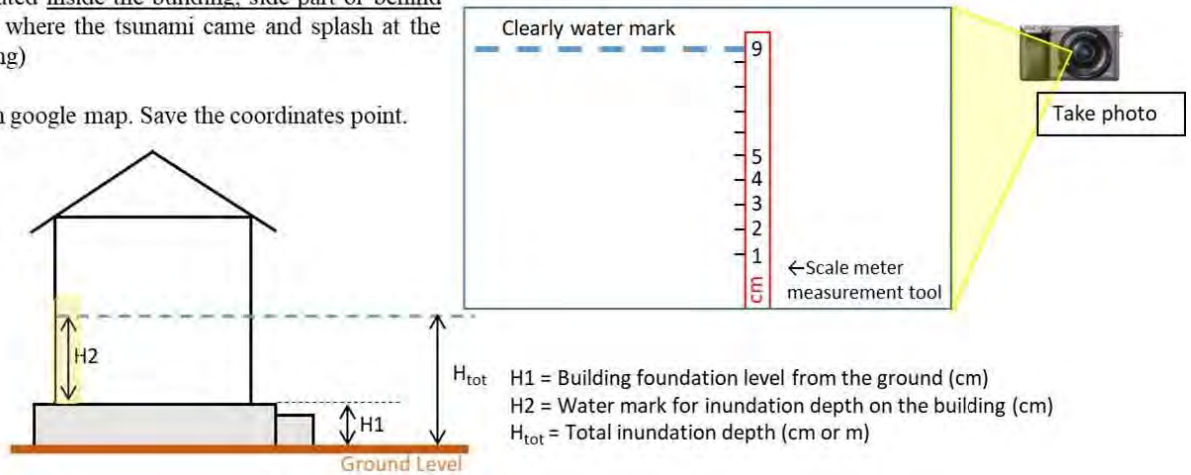
Total Energy = Potential Energy + Velocity Energy



MEASUREMENT METHODS

- ✓ Inundation Depth is a Water mark/ trace that gives evidence that the Tsunami inundate at the location for half hour or an hour or more. Please take notes and fill the form.
- ✓ The water mark is located inside the building, side part or behind the building (not area where the tsunami came and splash at the front side of the building)
- ✓ Point in the location on google map. Save the coordinates point.

1. By looking for visually evidence (constant watermark)



2. Local hearing for deeply cross-matching the evidence and investigation information from victims and witnesses

3

MEASUREMENT METHODS

1. By looking for visually evidence (constant watermark)



Tsunami Survey Point 1 (TSB1)

Elevation Recorded in Handheld GPS : 3 meter
DEM-based Point Elevation : 3.096 meter
Inundation Height : 3.1 m

Evidence Found :



Moist and visually seen waterline on the wall



There is a crack-line on the wall which presumably connected with bedding brick on door sills. (Water pressure on the column ?)

Tree on Green point as reference :



Broken branch
Possibly hit by splash.

+4.2 m

+3.1 m

Moldy stem.



4

MEASUREMENT METHODS

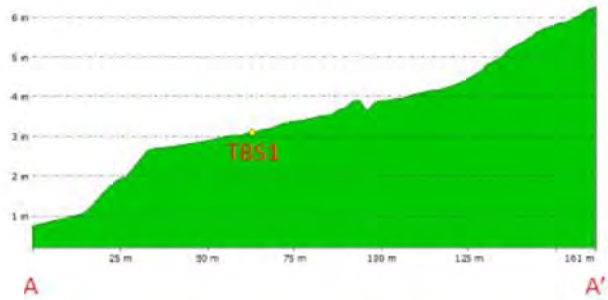


Tsunami Survey Point 1 (TSB1)

Elevation Recorded in Handheld GPS : 3 meter

DEM-based Point Elevation : 3.096 meter

Topographic Analysis:



Predicted tsunami inundation distance is 160 m.

5

MEASUREMENT METHODS



1. By looking for visually evidence (constant watermark)



Tsunami Survey Point 2 (TSB2)

Elevation Recorded in Handheld GPS : 7 meter

DEM-based Point Elevation : 6.926 meter

Inundation Height : 0.45 m

Evidence Found :



Indicated
Plunging/Surging
Wave Area

Darker-mark on
the wall indicating
inundated area

6

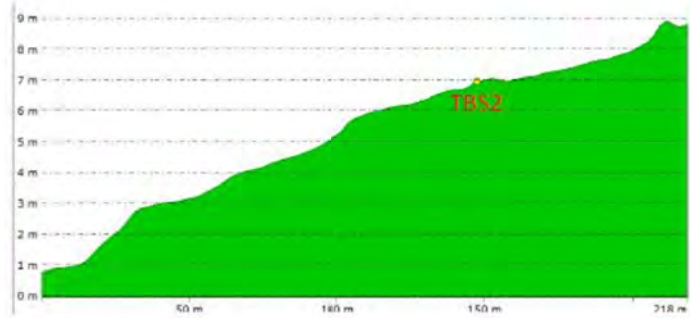
MEASUREMENT METHODS



Tsunami Survey Point 2 (TSB2)

Elevation Recorded in Handheld GPS : 7 meter
 DEM-based Point Elevation : 6.926 meter
 Inundation Height : 0.45 m

Topographic Analysis :



Predicted tsunami inundation distance is 200 m.

7

MEASUREMENT METHODS

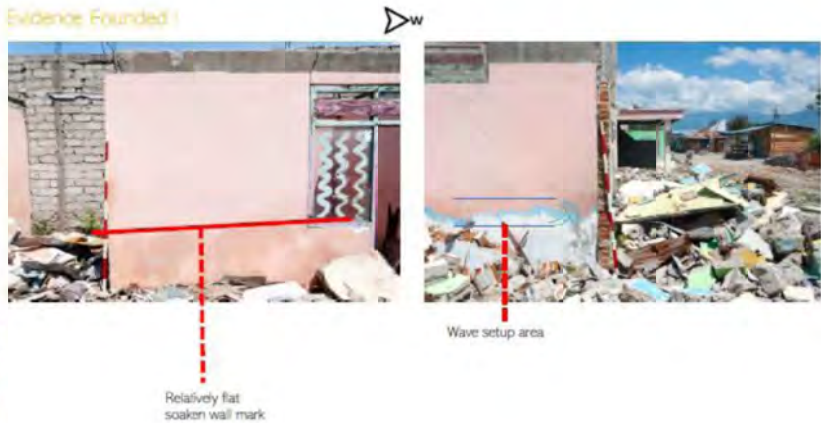
1. By looking for visually evidence (constant watermark)



Tsunami Survey Point 3 (TSB3)

Elevation Recorded in Handheld GPS : 7 meter
 DEM-based Point Elevation : 7.231 meter
 Inundation Height : 0.65 m

Evidence Found :



8

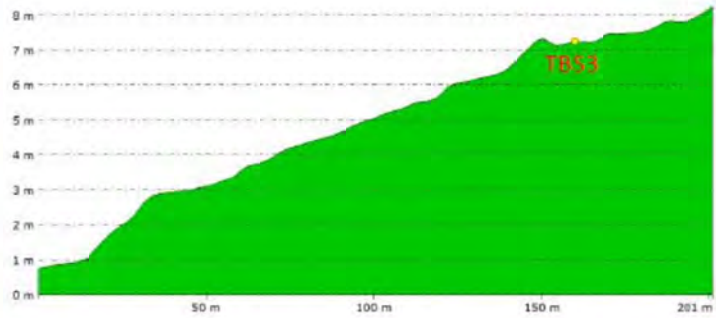
MEASUREMENT METHODS



Tsunami Survey Point 3 (TSB3)

Elevation Recorded in Handheld GPS : 7 meter
 DEM-based Point Elevation : 7.231 meter
 Inundation Height : 0.65 m

Topographic Analysis :



Predicted tsunami inundation distance is approximately 200 m.

3

MEASUREMENT METHODS

1. By looking for visually evidence (constant watermark)



Tsunami Survey Point 4 (TSB4)

Elevation Recorded in Handheld GPS : 4.85 meter
 DEM-based Point Elevation : 4.786 meter
 Inundation Height : 0 m

Evidence Founded :



North far electrical pole tilt to the east (perpendicular to picture) while near pole tilt to the west, the closest one even falling. By earthquake?

10

MEASUREMENT METHODS



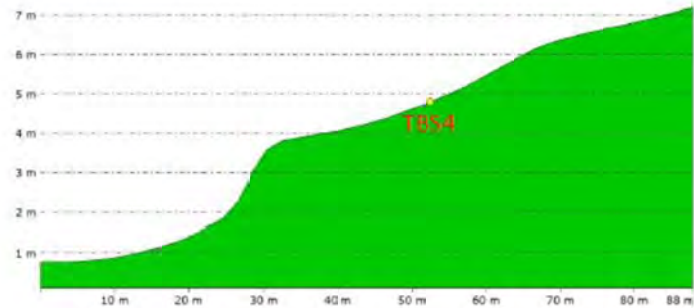
Tsunami Survey Point 4 (TSB4)

Elevation Recorded in Handheld GPS : 4.85 meter

DEM-based Point Elevation : 4.786 meter

Inundation Height : 0 m

Evidence Found:



Topographical check is necessary to clarified whether the 30m coastal area was slide or not.

11

MEASUREMENT METHODS

Tsunami Survey Point 4 (TSB4)

Local Hearing

Mr. Fatah; fisherman (victim)



He said coastal sea in eastern gulf has become shallow. There used to be a coral where they put their anchor boat; and catch some coral fishes. Now he claimed the coral was gone, and the coral fish; which tends to swim in groups, are scattered away. By his judgement, the TBS 4 area was settled around 4 m; judging from the anchor-rope length he used to park his boat. He found also most of south eastern of Palu Gulf area become shallow.

He gained from his friend whose he was fishing in the sea on Mamboro area during the earthquake. As the earthquake happened, suddenly the seabed underneath his feet felt as if they want to absorb him and there was bubbles coming from the deep water. The he swam forward to open sea looking for help as the wave height suddenly increased. When his friend took him up to the boat, he saw the tsunami coming to inland and swept the coastal area.



2. Local hearing for deeply cross-matching the evidence and investigation information from victims and witnesses

12

TSUNAMI INUNDATION DEPTH SURVEY ALONG PALU BAY AREA



SURVEY AREA – 1 – LERO TATARI VILLAGE



Effect of Mangrove or Topography? Lero Tatar Area

- The tree area (green) was damaged by the Tsunami
- Boat area didn't touched by Tsunami

12 m landslide

12 m area landslide, 20 houses gone.

Local boat area. No landslide

Damaged by Tsunami

Damaged by Tsunami

Tree Area

The object was moved by the Tsunami

Landslide occurred as far as 12 m area from the edge coastal

15

The Boundary of Tsunami in Palu Bay – East Area – Lero Tatar

E5. Inundation depth is 27 cm (+elevation). Total inundation depth is 1.27 m. (including measured ground level 1 m). The distance from coastal is 74 m

E2. Inundation depth is 37 cm (+elevation). Total inundation depth is 1.37 m. (including measured ground level 1 m). The distance from coastal is 66.76 m

E3. The water boundary. The distance from coastal is 88.38 m

E4. Ground level that lifted down is 1 m. The distance from coastal is 30.10 m

E1. Inundation depth is 100 cm (+elevation). Total inundation depth is 2 m. (including measured ground level 1 m). The distance from coastal is 52.87 m

The village office destroyed by the tsunami

Name	Latitude	Longitudinal	Htotal (m)
E1	0 37 43.69	119 48 42.44	2
E2	0 37 42.79	119 48 42.34	1.37
E3	0 37 42.03	119 48 43.12	1
E4	0 37 42.87	119 48 41.32	1
E5	0 37 42.25	119 48 42.12	1.27

Effect of Mangrove or Topography? Lero Tatar Area

The inundation depth in landslide area higher than the boat area. Even though there are several trees behind the landslide area, the trees were washed away.

Local boat area. Inundation depth is less than **0.5 m**

Inundation depth is less than **0.5 m** (about 1.5 m above the mean sea level)

Some trees and houses were damaged by the Tsunami

Inundation depth is about **1.5 m**

Inundation depth is less than **0.5m**

No damaged by Tsunami

Water boundary

12 m landslide

boat Area

Tree Area

Pelabuhan Lero

Rumah Makamkurga AMAKISUSA

Google

The Boundary of Tsunami in Palu Bay – East Area – Lero Tatar

The houses in the area were washed away by tsunami.

E7. Ground level that lifted down is 1 m. The distance from coastal is **8.79 m**

E8. Ground level that lifted down is 45 cm. The distance from coastal is **4.14 m**

E6. Inundation depth is **36 cm** (+elevation). Total inundation depth is **1.81 m**, (including measured ground level 1.45 m).

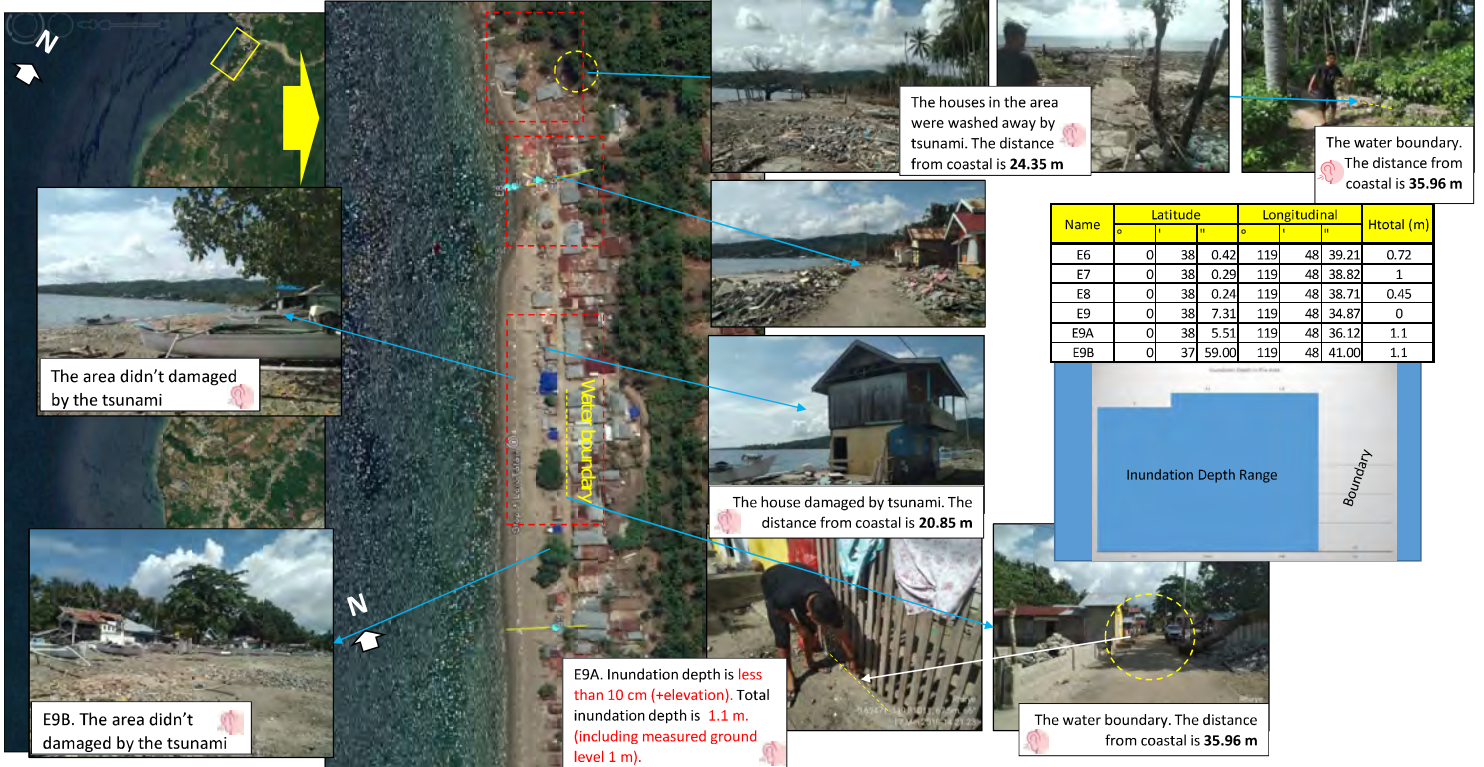
The water boundary. The distance from coastal is **30.58 m**

Name	o	'	''	o	'	''	Htotal (m)
E6	0	38	0.42	119	48	39.21	0.72
E7	0	38	0.29	119	48	38.82	1
E8	0	38	0.24	119	48	38.71	0.45
E9	0	38	7.31	119	48	34.87	0
E9A	0	38	5.51	119	48	36.12	1.1
E9B	0	37	59.00	119	48	41.00	1.1

Inundation Depth Range

Boundary

The Boundary of Tsunami in Palu Bay – East Area – Lero Tatar

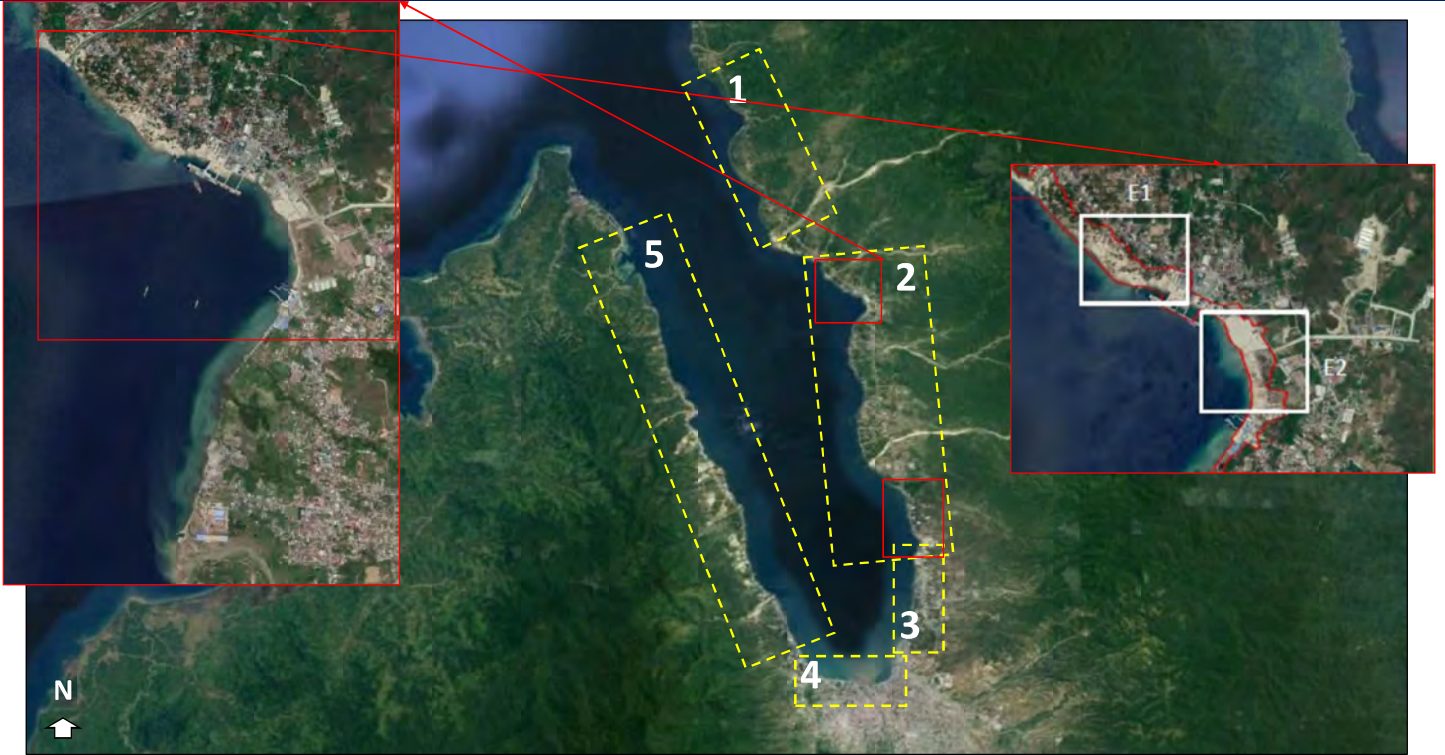


INUNDATION DATA at SURVEY AREA – 1

Table of Inundation Depth
(Lero Tatar Village Area; E1 to E9B)

Area	Lero Tatar						H1 (m) (ground)	H2 (m)	H3 (m)	H4 (m)	Htotal (m)	REMARKS
	Name	°	'	"	°	'						
E1	0	37	43.69	119	48	42.44	1	0	0	1	2	beside building
E2	0	37	42.79	119	48	42.34	1	0	0	0.37	1.37	beside building
E3	0	37	42.03	119	48	43.12	1	0	0	0	1	boundry water 80m from coast
E4	0	37	42.87	119	48	41.32	1	0	0	0	1	ground level height
E5	0	37	42.25	119	48	42.12	1	0.27	0	0	1.27	behind the building
E6	0	38	0.42	119	48	39.21	0.45	1	0	0.36	1.81	20m from coast
E7	0	38	0.29	119	48	38.82	1	0	0	0	1	ground level1
E8	0	38	0.24	119	48	38.71	0.45	0	0	0	0.45	ground level2
E9	0	38	7.31	119	48	34.87	0	0	0	0	0	boundry water 30.58m from coast
E9A	0	38	5.51	119	48	36.12	1	0	0	0.1	1.1	small road in front of the house
E9B	0	37	59.00	119	48	41.00	1	0	0	0.1	1.1	near small plantation area

SURVEY AREA - 2



E1



The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E1)

Est-2a. Inundation depth is less than 0.5m

est-2. Inundation depth is less than 0.5m

Topography level is less than 1 m

Water boundary

Inundation depth is less than 0.5m

est-1. Inundation depth is about 1m

There is no obvious difference in water height between the area behind the trees area and without trees (Northwest, almost the same topography, near river)

Name	Latitude	Longitudinal	Htotal (m)
Survey on May 27			
est-1	0 42 14.00	119 50 57.00	1
est-2	0 42 6.89	119 50 50.73	0.5
est-2a	0 42 6.65	119 50 50.97	0.2

LEGEND :
----- Water boundary

The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E1)

est-3. Inundation depth is about 0.5m

est-4. Inundation depth is less than 0.5m

Some houses have been washed away

Water boundary

Est-5a. Inundation depth is less than 0.5m

est-5. Inundation depth is less than 0.5m

Some trees and houses have been washed away

Name	Latitude	Longitudinal	Htotal (m)
Survey on May 27			
est-3	0 42 22.00	119 51 5.00	0.5
est-4	0 42 28.11	119 51 12.85	0.3
est-5	0 42 30.08	119 51 20.11	0.25
est-5a	0 42 29.30	119 51 20.33	0.1



LEGEND :
----- Water boundary

The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E1) – Pantoloan Port Area



Inundation Area

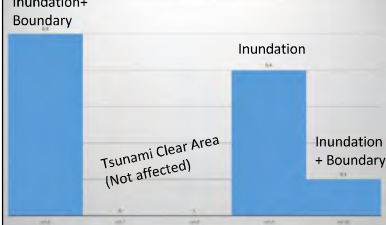
The Pantoloan Port area has variety inundation depth of Tsunami





est-6. Inundation depth is about **0.5m**. The water boundary is located between the port and mosque guardrail


Name	Latitude		Longitudinal		Htotal (m)		
	°	'	°	'			
Survey on May 27							
est-6	0	42	30.32	119	51	23.15	0.5
est-7	0	42	34.81	119	51	28.54	0
est-8	0	42	30.00	119	51	29.00	0
est-9	0	42	38.54	119	51	32.07	0.4
est-10	0	42	37.92	119	51	37.21	0.1

Inundation Depth in The Area







est-7. Tsunami came about two blocks behind this containers boxes (water boundary)




est-8. Tsunami didn't touch the area





est-9. Inundation depth is less than **0.5m**

LEGEND :
----- Water boundary



est-10. The boundary of the tsunami is about **180 m** from the coastal edge

E2



The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E2) – Palu Customs Office Area

Est-12. Tsunami didn't touch the area because there were fences along behind the area

Est-13. Tsunami didn't touch the area because there were fences along behind the area

Est-13-1. Tsunami didn't touch the area

Est-16. The boundary of the tsunami

Est-15. Inundation depth is about 4 m from msl

Est-14. Inundation depth is 0.1 (less than 0.5m)

LEGEND :
 - - - - - Water boundary

Name	Latitude	Longitude	Htotal (m)
Survey on May 27			
est-11	0 42 41.76	119 51 40.42	0
est-12	0 42 52.15	119 51 47.41	0
est-13	0 43 0.74	119 51 52.85	0
est-13_1	0 43 3.00	119 51 54.00	0
est-14	0 43 12.25	119 51 41.93	0.1
est-15	0 43 8.85	119 51 38.64	4
est-16	0 43 5.97	119 51 41.14	0

28

The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E2) – Palu Customs Office Area

Est-26. Water boundary is about 0.1 m. Total is 2.1 m

The distance of inundation to the coastal edge is about 96.7m

Est-17_1. Inundation depth is about 1m

Est-14-1. Inundation depth is less than 0.5m

Est-28. The topography is around 2m

Est-27. Inundation depth is about 1m. Total is 3 m

Est-14_3. Tsunami didn't touch the area

LEGEND :
 - - - - - Water boundary

Name	Latitude	Longitude	Htotal (m)
Survey on May 27			
est-14_1	0 43 13.16	119 51 42.84	0.1
est-14_2	0 43 12.25	119 51 41.93	0
est-14_3	0 43 17.30	119 51 40.45	0
est-17_1	0 43 11.55	119 51 42.72	0.1
est-17_1	0 43 9.47	119 51 42.42	1
est-17_2	0 43 7.84	119 51 43.74	0.1
South of Palu Custom Office			
est-26	0 43 20.70	119 51 34.17	2.1
est-27	0 43 22.06	119 51 32.57	3
est-28	0 43 19.39	119 51 31.66	2

29

INUNDATION DATA at SURVEY AREA – 2

Table of Inundation Depth
(Pantoloan Port & Palu Custom Office Area; est-1 to 17)

Water Boundary	
BG Point confirmation	
Clear area of Tsunami Affected	

Name	Latitude			Longitudinal			Latitude	Longitudinal	H1 (m)			Inundation		Tsunami		REMARKS
	°	'	"	°	'	"			(ground level)	H2 (m)	H3 (m)	Depth (No GL, H4 (m))	Htotal (m)	Splash Height (m)	Dcoastal (m)	
Survey on May 27																
est-1	0	42	14.00	119	50	57.00	-0.70388889	119.849167				1	1			beside local house (hearing and estimated)
est-2	0	42	6.89	119	50	50.73	-0.70191389	119.847425				0.5	0.5			in front of local house (facing the river)
est-2a	0	42	6.65	119	50	50.97	-0.70184722	119.847492				0.2	0.2			Water boundary
est-3	0	42	22.00	119	51	5.00	-0.70611111	119.851389				0.5	0.5			Local house
est-4	0	42	28.11	119	51	12.85	-0.70780833	119.853569				0.3	0.3			Water boundary (inside and beside local house estimation)
est-5	0	42	30.08	119	51	20.11	-0.70835556	119.855586				0.25	0.25			in front of local house (facing the road)
est-5a	0	42	29.30	119	51	20.33	-0.70813889	119.855647				0.1	0.1			water boundary
AREA : PANTOLOAN PORT																
est-6	0	42	30.32	119	51	23.15	-0.70842222	119.856431				0.5	0.5			water boundary between port and mosque guardrail
est-7	0	42	34.81	119	51	28.54	-0.761909	119.857928				0	0			no inundation according to the guard
est-8	0	42	30.00	119	51	29.00	-0.761909	119.858056				0	0			tsunami didn't come to the area
est-9	0	42	38.54	119	51	32.07	-0.71070556	119.858908				0.4	0.4			guardhouse
est-10	0	42	37.92	119	51	37.21	-0.71053333	119.860336				0.1	0.1			water boundary about 180 m from coastal
AREA : PALU CUSTOMS OFFICE																
est-11	0	42	41.76	119	51	40.42	-0.761909	119.861228				0	0			tsunami didn't come to the area
est-12	0	42	52.15	119	51	47.41	-0.761909	119.863169				0	0			tsunami didn't come to the area
est-13	0	43	0.74	119	51	52.85	-0.761909	119.864681				0	0			tsunami didn't come to the area
est-13_1	0	43	3.00	119	51	54.00	-0.761909	119.865000				0	0			tsunami didn't come to the area
est-14	0	43	12.25	119	51	41.93	-0.72006944	119.861647				0.1	0.1			guardhouse and portal of Custom Office
est-14_1	0	43	13.16	119	51	42.84	-0.72032222	119.861900				0.1	0.1			water boundary
est-14_2	0	43	12.25	119	51	41.93	-0.761909	119.861647				0	0			tsunami didn't come to the area
est-14_3	0	43	17.30	119	51	40.45	-0.761909	119.861236				0	0			tsunami didn't come to the area
est-15	0	43	8.85	119	51	38.64	-0.761909	119.860733				4	4			tsunami height at Custom Port
est-16	0	43	5.97	119	51	41.14	-0.761909	119.861428				0	0			water boundary, the tsunami height is unknown
est-17	0	43	11.55	119	51	42.72	-0.719875	119.861867				0.1	0.1			water boundary in front local house
est-17_1	0	43	9.47	119	51	42.42	-0.71929722	119.861783				1	1			in front local house. There is custom building and fences in front of the house.
est-17_2	0	43	7.84	119	51	43.74	-0.71884444	119.862150				0.1	0.1			Water boundary. Hearing from local people

30

INUNDATION DATA at SURVEY AREA – 2

Table of Inundation Depth
(South of Palu Custom Office Area; est-26 to est-28)

Name	Latitude			Longitudinal			Latitude	Longitudinal	H1 (m)			Inundation		Tsunami		REMARKS
	°	'	"	°	'	"			(ground level)	H2 (m)	H3 (m)	Depth (No GL, H4 (m))	Htotal (m)	Splash Height (m)	Dcoastal (m)	
South of Palu Custom Office																
est-26	0	43	20.70	119	51	34.17	-0.722417	119.859492				2	2.1			Water boundary according to local
est-27	0	43	22.06	119	51	32.57	-0.722794	119.859047				2	3			Local house
est-28	0	43	19.39	119	51	31.66	-0.722053	119.858794				2	2			Ground level from coastal

Water Boundary	
BG Point confirmation	
Clear area of Tsunami Affected	

31

SURVEY AREA - 2



E3



The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E3) – Mamboro Village Area

Name	Latitude	Longitudinal	Htotal (m)
Survey on May 27			
est-18	0 48 14.12	119 52 43.52	1
est-18_1	0 48 9.47	119 52 43.78	1.5
est-18_2	0 48 9.54	119 52 46.72	0.1
est-18_3	0 48 11.29	119 52 44.12	0.15
est-19	0 48 15.63	119 52 43.11	1
est-20	0 48 22.42	119 52 40.46	0.1
est-20_1	0 48 28.08	119 52 40.27	0
est-20_2	0 48 31.47	119 52 40.79	7
est-20_3	0 48 25.00	119 52 41.00	0.1

Est-18_1. Inundation depth is about **1.5m**

Est-18_2. Inundation depth less than **0.5m** and the boundary is near the hill

Est-18. Inundation depth is about **1m**

Head of Mamboro village confirmation

Est-19. Tsunami Inundation boundary area

Est-20_1. Tsunami Inundation boundary area

Est-20_2. Inundation depth is about **1m** from the ground. Topography is about **1m** above msl. Total is about **2 m**. Tsunami splash reached up to **2nd** level floor of the house at **7 m** height.

Est-20. Inundation depth is about **1m**. Inundation area is behind the tank.

LEGEND :
 ----- Water boundary

E4



The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E4)



The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E4) – BG Points Confirmation



INUNDATION DATA at SURVEY AREA – 2

Table of Inundation Depth
(Mamboro Village Area: est-18 to est-23)

Water Boundary	
BG Point confirmation	
Clear area of Tsunami Affected	

Name	Latitude			Longitudinal			H1 (m) (ground level)	H2 (m)	H3 (m)	Inundation Depth (No GL), H4 (m)	Htotal (m)	Tsunami Splash Height (m)	Dcoastal (m)	REMARKS
	°	'	"	°	'	"								
AREA : MAMBORO VILLAGE														
est-18	0	48	14.12	119	52	43.52	-0.803922	119.878756			1	1		inside elementary school. Local hearing
est-18_1	0	48	9.47	119	52	43.78	-0.802631	119.878828			1.5	1.5		inside broken local house, an open area from the coastal (hearing)
est-18_2	0	48	9.54	119	52	46.72	-0.802650	119.879644			0.1	0.1		water boundary, 302.23 m from coastal (hearing)
est-18_3	0	48	11.29	119	52	44.12	-0.803136	119.878922			0.15	0.15		water boundary, 220.83 m from coastal (hearing)
est-19	0	48	15.63	119	52	43.11	-0.804342	119.878642			1	1		the local house place in higher ground. (hearing)
est-20	0	48	22.42	119	52	40.46	-0.806228	119.877906			0.1	0.1		water boundary (hearing)
est-20_1	0	48	28.08	119	52	40.27	-0.807800	119.877853				0		unknown
est-20_2	0	48	31.5	119	52	40.79	-0.808742	119.877997	1		6		7	tsunami height according to local reach up to 2nd level of building (open area to coastal) - ground level estimation (SPLASH)
est-20_2	0	48	31.5	119	52	40.79	-0.808742	119.877997	1		1	2		inundation depth in the area surrounding
est-20_3	0	48	25.00	119	52	41.00	-0.806944	119.878056			0.1	0.1		water boundary (hearing)
est-21	0	49	2.37	119	52	53.35	-0.817325	119.881486	0		0	0		tsunami didn't touch the area
est-21-a	0	49	2.83	119	52	51.82	-0.817453	119.881061	0		2	2		in front of warehouse and the water boundary around 50 m at the back (hearing)
est-21-b	0	49	0.48	119	52	49.19	-0.816800	119.880331	0		0.2	0.2		in front of storehouse (hearing)
est-21-c	0	49	0.48	119	52	49.19	-0.816800	119.880331	1		2	3		tsunami height (hearing) + ground level 1 m (estimation)
JICA-16E	0	49	25.24	119	52	58.09	-0.823678	119.882803	1.5	1	1.1	3.6		Local house
JICA-17E	0	49	25.24	119	52	58.09	-0.823678	119.882803	0.7			0.7		Road level
JICA-18E	0	49	25.24	119	52	58.09	-0.823678	119.882803	0.8			0.8		Ground level
est-22	0	49	8.03	119	52	57.28	-0.818897	119.882578			0.15	0.15		water boundary (hearing)
est-23	0	49	8.68	119	52	55.78	-0.819078	119.882161			1	1		Local house (hearing)
JICA-13E	0	49	25.24	119	52	58.09	-0.823678	119.882803	2		0.5	2.5		No building or fence. BG Point is 4.34 m (Refer to Tsu06)
JICA-14E	0	49	25.24	119	52	58.09	-0.823678	119.882803	0			0	7.42	Dehydrated mangrove
JICA-15E	0	49	25.24	119	52	58.09	-0.823678	119.882803	0			0	7.42	Dehydrated mangrove

38

The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E4) – CITRA LAND HOUSING AREA



39

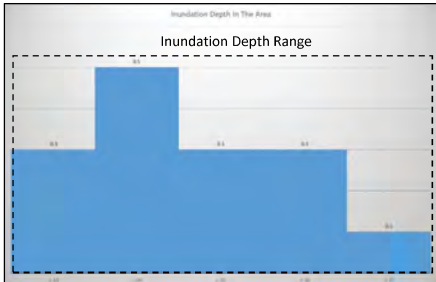
The Boundary of Tsunami in East Palu Bay – East Survey Area – 2 (E4) – CITRA LAND HOUSING AREA



Water inundation in the housing area came from the crack of the embankment which broke down and the others were entered from the south way when the tsunami occurred.



C-15. The flow of sea water broke through the gap during the tsunami



C-14. Inundation depth is about 0.5m



C-17. Inundation depth is less than 0.5m (Water boundary)

Name	Latitude			Longitudinal			Htotal (m)
	°	'	"	°	'	"	
c-13	0	49	42.45	119	52	47.08	0.3
c-14	0	49	52.55	119	52	49.70	0.5
c-15	0	49	44.99	119	52	45.91	0.3
c-16	0	49	44.92	119	52	48.95	0.3
c-17	0	49	52.89	119	52	55.28	0.1

INUNDATION DATA at SURVEY AREA – 2

Table of Inundation Depth
(Citra Land Housing Area : est-24 – est-25, c-1 to c-17)

Name	Latitude			Longitudinal			Latitude	Longitudinal	H1 (m)			Inundation Depth (No GL), H4 (m)	Htotal (m)	Tsunami Splash Height (m)	Dcoastal (m)	REMARKS
	°	'	"	°	'	"			°	'	"					
AREA : CITRA LAND HOUSING																
est-24	0	49	35.19	119	52	57.16	-0.826442	119.882544					0			Tsunami didn't touch the area. The topography is about 3 m
est-24a	0	49	35.88	119	52	52.74	-0.826633	119.881317					0			water boundary (unknown level). Tsunami didn't reach the road because of the topography
est-25	0	49	41.00	119	52	57.00	-0.828056	119.882500					0			tsunami didn't reach the area
c-1	0	49	38.56	119	52	49.79	-0.827378	119.880497					0	0		tsunami didn't reach the area
c-3	0	49	38.81	119	52	54.82	-0.827447	119.881894					0	0		clearing new area, tsunami didn't reach the area
c-10	0	49	40.63	119	52	49.35	-0.827953	119.880375					0	0		water boundary, 0.3 m
c-11	0	49	52.37	119	52	47.67	-0.831214	119.879908					0	0		water enter the area through this area
c-12	0	49	46.5	119	52	45.66	-0.829572	119.879350					0	0		tsunami didn't reach the area, there is embankment system of waterfront housing
c-13	0	49	42.45	119	52	47.08	-0.828458	119.879744					0.3	0.3		splash came from c11 area like a channel (hearing)
c-14	0	49	52.55	119	52	49.70	-0.831264	119.880472					0.5	0.5		splash came from this direction
c-15	0	49	44.99	119	52	45.91	-0.829164	119.879419					0.3	0.3		The flow of sea water broke through the gap during the tsunami
c-16	0	49	44.92	119	52	48.95	-0.829144	119.880264					0.3	0.3		water boundary, 0.3 m. The distance is 106.23 m from coastal
c-17	0	49	52.9	119	52	55.28	-0.831358	119.882022					0.1	0.1		water boundary reach on the road. The distance is 272.23 m from coastal

Water Boundary	
BG Point confirmation	
Clear area of Tsunami Affected	