地滑り津波と海講型地震津波に対する避難計画の検討

黄　はん[1]・永井　香織[2]・村田　慎[3]・渡部　真史[4]・有川　太郎[5]

[1]株式会社インテックソリューションパワー　第二金融システム事業部（〒151-0053 東京都渋谷区代々木3-25-2 あいおいニッセイ同和損保新宿ビル4F）
E-mail: kou_han@intec-sp.co.jp
[2]中央大学大学院　理工学研究科　都市人間環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
E-mail: a16.mkdb@g.chuo-u.ac.jp
[2]八千代エンジニアリング株式会社　事業統括本部　海外事業部　交通基盤部（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）
E-mail: murata@yachiyo-eng.co.jp
[4]正会員　中央大学助教　理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
E-mail: watanabe.07w@g.chuo-u.ac.jp
[5]正会員　中央大学教授　理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
E-mail: taro.arikawa.38d@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

2018年のパル津波以降，パル市では様々な津波被害軽減対策が検討されてきた．パル湾内で発生する地滑り津波は比較的早い津波到達時刻が予想される．一方，マカッサル海峡での海溝型地震起因津波が発生した場合，到達まで20分程度の猶予があるものの地滑り津波発生時よりも広い浸水範囲が予想される．本研究では，スラウェシ州で策定されている復興計画に基づき，地滑り津波および海溝型地震起因の津波の複合災害を想定したパル市街地における津波被害軽減方法を検討した．津波ハザードマップに基づいた避難所の選定や沿岸部における道路の嵩上げを想定した．その結果，地滑り津波に対しては沿岸部における避難所の適切な選定や嵩上げ道路による対策が重要であることが示された．また，海溝型津波に対しては津波外力に耐えうる避難所確保の重要性を示した．

Key Words : *Elevated road, tsunami evacuation, landslide tsunami, seismic tsunami, Palu*

1.　はじめに

(1)　研究背景及び目的

2018年のインドネシア・中部スラウェシ州における地滑り津波以降，甚大な津波被害が発生したパル湾内の沿岸地域においては，インドネシア政府を中心として，今後再び発生し得る津波災害を見据えた復旧・復興計画が推進されてきた[1)]．また，パル湾内では今次津波である地滑り津波に加えて，スラウェシ島西部に位置するマカッサル海峡沿いでの断層活動によって引き起こされる海溝型津波との同時発生も視野にいれた減災対策が必要とされており，異なる特徴をもった津波に対してハード・ソフトの施策を組み合わせた対策が検討されている[1)]．

パル湾南部に位置するパル市街地では，JICAをはじめとした日本国内支援委員会によって，ハード対策として道路の嵩上げやインフラ・公共施設の構造設計の見直しなどが計画されている．ソフト対策としては、津波ハザードマップに基づいた空間計画の策定が進められており、津波からの避難計画において活用されることが期待される。これらの現地における復興策定に基づき、地滑り津波と海溝型津波が同時に発生するような複合災害を想定した津波対策が求められる．

本研究では、パル市街地において，比較的早い到達時間が予想される地滑り津波と，到達時間は比較的遅いものの，広い浸水範囲が予想されるマカッサル海峡沿いでの海溝型津波の両津波に対しての避難行動及び津波対策を検討する．また，道路の嵩上げや，津波ハザードマップに基づいた避難所配置による効果を評価する．

(2)　研究概要

本研究ではまず，2018年にパル湾において発生した地滑りの波源モデルをはじめとして，複数の異なる規模の地滑り波源を想定し，パル市街地において津波浸水計算を行った．次に，これらの地滑り津波に対して避難シミ

ュレーションを実施し，津波被害抑制対策を施さない場合における死亡率の検討を行う．避難所の選定時には，地滑り津波及び海溝型津波に対応した津波ハザードマップ（津波HM）から示される浸水深さや現地の既存家屋の特徴を考慮した．さらに，パル市沿岸部で計画されている道路の嵩上げを想定して浸水計算を行い，避難シミュレーションによって嵩上げ道路の有効性を確認する．

2. 数値モデルの概要

本研究では，地滑り津波解析モデルを用いて，パル市街地における浸水計算を実施した．また，二層流モデルによって得られた時系列浸水深データを避難シミュレーションに用いた．避難シミュレーションには有川・大家[2]が開発した津波避難シミュレータを用いた．

(1) 二層流モデル

地すべり津波に対しては， Imamura & Imteaz[3]によって提案された非線形長波理論に基づく二層流モデルを用いた津波解析を実施した．当解析モデルでは，上層の水層と下層の土層それぞれにおいて連続式と運動方程式が解かれており，二層間の相互作用が考慮されている．入力条件である地滑り土塊は初期状態が楕円体に近似されており，幅，長さ，層厚，楕円体の中心の緯度経度が設定されている．地滑り土塊の方程式は以下に示す．

$$X' = (x - x_0)\cos\theta + (y - y_0)\sin\theta \tag{1}$$

$$Y' = -(x - x_0)\sin\theta + (y - y_0)\cos\theta \tag{2}$$

$$\frac{X'^2}{a^2} + \frac{Y'^2}{b^2} + \frac{z^2}{z_0^2} = 1 \tag{3}$$

$$Z = Z_0\sqrt{1 - \frac{X'^2}{a^2} - \frac{Y'^2}{b^2}} \qquad 1 - \frac{X'^2}{a^2} - \frac{Y'^2}{b^2} \geq 0 \tag{4}$$

$$Z = 0 \qquad 1 - \frac{X'^2}{a^2} - \frac{Y'^2}{b^2} \geq 0 \tag{5}$$

ここに，x, y, z: 座標軸の水平，垂直及び鉛直成分，x_0, y_0:楕円原点，X', Y':原点を移動した際の座標軸，a: 楕円X方向軸，b:楕円Y方向軸，z_0:楕円原点における地形変化量，θ: 回転角とする． また，二層流モデルにおいて，土塊が滑りだす斜面勾配（以下，限界勾配）を設定しており，本研究では特に言及しない限り14°として計算を行った．

(2) 避難シミュレータ

有川・大家[2]の避難シミュレータは，ポテンシャルモデルを使用し，避難者は地形や障害物を考慮した避難所までの最短距離経路を選択する．浸水深は，二層流モデルにより計算される値を読み込むことにより設定する．津波の挙動と避難行動を同時に計算することで，津波規模と避難条件に応じた避難率の定量的な評価を可能としている．

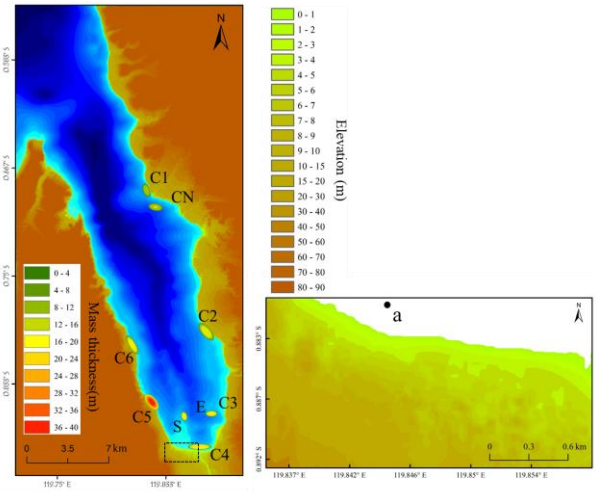

図-1 パル湾全体と地滑り波源
（左：地滑り波源，右：パル市街地の標高データ）

表-1 地滑り波源モデルの詳細

波源モデル	沿岸部	海底部	限界勾配 2°	Nagai et al. (2021)
Case 1	C1-C6, CN, E	S	―	Model CES
Case 2	C1-C6, CN, E	―	C2	Model CE2
Case 3	C1-C6, CN, E	―	C3-4	Model CE3-4
Case 4	C1-C6, CN, E	―	C5	Model CE5
Case 5	C1-C6, CN, E	―	C6	Model CE6
Case 6	C1-C6, CN, E	―	E	Model E

3. 異なる地滑り波源モデルを用いた津波解析

(1) 二層流モデル計算条件

図-1に本計算に用いた地滑り波源と，浸水計算を実施したパル市街地の標高データを示す．標高データには，インドネシア地理空間情報局から提供を受けたデータを5 mに内挿したものを用いた．湾奥に位置するパル市街地では比較的広範囲に平野部が広がっており，人口密集地域であったため，2018年のパル津波の際には広い範囲にわたって浸水範囲が確認され，甚大な津波被害が確認された．本検討では，2018年パル湾津波を対象とした既往研究に基づき，**図-1**に示した複数の地滑り波源を用いて，パル市街地における二層流モデルを用いた地滑り津波解析を行った．**表-1**に計算に用いた波源モデルの詳細

を示す．各地滑り波源における位置，幅，長さ，層厚の値はNagai et al. (2021)に基づいている．Case 1はパル市付近の海底部に想定された海底地滑りSを含んでおり，Case 2-6においては，パル市に約6分以内に到達する津波を発生させるC2-C6，Eに対して限界勾配値を小さくすることで崩壊量を増加させた．また本計算では，各地滑り波源は地震発生直後に同時に滑り出すものと仮定した．**表-2**に二層流モデルの計算条件を示す．Case 1では全ての波源に対して限界勾配角14°が想定されており，Case 2-Case 6においては**表-1**中に示す各地滑りC2-C6に対して限界勾配角2°を想定している．また，**図-1**中の点aにおいて水位変化の時系列波形を出力した．

(2) 二層流モデルの計算結果

各波源モデルによる地点a（**図-1**）での時系列水位変化と，Carvajal et al. (2019)によって示された津波の動画解析結果の比較を**図-2**に示す．動画解析結果からは地震発生から10分以内に2 m程度の津波が対象地域に来襲していることがわかる．同様に，いずれの波源モデルにおいても，地震発生から10分以内に約1~3 m程度の津波が来襲していることがわわかる．

4. 避難シミュレーション

(1) パル市街地における津波ハザードマップ

図-3に，JICAによる支援業務によって作成された地滑り津波に対するハザードマップと，インドネシア政府によって作成されたマカッサル海峡での海溝型津波に対するハザードマップ[1)]を合成したものを示す．また，**表-3**には津波HMにおけるハザードレベル（以下，HL）の定義を示す．パル市沿岸部の1 ~3 mの浸水深が予想されるHL3及び3 m以上の浸水深が予想されるHL4のエリアにおいては，ホテルやショッピングモールを除きほぼ全てが2階建以下の建物であり，木造建築の割合が多くを占めている．地滑り津波を対象とした避難シミュレーションでは、津波HMに示される浸水深に基づき、避難可能な施設を**表-3**に示すような構造物とした。

表-2 二層流モデルの計算条件

計算時間	1200 s
格子間隔	5 m
格子数	3880×8000
計算時間間隔	0.001 s
土塊密度	1500 kg/m^3
限界勾配角	14° or 2°

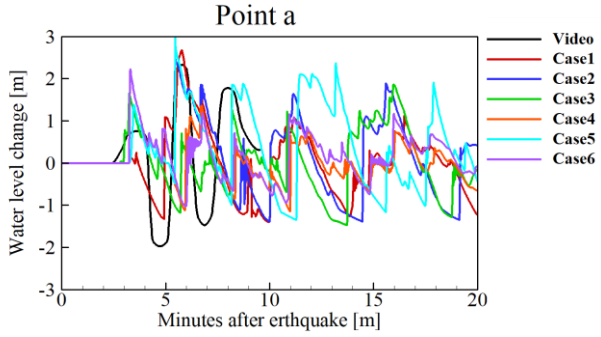

図-2 パル市における各波源モデルによる時系列水位変動

(2) 避難シミュレーション計算条件

図-4に，本計算における避難経路と津波HLに基づいて設置した避難所を示す．図中の緑で示した丸印は，パル市街地において1 m以上の浸水深が予想されているエリア（HL3及びHL4）に想定した避難所であり，既存の建物で3階建て以上の堅牢な構造物を選定した．赤で示した丸印は，1 m以下の浸水深が予想されているエリアまたは浸水範囲外に想定した避難所であり，2階建以上の堅牢な構造物を選定した．白の丸印に関しては，浸水

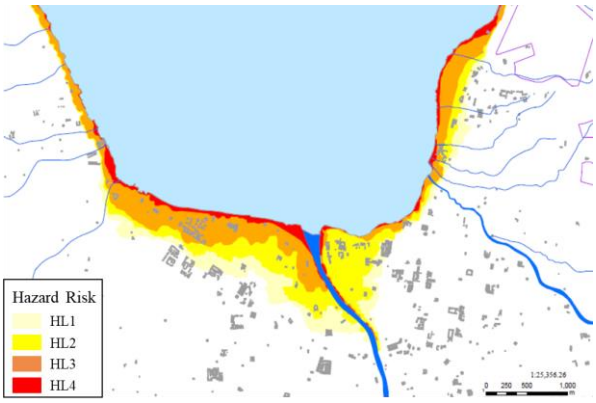

図-3 地滑り津波と海溝型津波を合成した津波HM

表-3 津波ハザードレベルの定義と選定した避難施設

Hazard Level	予想浸水深	避難施設（堅牢）
4	>3 m	4階建て以上
3	1-3 m	3階建て以上
2	0.3-1 m	2階建て以上
1	0-0.3 m	

図-4 パル市街地において想定した避難経路

表-4　避難シミュレーション計算条件

項目	詳細
避難経路	図-4　参照
避難所	9か所（図-4赤緑白丸箇所）
格子間隔	5.0 m
格子数	500×260
タイムステップ間隔	0.1 s
計算時間	1200 s
避難開始時間	0 s～600 s間の200 s毎
避難速度	初期速度1.0 m/s
避難者数	1700人

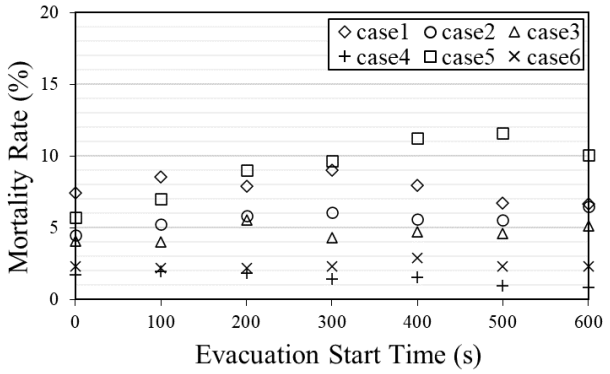

図-5　各波源モデルにおける避難開始時間ごとの死亡率

図-6　避難経路上の各セルにおける死亡率

範囲外に想定した仮想の避難所とする．表-4に避難シミュレーションの詳細な計算条件を示す．各避難者は避難経路上にランダムに配置されているものする．表-1で示した各波源モデルに対して，避難開始時間ごとの死亡率の算出を行った．さらに，各計算ケースにおいて発生した死亡者が避難を開始したセル位置を割り出すことで，パル市街地における死亡率分布を作成した．

(3)　計算結果

図-5に，各波源モデルにおける避難開始時間ごとの死亡率の変化を示す．Case 1とCase 5が全波源モデルの中でも比較的高い死亡率を示しており，各避難開始時刻において5 %以上の死亡率となった．また，避難開始時間が0 sであったとしても，全ての地滑り波源モデルにおいて死亡者が発生していることがわかり，Case 1では最も高い値である7 %が示された．図-6に示す死亡率の空間分布では、各避難者の避難開始セル位置において，避難計算における全ケース数（42ケース）のうち何割のケースにおいて，計算終了時に避難者が死亡判定を受けたかを示している．海岸線上の避難経路においては、最も高い値である死亡率0.81が算出されており，0.5以上の比較的高い死亡率のエリアが広く分布していることがわかる．また，内陸側の経路上においては0.01~0.4程度の死亡率が確認された．したがって，本計算で想定した到達時刻の早い地滑り津波に対しては，比較的高い死亡率が確認された海岸線付近において，避難所の増設や津波に遭遇しない避難経路の選択を検討することが重要であるといえる．今後は，追加で異なる規模の地滑り津波を想定し，より詳細に避難行動の検討を行う必要がある．

5.　道路の嵩上げ効果

(1)　嵩上げ道路の建設計画

図-7に国内支援委員会[1]で検討されているパル市沿岸部における嵩上げ道路の設置予定図を示す．嵩上げ道路の高さは5 m，幅は14 mで想定されており，マングローブをはじめとした植生などと組み合わせることで，津波被害抑制効果を発揮することが期待されている．本計算では，嵩上げ道路の効果を検討するため，嵩上げ道路設置予定場所の標高を5 mに補正し，二層流モデルによる浸水計算を行った．また，第4章の各波源モデルに対する避難シミュレーションにおいて，比較的高い死亡率となったCase 1及びCase 5を用いて避難シミュレーションを行い，道路の嵩上げ効果の検討を行った．

(2)　避難シミュレーション計算条件

図-8中の赤いラインで示した避難経路上の標高は5 mに補正されており，道路の嵩上げが想定されている．避難経路及び避難所，避難者の初期位置については，第4章において想定したものと同様とする．その他の詳細な計算条件についても表-4と同様し，波源モデル2ケースに対して避難開始時間7ケースを想定したため，全14ケースの避難シミュレーションを行った．

(3)　計算結果

図-9に，嵩上げ道路の考慮の有無によるCase 5の浸水計算結果を示す．道路の嵩上げを考慮した場合では，津波が嵩上げ道路を越流したエリアが一部確認されたものの，考慮しなかった場合と比較して浸水範囲が減少する結果となった．図-10に，道路の嵩上げを考慮した場合と考慮しなかった場合について，各避難開始時間におけ

る死亡率を示す．Case 1及びCase 5のどちらのケースにおいても，全ての避難開始時間について死亡率が低減していることが確認でき，避難開始時間を0 sとした場合では，1 %以下まで死亡率が低減された．よって，海岸線沿いにおける道路の嵩上げを想定することで，本計算で想定した地滑り津波に対しては，避難所の増設を検討せずとも大幅に死亡率を低減することができ，すべてのケースで3 %以下の死亡率に抑えることができた．図-11に，全14ケースに対する死亡率の空間分布を示す．道路の嵩上げを想定しなかった場合では（図-6），海岸線上の避難経路の広い範囲において高い死亡率が確認されたが，道路の嵩上げを想定することで，死亡率の低減が確認できた．今後より多くの津波ケースを用いた計算を行い，死亡率の空間分布を用いることで，道路の嵩上げのみでは津波対策が不十分なエリアを検討する必要がある．

(4)　マカッサル海峡における海溝型津波を想定した津波対策

地震発生時，早い到達が予測される地滑り津波と，到達までに20分以上の時間的猶予があるものの，地滑り津波よりも高い浸水深と広い浸水範囲が予想されるマカッサル海峡沿いでの海溝型津波[1]に対応可能な避難所の選定が重要となる．本検討での地滑り津波を想定した避難シミュレーションでは，海溝型津波及び地滑り津波に対応した津波HMをもとに避難所を設定し，道路の嵩上げを行うことで，大幅に死亡率を低減できることが示された．また，海溝型津波に関しても，本検討で想定した地滑り津波よりは避難時間に猶予があることから，本計算と同様の避難行動をとることができれば，津波到達以前に概ね避難完了が可能であるといえる．ただし，浸水深1 m以上が予想されるHL3及びHL4のエリアについては避難施設の建築基準に十分に留意する必要がある．

既往研究では，津波外力と家屋被害程度の関係について検討が行われてきており，浸水深が2 mを超えると，木造家屋については破壊や流出の被害が増加することが示されている[5),6)]．今回の対象地域では，浸水深1～3 mが予想されるHL3エリア，及び3 m以上の浸水深が予想されるHL4エリアについては，多くが2階建て以下の木造家屋であることから，避難所の選定や増設の際には，津

図-7　嵩上げ道路平面図

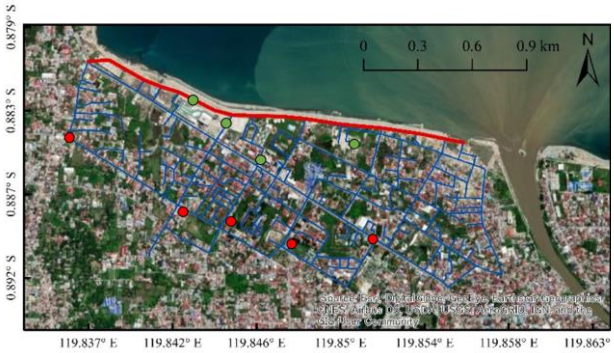

図-8　避難経路と嵩上げ道路の配置（赤線）

図-9　道路の嵩上げ効果による浸水範囲の差異
（青：嵩上げ道路有，緑：嵩上げ道路無）

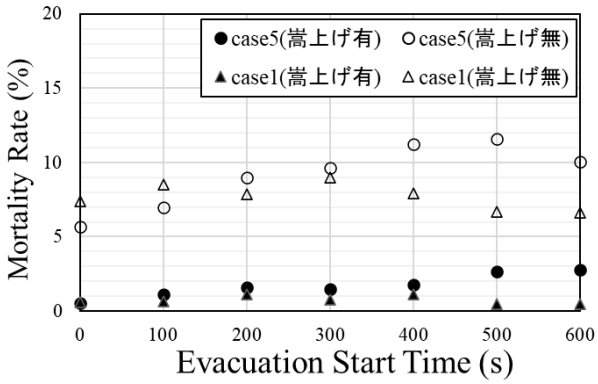

図-10　道路の嵩上げ効果による死亡率の変化

図-11　嵩上げ道路を考慮した場合の死亡率空間分布

波外力に耐えうる建築基準の検討が重要事項である．

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に列挙する．

1. 規模の異なる複数の地滑り波源に対して避難シミュレーションを実施した結果，避難開始時間が0 sであったとしても，全てのケースにおいて死亡者が発生した．また，死亡率空間分布を用いて，海岸線付近の死亡率の高いエリアを示すことができ，比較的早い到達時刻が予想されている地滑り津波に対して，適切な避難所配置の検討や避難経路の選択が今後必要となった．
2. 嵩上げ道路によって，対象地域での浸水範囲の減少がみられたほか，避難シミュレーションにおけるすべてのケースにおいて死亡率の低減効果が確認できた．
3. 道路の嵩上げや避難所の増設を検討したうえで，地滑り津波に対する避難行動をとることができれば，海溝型津波に対しても津波到達以前に避難完了が可能であるといえる．ただし，避難所の選定や増設時には，海溝型津波のような最大クラスの津波を想定し，高さや耐力などの建築基準に留意する必要がある．

今後の課題としては，パル市街地におけるより精度の高い地形データを用いることで，より詳細な浸水計算を実施したうえで避難行動を検討する必要がある．また，地滑り津波に対しては，より多くの波源モデルを想定した避難計画を検討すること，さらにはマカッサル海峡沿いでの海溝型津波に関するメカニズムを詳細に検討し，パル市街地に到達し得る最大クラスの津波規模を想定する必要がある．

謝辞：本計算に用いた標高データはインドネシア地理空間局から提供を受けた。また、中央大学海岸港湾研究室の皆様に，多大なる援助やご助言を頂いた．ここに記し，謝意を示す．

参考文献

1) JICA：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、インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト．
2) 有川太郎，大家隆行：数値波動水槽と連成した避難シミュレーションによる避難行動特性についての検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71，No.2，pp. I_319-I_324, 2015.
3) Imamura, F., Imteaz, M. M. A.: Long waves in two-layers: governing equations and numerical model., *J. Sci. Tsunami Hazards* 13(1), 3–24, 1995.
4) Nagai, K., Mihari, A., Pakoksung, K., Watanabe, M., Suppasri, A., Arikawa, T. and Imamura, F.: Consideration of submarine landslide induced by 2018 Sulawesi earthquake and tsunami within Palu Bay., *Coast. Eng. J.* (accepted)
5) 飯塚秀則，松富英夫：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.381-385，2000.
6) 林里美，成田裕也，越村俊一：東日本大震災における建物被害データと数値解析の統合による津波被害関数，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol69，No2，pp.I_386-I_390，2013.

(Received March 17, 2021)
(Accepted July 22, 2021)

EXAMINATION OF EVACUATION PLAN FOR LANDSLIDE TSUNAMI AND SUBDUCTION ZONE EARTHQUAKE TSUNAMI

Pan HUANG, Kaori NAGAI, Shin MURATA, Masashi WATANABE and Taro ARIKAWA

Since the event of the 2018 Palu tsunami in Indonesia, the countermeasures for reducing tsunami damage have been considered in Palu city where the destructive landslide tsunami event occurred. The tsunami induced by landslide in the Palu bay could reach the coastline of Palu city within a few minutes. On the other hand, there is a possibility that the tsunami induced a subduction-zone earthquake along the Makassar strait could cause the larger inundation area than that of landslide tsunami, although the tsunami could reach the coastline 20 minutes or more after the earthquake.

In this study, we investigated a effective countermeasure for complex disaster of landslide tsunami occurring in the Palu Bay and anticipated maximum tsunami induced by a subduction-zone earthquake along the Makassar strait in Palu city based on reconstruction plan in the Sulawesi island. We selected the evacuation facilities based on tsunami hazard map of Palu city and assumed the elevated road along the coastline of Palu city to investigate the effect of tsunami damage reduction. As results of evacuation simulation, the elevated road and appropriate selection of evacuation facilities could reduce the mortality rate of the landslide tsunami. Moreover, the importance of establishment of evacuation facilities which could resist against the tsunami induced by the subduction-zone earthquake was implied by the presented examination.