

1994 年東ジャワ地震津波の現地調査

松 富 英 夫* ・ 今 村 文 彦** ・ 都 司 嘉 宣***
韓 世 燮**** ・ G. S. Prasetya*****

1. ま え が き

1994 年 6 月 3 日 午前 1 時 17 分 頃 (日本時間 午前 3 時 17 分 頃), インドネシア・東ジャワ南岸の沖合い約 240 km (S 10.7°, E 113.1°) を震源とした $M_w=7.5$ (ハーバード大学) の地震により津波が発生した。この津波は東ジャワ南岸とバリ島南西岸を襲い, 最大打ち上げ高 13.9 m を記録し, 223 名の死者, 15 名の行方不明者, 多くの負傷者と家屋被害をもたらした (同年 6 月 20 日現在)。地震による被害はほとんどなかった。

著者らは, 日本・インドネシア・米国を中心とした国際共同チームを組織し, 同年 6 月 20~25 日 (正味) にかけて第一次の津波現地調査を行った。本研究はその調査結果を報告するものである。なお, 被害の詳細と統計データに関しては Tsuji et al. (1995) を参照されたい。

2. 現 地 調 査

調査域は, 東ジャワ南岸が西の Perigi から Purwo 岬までの延長約 340 km, バリ島南西岸が Kutaビーチから Gillimanuk までの延長約 110 km である。Banyuwangi 南のバリ海峡に面した所でも調査を行ったが, 津波は確

認できなかった。調査域の概略と震央を図-1 に示す。

主な調査項目は, ①津波の打ち上げ高と GPS によるその測点位置, ②津波の来襲状況 (方向, 時刻, 形態, 周期, 波数, 最大波の順位, 等) と震度の聞き込み, ③家屋の前面と背面での浸水位と浸水深および家屋の平面形状とその諸元 (松富ら, 1994), ④浸水深と家屋の造り別の被害程度 (松富ら, 1994), ⑤砂質地盤の侵食深とそこでの浸水位および浸水深である。

東ジャワ南岸では多くの所で海沿いに道路が走っておらず, 打ち上げ高の調査点が制限された。津波の来襲状況調査でも, 津波発生が真夜中であったこと, 震度が小さかったこと (3 章参照), 住民に津波の認識があまりなかったこと等のためか, 情報量が限られた。

3. 東ジャワ南岸とバリ島南西岸の津波

3.1 打ち上げ高

各地の津波打ち上げ高を図-2 に示す。高さの基準は平均海面である。打ち上げ高が 4 m 以上の海岸線の延長は東ジャワ南岸だけで 300 km 近くに達した。バリ島南西岸での打ち上げ高は, 波源に直面した凹海岸中央部での 4.1 m が最大で, そこを中心に両側へ離れるほど小さくなる。バリ島南西岸での津波被害は聞いていない。この海岸は潮差が 2 m 程度と比較的大きく, しかも常にうねりが打ち寄せている所で, この程度の津波では被災しない所なのであろう。

東ジャワ南岸の Bandialit から Lampon にかけて, 打ち上げ高が大きかった。最大打ち上げ高は Rajekwesi での 13.9 m であった。ただし, この打ち上げ高は局所的なもので, 背後が開けた平坦地での打ち上げ高は 7.5 m であった。本地区の代表的打ち上げ高は 8 m 弱といったところであろう (図-3 参照)。

以下, 西から順に, 他の主要被災地での津波状況を概述する。

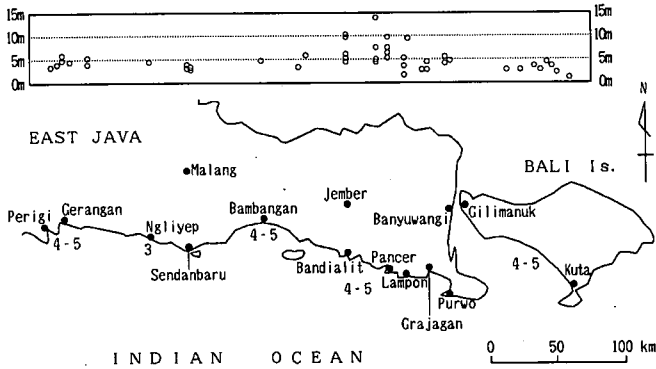
a) Bandialit

Bandialit では, 湾内西側の砂浜背後が絶壁地形の所で 9.9~11.2 m (絶壁基部の地盤高は 3.4 m), 中央部の砂浜背後が開けた所で 4.6~6.0 m (海岸線近くの樹木に残された痕跡を対象。この地盤高は 3.65 m, 浸水長は 650



図-1 調査域と震央

* 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木環境工学科
** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部災害制御研究センター
*** 理博 東京大学助教授 地震研究所
**** 韓国気象庁
***** インドネシア BPPT



図一2 各地の津波打ち上げ高と震度

m程度に達した)の打ち上げ高が測定された。津波の入射方向や海底地形等にもよるが、上述より、幅効果が効かない場合の陸上地形の違いによる打ち上げ高の差が推量される。海岸線近くでせき止められた場合の打ち上げ高は、そうでない場合の2倍程度に達するようである。1993年北海道南西沖地震津波の際、奥尻島藻内の少し北で代表的打ち上げ高として23~24 mが測定されたが(首藤ら, 1994), 上述の例よりその時の入射水位、換言して水脈の厚さが推量される。

本地区では津波で5名が死亡し、21軒の家屋が全壊した。地震は感じなかったという。津波来襲前に2度大砲のような音が聞こえ、強い風が吹いたという。これらで津波を察知し、91名が来襲前に避難した。これらが自然の津波警報になり得ることはすでに首藤(1990, 1993)が指摘している。

b) Pancer

Pancerは今回の津波で最大の人的かつ家屋被害を被った所で、死者は121名、半壊以上の家屋は704軒に達した。居住地は平坦で海に近く、地盤高は約5 mである。居住地と海の間に、海岸線に沿ってほぼ1列の大きな樹木群が茂っている。この樹木上の痕跡高は9.4 mであった。その測点より約130 m陸側の家屋上の痕跡高は7.5 m、この付近の家屋浸水深は1.2~3.0 mであった(表一2と図一5参照)。樹木群による津波エネルギーの減殺が推察される。また、背後が開けた平坦地での打ち上げ高から判断すると、Pancerでの津波が最も大きかったことになる。

居住地の背後を東から西へ海岸線に沿うように川が流れている。河口は本地区の西端にある。津波はこの川を遡上し、背後からも襲った。

c) Lampon

居住地は海に直面しており、平坦部と背後のやや低い部分からなる。平坦部の地盤高は約4.2 mである。前浜勾配はきつい。居住地と海の間に樹木はほとんどない。

Pancerと同じく、地区背後を川が流れ、地区西端に河口がある。津波は海と川の両方から侵入した。被害は河口左岸でひどく、死者39名、不明1名、半壊以上の家屋112軒に達した。河口からやや東に離れた海側最前列の家屋上の痕跡高は5.9 m、地区のやや低い所の痕跡高は3.8 mであった。東の地区入口付近での打ち上げ高は9.3 mであった。

3.2 津波マグニチュード

津波マグニチュードの評価法に打ち上げ高と震央距離によるものがある(羽鳥, 1986)。本地震の場合、地震観測網が粗く、

震央位置があまり正確でないので、この方法は利用できない。事実、この方法によるものは、後述の方法によるものに比べて、過大評価となった。

別法として、打ち上げ高と、海岸に平行な一直線上に正投影された最大打ち上げ高地点と他の打ち上げ高地点の投影点間距離によるものがある(羽鳥, 1986)。図一3は本津波の各地区での平均打ち上げ高 R_A と投影点間距離 L の関係を示す。最大打ち上げ高地点はRajekwesiとしている。図中、黒丸はGeranganであり(図一2参照)、実線は羽鳥の津波マグニチュード m_H に関する経験曲線で、次式である。

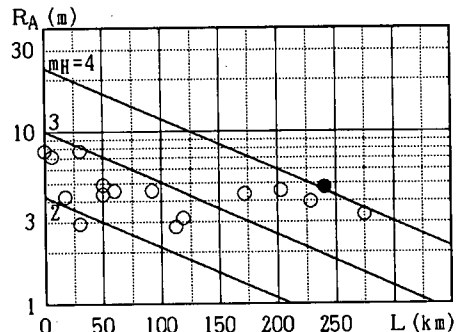
$$m_H = 2.7 \log R_A + 0.008L + 0.31 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 R_A の単位はm、 L の単位はkmである。

図より、羽鳥の津波マグニチュードは、 L の小さい範囲では2.5程度、全体では3程度と判断される。この値は地震規模から推定される1程度に比べてかなり大きく(渡辺, 1985)、本地震は“津波地震”と言えよう。Geranganは波源の西側長軸方向に位置しており、その方面で打ち上げ高が大きかったことも本津波の特徴である。

3.3 来襲状況

証言に基づく津波の来襲状況を表一1に示す。場所は上から順に西から東となっている。NgliyepからPancer



図一3 打ち上げ高と投影点間距離の関係

表-1 証言に基づく津波の来襲状況

地名	時間	周期	波数	最大波	備考
Ngliyep	40分	—	—	—	
Bandialit	28分	—	—	—	
Pancer	46分	—	3波	2波目	
Lampon	—	—	3波	2波目	短周期成分(1波目)
Grajanan	—	13分程度	4波	4波目	4波目は午前3時頃
Purwo 岬	58分	10-15分	2波	2波目	3mの白波(2波目)

の間で津波到達が早かった。それでも、発震後30~40分を要している。行政や住民の対処が良ければ、避難が可能な時間である。押し引きの初動は判らない。断層モデルからは引き波初動となる(高橋ら, 1995)。周期は10~15分程度であったようである。来襲波数は3~4波程度で、2波目が大きかったようである。Lamponでは、南南西方向から来襲し、1波目に周期1分程度の短周期波成分の発達が見られたという。

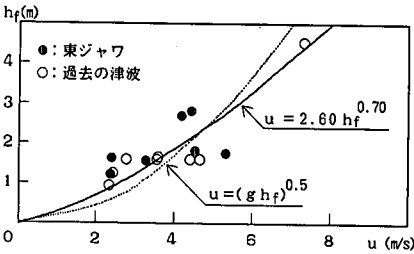
3.4 震 度

各地の改正メルカリ震度を算用数字で図-2に示す。震度は4~5の所が多く、日本の気象庁震度に換算すればIII程度であり、あまり大きくなかった。Bandialit, Lampon, Grajanan, Purwo 岬では地震を感じなかったとの証言を得た。この地方では、この程度の震度は度々経験されるという。震度が小さかったこと、度々の経験、しかも真夜中の発震が津波被害を大きくしたものと思われる。Grajananでは停泊中の船に寝ていた14名が津波で亡くなっている。

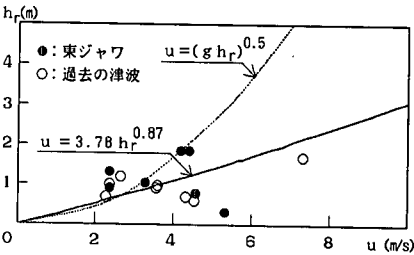
4. 浸水深と流速

津波の流速評価は、構造物への流体力や漂流物の移動速度、ひいては漂流物の衝突力評価等に欠かせないもので、残された重要な課題の一つである。そこで、津波浸水深のデータが比較的得易いことから、浸水深と流速の関係を検討することにする。両者の関係が明らかになれば、流速評価が容易になるからである。

浸水深 h と流速 u の関係を図-4(a)と(b)に示す。黒塗りが本津波で得られたデータ、白抜きが過去の津波で得られたデータ(松富ら, 1994)である。これらのデータはほぼ平坦か、周囲に比べてやや高所の頂部辺りに位置する家屋等から、つまり海水が滞留し難い所で得られたものである。ただし、流速は、流れ方向に見て、家屋等の前面と背面に残された津波痕跡から水位差を割出し、Bernoulliの定理を用いて評価している。この評価法から、得られる関係は陸上の定常的な流れに適用できるものである。各データの測定場所、具体的な数値や家屋の平面形状等をまとめて表-2に示す。図-4(a)と(b)の違いは、浸水深として各々前面と背面のものを採用している点にある。各図中の実線は、既報(松富ら, 1994)



(a) 前面水深を浸水深とした場合



(b) 背面水深を浸水深とした場合

図-4 実津波の浸水深と流速の関係

の回帰曲線で、各々次式である。

$u = 2.60 h_f^{0.70}$ (単位: m, s) (2a)

$u = 3.78 h_r^{0.87}$ (単位: m, s) (2b)

ここで、添字 f と r は前面と背面の別を示す。また、各図中の破線はFroude数が1の流れを示す。

図-4(a)と(b)によれば、本津波で得られたデータの傾向は過去のものとは変わらないように見える。事実、前面水深を用いた時の回帰式は、新データを加えても、係数とべき指数が各々0.04と0.02程度小さくなるだけで、基本的に変わらなかった。しかし、背面水深を用いた時の回帰式では、各々が0.08と0.45程度小さくなり、べき指数の変化が著しかった。

前面水深による回帰式は、前面水深の流速への応答性の高さから推して、今後新たにデータが加えられても、ほとんど変化しないと思われる。背面水深による回帰式に関しては、今後ともデータを蓄積して、データ取得地点の条件をより厳密に分類して議論する等の工夫が必要であろう。

5. 浸水深と家屋の被害程度

津波浸水深と家屋の造り別の被害程度 of 図-5に示す。黒塗りが本津波で得られたデータ、白抜きが既報(松富ら, 1994)のデータである。浸水深は前面水深を採用している。被害程度 of 定義は既報と同じで、次のようである。

大破: 壁はもちろん、柱のかかなりの部分が折れるか失われている。修復は不可能である。

表-2 現地調査データの一覧

測定場所	水深 (m)		水位差 (m)	流速 (m/s)	近傍の 潮上高 (m)	家屋の平面形状	家屋の 造り	記号	備考
	前面	背面							
Wuring (モスク)	1.56	0.91	0.65	3.57	3.19	正方形 (17.7×17.7 m)	煉瓦モルタル	○	側面
	1.56	1.19	0.37	2.69	〃	〃	〃	○	
藻内	1.29	1.00	0.29	2.38	16.19	長方形 (7×12 cm)	木造	○	
賽ノ河原	4.45	1.70	2.75	7.34	8.81	六角形 (15.6×19.0 m)	鉄筋コン	○	
稲穂小学校	1.60	0.65	0.95	4.32		長方形 (36.3×29.3 m)		○	海側
	1.60	0.55	1.05	4.54	9.79	〃	木造モルタル	○	中間
	1.60	0.94	0.66	3.60		〃	〃	○	陸側
江差港	0.94	0.67	0.27	2.30	2.85	長方形 (14.5×48.0 m)	鉄筋コン	○	引き波
Pancer 1	1.60	1.30	0.30	2.42	9.40	長方形 (8.2×5.9 m)	煉瓦モル	●	
2	2.70	1.80	0.90	4.20	9.40	長方形 (12.8×5.3 m)	煉瓦モル	●	
3	1.21	0.91	0.30	2.42	9.40	H 形 (15.0×9.0 m)	煉瓦モル	●	
4	2.80	1.80	1.00	4.43	9.40	長方形 (10.2×19.2 m)	煉瓦モル	●	
Lampon 1	1.75	0.30	1.45	5.33	5.40	長方形 (5.5×8.5 m)	煉瓦モル	●	
2	1.58	1.02	0.56	3.31	5.40	長方形 (10.6×6.0 m)	煉瓦モル	●	
3	1.80	0.75	1.05	4.54	5.40	長方形 (8.9×10.0 m)	煉瓦モル	●	

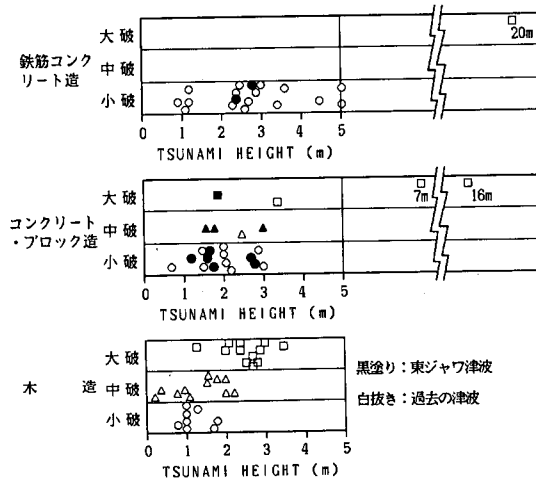


図-5 津波浸水深と家屋の造り別の被害程度の関係

中破：柱は残っている。壁の一部は破壊されている。
修復は可能である。

小破：窓等は破壊されても、壁は残っている。僅かな
補修で利用可能である。

上段は鉄筋コンクリート造、中段は石、煉瓦やコンクリート・ブロック造、下段は木造の家屋に対するものである。本調査では、鉄筋コンクリート造と煉瓦造の家屋に対してのみデータが得られた。これまでの他地域での被害傾向との違いは煉瓦造の家屋で見られた。他地域の煉瓦造の家屋は中破に至るのに3m程度の浸水深を必要としたが、この地域では1.5m程度で中破に至るようである。東ジャワ南岸地域の煉瓦造の家屋強度は、他地域のものに比べて、弱いと言える。

6. 砂質地盤の侵食深と流速

ダム破壊流れの被害と同じように(松富ら, 1984), 津波被害にも土砂移動によるものがあり, 津波による土砂移動の評価も残された重要な課題の一つである。

最近, ようやく津波による土砂移動が議論され始めた(高橋ら, 1992)。津波の掃流力は河川流に比べて比較にならないほど大きいらしい。津波による土砂移動に対して, 既往の河川流砂量式が適用できるかどうかは疑問である。実津波のデータによる津波流砂量の検討は有意義と思われる。

本津波(黒塗り)と1992年インドネシア・フローレス島地震津波(白抜き)で得られた砂質地盤の侵食深

h_s と流速 u の関係を図-6に示す。侵食深は後浜とそれに連続した平坦地の境界付近で得られたもので, 流速は侵食部近傍の浸水深から推定されている(4章参照)。写真-1(a)と(b)はほぼ同一地点での津波前後の地形変化例を示す。Bandialitでのもので, 共にその村長が写したものである。津波来襲前, 砂浜にバームは形成されていなかった。来襲後, 高さ0.8~2.2mのバームが形成された。図-6中の実線は回帰曲線で, 次式である。

$$h_s = 0.0033u^{3.0} \quad (\text{単位: m, s}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)はデータ数が少なく, 暫定的なものである。

実データの侵食深は流速の3乗に比例している。一次元の流砂の連続式は, 地盤勾配の影響を無視すれば, 次式である。

$$\partial z / \partial t = -(\partial q_b / \partial x) / (1 - \lambda) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, z は地盤高, q_b は単位幅・単位時間当たりの体積表示の流砂量, λ は地盤の空隙比, t は時間, x は水平距離である。侵食深 h_s は n 周期間($=nT$)で形成されたと仮定すれば, 式(4)より次式を得る。

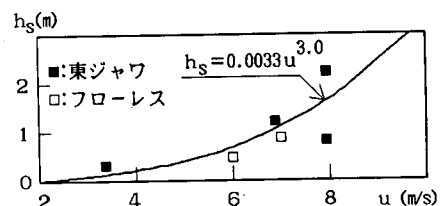


図-6 砂質地盤の侵食深と流速の関係



(a) 津波来襲前



(b) 津波来襲後

写真-1 Bandialit での砂浜の変化

$$\begin{aligned} h_s &\sim \int_0^{nT} (dq_B/dx) dt \\ &= d \left(\int_0^{nT} q_B dt \right) / dx \\ &= nT d(q_{Bm})/dx \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 q_{Bm} は侵食時間平均の流砂量である。式(5)のような表現は、現象が定常的と見なせる場合には許される。式(5)を書き直せば、次式を得る。

$$\begin{aligned} d(q_{Bm})/dx &\sim h_s/nT \\ &\sim O(10^{-3}) \times h_s \\ &\sim (\text{微小量}) \times h_s \text{ (単位: m, s)} \dots\dots (6) \end{aligned}$$

現象が等流的と見なせる場合、式(6)の微小量に対応する物理量としては $(\partial u/\partial x)$ を考えるのが道理にかなっている。これは次元的にも妥当である。よって、式(3)と(6)より次式を得る。

$$d(q_{Bm})/dx \sim u^3 (\partial u/\partial x) \dots\dots\dots (7)$$

式(7)は、津波のように波長や周期が長くて、局所的に等流かつ準定常流と見なせる場合には、流砂量が流速の4乗に比例することを示している。高橋ら(1992)によれば、津波による土砂移動はBrownの流砂量式で比較的よく説明されるという。定常粗面乱流の場合、摩擦

速度は流速に比例するので、Brownの式は流速の5乗に比例すると解釈され、式(3)はそれに近い結果を与えるものとなっている。

7. む す び

本調査研究で得られた主な結論は次の通りである。

① 打ち上げ高が4m以上の海岸線の延長は東ジャワ南岸だけで300km近くに達し、羽島の津波マグニチュード m_H は3と評価された。

② 地震規模($M_w=7.5$)の割に津波規模($m_H=3$)が大きく、本地震は“津波地震”と判定される。

③ 前面水深と流速の関係は、今回のデータを加えても既報のものとほとんど変わらなかった。背面水深によるものはべき指数が大きく変化した。後者に関しては、さらにデータを収集して、普遍的なものにする必要がある。

④ 東ジャワ南岸地域の煉瓦造の家屋は浸水深1.5m程度で中破に至り、他地域の3m程度に比べて小さく、家屋強度が弱い。

⑤ 津波による砂質地盤の侵食深は、これまでのデータでは、流速の3乗に比例している。

謝辞：本調査に当たり、東北大学の首藤伸夫教授からは調査全般のご指導を、気象庁の原田智史氏と東京大学の荒井賢一氏からはご協力を頂いた。本論文の公表に当たり、小川記念基金の補助を受けた。謝意を表する。

参 考 文 献

- 首藤伸夫 (1990): 津波発生及び来襲時の音響—その1 明治三陸大津波時の分類—, 東北大学津波工学研究報告, 第7号, pp. 1-43.
- 首藤伸夫 (1993): 津波発生及び来襲時の音響—その2 昭和三陸大津波による沿岸での音響発生条件—, 東北大学津波工学研究報告, 第10号, pp. 1-12.
- 首藤伸夫・松富英夫・卯花政孝 (1994): 北海道南西沖地震津波の特徴と今後の問題, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 236-240.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1992): 土砂移動を伴う津波計算法の開発, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 231-235.
- 高橋智幸・堀内信哉・首藤伸夫 (1995): 1994年ジャワ東部地震津波の数値解析, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 178-179.
- 羽鳥徳太郎 (1986): 津波の規模階級の区分, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 61, pp. 503-515.
- 松富英夫・浅田 宏・佐藤隆志 (1984): 移動床におけるダム破壊流れの氾濫計算, 第28回水理講演会論文集, pp. 827-831.
- 松富英夫・首藤伸夫 (1994): 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 246-250.
- 渡辺偉夫 (1985): 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, 206 p.
- Tsuji Y. et al. (1995): Field survey of the east Java earthquake and tsunami of June 3, 1994, Topical Issue of Pure and Applied Geophysics, Vol. 144, No. 3/4.