

津波による構造物被害予測法の研究

RESEARCH ON PRACTICAL PREDICTING METHOD OF STRUCTURE DAMAGE DUE TO TSUNAMI

山本吉道¹・成吉兼二²

Yoshimichi YAMAMOTO and Kenji NARIYOSHI

¹フェロー 博(工) 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117番地)

²学生会員 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

The following examinations are performed in order to improve the evaluation method of tsunami damage.

- 1) A numerical model of tsunami inundation and evaluation methods of structure destruction which Yamamoto et al.¹⁾ had proposed are applied to the damage due to the 2004 Indian ocean tsunami in Patong beach of Thailand and the tsunami damage due to the 1993 Hokkaido-Nansei earthquake in Taisei coast of Hokkaido. As a result of these examinations, the high applicability of the model and those methods are confirmed.
- 2) An evaluation method of seawall stability against the back-flow of tsunami is improved based on some experiments, and the validity is checked by application to the above-mentioned Patong beach. Then, this evaluation method is applied to the stability examination of two seawall types in a model coast.

Key Words : *Tsunami, structure damage, predicting method of damage, back-flow*

1. はじめに

近年のインドネシアにおける一連の地震津波、日本における北海道南西沖地震や日本海中部地震による津波など、津波による被害は少なくない。特に、わが国では東海・東南海・南海地震による巨大津波の来襲が現実的な問題となっている。巨大津波の発生は防げないが、被害の発生機構が明確になり、正確な被害予測ができれば、効果的な対策が立てられ、その被害を大幅に低減できるようになるだろう。

本研究では、山本ら¹⁾がタイ国Phangnga県KhaoLak海岸で用いた津波浸水数値モデルと家屋破壊評価法を、タイ国Phuket県Patongビーチでの2004年インド洋大津波による被害にも適用できることを確認した。そして、同浸水数値モデルと海岸堤防・護岸安定性評価法を、北海道大成海岸での1993年北海道南西沖地震津波による被害に適用して、破堤を考慮した有効な浸水予測計算法を示した。さらに、山本ら¹⁾の津波の戻り流れに対する護岸安定性評価法を改良し、その有効性をPatongビーチへの適用から確認した上で、モデル海岸における対策工の検討を同安定性評価法によって行った。

2. 進入波による構造物被害の予測

(1) 津波浸水計算法の説明

津波の浸水計算を可能にする数値モデルは複数あるが、ここでは、適度な計算容量で、工学上十分な精度を期待できることから、下記の基本式から成る山本ら¹⁾の数値モデルを用いる。

a) 基本式

$$\frac{\partial f_y q_x}{\partial x} + \frac{\partial f_x q_y}{\partial y} + \frac{\partial S \eta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S q_y q_x}{d} \right) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{S q_y^2}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left[d \nu_t S \frac{\partial (q_y/d)}{\partial x} \right] - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial y} \left[d \nu_t S \frac{\partial (q_y/d)}{\partial y} \right] + \frac{f_c}{d^2} Q q_y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S q_x^2}{d} \right) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{S q_x q_y}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left[d \nu_t S \frac{\partial (q_x/d)}{\partial x} \right] - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial y} \left[d \nu_t S \frac{\partial (q_x/d)}{\partial y} \right] + \frac{f_c}{d^2} Q q_x = 0 \quad (3)$$

ここで、 q_x と q_y は x と y 方向の線流量、 η は水位、 f_x と f_y は格子の x と y 方向に平行な辺の浸水部分の割合、 S は格子内の浸水面積の割合、 d は水深、 g は重力加速度、 ν_t は浸水の渦動粘性係数、 f_c は構造物・樹木による抵抗係数。

なお、連続式はコントロール・ボリュームの x 方向と y 方向の流入出量とボリューム面積全体での水位変動量の平衡を考えているため、第1項に f_x 、第

2項に f_y ，第3項に S が考慮されることになる．一方，運動方程式はコントロール・ボリューム内の質量全体に対する運動を考えれば良いので， S だけが考慮されることになる．

b) 計算方法

基本式の差分展開はYamamoto²⁾に倣って，Crank-Nicholson方法を用いて時間差分を行い，時間間隔 Δt をC.F.L.安定条件によって決めている．

そして，沖側からの入力条件には，岸沖方向の線流量 q_x を用いており，海岸線上から計算を始める場合は式(4)，(5)を用いて，沖合から計算を始める場合は式(6)を用いて，陸側への浸水計算を進める．

$$q_x = 0.55d_o\sqrt{gd_o} \quad (4)$$

$$q_x = 0.2(H - hc)\sqrt{g(H - hc)} \quad (5)$$

ここで， d_o は海岸線に位置する海岸堤防や浜崖の上の越流高， H は海岸線に位置する壁に残った津波痕跡高， hc は海岸線に位置する海岸堤防や浜崖の天端高である．

また，河口がある場合には，平均水面上の津波高 d' を用いて，式(6)から求める．

$$q_x = (d + d')\sqrt{g(d + d')} \quad (6)$$

$$d' = (2H - d)/3 \quad (7)$$

ここで， d は河口部水深である．

さらに，平均水面上の津波高 d' を沖合の水位上昇量 η に置き換えれば，沖合での入力条件となる線流量が求まる．

(2) 家屋倒壊判定法の説明

山本ら¹⁾は，複雑な建築物も門型ラーメン要素に分解できるならば，ラーメンの柱が壊れば倒壊すること，その柱間隔などの寸法は窓枠などの規格や人体寸法を基準に決められていることから，少数のパターン化された門型ラーメンの強度計算問題に帰着できることを示した．

2004年12月のインド洋津波による浸水被害を被ったタイ国Patongビーチで，主要な建築物のパターン化を行うと，次のようになる．柱間隔が5mで，1階の高さが約3mの2階建てコンクリート製建築物が多数あった．柱は複鉄筋コンクリート断面で，1辺の幅は20cm～40cm程度，断面鉄筋比は0.037程度と見なせた．壁は10cm程度の間隔で直径1.3cm前後の用心鉄筋が入った幅15cm以上の単鉄筋コンクリート断面が多いと推定された．これらの情報を基に，建築物の骨組みと荷重分布を，図-1に示すようにモデル化した．ここで，津波力は飯塚・松富³⁾の流体力式から求め，流速のフルード数は1.1とする．この門型ラーメンの海側柱の根元部での応力計算か

ら，浸水深に対して壊れないために必要な柱幅を求めると，図-2(a)のようになった．壁体に対して，単鉄筋コンクリート断面の柱による同様なモデル化から，浸水深に対して壊れないために必要な壁厚さを求めると，図-2(b)のようになった．

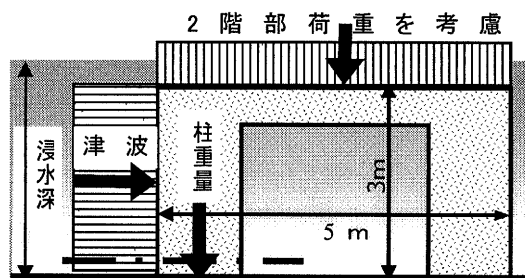


図-1 Patongビーチにおける家屋のモデル化

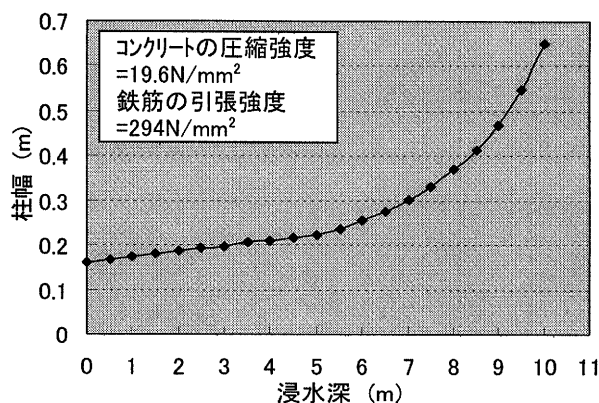


図-2(a) 複鉄筋コンクリート柱の限界幅

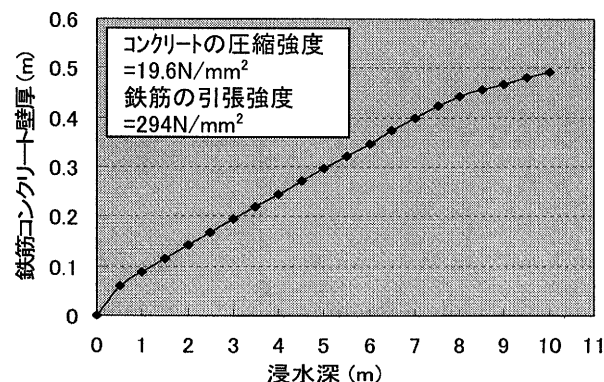


図-2(b) 単鉄筋コンクリート壁の限界厚

(3) 海岸堤防・護岸の安定性評価法

図-3に示す載荷モデルに朝倉ら⁴⁾の津波力算定式を用いた安定検討を提案する．

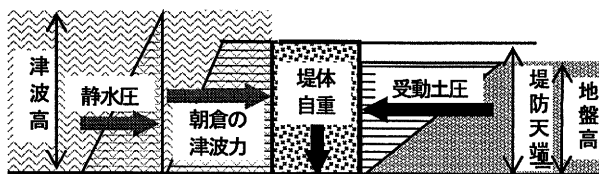


図-3 津波入射時に考慮すべき力

この評価法を1983年日本海中部地震津波と北海道南西沖地震津波による被災事例に適用したところ、図-4のように、堤防を破壊する力が全ての事例で、それに抵抗する力を超えており、有効と判断できる。なお、堤防と基礎地盤の間の摩擦係数には0.6を、内部摩擦角には28度を用いた。

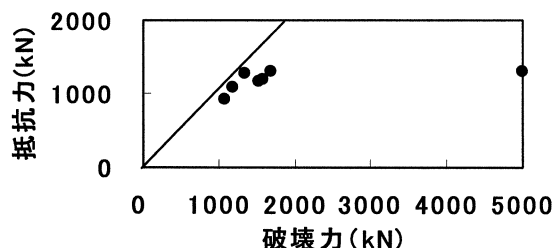


図-4 津波入射時のすべり破壊力対抵抗力（図-3参照）

(4) Patong ビーチでの被災事例への適用

上記の津波浸水数値モデルを2004年インド洋大津波で被害を受けたタイ国Phuket県Patongビーチに適用した。入射させる津波高の経時変化には、本県北隣のPhangnga県Krabi海岸と東隣のKrabi県Krabi海岸の潮位観測記録の平均値をモデル化した図-5を用いた。Patongビーチの地盤高、海岸線での最大津波高、最大浸水域は、タイ国政府提供資料と山本ら⁵⁾の調査結果を基に、図-6のように整理できた。

浸水計算結果は図-7(1)～7(3)に示すようになり、北部海岸の浸水域は11分～14分の間に、中部海岸の浸水域は14分～29分の間、南部低地は29分頃に、それぞれ最大となっている。これらの最大浸水域の計算結果の重ね合わせと図-6に示す実測との一致度は概ね良好である。これらの浸水計算結果から図-6に示すA～D地点の浸水深を抜き出し、現地踏査時の調査結果と比較すると表-1のようになり、比較的良く一致していることが分かる。

本海岸での家屋の被害状況は、厚みの薄いコンクリート・ブロック塀などは転倒したが、ほとんどの家屋は鉄筋コンクリート製で、窓が破れて相当な浸水が生じたものの、柱（幅20cm～40cm）も壁（15cm以上）も壊れることなく、原型を留めていた。浸水深の計算値を図-2に当てはめると、表-1の右半分のようになり、家屋の推定被害と実際との一致度も概ね良好である。

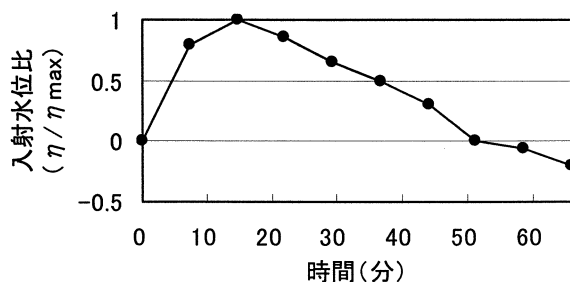


図-5 水深20m地点での水位上昇量の経時変化モデル
(Kuraburi海岸とKrabi海岸の平均)

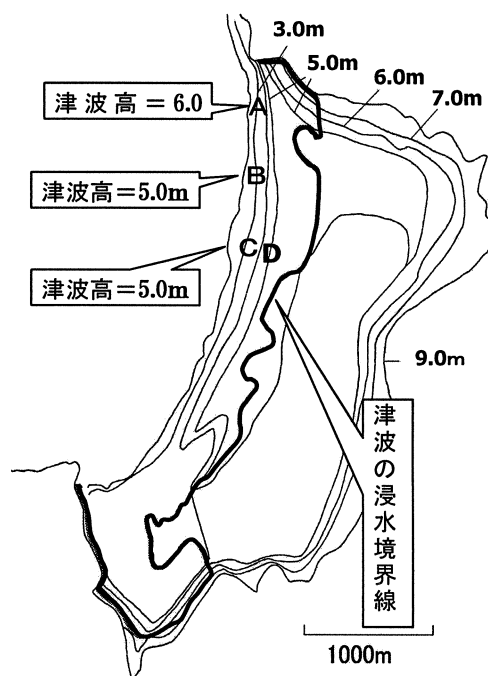


図-6 Patongビーチの地盤高、津波高および浸水域

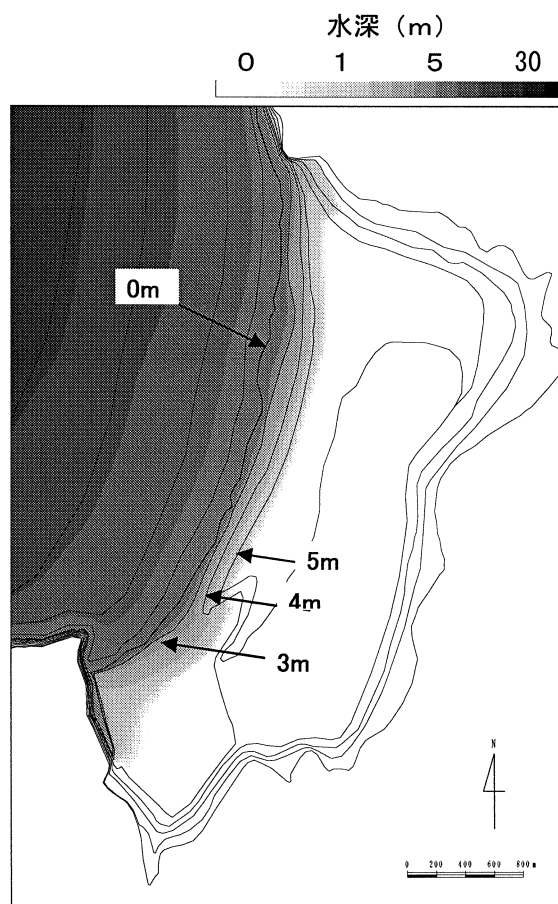


図-7(1) 計算開始11分後の水深分布計算
(図中の数値は地盤高コンターである)

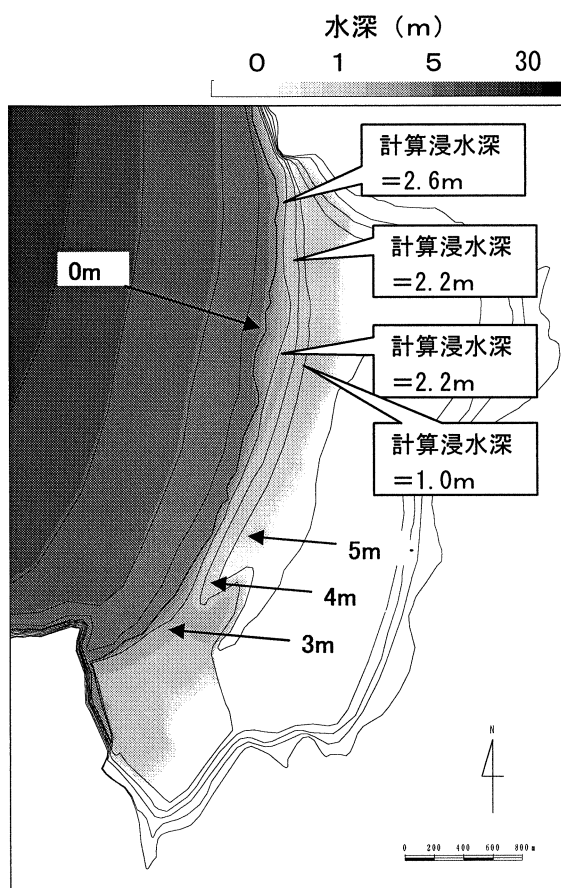


図-7(2) 計算開始14分後の水深分布計算

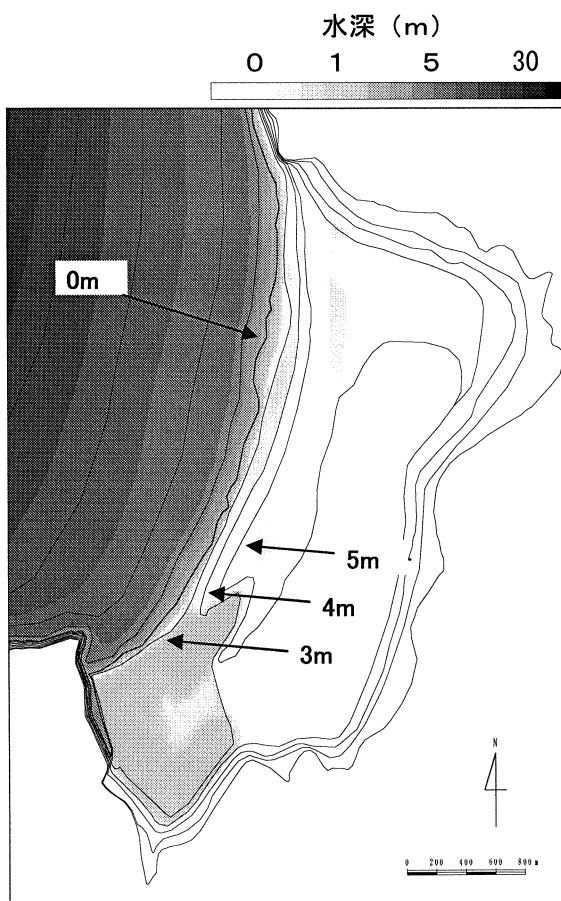


図-7(3) 計算開始29分後の水深分布計算

表-1 浸水深と家屋被害状況の実測と推定の比較

地点 No	実測 浸水深 (m)	実際の 被害 状況	計算 浸水深 (m)	限界 柱幅 (m)	限界 壁厚 (m)	推定の 被害 状況	一 致度
A	2.5	柱・壁は 破壊せ ず、窓の み破壊	2.6	0.19	0.16	柱・壁は 破壊せ ず、窓の み破壊	良好
B	2.0	柱・壁は 破壊せ ず、窓の み破壊	2.2	0.18	0.14	柱・壁は 破壊せ ず、窓の み破壊	良好
C	2.0	柱・壁は 破壊せ ず、窓の み破壊	2.2	0.18	0.14	柱・壁は 破壊せ ず、窓の み破壊	良好
D	1.0	破壊なし	1.0	0.17	0.09	破壊なし	良好

(5) 大成海岸での被災事例への適用

第2章1節の津波浸水数値モデルを1993年の北海道南西沖地震津波で大きな被害を受けた北海道大成海岸に適用した。その際、第2章3節の海岸堤防・護岸の安定性評価法を組み込んで、破堤する場合には、海岸線上から流入する線流量の計算に用いる堤防・護岸天端高を背後地盤高に置き換えて、破堤の影響を考慮出来るようにした。本海岸での破堤限界津波高は7.5mであった。

入射させる津波高の経時変化には、比較的近い岩内海岸と江差海岸の潮位記録の平均値をモデル化した図-8を用いた。海岸線での津波高の最大値は、北海道庁、北海道開発局、および、旧建設省による測定値^{6), 7)}の平均を用いて、図-9に整理した。

浸水計算結果は、図-10のようになり、海岸線から線流量を入力しているため、砂浜部が浸水域になっていないことを考慮すれば、図-9の実測浸水域との一致度は良好である。また、宮野地区中心部と破堤した平浜地区中心部で木造家屋等が倒壊・流出しているが、これは浸水深が2mか、それ以上になっていたことを意味しているが、該当地区の計算浸水深も2m以上になっている。以上から、本浸水モデルの計算精度は良好と判断される。当然のことながら、護岸から越流するが、破堤しない場合の浸水計算を行うと、平浜地区の浸水深は相当に低減される。

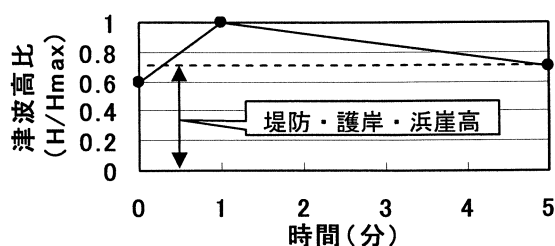


図-8 海岸線上の津波高の経時変化モデル
(岩内海岸と江差海岸の平均)

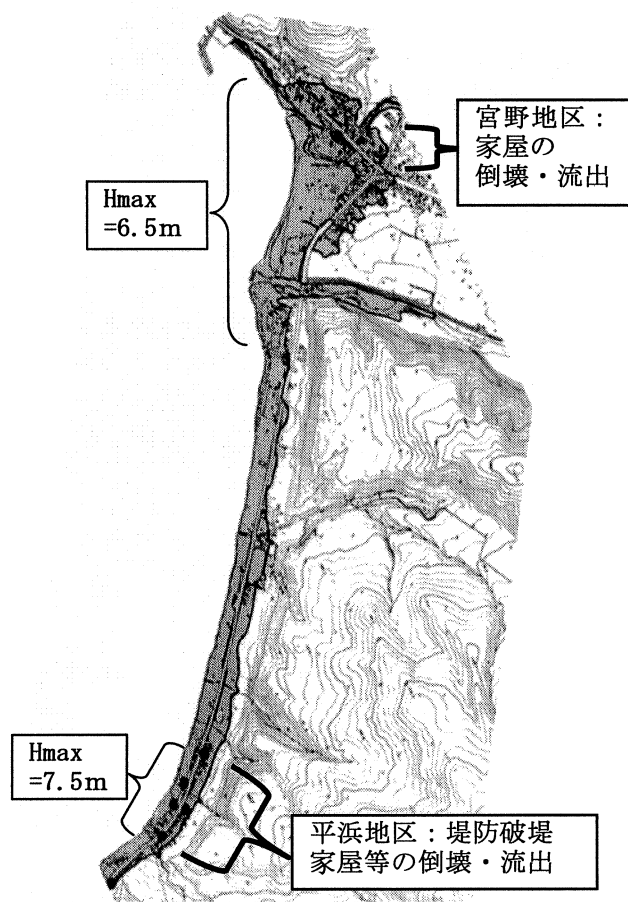


図-9 津波高記録と被災状況（灰色ゾーンが浸水域）

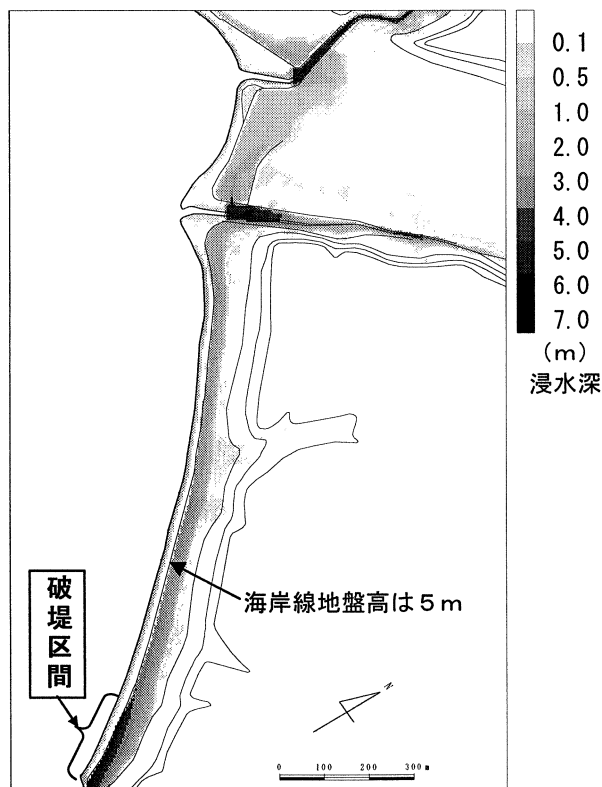


図-10 津波浸入開始5分後の浸水深分布の計算結果（護岸破堤の場合）

3. 戻り流れに対する護岸の安定評価法の提案

2004年インド洋津波などで、津波の戻り流れで護岸が倒壊した事例が複数あった。本学の水理模型実験でも、写真-1に示すように、入射津波で壊れなかった護岸が、より弱い戻り流れで転倒する場合があることが確認できた。



写真-1 戻り流れに対する護岸の安定性検討実験結果

この実験では、幅0.5m×高さ0.8m×全長22mの水路とボールネジ駆動式造波装置によって構成されている造波水槽に、粒径0.2mm～0.66mmの混合砂を用いて、護岸前面海底勾配と背後地表勾配が1/15の地盤を造成し、幅50cm×高さ15cm×厚さ2cmのコンクリート板を海岸護岸として、前面水深が8cmになるように設置した。入射波と水深は、波高が小さくならない範囲で、本造波装置によって起こすことが出来る最大周期5.0sに対して長波条件を満足出来るように、水深を設定した。具体的には、波高19cm、周期5.0s、水深30.8cmとなった。

護岸天端が背後地盤から突出していない場合は、護岸が入射時も戻り流れ時も壊れなかったのに対して、写真-1に示すように天端が4cm突出している場合は、入射波力に耐えた護岸が戻り流れ時に転倒している。

この実験結果から判るように、津波の戻り流れによる破堤の原因は、海側に支えてくれる地盤がないため、対策工として基礎矢板工と控え工を考え、図-11に示す安定計算モデルを考案し、本実験データを用いて、本安定計算モデルの妥当性を確認した。この計算では、主動・受動土圧にはクーロンの土圧式を用い、津波の動水圧には飯塚・松富³⁾の算定式を用いたが、戻り流れの流速 u_r と水流厚 h_r が必要になるので、山本ら¹⁾・⁵⁾の式を上記の実験データを用いて改良した式(8)と式(9)を提案した。

$$u_r = \frac{\sqrt{2 \sin \theta}}{f} \sqrt{g h_r} \quad (8), \quad h_r = \frac{\frac{1}{3}(R-Z)f}{\sin \theta + f} \quad (9)$$

ここで、地表面の摩擦係数 f には0.05（写真に示すものとは波高を変えた複数の実験ケースから逆算で求めた。また、基礎地盤と護岸底面の間の摩擦係数には0.6を、内部摩擦角には28度を用いた。

さらに、これらの理論式の妥当性を確認するために、Yamamoto らの津波被害事例⁸⁾に記述されている Patong ビーチ海岸北部と中部の護岸の安定性をこれらの式を用いて検討してみた。結果を表-2 と表-3 に示す。各表の1行目は北部にある道路護岸で戻り流れにより破壊されていた。各表の2行目は中部にある護岸で健在であった。本計算結果は被害実態と一致している。なお、諸係数には上記のものと同じ値を用いた。

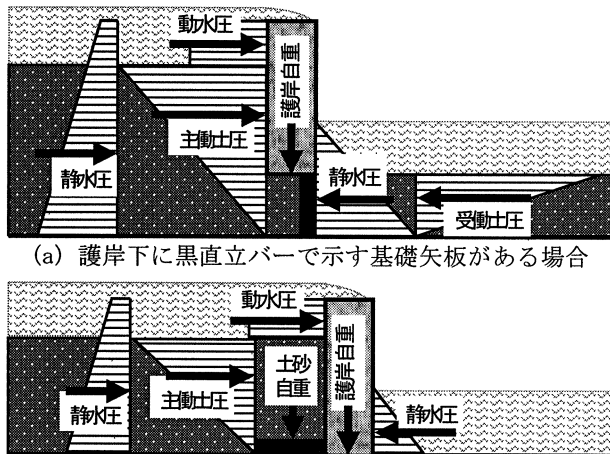


図-11 戻り流れに対する護岸の安定計算モデル

表-2 戻り流れ時のスベリ検討

浸水深 (m)	天端高 (m)	地盤高 (m)	押出し力 (N)	護岸幅 (m)	前面砂層厚さ (m)	抵抗力 (N)	安全比 (-)
0.7	5.0	4.0	123114	1.0	0.0	37338	0.3
1.0	1.5	1.5	27290	1.5	0.7	36582	1.3

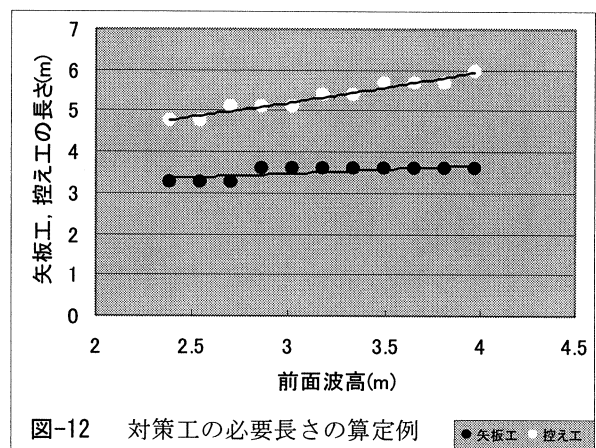
表-3 戻り流れ時の転倒検討

浸水深 (m)	天端高 (m)	地盤高 (m)	転倒モーメント (Nm)	護岸幅 (m)	前面砂層厚さ (m)	抵抗モーメント (Nm)	安全比 (-)
0.7	5.0	4.0	217969	1.0	0.0	31115	0.1
1.0	1.5	1.5	22874	1.5	0.7	30233	1.3

さらに、標準的な海岸護岸（天端高T.P.+4.5m，天端厚さ0.6m，突出高1.2m）と、前面海底勾配1/15，後背地盤勾配1/15のモデル海岸において、破堤しないために必要な基礎矢板工と控え工の長さの算定図を作成し、図-12に示す。ここで、入射時前面波高から打上げ高 R を求める際、Freeman & LeMehaute⁹⁾の式を用い、フルード数は1.1，護岸と基礎地盤の間の摩擦係数は0.6，地表面の摩擦係数は0.05とした。この図から、基礎矢板工の必要長さは3.5～4.0m，控え工の必要長さは4.5～7.0mとなり、基礎矢板工の方が有利な結果となった。

4. 結論

- 1) 本研究で取り上げた浸水数値計算モデルを用いて、Patong ビーチと大成海岸起でも良好な精度で計算出来ることが確認でき、海岸堤防の破堤を考慮した浸水計算法も提案できた。さらに、Patongビーチでも家屋破壊評価にラーメン・モデルを使えることが確認できた。
- 2) 津波の場合は、戻り流れによる流体力が相対的に大きくなる可能性が高く、これによる堤防・護岸の安定性を精度良く評価できる手法も提案できた。



参考文献

- 1) 山本吉道，ウィフール ウッチャン，有川太郎：津波による海岸被害の予測方法の改良，海岸工学論文集，第55巻，pp.301-305，2008。
- 2) Yamamoto Y. : Design Process of Coastal Facilities for Disaster Prevention, *Proc. Schl. Eng. Tokai Univ.*, Ser. E. Vol. 31, pp.11-19, 2006。
- 3) 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。
- 4) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷毅，高尾誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp.911-915，2000。
- 5) 山本吉道，ウィフール ウッチャン，飯田邦彦，河合恭平(2007)：一般地理情報とインド洋津波被害資料を用いた津波被害の広域推定法構築の試み，海洋開発論文集，第23巻，pp.81-86。
- 6) 北海道庁：北海道南西沖地震津波検討委員会，1993。
- 7) 北海道函館現業所：平成5年度奥尻海岸津波痕跡調査委託外3報告書，1993。
- 8) Yamamoto, Y., Takanashi, H., Hettiarachchi, S. and Samarawickrama, S : Verification of destruction mechanism of structures in Sri Lanka and Thailand due to the Indian Ocean tsunami, *Coastal Engineering Journal*, Vol.48-2, pp.117-145, 2006。
- 9) Freeman, J.C. and Mehaute, B.L. : Wave breakers on a beach and surges on a dry bed, *Proc. ASCE*, Vol. 90, No. HY2, pp.187-216, 1964。