

マレ島における津波遡上に対する護岸の効果検討

NUMERICAL STUDY ON THE SEAWALL'S EFFECT AGAINST TSUNAMI RUN-UP AT MALE' ISLAND

加藤史訓¹・福濱方哉¹・大谷靖郎²・今津雄吾³・佐川拓也³・林健太郎³

Fuminori KATO, Masaya FUKUHAMA, Yasuro OHTANI, Yugo IMAZU,
Takuya SAKAWA, Kentaro HAYASHI

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京支店 (〒108-0073 東京都港区三田4-15-35 三田ヒルクレスト)

³工修 株式会社アルファ水工コンサルタンツ 技術部 (〒063-0829 北海道札幌市西区発寒9条14丁目516-336)

Male' Island, the capital of Maldives, was hit by Indian Ocean Tsunami on December 26 2004, but the damage was less severe in comparison with other islands in Maldives and neighbor countries. One of the major reasons was attributed to the solid seawalls surrounding the island. In this study, the effects of the seawalls were inspected by numerical simulation, in which the finest grid size was 3.33m for the whole Male' Island. The results indicated that Male' Island without seawalls would have been hit by run-up flows with higher energy several times, especially on the east coast facing to the tsunami source. Thus it is certain that the existing seawalls reduced the damage of Male' Island as long as this event. In fact, the maximum tsunami height in Maldives, however, was relatively small, approx. 2m, so that the existing seawalls worked well against the tsunami. So it may be needed to implement other software methods; forecast and alert system, evacuation guideline system etc., as well as shore protection structures in preparation for larger scale tsunamis.

Key Words : *Indian Ocean Tsunami, inundated flow, long distance tsunami propagation, seawalls, Maldives*

1. はじめに

2004年12月26日にスマトラ島沖で発生したマグニチュード9.0の地震は、大規模な津波を引き起こし、インド洋沿岸の広範囲にわたり甚大な被害を発生させた。津波は、震源に近いインドネシアのスマトラ島だけでなく、震源から1,000km以上離れたスリランカやモルディブなどにも押し寄せて、死者数が約30万人に達する世界的な巨大災害となった。この大規模な被害の要因として、津波に対する予警報システムの不在、津波に関する認識不足、津波対策の不備などが指摘されている。

インド洋沿岸の海岸では、日本国内のように堤防や護岸などの海岸保全施設は、港湾等を除いてほとんど整備されていない。しかし、モルディブ共和国の首都であるマレ島においては、日本政府の開発援助によって島の

周囲には護岸等が整備されており、今回の津波では、これらの施設が被害の軽減に効果があったと言われている。

本研究では、津波に対する堤防・護岸等の海岸保全施設の効果を定量的に評価することを目的として、スマトラ島沖地震津波による詳細なマレ島の津波遡上計算を行い、護岸等の津波被害の軽減効果について検討した。

2. マレ島の概要と津波の被害状況

モルディブ共和国は、図-1に示すように東西約130km、南北820kmに広がる26の環礁で構成される島嶼国である。首都であるマレ島は、北マレ環礁の南端に位置する南北約1km、東西約2kmの小さな島であるが、総人口の1/3に相当する約8万人が居住する政治・経済の中心となっており、島内にはビルや住宅が密集している。

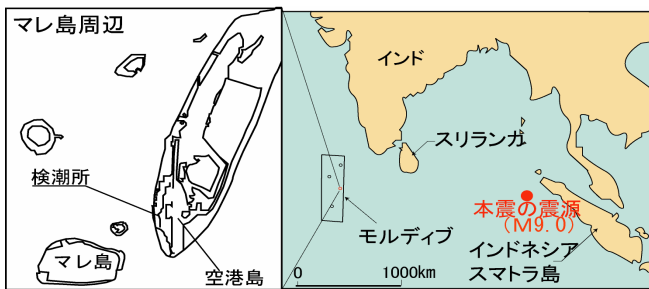


図-1 モルディブとマレ島の位置

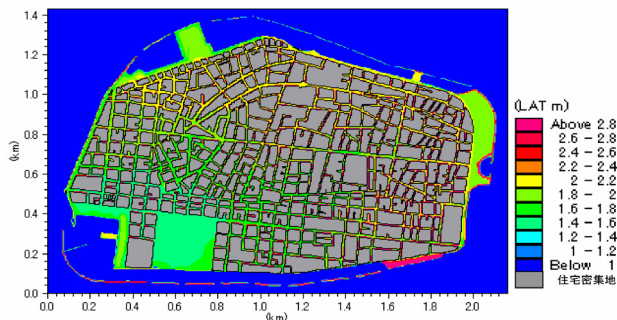


図-2 マレ島の地盤高

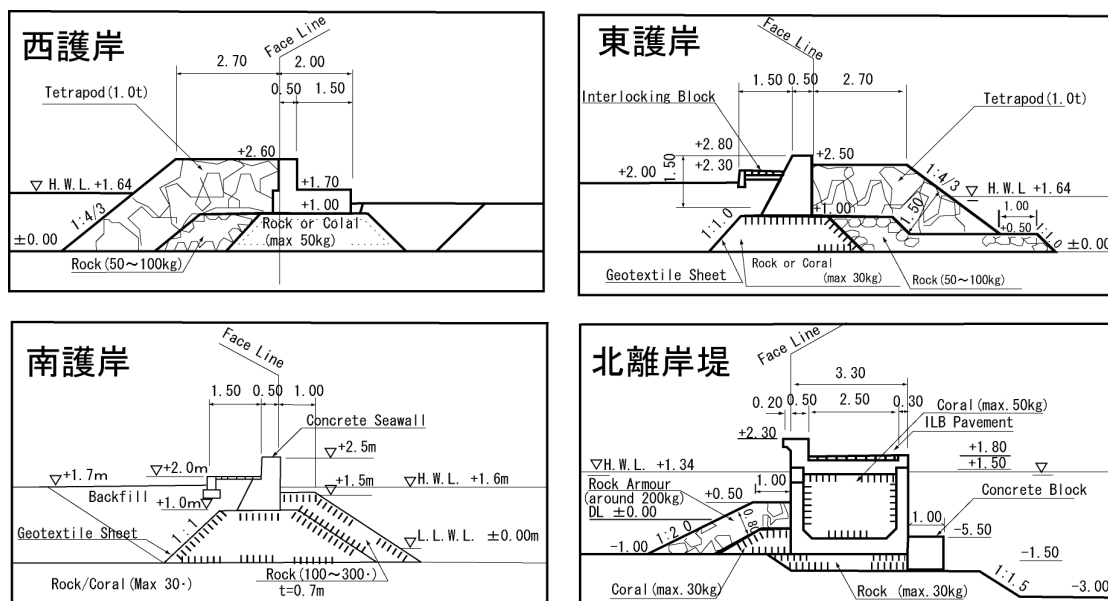


図-3 マレ島の主な海岸保全施設の標準断面

図-2に示すように、マレ島の標高は平均海面上約1.5mと低く、過去に高潮による被害が発生しており、地球温暖化に伴う海面上昇による水没の危険性も懸念されている。また、島はリーフの外縁近くまで埋め立てられており、島から数百m沖合では水深50m程度まで深くなり、南東沖は環礁外となるため沖合20kmで水深2,000mに達する急勾配となっている。

マレ島では、1987年および1988年の高潮・高波被害の後、島の周囲には、図-3に示す護岸および離岸堤が設置されている。護岸の高さは、高潮時の高波浪の来襲方向を考慮して、東岸では平均海面上2.16~2.56m、南岸では同1.46~3.36m、西岸では同1.96~2.36mである。また、南岸と北岸にある港の岸壁の高さは平均海面上1.16mであり、南岸には、離岸堤も設置されている。

2005年3月5日に実施した津波の来襲状況の聞き取り調査結果によると、マレ島東岸の人工ビーチでは、津波の第1波は護岸上約1mの高さで5~10分間継続し、突堤付近の海底が露出するほど潮が引いた後に、高さ0.5m程度の第2波が来襲したということであった。また、北岸の岸壁では、岸壁上約1mの高さの津波が来襲したとのことである。

このように、津波による浸水被害は比較的小規模であり、密集している建築物はコンクリート製がほとんどであるため、マレ島では死者は出なかった。しかし、マレ島以外の島では、護岸等の海岸保全施設がなく、家屋は軽いサンゴ石をセメントで固めて建てられたものが多いため、モルディブ国内では、死者82人、行方不明者26人の人的被害が生じた。

3. 津波シミュレーションの概要

津波の数値計算には、深海域から陸上まで計算するため、以下に示す非線形長波方程式に底面摩擦、乱流、コリオリ力の効果を取り入れたモデルを使用した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gPn^2 \sqrt{P^2 + Q^2}}{D^{7/3}} - \frac{\partial}{\partial x} \left(ED \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{D} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(ED \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{D} \right) \right) - \Omega Q = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gQn^2 \sqrt{P^2 + Q^2}}{D^{7/3}} - \frac{\partial}{\partial x} \left(ED \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{D} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(ED \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q}{D} \right) \right) + \Omega P = 0 \quad (3)$$

ここで、 P ： x 方向の単位幅流量、 Q ： y 方向の単位幅流量、 D ：全水深、 E ：渦動粘性係数、 n ：Manningの粗度係数、 Ω ：コリオリパラメータ、 g ：重力加速度である。

初期条件としては、断層モデルを用いて計算される海底地盤変動の鉛直成分を海面上の水位変動として与えた。断層モデルについては、幾つかの断層パラメータを用いた予備検討により、モルディブにおける津波波形の再現性が最も良い越村ら¹⁾の断層パラメータを採用した。この断層モデルは、余震の分布域から断層幅を150kmと仮定して経験則から断層長さ(900km)を求め、余震分布に整合するように北側400kmと南側500kmの2つのセグメントに分割したものである。

シミュレーションは、計算格子間隔2,430mで波源からモルディブ諸島を含むインド洋全体の伝播計算を行った後に、モルディブ環礁を対象とする東西約600km、南北約1500kmの範囲について遡上計算を行った。遡上計算では、伝播計算結果により得られた計算領域周囲の水位変動を境界条件として与えた。遡上計算の計算格子間隔は、最も外側の2,430m(計算範囲：約600km×1500km)から810m(同：約27km×27km)、270m(同：約10km×10km)、90m(同：約5km×4km)と段階的に小さくし、最終的には、マレ島周辺の約2km×1.5kmの範囲を3.33mの格子間隔で計算を行った。

計算時間間隔は、計算の安定条件を満たすように伝播計算では1.0s、遡上計算では0.25sに設定した。なお、初期潮位は、マレ島に津波が来襲した時刻の観測潮位(LAT+0.58m=平均水位-0.06m)を一定に与えた。

従来の津波遡上計算では、家屋等の構造物については、それらと同等以上のスケール(十数m~数十m)で計算格子を設定し、格子内における家屋の密集度合いに応じて粗度に換算した抵抗として与える方法が一般的であった²⁾。しかし、近年は計算機性能や測量技術の向上により、家屋より小さいスケールの解像度による計算が実用段階に入っている。この場合には、家屋の壁を地形として表現することにより、家屋間を流下する際の流速の増大や家屋前面での水位上昇等の局所的な津波の流動を再現することが可能となる。

本研究では、マレ島全域の計算格子を3.33mに設定していることから、家屋一軒一軒を区別して扱うことが理論上可能であったが、それらの識別に十分なデータが得られなかったため、空中写真や観光マップを参考にして、陸上の計算格子を住宅密集地、道路、空地の3種類に分類した。住宅密集地には津波が侵入しないものとし(図-2参照)、道路および空地の粗度係数は各々0.02、

0.025に設定した。マレ島では極めて住宅が密集した状況にあることから、家屋を集合体として扱っても道路等を津波が遡上するという実態に即した計算が可能であると考えられる。なお、海底の粗度係数は0.025とした。

海底地形のデータは、種々の海図を用いて作成した。マレ島市街地の地盤高と護岸の天端高は、大谷ら³⁾の現地調査結果を参考にして、図-2に示すように設定した。なお、図-2中の灰色の部分は住宅密集地である。島内の地盤高は、南西部が全般的に低く、北東部が比較的高い状況にある。また、北岸には防波堤が、南岸には離岸堤が設置されている。

4. 津波伝播計算結果

インド洋における地震発生時からの津波の伝播状況を図-4に示す。図において、赤は海面の上昇を、青は海面の低下を示している。地震発生時には、震源の西側で押し波が、東側で引き波が発生している。津波は主に東西方向に伝播し、地震発生0.5時間後には、スマトラ島北端では、引き波に続いて押し波が到達している。2時間後には、スリランカに押し波の第1波が到達しており、マレ島では、地震発生3.5時間後に押し波の第1波が到達している。

今回の津波では、マレ島北の空港島環礁内(図-1参照)において潮位が観測されていた。この観測潮位から天文潮を除いて水位変化量を算出し、伝播計算で得られた計算値と比較した結果を図-5に示す。なお、時刻は協定世界時(UTC)で示している。計算値および観測値ともに、押し波が最初に到達し、40分程度の周期で第2波、第3波が来襲している。津波の到達時刻および波高の最大値は、計算値と観測値がほぼ一致しており、波高は第1波が最も大きく、2m近くに達している。

以上のことから、伝播計算の結果は、遡上計算に用いる境界条件として十分な精度を有しているものと判断した。なお、観測値に比べて計算値の方が短周期の変動が顕著であるが、検潮所が環礁内に位置しているため計算格子間隔(2,430m)の影響が生じている可能性があること、潮位の観測では短周期の振動を対象としていないことなどが考えられる。

5. 津波遡上計算結果

津波遡上計算結果から、第1波が来襲した主な時刻におけるマレ島の水位の平面分布を図-6の上段に示し、下段には、マレ島の北岸、西岸、南岸、東岸の代表地点(平面図中の●印)における水位変化量の経時変化を示す。なお、伝播計算の結果によると、第1波の波高が最大であったことから、第1波に着目して整理を行った。

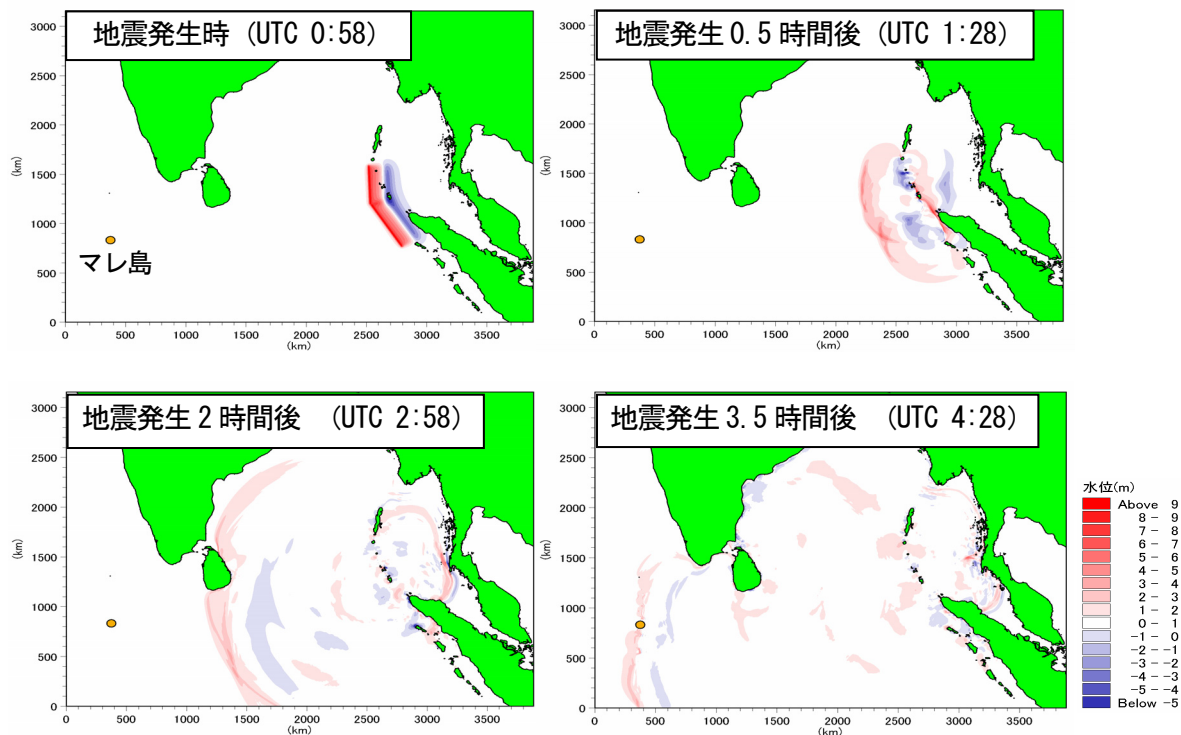


図-4 インド洋における津波伝播計算結果

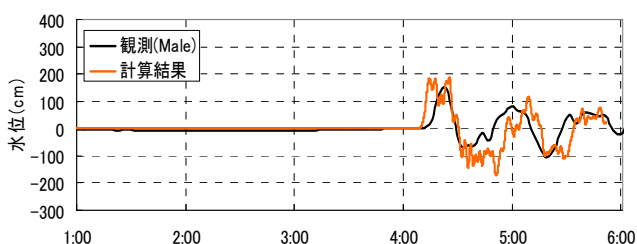


図-5 水位変化量の観測値と計算値の比較

下段の水位変化量の経時変化を見ると、津波による水位上昇の開始時刻は、環礁内に位置する北岸と西岸に比べて南岸と東岸の方が1分半ほど早くなっている。これは、津波が南東方向から来襲し、島を回り込んだことを示している。南岸と東岸では、その後の約20分間に水位は2～4分周期で振動を繰り返し、平均で1 m程度、最大で2 m程度上昇している。特に、東岸で振動は大きく、4時20分頃には3 m弱の振幅が生じている。北岸と西岸においても同様の変化を示しているが、振幅は全般的に小さくなっている。このような振動の要因として、マレ島周辺の環礁や島による津波の反射が考えられる。

上段の水位の平面分布を見ると、南東側の海域で水位が2 m以上上昇した4時15分には、島の南岸の一部に海水が流入しており、4時25分には、南東側の海域で水位が2.5 m以上になり、東岸でも浸水が生じている。4時30分には、海域では水位は下がっているが、北岸では浸水域が広がっており、海域の水位がさらに下がった4時40分でも陸地の広い範囲で浸水した状況となっている。

なお、大谷ら³⁾もマレ島周辺の遡上計算を行って

るが、住宅密集地を考慮していないこと、計算格子が最小で30mであること、波源からの伝播計算を行っていないことなどが、本計算と異なっている。また、計算結果は、本計算と同様の傾向にあるが、本計算に比べてマレ島の浸水域が広がっている。

6. 護岸の有無による津波遡上の比較

図-7は、遡上計算で得られたマレ島内の最大浸水深である。なお、図中の灰色の部分には住宅密集地および非浸水域である。図中の黒線は、大谷ら³⁾の現地調査による浸水域を示しており、島の南半分と西岸を中心に浸水被害が発生したことがわかる。計算で得られた浸水域は、現地調査結果と概ね一致しており、浸水深は、島の北西部や南西部の岸壁などでは1 mを超えているが、島内の道路の大半では0.4 m以下となっている。

図-8は、護岸がないものと仮定した遡上計算結果による最大浸水深である。計算では、防波堤や離岸堤も除去しており、図中の黒の破線は、図-7の護岸がある場合の計算結果による浸水域を示している。護岸がない場合には、護岸がある場合と比べて浸水域は広がり、最大浸水深も全体的に大きくなっている。特に、南東部から東部の護岸背後では、浸水深が1 m以上増加しており、南西部の空地や岸壁でも浸水深の増加が顕著である。なお、北部では、地盤高が護岸の天端高とほぼ等しいため、護岸の有無による浸水状況の違いはほとんど生じていない。

図-9は、図-8中に示したマレ島内の代表6地点にお

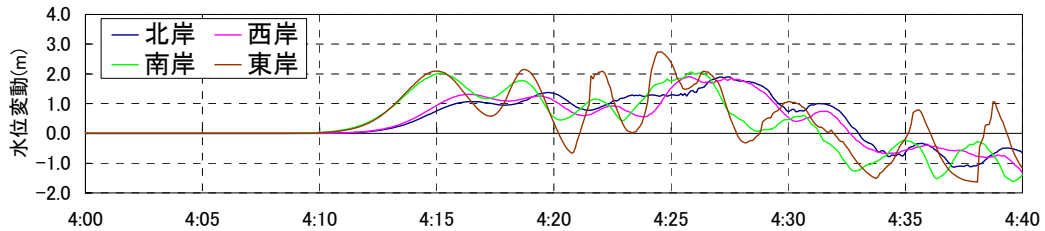
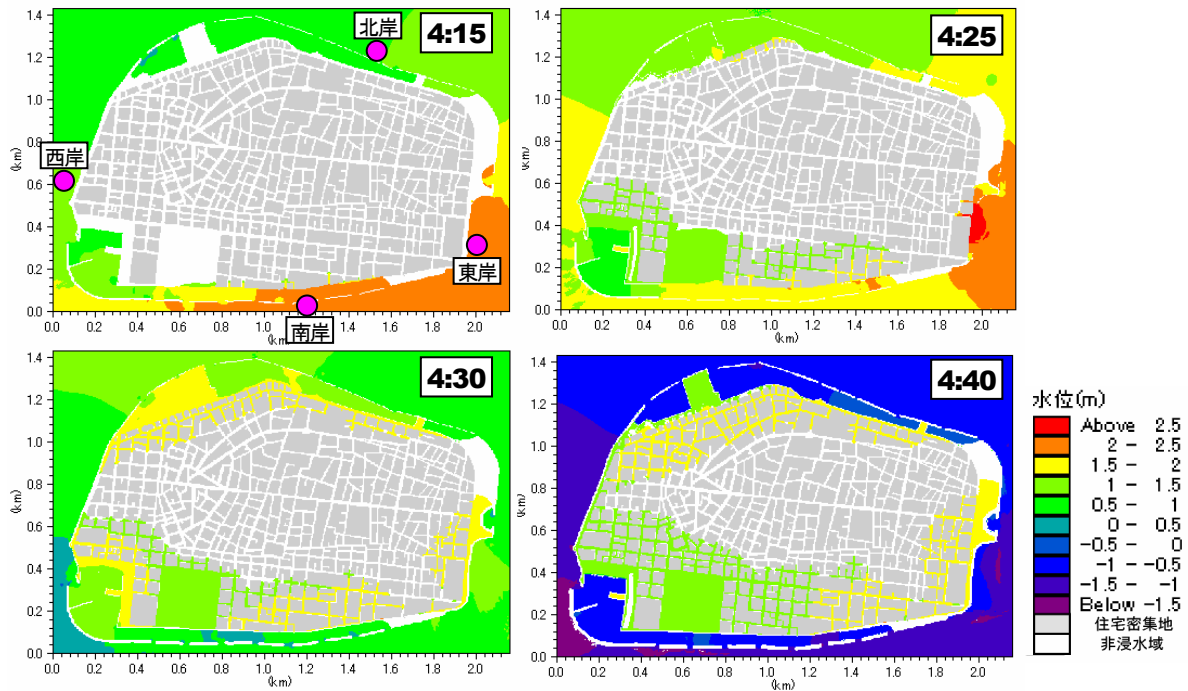


図-6 マレ島周辺の水位変化

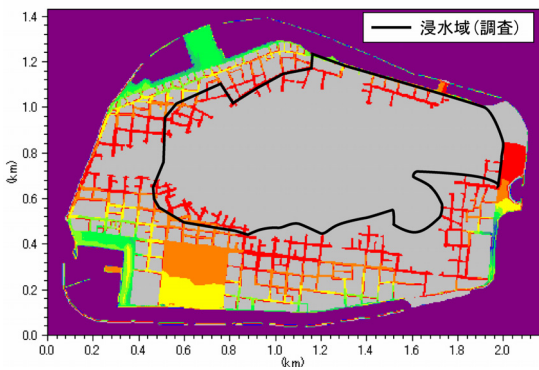


図-7 現況(護岸がなし)の最大浸水深の分布

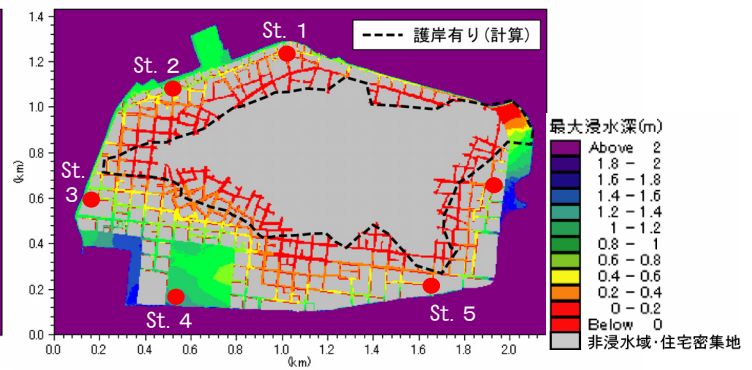


図-8 護岸がない場合の最大浸水深の分布

ける護岸の有無による浸水深の比較である。北岸に位置するSt. 1～2では、地盤高が護岸天端高とほぼ等しいことから、護岸の有無による浸水深の差は顕著ではない。一方、北岸以外のSt. 3～6では、護岸がない場合には、浸水の開始時刻が早くなるとともに、浸水深の最大値が2倍以上となっている。また、南岸および東岸のSt. 4～6では、図-6に示した水位の変動に対応するように浸水深が変化している。

図-10は、流速について、図-9と同様に整理したものである。北岸のSt. 1～2では、浸水深と同様に護岸の有無による差は小さく、西岸のSt. 3では、浸水深と異

なり流速の最大値は同程度となっている。St. 3は、津波の来襲方向に対して島影に位置するため、流速が比較的小さく、護岸による流速の低減効果が顕著ではない。南岸・東岸のSt. 4～6では、流速の最大値は、護岸がある場合には0.5m/s前後であるが、護岸がない場合には1.5m/s前後と3倍程度となっている。特に、津波の来襲方向である島の東側に位置するSt. 5～6において、流速の増大が顕著である。

以上の結果から、護岸がない場合には、マレ島の東方向から来襲した津波が東岸および南岸から陸上に遡上していくが、護岸がある場合には、南東部からの遡上が

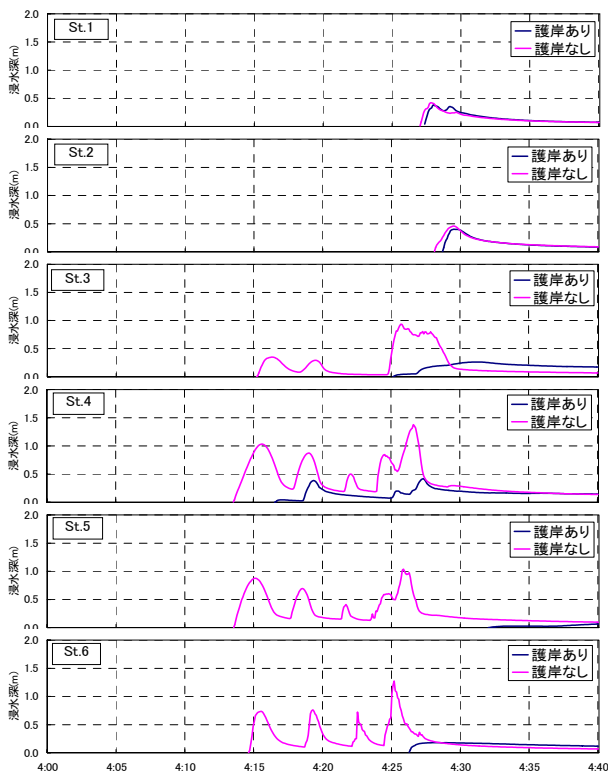


図-9 代表地点における浸水深の比較

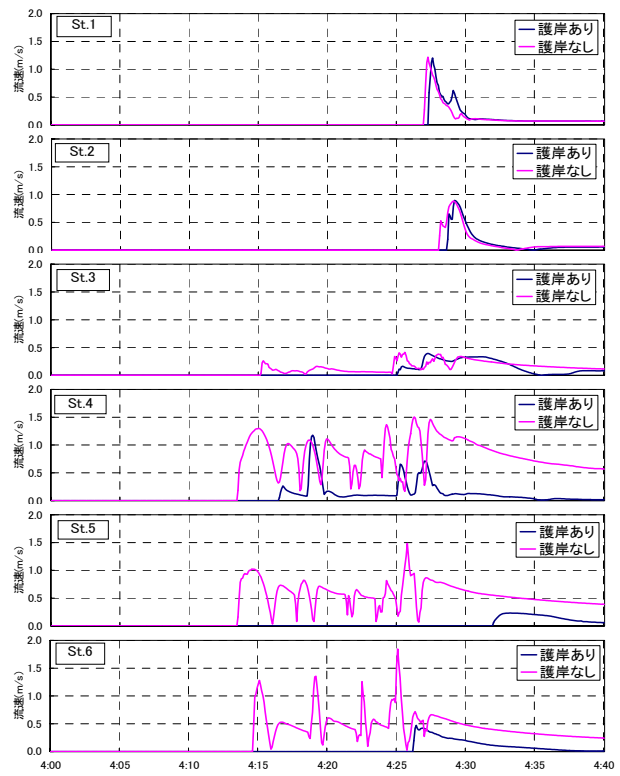


図-10 代表地点における流速の比較

妨げられて、護岸の天端高が比較的低い南西部から浸水すること、護岸によって陸上の浸水深および流速が低減されたことがわかる。

7. まとめ

本研究で行った津波シミュレーションの伝播計算および遡上計算により、マレ島における津波の来襲状況を良好に再現できることが確認された。また、遡上計算の結果から、高潮・高波対策として設置された護岸は、津波による浸水深を低下させるとともに、陸上の流速を低減させる効果を発揮したことが推定された。流体力は、一般的に流速の二乗と水深に比例することから、護岸による流速および水位の低減は、マレ島における人的・物的被害の軽減に大きく寄与したものと考えられる。

以上のように、護岸等の海岸保全施設は、津波の遡上をある程度低減する機能を有している。特に、マレ島のように低平地に多くの人口が密集している地区においては、海岸保全施設は、津波による被害の軽減に効果的である。しかし、今回の津波では、マレ島に襲った津波の高さが2m程度と比較的小さかったため、顕著な効果を発揮したものと考えられる。大規模な津波が襲った場合には、護岸等による低減効果は小さくなることから、予警報システムや避難体制などのソフト対策を充実

させることも必要となる。

なお、インド洋大津波の波源モデルに関して種々の検討が進められていること、今回の計算に用いたマレ島内の地盤高データが十分ではないことから、これらの点を含めて今後も計算精度の向上を図っていくことが必要であると考えられる。

謝辞：マレ島での聞き取り調査は、事前に茨城大学工学部都市システム工学科の信岡尚道先生と(株)テトラの半沢稔氏より現地の情報をいただき、国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室の片岡正次郎主任研究官と行った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 越村俊一, 高島正典, 鈴木進吾, 林春男, 今村文彦, 河田恵昭: インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1416-1420, 2005.
- 2) 油屋貴子, 今村文彦: 合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.276-280, 2002.
- 3) 大谷英夫, 藤間功司, 嶋原良典, 富田孝史, 本多和彦, 信岡直道, 越村俊一, 折下定夫, 辰巳正弘, 半沢稔, 藤井裕之: インド洋大津波によるモルディブ共和国マレ島・空港島の浸水特性とそれに及ぼす護岸・離岸堤の影響, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1376-1380, 2005.

(2005.9.30 受付)