

◆ 報 文 ◆

津波遡上に及ぼす護岸の効果

加藤史訓* 福濱方哉**

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おいて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た。死者数は全体で約30万人に達し、世界的な巨大災害となった。被害拡大の要因として、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などが指摘されている。

日本の海岸では、高潮、高波、津波から背後地を防護するため、コンクリート製の堤防や護岸が整備されてきた。このような施設は、港湾等を除くとインド洋沿岸ではあまり見られない。しかし、モルディブの首都であるマレ島では、1987年および1988年の高潮被害の後、日本の政府開発援助により島の周囲に護岸等が整備されていた。今回の津波では、この護岸により浸水がある程度防がれたため、被害が比較的少なかったと言われている。

津波遡上に対する堤防などの海岸保全施設の効果を定量的に評価するため、この津波の再現計算を行い、津波遡上に対するマレ島の護岸の効果を評価した。

2. マレ島の概要

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と比較的小さく、標高は平均海面上約1.5m程度と低い。しかし、約8万人の人口を抱え、ビルや住宅が密集している。マレ島はリーフ上にあるが、1979年以降、人口集中のためリーフ外縁近くまで埋め立てられてきた¹⁾。水深は、島から数百m沖に離れると50m程度に達する。また、マレ島の南東沖は環礁の外になり、20km先では水深2,000mに達する急勾配の海底で

ある。

写真-1のように、高潮対策として島の周囲には、波返し工を有する護岸が設置されている。護岸の高さは、卓越波向が南東であること¹⁾を考慮して、東岸で平均海面上2.16m、南岸で同1.45～3.36m、西岸で同1.96mで、所によってそれより高くなっている²⁾。また、南岸と北岸にある岸壁の高さは同1.16mである²⁾。南岸には、離岸堤も設置されている。

津波の遡上状況について2005年3月5日にマレ島で聞き取り調査をしたところ、写真-2に示す

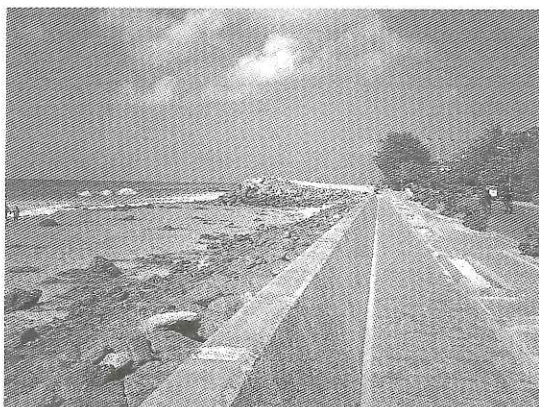


写真-1 マレ島の護岸（南東端付近）

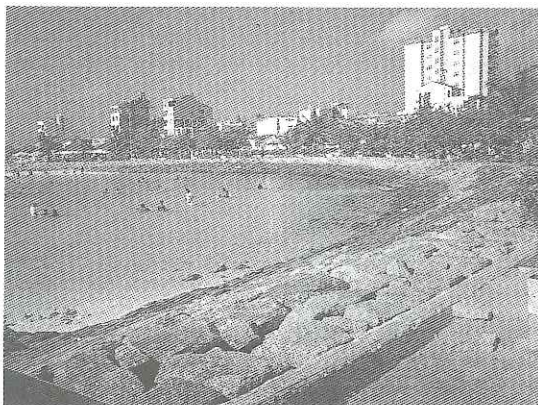


写真-2 マレ島の人工ビーチ（東岸）

東岸の人工ビーチでは、第1波で護岸上1m (調査時の海面上2.3m) まで5~10分間浸水し、突堤付近の海底が見えるほど潮が引いた後に高さ0.5m程度の第2波が来たとの証言が得られた。また、北岸の岸壁では、岸壁上1m (調査時の海面上1.5m) まで浸水したとのことであった。

このように、津波による浸水は比較的小規模で、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、全国では死者82人、行方不明者26人という人的被害が生じた。

3. 津波シミュレーションの概要

津波の数値計算は以下の式で行った。深海域から陸上まで計算するため、非線形長波方程式に底面摩擦、乱流、コリオリ力の各効果を取り入れたモデルを使用した。

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

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

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

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、 η : 水位変動量、 n : Manningの粗度係数、 E : 渦動粘性係数、 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、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。断層モデルは、予備検討においてモルディブにおける津波波形の再現がもっとも良かったことから、越村ら³⁾のモデルを採用した。このモデルでは、断層を北側400km、南側500kmの2つのセグメントで表現している。

シミュレーションは、計算格子間隔2,430mでインド洋全体の計算 (以下「伝播計算」という) を行った後、その結果を境界条件として与えてマレ島周辺 (東西102km、南北73km) の計算 (以下「遡上計算」という) を行った。遡上計算では、沖合から陸上に向かって計算格子間隔を2,430mから段階的に細かくし、陸上では3.3mに設定した。

伝播計算では、海底の粗度係数を0.025とした。遡上計算では、マレ島が密集市街地であることを考慮して、空中写真等を参考に陸上の計算格子を住宅密集地、道路、空地に分類し、住宅密集地には水が入らないものとした。これにより、密集市街地において津波が道路や空地を遡上するという実態に即したシミュレーションが可能となる。道路および空地の粗度係数はそれぞれ0.02、0.025に設定した。

地盤高は、現地調査結果²⁾を参考にして、図-1のように設定した。南西部の岸壁の東側が比較的低く、島の北側は比較的高い。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。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 (=平均水位 - 0.06m) を一定に与えた。

4. 津波伝播計算

今回の津波では、マレ島の北にある検潮所で潮位が観測されていた。そこで、観測された潮位から天文潮を引いて潮位変化量を算出し、伝播計算で得られたマレ島における潮位変化量の計算値とともに図-2に示した。時刻は世界標準時で示している。計算値、観測値とも、押し波が最初に到達し、40分程度の周期で第2波、第3波が現れている。波高は、第1波がもっとも大きく、2m近くに達している。津波の到達時刻も波高の最大値も、計算値は観測値とほぼ一致している。なお、観測値より計算値の方が短周期の振動が顕著であるが、これは検潮所が短周期の振動に追従しにくい構造であるためと考えられる。

以上のことから、遡上計算を行うのに十分な精度で伝播計算ができたと判断した。

図-3は、インド洋における地震発生時からの津波の伝播状況を示している。図において、赤は潮位上昇を、青は潮位低下を示している。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、



図-1 マレ島の地盤高

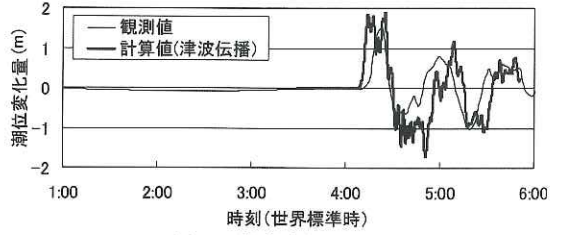


図-2 潮位変化の比較

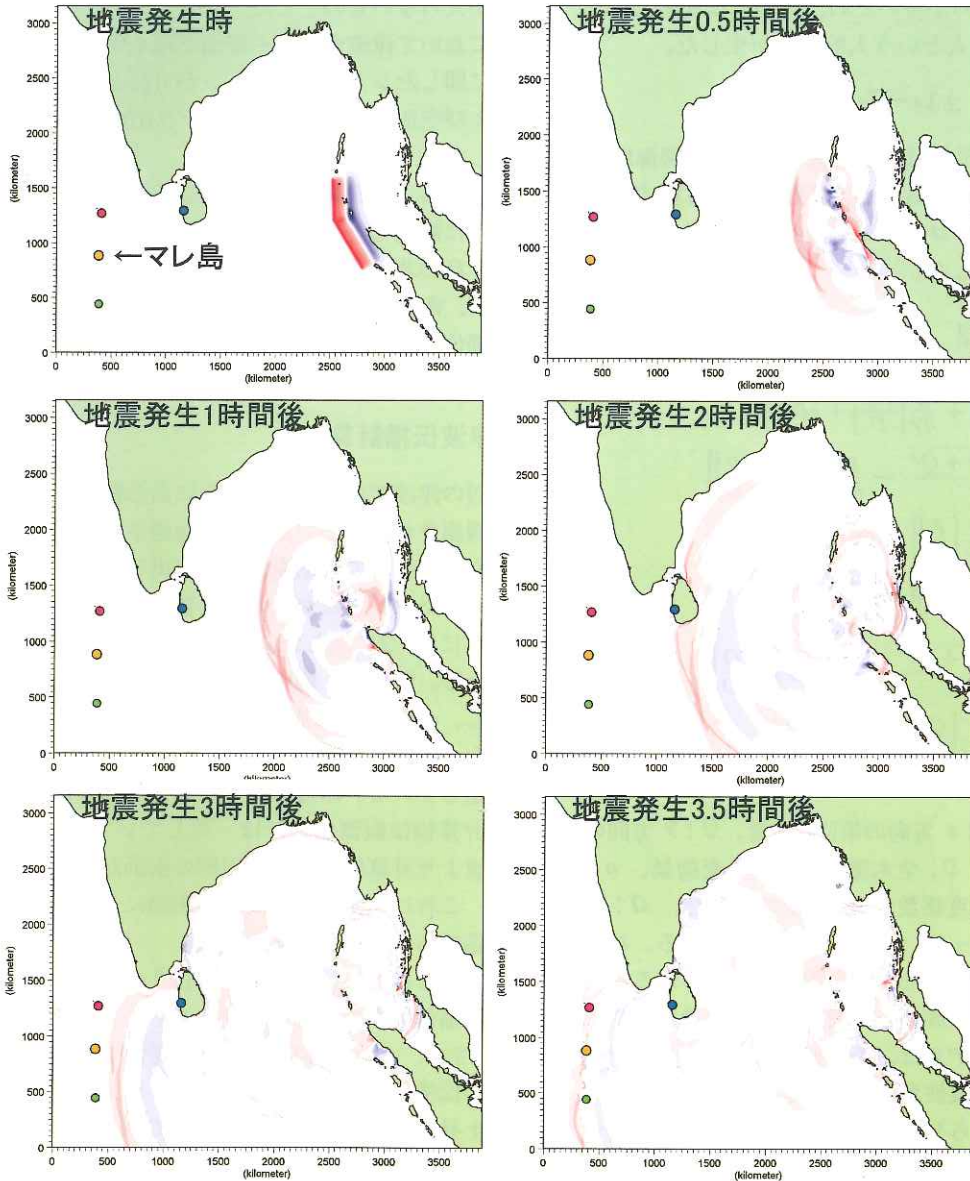


図-3 インド洋における津波の伝播 (丸印はモルディブ周辺の検潮所設置点)

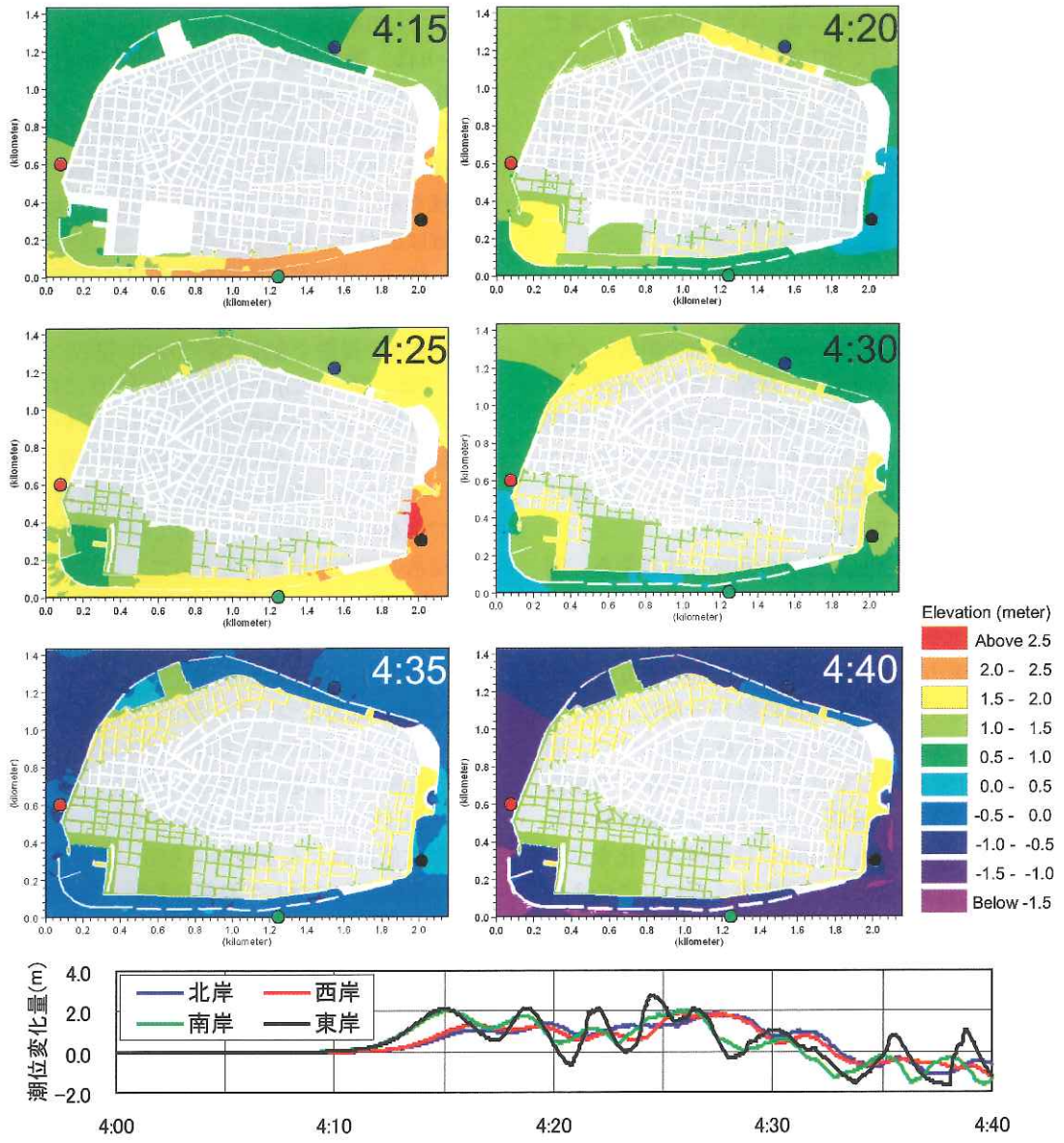


図-4 マレ島周辺の潮位変化

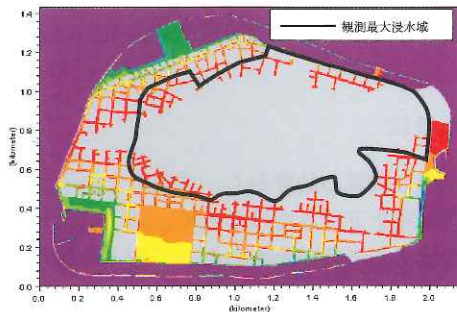


図-5 護岸がある場合の最大浸水深

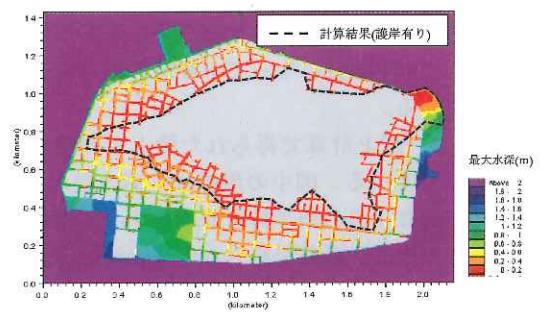


図-6 護岸がない場合の最大浸水深

地震発生0.5時間後には、スマトラ島の北端では、引き波に続いて押し波が既に到達している。地震から2時間後には、スリランカに押し波が達する一方、タイのプーケット付近には引き波に続いて押し波が来襲している。マレ島には、地震発生3時間10分後に押し波が到達している。

5. 津波遡上計算

図-4は、遡上計算で得られたマレ島周辺での潮位変化量を4時15分から5分間隔で面的に示すとともに、マレ島の北岸、西岸、南岸、東岸(平面図において●で位置を表示)での時系列の潮位変化量を下段で示している。伝播計算の結果では第1波がもっとも大きかったことから、第1波に着目して整理している。

まず、下段に示した海域の潮位に注目する。潮位の上昇開始時刻は、南岸と東岸の方が環礁内に位置する北岸と西岸より1分半ほど早い。これは、津波が南東方向から来襲し、マレ島を回り込んだことを示している。その後の約15分間に、南岸と東岸では、潮位は平均で1m程度上昇しつつ、周期2~4分で振動している。特に、東岸での振動は大きく、4時20分頃には3m弱の振動が見られる。北岸と西岸でも平均的には同様の変化を示しているが、振動はそれほど大きくない。このような振動の要因として、マレ島周辺の環礁や島での津波の反射が考えられる。

次に、陸域の浸水深に注目する。南東側の海域で潮位が2m以上上昇していた4時15分には、島の南岸の一部に海水が流入している。4時20分になると、海域の潮位は2m以下に下がるが、島の南岸の浸水域は広がっている。4時25分には、南東側の海域で潮位が2.5m以上に上昇し、東岸でも浸水が見られる。4時30分には、海域で潮位は下がってきているが、北岸でも浸水域が広がっている。それ以降、海域の潮位はさらに下がっていくものの、4時40分になっても陸域の広い範囲で浸水している。

図-5は、遡上計算で得られた陸上での最大浸水深を示している。図中の黒線は実測の浸水域²⁾を示しており、島の南半分と西岸を中心に浸水したことがわかる。計算で得られた浸水域は実測値と概ね一致している。また、浸水深は、北西部や南西部の岸壁などで1mを越えるが、島内の道路

の多くでは0.4m以下である。

図-6は、護岸がないものと仮定した遡上計算により得られた最大浸水深を示している。計算は、防波堤や離岸堤も除去して行っている。図中の黒の破線は、図-5から得られた護岸がある場合の浸水域を示している。護岸がない場合と比べて、浸水域は広がり、浸水深も全体的に大きくなっている。特に、南東部から東部にかけての護岸背後では、浸水深が1m以上増加している。また、南西部の空地や岸壁でも浸水深の増加が顕著である。

図-7は、図-1に示された島内の6点について、護岸の有無による浸水深の違いを示している。北岸に位置するSt.1~2では、地盤高が護岸と同じくらい高いため、護岸の有無による浸水深の差は顕著ではない。一方、St.3~6では、護岸がないと、浸水の開始が早まるとともに、浸水深の最大値が2倍以上になる。また、St.4~6では、図-4に示された東岸および南岸における潮位の振動に合わせるように浸水深が変化している。

図-8は、流速について、図-7と同様に整理している。St.1~2については、浸水深と同様に、護岸の有無による違いはほとんどない。西岸に位置するSt.3では、浸水深の違いにも関わらず、流速の最大値はほとんど変わらなかった。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、護岸の流速低減効果が顕著ではないことを示している。St.4~6では、流速の最大値は、護岸がある場合には1m/s以下であったが、護岸がない場合には1m/sを上回った。特に、津波の来襲方向である東岸に位置するSt.5~6において、流速の増加が顕著である。

以上のことから、護岸がない場合には東から来襲した津波が南東部から陸上に遡上するが、護岸がある場合には南東部からの遡上が妨げられ、護岸が比較的低い南西部から浸水すること、護岸によって陸上での浸水深や流速が低減されたことがわかる。

6. おわりに

津波の遡上計算の結果から、波返し工を有する護岸は浸水深を下げるだけでなく、陸上における流速を低減することがわかった。一般的に流体力は流速の2乗に比例すると言われていることから、護岸による流速の低減は、陸上における人的・物

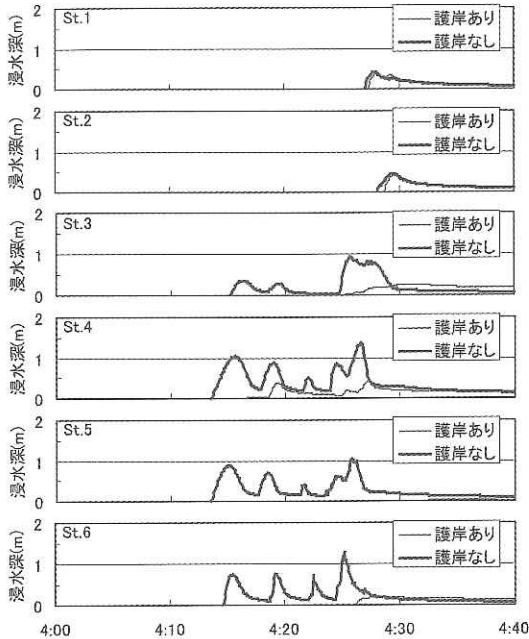


図-7 浸水深の比較

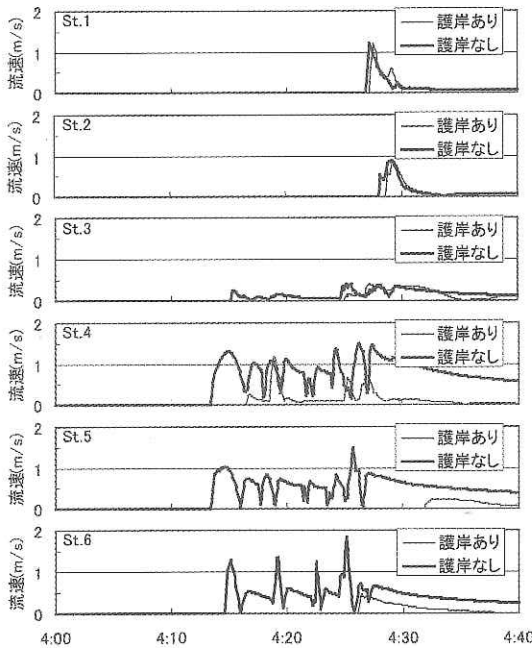


図-8 流速の比較

的被害の軽減に大きく寄与したと考えられる。

以上のように、堤防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する。特に、低平地に多くの人口を擁する地区については、海岸保全施設は津波の被害軽減に効果的である。津波

被害を軽減するためには、予警報システムや避難体制などのソフト対策の充実とともに、必要な海岸保全施設の整備、それら施設の機能維持が重要である。

謝 辞

津波のシミュレーションでは、アルファ水工コンサルタンツの今津雄吾氏にご尽力いただいた。また、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) 宇多高明、桜本 弘、折下定夫：モルディブ国マレ島の地形、波浪および海浜流の特性，海洋開発論文集，Vol.10，pp.19-24，1994.6
- 2) Fujima et. al：Preliminary Report on the Survey Results of 26/12/2004 Indian Ocean Tsunami in the Maldives，89p.，2005.4
- 3) 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，2005（印刷中）
- 4) 宇多高明：スマトラ島沖大津波の被害軽減に役立ったモルディブマレ島の高潮対策，河川，No.703，pp.91-97，2005.2

加藤史訓*



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部海
岸研究室主任研究官
Fuminori KATO

福濱方哉**



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部海
岸研究室長
Masaya FUKUHAMA