

# 海岸砂丘と補強盛土技術を組み合わせた新形式防潮堤の提案

## A New Type Tsunami Barrier Seawall of Sand Dune using Reinforcing Technology

柳沢舞美<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>・山口晋平<sup>1</sup>・川邊翔平<sup>3</sup>・龍岡文夫<sup>4</sup>

Maimi YANAGISAWA, Yasuo NIHEI, Shinpei YAMAGUCHI, Shohei KAWABE

and Fumio TATSUOKA

During the 2011 Great East Japan Earthquake, fill-type seawalls were fully collapsed by overflowing tsunami and totally lost their function as a tsunami barrier at many places. On the other hand, sand dunes reduced the overflow of tsunami. To evaluate the function of sand dune as a tsunami barrier and effects of reinforcing sand dune/fill with a geogrid and/or covering the slopes and crest of sand dune/fill with concrete panels on the strength against the over-flowing tsunami, a series of model tests were performed in the laboratory. The test results indicated that: 1) sand dune can function as a tsunami barrier; and 2) to survive strong tsunami functioning as a tsunami barrier, it is very effective to cover the crest and down-reach slope of sand dune/fill with concrete panels connected to the geogrid layers reinforcing the sand while increasing the resistance against erosion.

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、青森から千葉に至る太平洋沿岸において甚大な津波被害が発生した(Moriら, 2012)。三陸海岸では、20mを越える浸水高が多数の地点で観測され、コンクリート製の巨大防潮堤の一部は破壊された(Ogasawaraら, 2012)。また、宮城県・仙台市以南における砂浜海岸を有する平野部においても浸水高は10mを越え、海岸から最大5kmに達する広大なエリアにわたり津波は遡上しており(Gokon・Koshimura, 2012)、これが明治・昭和三陸津波とは大きく異なる本震災の特徴の一つである。

著者らは、このような平野部で砂浜海岸を有する宮城県名取市等において、集中的な家屋被害調査を実施したところ、高さ9m程度の海岸砂丘の背後では建物の流出・損壊が著しく抑制されていたことが明らかとなった(二瓶ら, 2012)。砂浜海岸における一般的な津波防災・減災対策として防潮林の効果が検討されているが(Danielsenら, 2005; Tanakaら, 2007)、海岸砂丘に着目した本格的な研究は皆無に等しい。また、砂丘高さを大きく上回る津波の場合には、砂丘が大きく侵食されるため、砂丘の耐侵食性を向上させる補強技術の導入が必要となる。

本研究では、津波の室内実験を行い、津波に対する海岸砂丘の減災効果(越流量抑制や耐侵食性)の基本特性

を調べるとともに、既往の海岸砂丘を活用しつつ最新の盛土補強技術を組み合わせた“粘り強く、防災機能を失うまで崩壊することはない”新形式防潮堤を提案し、その有効性を検討することを試みる。後者の盛土補強技術としては、数多くの土構造物に用いられているジオシンセティックス補強土(GRS, Geosynthetic-Reinforced Soil, Tatsuokaら(1997))を採用する。GRSは擁壁や橋梁等の補強技術として既に実用化され、最大の利点の一つは耐震性に極めて優れていることである(Tatsuokaら, 1998; Tatsuokaら, 2009)。そのため、本研究で提示する新形式防潮堤は津波と地震による複合災害対策になる。海岸砂丘そのものや新形式防潮堤の津波耐力を検討するために、大型造波水路を用いて、津波の越流・侵食実験を行った。具体的には、①津波を模擬した孤立波を起こして、砂丘の有無や津波条件による越流量の差を調べるとともに(越流実験)、②津波継続時間を長めにするために段波を発生させて、後述する従来形式・新形式防潮堤を含む様々な補強条件による砂丘の耐侵食性向上効果を検討した(侵食実験)。

### 2. 新形式防潮堤の概要

従来の防潮堤としては、**図-1(a)**に示すように、盛土構造物の天端と表・裏のり面に、コンクリート製被覆工(以下、パネルと呼ぶ)が敷設されており、盛土表面の侵食を防ぎ、防潮堤の津波耐力を向上させている。しかしながら、東日本大震災では、裏のり面直下の基礎地盤の洗掘と天端・裏のり面に作用する揚力によってコンクリート製被覆工が不安定化して越流津波によって流送され、露出した盛土部分が大きく侵食され、結果として、防潮

1	学生会員		東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻修士課程
2	正会員	博(工)	東京理科大学准教授理工学部土木工学科
3	正会員	博(工)	東京理科大学助教授理工学部土木工学科
4	フェロー会員	工博	東京理科大学教授理工学部土木工学科

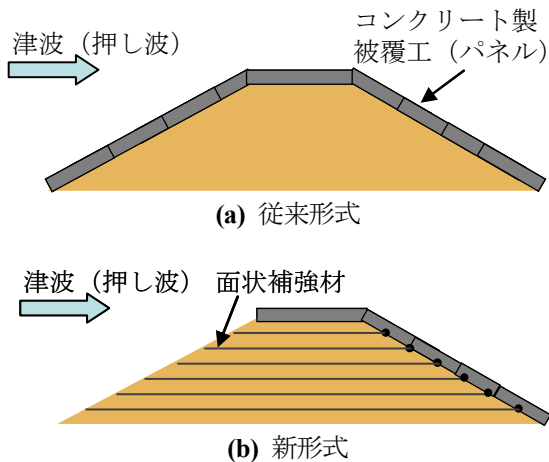


図-1 従来形式・新形式防潮堤の概念図



図-2 従来形式防潮堤の被災例 (岩手県宮古市田老海岸)

堤が破壊されほぼ完全に防災機能を喪失した事例が各地で報告されている。図-2 にその例を示す。

平野部の砂浜海岸では、背後には、海岸砂丘が存在する場合があります。それを“一種の土構造物”として生かしつつ、従来形式防潮堤の課題を克服する必要があります。そこで、図-1(b)のように、海岸砂丘の耐侵食性の大幅な向上を見込みつつ、砂浜海岸における環境に配慮するために、砂丘内に面状補強材（ジオテキスタイル）を層状に敷設する GRS 補強を行い、かつ、砂丘の天端と裏のり面にコンクリート製被覆工（パネル）を付け、それらをジオテキスタイルと繋ぐ、という新形式防潮堤を提案する。パネルのみを三面に置く従来形式と比べて、新形式では、侵食され易い砂丘天端・裏のり面を覆っているパネルをジオテキスタイル等と繋いでパネル流出を防ぎ、防潮堤の侵食・決壊を抑止する。また、砂浜海岸の生態系の連続性を考慮して、砂浜と隣接する表のり面にはパネルを設置しない。このように、新形式防潮堤は、環境と耐侵食性を兼ね備えた防潮堤になると想定される。本論文では、新形式防潮堤の耐津波性を室内実験にて検討した結果を報告する。なお、今回は越流津波が盛土そのものに

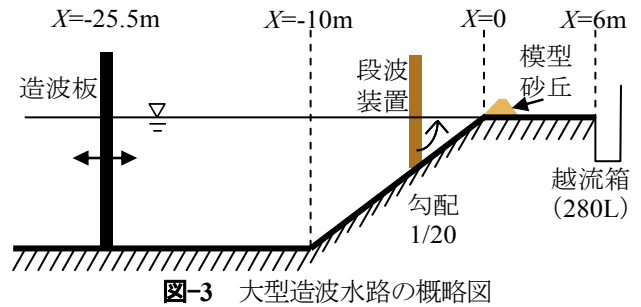


図-3 大型造波水路の概略図

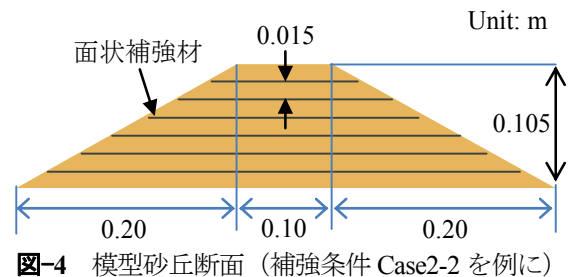


図-4 模型砂丘断面 (補強条件 Case2-2 を例に)

対する影響については検討したが、裏のり面直下の基礎地盤の洗掘への影響は検討しなかった。

### 3. 津波実験方法

#### (1) 造波水路

図-3 に示す長さ 36m、幅 1m の大型造波水路を用いた。水路沖側には、位置・水位制御可能な造波板が設置されている。水路中央部には、勾配 1/20 の斜面が固定され、その他は水平床である。模型砂丘は汀線 ( $X=0$ m、陸向きを正) に設置した。本研究では、模型縮尺として 1/100 を目安とし、著者らが調査を行った宮城県名取市の人工海岸砂丘の高さが 9.1m (二瓶ら, 2012) であったことを参考に、模型の高さを 0.105m とした (図-4)。また、模型砂丘ののり面勾配は一般的な 2 割勾配に設定した。

当初は造波板を用いて実験を行ったが、設定できる孤立波の周期が最大で 5s 程度であり、模型砂丘がほとんど侵食されなかった。そこで、より長周期の津波を発生させるために、段波発生装置を作製した。具体的には、木製ゲートを斜面途中の  $X=-4$ m 地点に設置し水路を仕切り、沖側にて給水しゲートを挟んで水位差  $\Delta h$  を付けた。実験開始と共に、木製ゲートを回転させ段波を発生させた。フルードの相似則に基づく場合、今回の模型縮尺 (=1/100) では時間的縮尺は 1/10 となる。現地の津波周期を 10 分とすると、模型実験では 600s の周期を設定する必要があるが、本実験では水路の制約からこのような長周期を設定できておらず、今後の課題である。

#### (2) 越流実験 (Case1)

砂丘の津波遡上量抑制効果を調べるために、表-1(a)に示すように、津波に模した孤立波を用いて沖波波高  $H_o$  や周期  $T$  を変えた 4 ケースの越流実験を行った。この  $H_o$  や  $T$  の定義は図-5 に示すとおりである。模型砂丘は、図

表-1 津波実験条件  
(a) 越流実験 (Case1)

No.	波条件			砂丘条件
	種類	$H_0$ [cm]	$T$ [s]	
1	孤立波	10.2	1.7	木製模型有, 無
2		24.6	1.6	
3		10.0	3.0	
4		8.2	4.7	

(b) 侵食実験 (Case2)

No.	波条件		砂丘条件	
	種類	$\Delta h$ [cm]	補強材	パネル
1	段波	15	無	無
2			有	無
3	15, 20	15, 20	無	従来形式
4			有	新形式

4と同じサイズの木製模型を用いており、模型砂丘が有る場合と無い場合を対象にして、全4ケースについて実施した。

この実験では、越流量と砂丘前後の波高を計測した。波高計測には、容量式波高計 (HA-1106, 東京計測(株)製) を用いた。また、越流量の計測には、水路陸側に設置した箱 (容積約 280L) を用いて (図-3 参照)、越流 (遡上) してきた水を回収し、その容積を計測した。

### (3) 侵食実験 (Case2)

海岸砂丘の耐侵食性とその対策としての補強技術による耐侵食性向上効果を把握すべく、津波継続時間を長くした段波を発生させ、砂丘侵食状況をビデオ撮影・画像解析した。ここでは、デジタルビデオカメラ (HDR-XR550V, SONY 製) を用いて、砂丘の側面・上面・斜め上 (沖側) の3方向から同時撮影し、データ解析には側面からの撮影データを用いた。段波の水位差  $\Delta h$  は 0.15, 0.20m であり、この時、砂丘高さを上回る水位継続時間は約 20 s であった。また砂丘は最適含水比 15.2% の湿潤豊浦砂を締め固め度 90%, 厚さ 1.5 cm の層毎に締め固めて作成された。実験で用いる砂の粒径も模型縮尺に合わせる必要があるが、現地海岸 (約 0.2mm) の 1/100 スケールに相当する粘土粒子を用いることは非現実的であり、ここでは小さい粒径を有する砂である豊浦砂を選んだ。

砂丘に対する補強条件は、表-1(b)に示す4パターンである。具体的には、砂丘そのもので無補強のもの (Case2-1)、砂丘に面状補強材のみを層状に 0.015m 間隔で敷設したもの (Case2-2)、砂丘にパネルのみを3面に敷設したもの (Case2-3, 従来形式)、砂丘に面状補強材を敷設すると共に、天端・裏のり面にパネルを設置し、かつ、それらを面状補強材に結合しているもの (Case2-4, 新形式)、の4通りである。なお、面状補強材は、耐候性安定剤入りポリプロピレン (目合い 1.3 mm) のジオグリッドである。

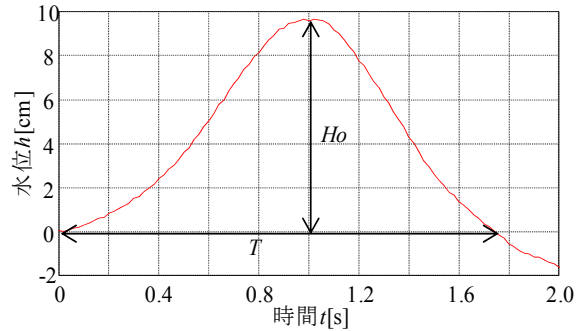
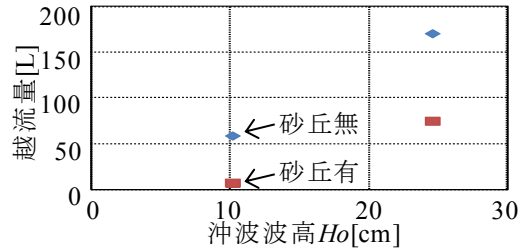
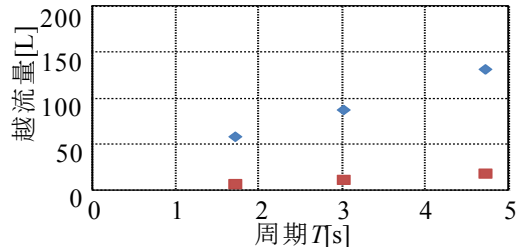


図-5 孤立波波形 (Case1-1)



(a) 波高依存性 (Case1-1, 1-2)



(b) 周期依存性 (Case1-1, 1-3, 1-4)

図-6 砂丘有無による越流量の比較 (木製模型を使用)

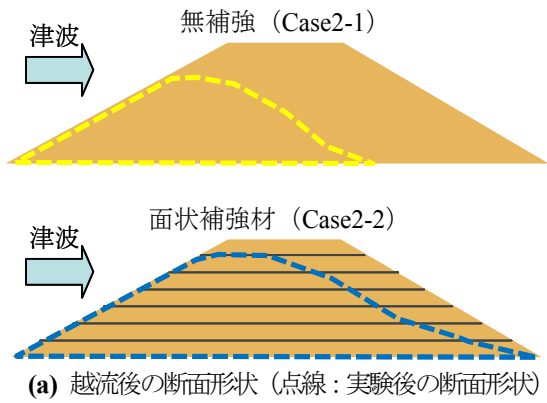
また、パネルは厚さ 5 mm, 横幅 250 mm の無筋コンクリートであり、縦幅は天端では 100 mm, 裏のり面では縦幅 50 mm であり、パネル間は特段結合していない。

## 4. 観測結果と考察

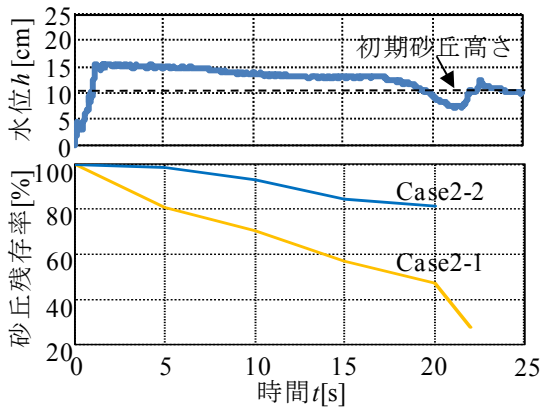
### (1) 砂丘による越流量抑制効果

まず、海岸砂丘の存在による越流量の抑制効果を把握するために、「砂丘有」と「砂丘無」における越流量の違いを比べたものを図-6に示す。ここでは、越流量に対する沖波波高依存性や周期依存性という形でまとめて表示している。これより、まず、砂丘高さと同程度の波高 (Case1-1) では、「砂丘有」の越流量は、「砂丘無」のわずか 13% であり、「砂丘有」のケースでは、ほとんど越流していないことが分かる。一方、砂丘高さの 2.3 倍の沖波波高条件 (Case1-2) では、「砂丘有」のケースでも越流量は大きく増加するが、その値は Case1-1 の「砂丘無」と同程度であり、砂丘の存在により波高増加分 (=0.14m) の越流を防いだものと言える。

次に、越流量に対する周期依存性を見ると、砂丘の有無に関わらず、越流量は周期  $T$  とともに直線的に増加している。しかしながら、この増加率は「砂丘有」の条件



(a) 越流後の断面形状 (点線：実験後の断面形状)



(b) 砂丘残存率の時間変化

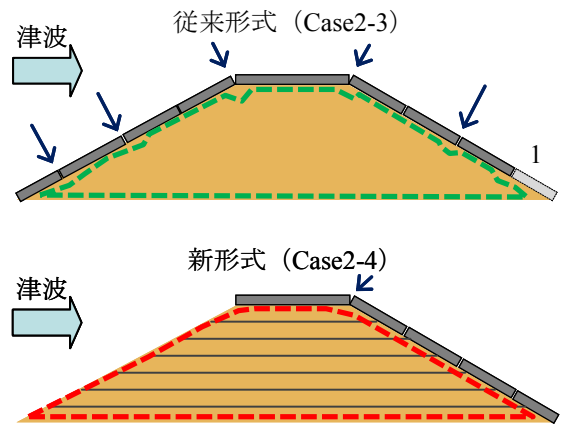
図-7 面状補強材有無による侵食状況の比較 (Case2-1 と 2-2)

では「砂丘無」よりも著しく小さくなっている。以上の結果より、砂丘が存在し続ける場合、波高に依らず越流量を大幅に抑制できており、この越流量抑制効果はより長周期の津波に対して顕著であることが示された。

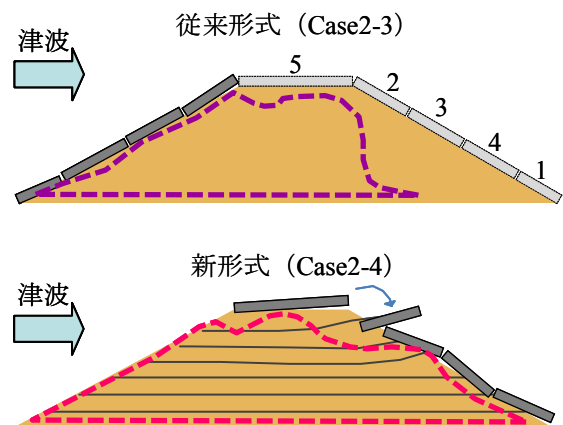
## (2) 砂丘の耐侵食性への面状補強材の効果

海岸砂丘の耐侵食性や、様々な補強策のうち面状補強材による耐侵食性向上効果を見るために、無補強のもの (Case2-1) と面状補強材のみ (Case2-2) における越流終了後の砂丘侵食形状及び砂丘残存率の時間変化を図-7 に示す。ここで砂丘残存率とは、砂丘断面の撮影画像から時々刻々の砂丘断面積を求め、それを初期断面積で除したものである。また、侵食形状を見やすくするために、元の砂丘形状の上に、実験後の形状を点線で図示している。砂丘前面における水位データも合わせて表示する。

これより、無補強 (Case2-1) の越流後の断面形状では、砂丘天端と裏のり面が大きく侵食され、その裏のり面の勾配は豊浦砂の安息角に概ね近くなっている。このときの砂丘残存率の時間変化としては、概ね直線的に減少しているが、越流開始時や終了時に大きく減少している。このうち後者では侵食に伴い砂丘高さが低下し、水位が下がる 20s 以降も更なる侵食が生じ、最終的に砂丘残存率は約 30%まで低下している。一方、面状補強材を付設した Case2-2 では、無補強の時よりも侵食量は大幅に抑制されており、最終的な砂丘残存率は 80%である。これは、



(a) 水位差  $\Delta h = 0.15\text{m}$



(b) 水位差  $\Delta h = 0.20\text{m}$

図-8 従来形式と新形式における侵食形状の比較 (点線：実験後の断面形状、図中の番号はパネル流出の順番を示す)

層状に面状補強材を設置することで、砂丘が多層化され、砂丘の天端崩落を抑制できるためであり、面状補強材だけでも耐侵食性がかなり向上することを示している。

## (3) 従来形式と新形式の侵食状況の比較

従来形式 (Case2-3) 及び新形式防潮堤 (Case2-4) の越流後の侵食状況を図-8 に示す。ここでは、越流後における砂丘断面形を点線で示し、パネルの移動状況をそのまま表示した。図中の数字はパネル流出の順番を表す。また、水位差  $\Delta h = 0.15, 0.20\text{m}$  の結果を図示している。まず、水位差 0.15m のケースでは、両形式ともにほとんど侵食されていないが、パネルの隙間の一部から土砂が流出し、その部分のみ侵食していることが確認された (同図中矢印)。また、このケースにおけるパネルの流出状況としては、従来形式における裏のり尻部の 1 枚のみが流出しただけである。このように、多くのパネルは流出していないため、砂丘の侵食を抑制できたものと考えられる。最終的な砂丘残存率は、従来形式・新形式において、それぞれ、93%、95%となり、無補強 (Case2-1) や面状補強材のみ (Case2-2) と比べて耐侵食性は向上している。

それに対して、水位差 0.20m の場合においては、従来

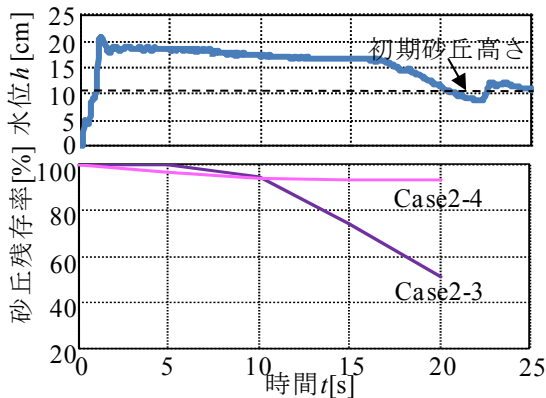


図-9 従来・新形式における砂丘残存率の時間変化 ( $\Delta h=0.20\text{m}$ , Case2-3, 2-4)

形式では、裏のり尻のパネルから移動し、最終的には天端・裏のり面の全パネルが流出し、砂丘断面は大きく侵食された。そのような状況下でも新形式では、パネルはわずかに移動したものの、面状補強材に結合されているため流出せず砂丘断面の侵食も効果的に抑えられており、粘り強い防潮堤であると言える。また、パネルの無い表のり面は、ほとんど侵食されておらず、押し波のみを想定する場合には、パネルは不要であることが分かる。この状況を詳しく見るために、水位差 $\Delta h=0.20\text{m}$ における砂丘残存率の時間変化を図-9に示す。これより、従来形式では、裏のり面の全パネルが流出し終わった10s以降に砂丘残存率が大きく低下し、最終的に51%になっている。一方、新形式では、パネルの流出が抑制されたことに伴って、砂丘残存率の低下量も抑えられ、最終的に93%と極めて高くなっている。このように、パネル流出と連動して砂丘断面の侵食が大きく進行していることから、新形式では、面状補強材をパネルと結合することで耐侵食性を大幅に向上させている。また、表のり面では、パネルを設置しなくてもほとんど侵食されておらず、本研究で提案する新形式防潮堤は、環境と耐侵食性に配慮した津波減災対策として有望であることが示された。

## 5. まとめ

本研究では、得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 海岸砂丘が存在する場合には、沖波波高に依らず越流量を大幅に抑制でき、この効果はより長周期の津波に対して顕著であることが示された。
- 2) 砂丘に面状補強材を設置することにより、無補強の場合よりも侵食量を抑制できることが示された。これは、面状補強材により砂丘が多層化され、砂丘の天端崩落を抑制できるためである。
- 3) 従来形式・新形式防潮堤共に、無補強や面状補強材のみのケースよりも耐侵食性は向上しており、段波の水位差が0.15mのケースでは両形式共にほとんど侵食されなかった。一方、水位差が0.20mの場合には、従来形式に

おける天端・裏のり面の全パネルが流出し、砂丘残存率が51%まで低下したのに対して、新形式ではパネルは残り、砂丘断面の侵食も効果的に抑えられ、新形式は粘り強い防潮堤である。両者の差は、面状補強材とパネルが結合されているか否かであり、本研究で提案する環境配慮型の新形式防潮堤は津波減災対策として有望であることが示された。

この新形式防潮堤の実現に向けて、裏のり面直下の基礎地盤の洗掘の影響や周期などをフルードの相似則等に合わせた実験を今後行っていく予定である。

謝辞：本研究は、三井物産環境基金・2011年度復興助成（研究代表者：二瓶泰雄）によって実施された。ここに記して深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 二瓶泰雄・前川俊明・大嶋李香・柳沢舞美 (2012)：宮城県名取市沿岸部における津波被害関数の推定と海岸砂丘の減災効果，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.59 (投稿中)。
- Danielsen, F., M. K. Sørensen, M. F. Olwig, V. Selvam, F. Parish, N. D. Burgess, T. Hiraishi, V. M. Karunagaran, M. S. Rasmussen, L. B. Hansen, A. Quarto and N. Suryadiputra (2005): The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation, *Science*, Vol. 310, 643p.
- Gokon, H. and S. Koshimura (2012): Mapping of building damage of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami in Miyagi Prefecture, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54, No.1, 1250006(12pages).
- Mori, N., T. Takahashi and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2012): Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku earthquake tsunami, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54, No.1, 1250001(27pages).
- Ogasawara, T., Y. Matsubayashi, S. Sakai and T. Yasuda (2012): Characteristics of the 2011 Tohoku earthquake and tsunami and its impact on the northern Iwate coast, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54, No.1, 1250003(16pages).
- Tanaka, N., Y. Sasaki, M. I. M. Mowjood, K. B. S. N. Jinadasa and S. Homchuen (2007): Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami, *Landscape and Ecological Engineering*, Vol.3, No.1, pp.33-45.
- Tatsuoka, F., M. Tateyama, T. Uchimura and J. Koseki (1997): Geosynthetic-reinforced soil retaining walls as important permanent structures, 1996-1997 Mercer Lecture, *Geosynthetic International*, Vol.4, No.2, pp.81-136.
- Tatsuoka, F., J. Koseki, M. Tateyama, Y. Munaf and N. Horii (1998): Seismic stability against high seismic loads of geosynthetic-reinforced soil retaining structures, Keynote Lecture, *Proc. 6th Int. Conf. on Geosynthetics*, Atlanta, Vol.1, pp.103-142.
- Tatsuoka, F., D. Hirakawa, M. Nojiri, H. Aizawa, H. Nishikiori, R. Soma, M. Tateyama and K. Watanabe (2009): A new type integral bridge comprising geosynthetic-reinforced soil walls, *Geosynthetics International*, IS Kyushu 2007 Special Issue, Vol.16, No.4, pp.301-326.