

GRS防潮堤の耐越流侵食性に関する実験的・理論的検討

Laboratory Experiment and Theory on Resistance of GRS Tsunami Barrier to Overflow Erosion

二瓶泰雄¹・縄野惇郎²・柳沢舞美³・川邊翔平⁴・菊池喜昭⁵・龍岡文夫⁶

Yasuo NIHEI, Junro NAWANO, Maimi YANAGISAWA, Shohei KAWABE
Yoshiaki KIKUCHI and Fumio TATSUOKA

We recently applied a geosynthetic-reinforced soil (GRS) technology to increase the resistance of tsunami barrier to an overflow erosion. In the present study, we performed a series of model tests in the laboratory to evaluate the resistance of previous and new tsunami barrier on the strength against the over-flowing tsunami. We examined dynamical balance of concrete panels covering on the crest and its outflow conditions. The test results indicated that the GRS seawall has a function of tsunami barrier that has a high resistance to erosion due to tsunami overflow. The length of geogrid layers required to prevent outflow of concrete panels was evaluated quantitatively under various tsunami heights.

1. はじめに

東日本大震災では、三陸海岸において建設された高さ10m以上の巨大防潮堤は破壊され、背後地は甚大な被害を受けた (Moriら, 2012)。この東日本大震災を契機に、我が国の津波対策としては、数十年から百数十年に一回の高頻度津波 (レベル1, 防災) と最大級津波 (レベル2, 減災) が想定され、越流侵食が生じるレベル2規模でも「粘り強く壊れない」防潮堤強化技術の確立が急務である (中央防災会議, 2011)。また、海岸堤防を大きく越流するケースでも、海岸堤防が壊れなければ背後地の減災に大きく寄与する (田島ら, 2013)。これらのことから、耐越流侵食性の高い防潮堤が強く望まれる。

既存の防潮堤としては、盛土表面をコンクリート製被覆工でカバーする“アーマ・レビー”タイプ (従来型) が多い。今回の大震災では従来型防潮堤の被覆工が津波越流により堤体天端から裏のり面にかけて作用する揚力とせん断力及び裏のり面の洗掘による不安定化によって流失し、盛土が大きく侵食され、その後、破壊に至る事例が多く観察された。岩手県・宮城県・福島県における海岸堤防の総延長300kmのうち190kmが全壊・半壊した (内閣府, 2012)。それに対して、国土交通省では、越流津波に対する粘り強い海岸堤防の構造を検討している

(例えば、諏訪, 2013)。そこでは、防潮堤の裏のり尻保護工の強化や裏のり面における被覆ブロックのかみ合わせなどの構造上の工夫点を提示し、現在、多くの条件下の水理実験を通し、詳細な性能検証が実施されている。

一方、著者らは、抜本的な耐震化と共に越流津波用強化技術として、ジオシンセティックス補強土 (Geosynthetic-Reinforced Soil, GRS) と堤体表面のコンクリート製被覆工を一体化し、堤体全体で被覆工流出を抑制し耐越流侵食性を大幅に向上させる「GRS防潮堤」を提案し、室内実験を通してその基本性能や有効性を検証した (柳沢ら, 2012; 山口ら, 2012)。しかしながら、その実験条件は限定されており、防潮堤決壊プロセスとして重要な堤体裏のり尻部における洗掘の影響 (Katoら, 2012) を考慮した実験ケースは無く、また、越流時間が20s程度と相似則から想定された時間 (60s) よりも短いなどの課題が残った。

本研究では、基礎地盤上に模型防潮堤を設置し、越流時間60s以上の津波による越流侵食実験を行い、GRS防潮堤と従来型防潮堤の耐越流侵食性を検証する。特に、裏のり尻における「洗掘対策工」や「GRS補強土」の重要性に着目する。また、一般的な堤防照査 (建設省河川局治水課, 2000) に準じて、防潮堤の被覆工の力学パラメータや流出条件を理論的に検討する。

2. 実験方法の概要

(1) GRS防潮堤について

アーマ・レビータイプの従来型防潮堤では、図-1 (a) に示すように、表のり面、天端、裏のり面の三面がコンクリート製被覆工でカバーされている。津波による越流が生じると、裏のり尻部での局所洗掘や被覆工と盛土表

1 正会員 博(工) 東京理科大学准教授理工学部土木工学科
2 非会員 清水建設 (株)
3 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
4 正会員 博(工) 東京理科大学助教授理工学部土木工学科
5 フェロー 工博 東京理科大学教授理工学部土木工学科
6 フェロー 工博 東京理科大学嘱託教授理工学部土木工学科

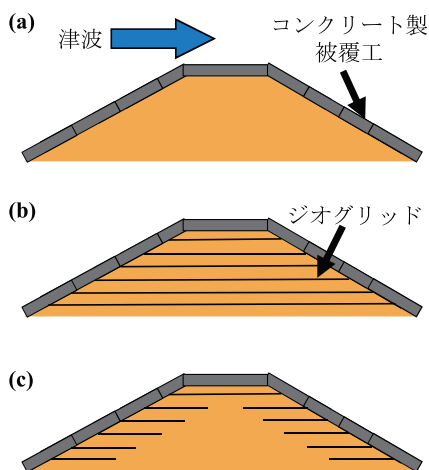


図-1 従来型防潮堤(a)とGRS防潮堤の全体補強(b), 部分補強(c)の模式図

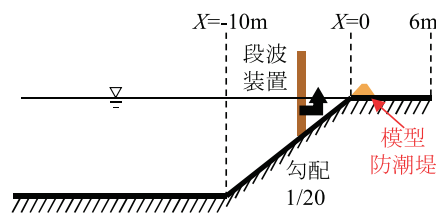


図-2 造波水路の概略図

表-1 実験条件

防潮堤	Case	Δh [cm]	洗掘工
従来型	A-1	20	無
	A-2		有
	A-3	30	有
GRS (全体)	B-1	20	無
	B-2		有
	B-3	30	有
GRS (部分)	C-1	20	有

面間の不陸の発生により、裏のり面の被覆工が不安定化・流出し、防潮堤が崩壊する。この被覆工流出を堤体全体で防止するために、著者らは、盛土構造物の補強土工法として一般的なジオシンセティックス補強土(GRS)を適用する。具体的には、同図(b),(c)に示すように、防潮堤内に一定間隔で面状補強材(図中のジオグリッド)を敷設し、それと堤体表面のコンクリート製被覆工を結合することにより、被覆工の流出を堤体全体で抑制する。また、GRS防潮堤としては、防潮堤の築堤状況を考慮し、新設用としては全面的にジオグリッドを入れる「全体補強」(同図(b))及び、既存の盛土や砂丘を生かすことを前提としてジオグリッドを一部のみ敷設する「部分補強」(同図(c))を想定する。

GRS補強土工法は、一般的に、優れた耐震性を有することが報告されている(Tatsuoka et al., 1997)。そのため、津波被害及び津波到達前に生じる地震被害を合わせた複合災害対策としてGRS防潮堤は極めて有効である。

(2) 実験方法の概要

本実験では、造波水路を用いて、様々な補強条件下における防潮堤の越流侵食実験を行う。ここでは、柳沢ら(2012)と同じく、東京理科大学所有の長さ36m、幅1mの二次元造波水路を用いた。この装置には、造波板が付いているが、十分な津波周期を再現できなかったため、ここでは、木製の段波発生装置を設けて、仕切り用板を挟んで水位差 Δh を設け、あるタイミングで仕切り用板を外して段波を発生させた。

防潮堤形式としては、「従来型」とGRS防潮堤のうちジオグリッドを全面に敷く「全体補強」、一部のみ敷く「部分補強」とし、各条件にて洗掘対策工の有無や段波高さ Δh を変えた7ケースを設定した(表-1)。模型防潮

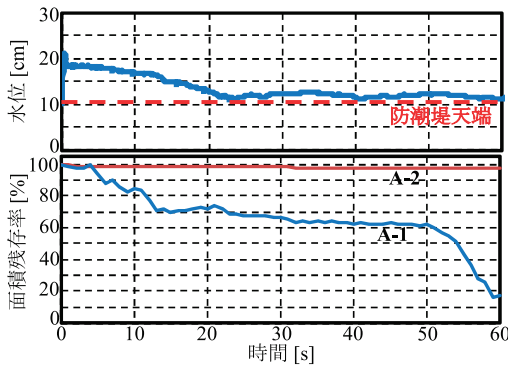
堤は、柳沢ら(2012)と同じく、縮尺1/100、高さ10.5cm、天端幅10cm、表・裏のり面を2割勾配とした。裏のり尻部における洗掘影響を考慮するために、厚さ5cmの基礎地盤に設置し、その上に模型防潮堤を設置した。盛土には豊浦砂を締固め度(標準プロテクター)90%で作成し、その上に敷設する被覆工に厚さ5mmのアルミ板(密度 $2.70 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、長さ約 $5 \times 20 \text{cm}$)、ジオグリッドに農業用ネット(1.5cm間隔)を用いた。また、洗掘防止工としては、長さ10cmのアルミ板を敷設した。

本実験では、波高と防潮堤の侵食状況を計測した。波高については、容量式波高計(HA-1106,東京計測(株)製)を用いて、防潮堤前面の水位を計測した。また、防潮堤の侵食状況については、側面・上面から、DVカメラ(XDR-XR550V, SONY(株)製)を用いてビデオ撮影した。

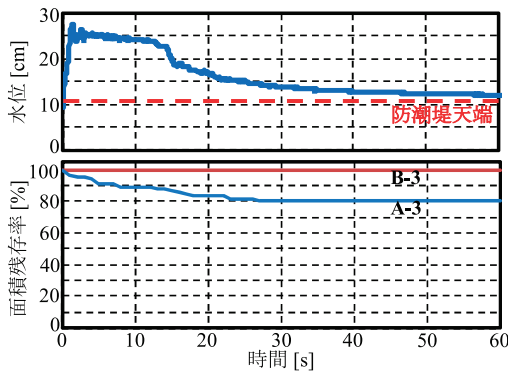
3. 実験結果と考察

(1) 防潮堤の面積残存率の時間変化

様々な補強・津波条件下の防潮堤の侵食状況を把握するために、防潮堤の面積残存率の時間変化を図-3に示す。この面積残存率とは、ビデオ画像から読み取られた時々刻々の堤体断面積を初期断面積で除したものである。なお、断面侵食状況は必ずしも横断(奥行き)方向に一樣とはなっていないが、側面から撮影できている範囲の結果を表示している。図中では、実験結果の代表例として、段波高さ $\Delta h=20 \text{cm}$ では、従来型防潮堤に関するCase A-1, A-2, $\Delta h=30 \text{cm}$ では従来型(A-3)とGRS(全体補強, B-3)の結果を表示している。また、防潮堤前面での水位変化も合わせて表示している。なお、この水位変化は、



(a) $\Delta h=20\text{cm}$ (Case A-1, A-2)



(b) $\Delta h=30\text{cm}$ (Case A-3, B-3)

図3 防潮堤の面積残存率の時間変化

破堤しない実験ケース（ここでは、A-2とB-3）での結果であり、破堤後では図中の水位よりも低下する。

まず水位変化としては、所定どおりの段波が形成されているのが20秒程度であり、その後の水位は漸減しながら反射波の影響で上下している。両条件共に、防潮堤の天端高さを60s以上越えており、相似則で求められる越流時間（現地スケール10分，実験室スケール60s）が概ね確保された。また越流高さとしては、最大として $\Delta h=20\text{cm}$ では8cm， $\Delta h=30\text{cm}$ では15cmであった。

面積残存率に着目すると、段波高さ $\Delta h=20\text{cm}$ では、従来型のうちCase A-1（洗掘工無）の面積残存率は越流開始とともに徐々に減少し、 $t=50\text{s}$ 以降に急減した様子が伺える。一方、洗掘工有のCase A-2では、面積残存率はほとんど減少しておらず、洗掘防止工の効果が見られることが分かる。次に、段波高さ $\Delta h=30\text{cm}$ を見ると、従来型（Case A-3）の面積残存率は $t=30\text{s}$ まで漸減しているものの、GRS全体補強（Case B-3）は全く侵食されていなかった。これより、従来型防潮堤よりもGRS防潮堤の方が耐越流侵食性が高いことが分かる。

(2) 洗掘防止工の効果

越流開始60秒後における全7ケースの防潮堤の面積残

表-2 越流開始60秒後の面積残存率

津波高さ h	20cm		30cm
	無	有	有
洗掘工			
従来型	17	98	80
GRS（部分）		99	
GRS（全体）	93	98	100

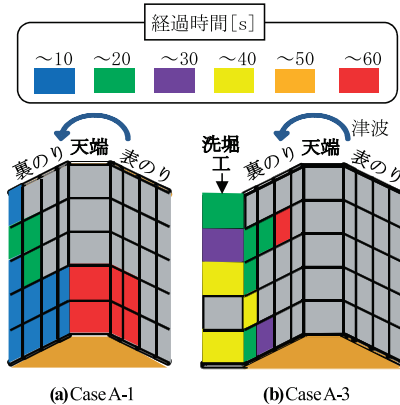


図4 被覆工の流出状況

存率を示す表-2に基づいて、洗掘防止工の効果を検証する。同表から、 $\Delta h=20\text{cm}$ における洗掘工無の従来型（Case A-1）とGRS全体補強（B-1），洗掘工有のA-2とB-2の面積残存率を比べる。従来型では、洗掘防止工が無（A-1）と有（A-2）の面積残存率はそれぞれ17%，98%であり、前述した洗掘防止工の効果が見られる。このCase A-1における侵食状況を詳細に確認するために、被覆工の流出状況を図-4（a）に示す。ここでは、被覆工が流出した時間を色分けして表示している。これより、このケースでは、越流開始直後から始まる裏のり尻部の洗掘に伴って、裏のり面下部における多くの被覆工が $t=10\text{s}$ までに流出した。その後、より上部の被覆工が流出し、さらに一部では天端部や表のり面の被覆工まで流出した。このように、裏のり面の被覆工流出により防潮堤が侵食され、面積残存率が大きく低下した。洗掘防止工有（A-2）では、洗掘防止工の存在により裏のり面の被覆工流出は確認されておらず、結果として防潮堤がほとんど侵食されなかった。

一方、GRS全体補強の場合（B-1, B-2）では、両者とも面積残存率は高く、洗掘防止工による差異は見られなかった。これは、裏のり尻部の局所洗掘が進行しても、被覆工がジオグリッドに結合されて流出しなかったためである（倉上ら，2013）。

このように、被覆工が不安定化し流出し易い従来型防潮堤では洗掘防止工の重要性が明確であるが、被覆工の流出防止策を講じているGRS防潮堤では洗掘防止工が無

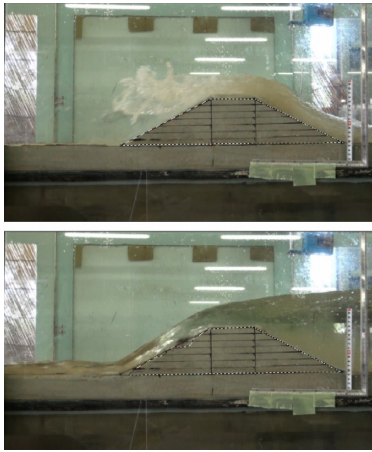


図-5 津波越流の様子（上： $t=1s$ ，下： $t=3s$ ，Case A-1）

くても被覆工が不安定化しにくいことが示された。

(3) GRS補強土の効果

次に、GRS補強土の効果を見るために、洗掘工有の $\Delta h=20cm$ の場合（A-2，B-2，C-1）， $\Delta h=30cm$ の場合（A-3，B-3）に着目する。まず、 $\Delta h=20cm$ では3つの補強条件共に面積残存率は高い。一方、 $\Delta h=30cm$ では、従来型（A-3）では、面積残存率は80%まで低下した。これは、図-4（b）に示すように、洗掘防止工の流出前に裏のり面の被覆工が流出したためである。それに対して、GRS（全体補強，B-3）では、 $\Delta h=30cm$ でも全く侵食されず、面積残存率はほぼ100%であった。これより、GRS補強土の引抜抵抗により、被覆工が堤体から流しせず、防潮堤全体の耐越流侵食性が大幅に向上しており、GRS防潮堤は粘り強く壊れない防潮堤強化技術になり得ることが明らかとなった。なお、本実験ではGRS防潮堤（部分補強）の効果を十分検証できておらず、今後の課題とする。

4. 越流による被覆工の流出条件に関する理論解析

(1) 方法

前述したように、防潮堤の耐越流侵食性は、防潮堤をカバーする被覆工流出の有無に大きく依存している。そのため、一般的な堤防照査（建設省河川局治水課，2000）に基づいて、津波越流時の防潮堤における被覆工の力学バランスや流出条件を理論的に検討する。そこでまず、対象とする流れ場について検討する。図-5に示すように、津波が防潮堤に到達直後には（ $t=1s$ ），水塊は表のり面にて大きく跳ね上がり、裏のり面を叩きつけられるなど衝撃波力が発生する。その後、最大水位前後では（ $t=3s$ ），天端を越流し裏のり面を流れ下る状況となる。この様子は、河川堤防の越流状況と類似しており、津波も準定常流と見なせる。被覆工の流出は、衝撃波力よりも準定常

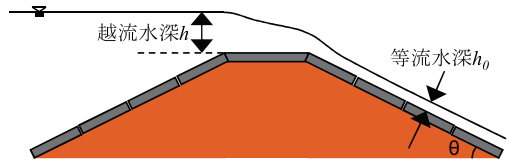


図-6 理論解析において想定する流れ場

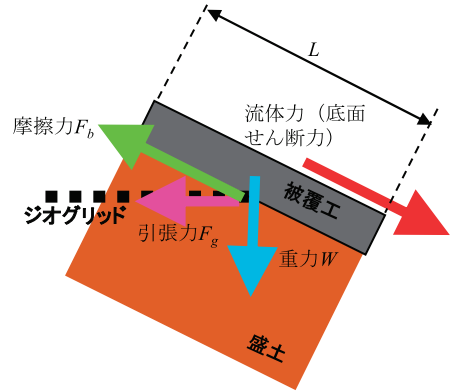


図-7 被覆工一枚に作用する力の設定（GRS防潮堤）

的な越流時に生じている（図-4）。そのため、ここでは、後者を参考とし、簡便に扱うため、津波が天端を越えた流れが裏のり面で等流となる場とする（図-6）。裏のり面の傾き θ の時の等流水深 h_0 や単位幅越流量 q は、以下のようになる。

$$h_0 = \left(\frac{n^2 q^2}{\sin \theta} \right)^{\frac{10}{3}} \dots\dots\dots (1a)$$

$$q = Ch^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (1b)$$

ここで、 h は越流水深、 n は被覆工表面のマニングの粗度係数（ $=0.010m^{-1/3}s$ ）、 C は流量係数（ $=1.6$ ）である。

この越流条件で飽和状態での裏のり面の被覆工（長さ L ）に作用する力としては、流体力（底面せん断力） τ_0 と水中重量 W 、盛土との摩擦力 F_b （ $=\mu_b W \cos \theta$ ， μ_b ：盛土と被覆工間の摩擦係数（ $=1.00$ ））、ジオグリッドによる引張力 F_g を考慮する（図-7）。従来型ではジオグリッドの引張力 F_g が0となる。この時のパネルの流出条件としては、裏のり面と平行方向の合力が正（下向きを正）となる場合であり、次式で表わされる。

$$\tau_0 L + W \sin \theta > \mu_b W \cos \theta + F_g \cos \theta \dots\dots\dots (2)$$

ここで、ジオグリッドの引張力 F_g はジオグリッド長を l_g とすると、

$$F_g = \mu_g \frac{l_g^2}{2} \rho_s g \tan \theta \dots\dots\dots (3)$$

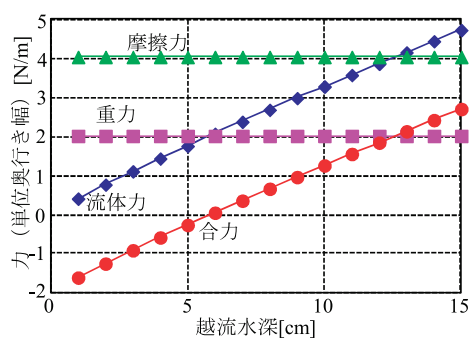


図-8 被覆工に作用する力 (従来型防潮堤)

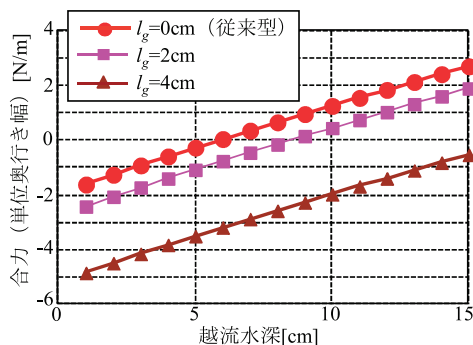


図-9 GRS防潮堤の被覆工に作用する合力

上式の μ_g は盛土とジオグリッド間の摩擦係数(=0.50), ρ_s は土粒子の水中密度である。

(2) 結果と考察

理論解析を前述の実験条件(2割勾配)に対して行う。まず従来型防潮堤について、越流水深 h を1~15cmと変えた時の被覆工に作用する力を算出した結果を図-8に示す。これより、津波の越流水深と共に流体力は増加し、従来型での合力は越流水深5.8cmで0となり、これ以上の越流水深では被覆工が流出する。本実験と柳沢ら(2012)の結果より、洗堀防止工が無いケースでは、越流水深5cmでは被覆工は留まったが、越流水深8cmでは流出しており、これらは上記の理論解析結果と一致する。

一方、GRS防潮堤に関して、越流水深 h (=1~15cm)とジオグリッド長 l_g (=0~4cm)を変化させたときの合力を図-9に示す。GRS防潮堤の場合には、ジオグリッド効果により、被覆工流出が生じる越流水深は増えている。特にジオグリッド4cm(被覆工1枚につき)では、合力はどの越流水深でも負、すなわち被覆工の流出を抑止できており、GRS防潮堤内のジオグリッドによる被覆工流出抑制効果が理論的にも検証された。

5. まとめ

本研究では、従来型・GRS防潮堤の耐越流侵食性に関

する津波実験を行うと共に、被覆工流出条件の理論的検討を行った。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 洗堀防止工の有無により被覆工流出状況やそれに伴う防潮堤の侵食結果が大きく変化し、耐越流侵食性に対する洗堀防止工の重要性が示された。
- 2) 津波高さ $\Delta h=30\text{cm}$ では、洗堀防止工がある場合でも従来型では大きく侵食されたが、GRS防潮堤ではほとんど侵食されていなかった。これはGRS補強土の引抜抵抗により被覆工が堤体から流失せず、防潮堤全体の耐越流侵食性が大幅に向上したためであり、GRS防潮堤は粘り強く壊れない防潮堤強化技術になり得ることが示された。
- 3) 理論解析に基づいて、GRS防潮堤におけるジオグリッドによる被覆工流出抑制効果を定量的に検証した。

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

- Kato, F., Y. Suwa, K. Watanabe and S. Hatogai (2012) : Mechanisms of coastal dike failure induced by the great east japan earthquake tsunami, *Proc. ICCE*, (9pages).
- 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).
- 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.
- 倉上由貴・二瓶泰雄・矢田孝次朗・山崎達也・山口晋平・川邊翔平・菊池喜昭・龍岡文夫 (2013) : 耐越流侵食性向上のための河川堤防補強技術の提案, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.1219-1224.
- 建設省河川局治水課 (2000) : 河川堤防設計指針, pp.161-191.
- 諏訪義雄 (2013) : 津波越流に対して粘り強く機能する海岸堤防とは, 建設物価, 4月号, pp.10-16.
- 田島芳満・舟竹祥太郎・佐藤慎司 (2013) : 越流を伴う巨大津波に対する海岸堤防の減殺機能の検証, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.1, pp.23-33.
- 中央防災会議 (2011) : 「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」中間とりまとめに伴う提言～今後の津波防災対策の基本的考え方について～, <http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/pdf/teigen.pdf> (閲覧日：平成25年5月17日)。
- 内閣府 (2012) : 平成23年度防災白書, 第I部第1編第2章。
- 柳沢舞美・二瓶泰雄・山口晋平・川邊翔平・龍岡文夫 (2012) : 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, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1886-890.
- 山口晋平・柳沢舞美・川邊翔平・龍岡文夫・二瓶泰雄 (2012) : 小型模型実験による防潮堤の越流津波に対する安定性の評価, ジオシンセティックス論文集, Vol.27, pp.61-68.