

津波に対する防潮堤補強技術に関する 実験的検討

山口晋平¹・大林沙紀¹・川邊翔平²・龍岡文夫³・菊池喜昭⁴・二瓶泰雄⁵

2011年東北地方太平洋沖地震で経験したような巨大津波に対して、防潮堤を越流が生じない高さに建設する事は非常に困難である。越流しても可能な限り堤体高を保ち粘り強く抵抗することが必要であり、そのためには盛土の浸食を抑制する事が求められる。既設防潮堤盛土の越流津波に対する安定性を増加させる補強強化技術と新設技術の一つとして、盛土を引張り剛性以外の剛性がないジオシンセティック（不織布）で被覆した小型模型の実験を行った。不織布で被覆した場合でも不織布がめくれ上がるなどしない限り堤体の浸食は若干に留まり堤体の形状を保つ事が分かった。

キーワード：堤防，補強土，津波

1. はじめに

(1) 研究背景

平成 23 年（2011 年）3 月に発生した東北地方太平洋沖地震により、我が国は甚大な被害を受けた。この地震は、広範囲での強い揺れ、地盤液状化、津波、強い余震等の被害を引き起こした。東北地方太平洋沖地震の震源は三陸沖で規模はマグニチュード 9.0⁹⁾を記録し、日本周辺における観測史上最大の地震である。また、震度 6 弱以上観測した地域は 9 県⁶⁾（宮城県、福島県、茨城県、栃木県、岩手県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県）110 市町村の広範囲である。地盤液状化を生じたのは 1 都 6 県（茨城県、栃木県、群馬県、千葉県、埼玉県、東京都、神奈川県）96 市区町村の広範囲である。津波に関しては、宮古地点で 8.5 m 以上、石巻市鮎川地点 8.6 m 以上、相馬地点 9.3 m 以上等であった⁷⁾。太平洋津波警報センターは、アメリカ合衆国ハワイ州、ロシア、ニュージーランド、南米のチリなども含む約 50 の太平洋沿岸の国・地域に津波警報を発令した⁸⁾。強い余震に関しては、震源域は岩手県沖から茨城県沖にかけての広い範囲で、最大震度 4 以上は約 309 回観測されている⁹⁾。このような甚大な被害は世界的にも稀である。

今回の地震による被害を検討すると、死者・行方不明者は約 18,500 人、建築物の全壊・半壊は合わせて 39 万戸以上であり¹⁰⁾、その大半は東北の 3 県（宮城県、岩手県、福島県）が占め、原因は津波によるものであり、

津波によって防潮堤が破壊したため（図-1）被害が増大した。そこで本研究では、津波を念頭に置いて、不織布による被覆工の可能性を補強土工法を用いて検討した。



図-1 東北地方太平洋沖地震による防潮堤の被害（東京大学 古関教授撮影）

(2) 従来型防潮堤の破壊メカニズム

今回の津波で防潮堤が耐えることができなかったのには 6 つの要因がある。① 打ち継ぎ目（波返し工や擁壁）の剥離。② 揚圧力等による被覆コンクリートの引き剥がれ。③ 落下流や漂流物による被覆コンクリートの損傷。（被覆コンクリートの曲げ強度不足&盛土の剛性不足）④ 被覆コンクリート背面への水圧回り込みに

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（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

²正会員，東京理科大学大学院理工学研究科 土木工学専攻，助教

³正会員，東京理科大学大学院理工学研究科 土木工学専攻，嘱託教授

⁴正会員，東京理科大学大学院理工学研究科 土木工学専攻，教授

⁵非会員，東京理科大学大学院理工学研究科 土木工学専攻，准教授

よめくれ、⑤ 地盤の洗掘、⑥ 地震時に地盤の液状化である¹⁾ (図-2)。

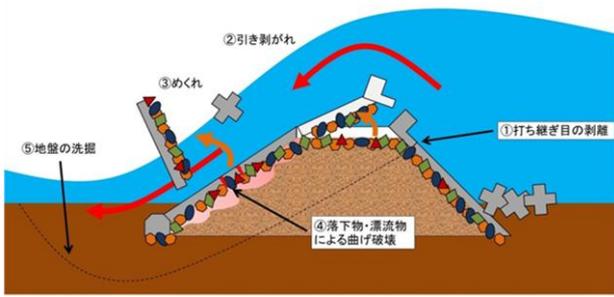


図-2 破壊メカニズム

(3) 粘り強い防潮堤に向けて

津波に対して破壊されないためには5つのポイントがある。被覆がズレがあると、その箇所に津波が当たり被覆のめくれ上がりとなる原因となるため、① 地震や衝撃に対する被覆コンクリートのズレ防止。被覆が流されてしまうと、その箇所から内部の盛土が流失してしまうため、② 被覆コンクリートの浮き上がり、引き剥がれの防止。津波はただ海水が流れてくるだけでなく、様々な漂流物が混入しており、それが防潮堤に対して悪い影響を与える可能性もあるため、③ 万が一損傷しても、盛土内部に水圧が回り込まない構造。同様の理由から、④ 落下流・漂流物の損傷対策。基礎地盤が不安定では防潮堤も不安定になってしまうため、⑤ 地盤の洗掘防止。これらが必要となってくる⁴⁾。

これら5つのポイントを改善するためには、コンクリートの打ち継ぎ目の補強、コンクリートと盛土の一体化、被覆コンクリートの補強、盛土地盤の剛性向上、水たたきによる洗掘対策が必要となってくる。

そこから被覆コンクリートと剛性を高めた盛土との一体化が重要であることが認識されて、GRS (Geosynthetics-Reinforced Soil) 防潮堤 (図-3) のような一体化構造による新しい防潮堤の提案がされた⁴⁾。

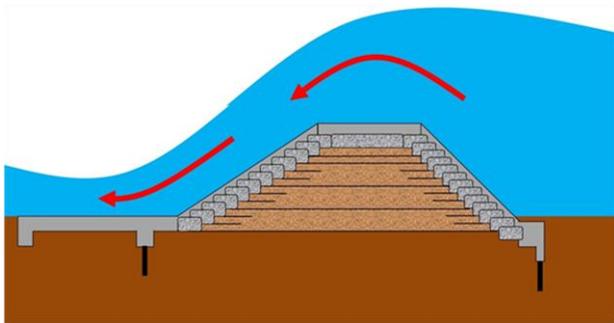


図-3 GRS防潮堤

(4) 既往の研究による知見

- 盛土を多層の水平補強材層で補強すると、津波によ

る盛土侵食速度は低下する。

- コンクリート被覆工は、健全であれば盛土の侵食抑制効果がある。しかし、自重だけで天端と下流のり面側に作用する大きな越流津波による揚力と掃流力に十分に抵抗しようとする、不経済になり耐震性にも問題が生じてくる。
- 被覆工を盛土内に配置した多層の面状補強材に連結して盛土と被覆工を一体化すると、被覆工の津波の揚力に対する抵抗力が大幅に上がり盛土の侵食を抑えられる。しかし、被覆工がパネル状であると、パネル間の隙間が弱点となり、そこから局所的な盛土の侵食が起きる可能性がある。
- 盛土を補強し被覆工と結合することによって盛土の地震に対する安定性が飛躍的に上がる。
- 補強材に連結した被覆工パネルを相互に連結すると、津波揚力に対して被覆工が安定化するだけでなく、盛土と被覆工がより一体化して盛土の侵食を更に効果的に抑止できる。
- 堤体断面を小さくする必要がある場合には、断面を縮小しても津波に対する安定性が確認出来た GRS 防潮堤が、最も効果的である (便益/費用の比が最も高い)。

以上の知見⁴⁾を踏まえて、本研究では既設防潮堤盛土の越流津波に対する安定性を増加させる補強強化技術と新設技術の一つとして盛土を引張り剛性以外の剛性がないジオシンセティック (不織布) で被覆した小型模型の実験を行った。

2. 実験概要

(1) 実験装置

図-4 に示す、東京理科大学水理研究室所有の内寸法で長さ 30 m×高さ 12 m×幅 1 m の開水路を用いた。海側の路床勾配は 1/20 で、模型から 4.7 m 沖に段波作製のための堰を設置してある。模型は開水路内の水平な木製板の上に作製した。このため、陸側法尻の支持地盤の洗掘と堤体底面直下の支持地盤内からの浸透破壊は生じない実験となっている。また、堤体模型と水路側面との境界はグリースを塗布した。人工津波は、発生時の水位差 Δh が 20 cm と 30 cm の 2 種類の段波で再現した。 Δh が 20 cm の時は上流法肩部での越流水深はおよそ 5~7 cm であり、 Δh が 30 cm の時は上流法肩部での越流水深はおよそ 11~14 cm であった。津波の越流時間はどちらも約 50 秒だった。水理研究室所有の実験装置は段波を発生させる事が出来るため、津波の模型への衝突を再現する事が出来るが、越流時間が 50 秒と短いため越流継続時間を再現する事は出来ない。最初の段波で堤体が残存した場合は、さらに 2 番目の段波を当てた。本稿において、単に「水位差」と記述されているときは段波発生時の水位差を意味する。

模型の縮尺は、1/50 を目安として高さを 10 cm とした。奥行きは、水路幅と同じで 1 m である。

模型津波による被覆工の変位，堤体の浸食，堤体の変形等の状況を，デジタルビデオカメラ（① HDC-TM750: Panasonic 製，② GZ-HM450: JVC 製で撮影し浸食・崩壊について観察した。砂丘の側面 ①・上面 ②・斜め上（沖側，②）の3方向から同時撮影した。

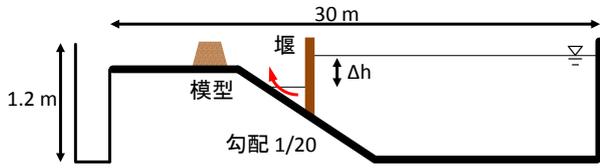


図-4 造波水路の概略図

(2) 実験ケース

各実験ケースの模型概要を図-5 に示す。本稿では図の右側，または上側が海側である。堤体は，豊浦砂を用いて 1Ec での最適含水比（15.2 %）で締固め度 90 %（乾燥密度 1.4 g/cm³、相対密度 21 %）で締固めて作製し，不飽和状態のまま実験を行った。

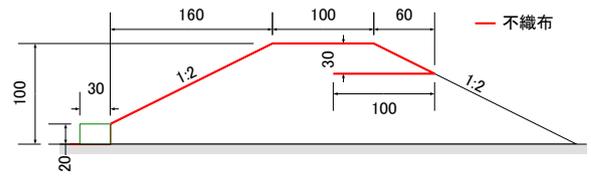
CASE01（陸側法面不織布、図-1a）：海側法肩から 30 mm 下の高さで巻き込み，陸側法面を不織布（ポリプロピレン，40 g/m²）で被覆した。今回，不織布に関しては模型縮尺を考慮しておらず，透水透気性に優れたものを用いた。陸側法面の法尻では不織布を巻き込まずに，ジオグリッドで礫（9.5 mm ふるい通過 4.75 mm ふるい残留）をくるんだ蛇カゴ模型（断面 20 mm × 30 mm）を設置した。蛇カゴは，密度を実際の蛇カゴと揃え石の粒径も模型の縮尺と同じにした。下流法面・法尻からの砂の浸食を低減させる事を目的に設置した。

CASE02（陸側法面不織布+ネイル，図-2b）：不織布の配置は CASE01 と同様であるが，堤軸方向には 40 mm 間隔でネイルにより陸側で堤体に固定した。ネイル補強とは，主に鉄道構造物で使われている工法である。ネイルには爪楊枝（直径 2 mm，長さ 60 mm）を用いた。補強材長・間隔は丸善株式会社出版の「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」を参考に決めた。頭部に 5 mm × 5 mm のプラスチック板を固定し，これによって不織布に固定した。

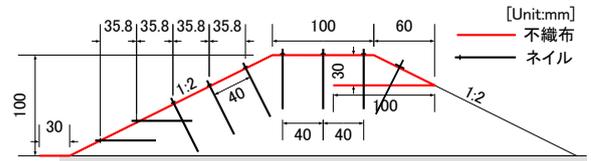
CASE03（全面不織布+ネイル）：不織布の配置とネイルによる固定法は CASE01 と類似であるが，天端のネイルは省略し，不織布を海側法尻で堤体底面に巻き込んだ。

CASE04（全面不織布）：CASE03 と同様に堤体全体を不織布で被覆したが，海側法尻で堤体底面に巻き込まずに，海側法尻から 30 mm 先の位置で画鋸で木製の基礎地盤に固定した。CASE04, 05 でのネイルは，天端で重なる不織布同士を固定するのみで，堤体内へはごく浅く貫入されている。

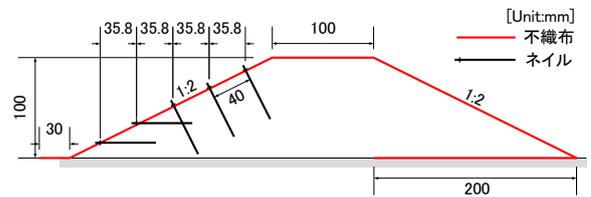
CASE05（全面不織布+面状ジオグリッド補強材）：CASE04 と同様に全面を被覆したが，海側法尻は堤体底面に巻き込んでおらず画鋸等による基礎地盤への固定も行っていない。しかし，ジオグリッド模型（面上補強材，目開き 4 mm のネット）を堤体内に多段に敷設



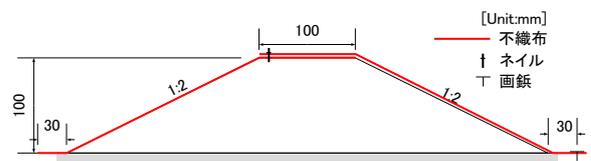
a) CASE01



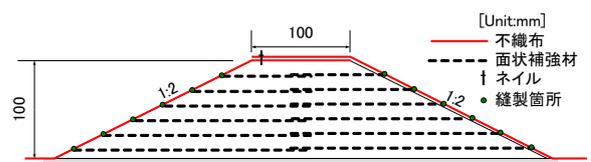
b) CASE02



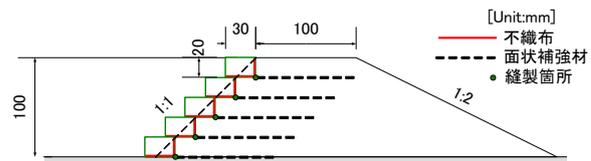
c) CASE03



d) CASE04



e) CASE05



f) CASE06

図-5 各種模型断面図（長さの単位は mm）

し不織布被覆と結合した。用いた補強材は、芯材がポリエステルで出来ており、その周りをポリ塩化ビニルで覆った物である。剛性は縮尺比に近いが、剛性は縮尺比よりも高くなっている。

CASE06 (蛇カゴ+面状補強材) : CASE01 で用いた蛇カゴを長さ 100 mm の盛土内に敷設したジオグリッド補強材に結合した。蛇カゴと堤体の境界にはフィルターとして不織布を設置した。

3. 実験結果

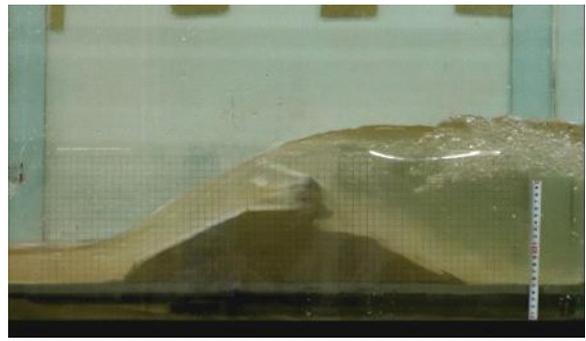
(1) CASE01

CASE01 では、蛇カゴに補強材は結合されておらず、盛土も独立しているため津波越流により直ちに流失した。1 波目 (水位差 20 cm) で陸側法面の下端と不織布間の流下方向のつなぎ目から堤体材が若干流失したが、50 秒間の越流終了後堤体形状に大きな変形は見られず堤体高さも保たれていた。陸側の法尻をめくって砂の流失を確認したところ砂の流失は僅かであったが (図-6a) , 堤体下部はだいぶ飽和しているように見えた。また、1 波目越流終了後海側の水位が下がる際、海側法面の天端から 30 mm の位置での不織布の巻き込み部と盛土の境界が侵食されて段差が僅かに生じた。

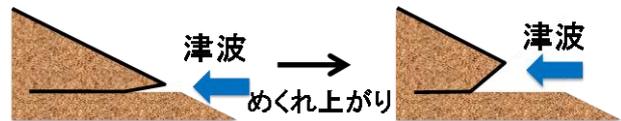
2 波目 (水位差 30 cm) では、津波が海側法面を駆け上がる際にこの段差からめくれ上がり始め、めくれ上がるほど波力を受ける面積が増加する (図-6c) ため、不織布は加速度的に流失した (図-6b) 。その後は、堤体の侵食速度は急上昇して堤体は短時間で完全に流失した。



a) 1 波目 (水位差 20cm) 越流後
(真上からの撮影)



b) 2 波目 (水位差 30cm) 1.5 秒後
(側方からの撮影)



c) めくれ上がりによる波力を受ける面積の増大
図-6 CASE01

(2) CASE02

CASE02 の 1 波目 (水位差 20cm) では、陸側法面下部の不織布同士の間隙が生じたものの堤体の変状はほぼ無かった (図-7a) 。越流終了後海側の水位が下がる際、不織布巻き込み部が侵食され、段差が僅かに生じた。

2 波目 (水位差 20 cm) では、CASE01 とは異なり越流開始後 5 秒程度まで安定であった。しかし、不織布巻き込み部から不織布がめくれ上がり始めた。ネイルによってめくれ上がり速度は低下したが、最終的には堤体は完全流失した (図-7b) 。

(3) CASE03

CASE03 では、1 波目 (水位差 20cm) の津波衝突時に堤体下面に巻き込まれた不織布がめくれ上がった (図-8) 。陸側ネイルは一定程度の間不織布の流失を防いだが、堤体材料が流失するにつれ徐々にネイルの効果がなくなって不織布が流失すると、堤体の侵食・流失速度が急増して 40 秒後には堤体は完全流失した。



a) 1 波目 (水位差 20cm) 越流後
(陸側上方からの撮影)



b) 2波目 (水位差 20cm) 6秒後
(真上からの撮影)

図-7 CASE02



図-8 CASE02 1波目 (水位差 20cm) 2秒後
(陸側上方からの撮影)

(4) CASE04

CASE04 では 1, 2 波 (水位差 20 cm) 後でも大きな堤体変状はなかった。ただし、浸透は堤体内ほぼ全域に達していて、陸側法面に凹凸が見られた。その理由として、堤体内が飽和に近くなったこと、越流によって曲げ剛性のない不織布が特に法尻で振動するようになったこと、さらに越流水の作用力が堤体に伝わったことにより、堤体材料が部分的に流失したため陸側法面に凹凸が見られたと考えられる。

3 波目 (水位差 20 cm) ではこの現象がより顕著となり、ガラス面との境界で盛土が大きく流失した (図-9)。



図-9 CASE04 3 波目 (水位差 20 cm) 越流後、不織布を取り除いた盛土の状態

(真上からの撮影)

(5) CASE05

CASE05 では、1 波目 (水位差 20 cm) では堤体の変状は殆どなかった。

2 波目 (水位差 30 cm) では CASE03 と同様に、津波衝突直後に不織布は海側法面下部の巻き込み部からめくれ上がった。補強材・不織布ともに曲げに対する剛性はほぼ無いので、不織布がめくれ上がり始めるとジオグリッドで補強された堤体はめくれ上がり、ジオグリッド・不織布・盛土が一体となって堤体全体が滑りながら流失した (図-10)。



図-10 CASE05 2 波目 (水位差 30cm) 3秒後
(真上からの撮影)

(6) CASE06

CASE06 では、1 波目 (水位差 20 cm) の越流直後から堤体内への浸透が始まり、上部蛇カゴと盛土の境界から堤体材の流失が始まった。越流開始 20 秒後、越流した水が蛇カゴと盛土の境界に侵入することによって陸側法面は徐々に侵食され、10 cm あった堤体は天端の位置が 2 cm 下がり 8 cm となった。しかし、それでも堤体がある程度残存している間は、蛇カゴは補強材と結合されているため流失は免れていた。しかし、越流開始 35 秒後、盛土全体への浸透で堤体中央に集まっていた間隙空気が天端から抜けるとともに、堤体内に補強領域に沿うような滑り破壊が生じた (図-11)。しかし、盛土下部の蛇カゴがとどまることにより、堤体の完全流失は免れ、結果天端の高さは 2 cm 下がった 8 cm を維持した。

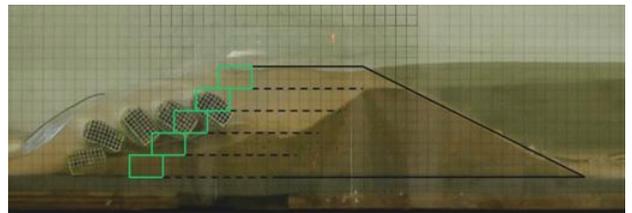


図-11 CASE06 (水位差 20 cm) 40 秒後
(真上からの撮影)

4. 結論

- 1) 不織布は流れ方向に対して一枚で盛土を覆っており、堤体と一体となっている限りは、盛土の流失を防ぎ安定性を確保出来る事が分かった。
- 2) 盛土をネイル補強していないケースとネイル補強して不織布を固定したケースを比較すると、ネイル補強した場合は被覆と堤体が一体となっており、陸側法尻からの盛土の流失が見られなかった。そのため、盛土の浸食速度の低減に効果があったと思われる。
- 3) 海側法尻部の被覆工つなぎ目に十分な強度があり被覆工との固定が維持されていれば、盛土は無補強でも越流に抵抗することが出来る。一方で津波衝突時の波力により、海側法面のめくれ上がりが生じてしまうと、陸側法面・天端をネイル補強しても効果が少ない。
- 4) 既往の研究⁴⁾より、従来型の防潮堤と比べ、蛇カゴを陸側法面に設置して堤体補強材に連結した場合、蛇カゴが流失しにくくなること、また蛇カゴ自体が流失せずとその場に留まることで越流速を減少させ流れを乱す効果が生まれ、堤体材料の流失速度を軽減する効果が生まれる。

なお、これまでの実験では津波の越流による防潮堤の一連の挙動を定性的に把握したが、波力や流速等の定量的な検討不十分である。さらに、使用した試料が豊浦砂であり、異常に透水性が高く容易に飽和してしまう。実際の堤体は津波時に飽和しない事から、より良配合の試料を使うことによってより実現現象を模擬する必要がある。

参考文献

- 1) 総合土木研究所：新しい補強土擁壁のすべて—盛土から地山まで—/総合土木研究所，2005年

- 2) RRR工法協会：RRR工法協会だより No.30 2011.08
- 3) 小岩井聖了，大林沙紀，山口晋平，川邊翔平，龍岡文夫，菊池喜昭，二瓶泰雄：越流津波に対する防潮堤の補強技術の模型実験，第48回地盤工学研究発表会論文1061，2121-2122頁
- 4) 山口晋平，柳沢舞美，川邊翔平，龍岡文夫，二瓶泰雄：小型模型実験による各種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 第27巻 61-68頁
- 5) 気象庁：「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」について（第15報）
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/201103131255.html>
- 6) 気象庁：各地の震度
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/db_map/201103/11/A20110311144618120026038062100560142516600870237429590J84D5117002064_table.html
- 7) 気象庁：「宮古」，「石巻市鮎川」，「相馬」の津波観測点の観測値について
http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/23b/tsunami_miyako_ofunato.html
http://www.jma.go.jp/jma/press/1106/03b/tsunami_ayukawa2.html
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/13a/201104131600.html>
- 8) 共同通信：「太平洋一帯に津波到達 50の国・地域に警報観測」<http://www.47news.jp/CN/201103/CN2011031101001109.html>
- 9) 気象庁：震度4以上の余震の最大震度別地震回数表
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011_03_11_tohoku/yukan.pdf
- 10) 警視庁：東日本大震災について 被害状況と警察措置
<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higajokyo.pdf>
- 11) 松島健一，毛利栄征，桐博英，丹治肇，堀俊和：越流津波による盛土形式の防潮堤の水利模型実験—ジオテキスタイルによる被覆工の引き剥がれ対策の有効性—，第48回地盤工学研究発表会論文608，1215-1216頁

EXPERIMENTAL EXAMINATION ABOUT THE TIDE EMBANKMENT STRENGTHENING TECHNIQUE OVER TSUNAMI

Shimpei YAMAGUCHI, Saki OBAYASHI, Syohei KAWABE, Fumio TATSUOKA
Yoshiaki KIKUCHI and Yasuo NIHEI

It is not feasible to construct coastal dykes that are high enough to prevent over-topping flow of such giant tsunami as experienced during the 2011 Great East Japan Earthquake. For such coastal dykes as above to survive deep over-topping tsunami current, it is essential to prevent the erosion of backfill. The results of small-scale model tests showed that even facing of a thin flexible planar material, such as nonwoven geotextile sheets, can prevent the erosion of the backfill very effectively if the facing is arranged in such that its stability against over-topping tsunami current is maintained.

KEYWORDS: Embankment, Reinforced soil, Tsunami