津波越流時の防潮堤の耐侵食性に及ぼす ジオグリッドの敷設の影響

小林 貴瑠¹・菊池 喜昭²・兵動 太一³・柿原 結香⁴・
二瓶 泰雄⁵・倉上 由貴⁴・渡辺 健治⁶・工藤 敦弘⁷

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
(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: 7616614@ed.tus.ac.jp

² フェロー会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: kikuchi_y@rs.tus.ac.jp

³ 正会員 東京理科大学 助教 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁴ 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁵ 正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁶ 正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁷ 正会員ジェイアール東日本コンサルタンツ (株) (〒171-0021 東京都豊島区西池袋 1-11-1)

東北地方太平洋沖地震では海岸防潮堤よりも高い津波が襲来し越流したことにより盛土形式の防潮堤が多く崩壊した。それ以降、津波災害に対して粘り強く抵抗する防潮堤の構造が求められている。津波に対して粘り強い構造機能を有する防潮堤として、ジオシンセティックス補強土を用いた強化防潮堤が提案されてきた。防潮堤の内部構造を変えることやジオグリッド補強材の敷設により耐侵食性を向上させることができることが分かったが、補強材がどのようにしてその効果を発揮し、耐侵食性を向上させたかについては不明な点が多い。本研究では、ジオグリッド補強材を地盤の表面に敷設し、表面に流水を流すことで、流水に対する地盤材料の流出特性がどう変化するか検討した。その結果、ジオグリッドを表面に敷設することで地盤材料の流出が抑えられることが明らかとなった。

Key Words : geogrid, erosion, mesh size, tsunami, seawall

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、巨大な津波が発生し、人的にも物的にも甚大な被害が発生した。この地震は、その規模が非常に大きく、津波の遡上高や浸水域の広さなど、近年の地震災害の中でも非常に大きなものであった。海岸保全施設の一つである防潮堤も多数被災した。上記の地震による津波は、防潮堤を越流し、基礎地盤の洗掘や被覆コンクリートの引き剥がれなどによる堤体の侵食を起こした。それによって多くの防潮堤が完全に崩壊した。

この地震を契機に、津波災害に対して粘り強く抵抗する防潮堤の構造が求められてきている。津波の越流に対して粘り強い構造機能を有する防潮堤として、ジオシンセティックス補強土技術を用いた強化防潮堤 (GRS 防潮堤) が提案されてきた^{1),2),3),4)}。これまでの研究の結果、補強材を敷設することによって防潮堤の耐津波抵抗性が向上することは明らかになってきているが、ジオグリッ

ドを補強材として用いたときにどのようなメカニズムで防潮堤の耐津波抵抗性が向上したのかという点については定かではない。その中で、青柳ら³⁾は、砂を主体とする築堤に際し、築堤表面を土嚢で被覆し、その土嚢をジオグリッドで巻くことで補強すると、盛土の対越流性が増すことを示した。また、深津ら⁴⁾は、ジオグリッドで補強した防潮堤の表面にパネルを設置したモデルの越流実験をした。そして、越流による防潮堤の破壊は越流水の影響による堤体表面をカバーするパネルの引きはがしとその後の堤体土の侵食によるものの他に、堤体内を浸透する水の影響で堤体内部から侵食が生じることによる崩壊の場合の少なくとも二つのメカニズムがあることが示唆された。

前者については、防潮堤の被覆パネルとジオグリッドをつなげることで、ジオグリッドの地盤からの引き抜き抵抗を期待することで被覆パネルの引きはがしに抵抗できるものと考えられる。後者については、次のような実験結果がある。図-1に示すように、砂による盛土の表面

側に碎石層を設け、それらをジオグリッドで補強し、その上にパネルを取り付けることで、内部の砂の流出が抑えられ、防潮堤の耐越流性能が著しく向上した⁵⁾。特に、同様の構造でジオグリッドを用いた場合と用いない場合とで内部の砂の流出挙動に著しい違いがあった。このことから、ジオグリッドを用いることで流出を抑制する効果が向上する可能性が考えられる。

このようにジオグリッドの効果をまとめると、堤体内を通過する水に対する侵食抵抗に加えて、図-2のようなGRS 防潮堤裏法面の越流時における越流水による堤体材料の流出に対しても効果が発揮されれば、防潮堤の耐越流侵食性も向上すると考えられる。本研究では、これらの二つのジオグリッドの効果を定量的に検討することを最終目標として、ここでは、越流水による流出抵抗特性の向上効果に着目する。そこで、堤体裏法面の一部分を想定した模型を作製して、堤体表面の越流水に対する堤体材料の流出過程や補強材敷設による流出低減効果を検討することにした。堤体のり面のような斜面の場合には、重力の影響により流出が起こりやすくなること、実験の都合上斜面地盤の作製が困難であったことから、研究の初期段階として、本研究における実験では表流水による流出のみ検討するため、盛土模型をほぼ水平に作製し、模型上に水を流すことで表流水に対する流出実験を行った。特に、補強材の有無や砂と礫の層構造の違いがどのようにして耐侵食性の向上に寄与しているのか検討を行う。

図-1 GRS 防潮堤における越流実験の様子

図-2 本研究における想定箇所（防潮堤裏法面）

図-3 小型循環水路の概略図

図-4 試料の粒径加積曲線と補強材の目合い

図-5 補強材の固定の状況（上から見たところ）

2. 実験概要

図-3に今回の実験で用いた水路の概略図を示す。内寸法が長さ1900 mm×高さ390 mm×幅300 mmの小型循環水路の底面に防潮堤の要素模型（長さ 300 mm×奥行き 300 mm×高さ 50 mm）を作製した。要素模型の前後はアクリル板で水路底面を作成し、要素模型の表面と前後の底面上端の高さが一致するようにした。水路側面の片側はアクリル板でできているため、実験中の模型断面の状態を観察できるようになっている。また、水路底面は表流水の流速をある程度大きくするために、勾配を約1/36にセットした。

要素模型に使用した試料は、千葉礫をふるい分けし粒

径が2.00～4.75 mmになるように粒度を調整した碎石($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $D_{50} = 3.12 \text{ mm}$, 以下, 碎石)と東北珪砂4号($\rho_s = 2.66 \text{ g/cm}^3$, $D_{50} = 0.726 \text{ mm}$, $e_{\max} = 0.791$, $e_{\min} = 0.575$, 以下, 珪砂)である。補強材は、ジオグリッドを模擬したターポスクリーン(繊維径0.06 mm 目合い3.2 mm)を用いた。本実験に使用した補強材の目合いと試料の粒径加積曲線との関係を図-4に示す。なお、この目合いは、碎石の平均粒径 D_{50} とほぼ等しい。補強材を用いる場合は、模型地盤の表面に補強材を敷設し、図-5に示すように、流下方向に対して上流側と下流側の全幅にわたりアルミテープを用いてアクリルの枠組みに固定した。模型は碎石単体の場合は目標乾燥密度 $\rho_d = 1.35 \text{ g/cm}^3$ 、珪砂単体の場合は目標相対密度 $D_r = 60\%$ (乾燥密度 $\rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$)になるように水中落下で作製した。

今回の実験における流速は平均流速が一定になるようにポンプの流量を決めており、目標の平均流速を1.0 m/s(単位幅流量 $0.499 \text{ m}^3/\text{s/m}$)とした。なお、平均流速は、模型上流側1 cmの部分のアクリルの枠組みでの水深と単位幅流量から算出した。

今回行った実験ケースを表-1に示す。実験ケースのうち、Case1からCase4は珪砂と碎石それぞれ単体の実験ケースである。Case5からCase8は珪砂と碎石の両方を使用したケースである。珪砂と碎石の両方を用いた場合には、下層を珪砂とし、上層を碎石としている。図-6にはCase6の実験の状況を示す。

実験では30秒間の流水を一回として、6回繰り返して流水実験を行った。ただし、侵食が激しく、模型上で跳水が発生した場合は、その段階までで流水実験を終了した。各回の流出した地盤材料を回収し乾燥質量を計測した。

3. 実験結果

(1) 予備実験

本実験に入る前に予備実験を行い、今回使用する試料の流出特性を確認した⁶⁾。その結果を図-7に示す。ここで平均流出速度とは、30秒間水を流した間の流出割合(各段階の流出試料質量を実験開始前の模型試料の全質量で除した値(%))をその水を流した秒数で除したものである。いずれの試料であっても、流速が大きくなるほど流出速度が大きくなる傾向にある。ただし、碎石の場合は平均流速が0.75 m/s程度で流出速度がほぼ0になるのに対し、珪砂4号の場合には0.55 m/s程度の流速でもある程度の流出が生じていた。

(2) 珪砂・碎石単体のケース (Case1～4)

Case1 と Case2 は珪砂単体の実験ケースである。図-8

と図-9に Case1 と Case2 の実験の際の珪砂層の浸食の状況を示す。Case1 では通水開始から8秒で跳水が発生した。その一方で、Case2 では跳水は発生しなかった。ジオグリッドを用いないCase1の方が著しいことが顕著であるほか、ジオグリッドを用いない場合は比較的上流側が選択的に浸食される傾向にあった。ジオグリッドを用いた場合には、ほぼ均等に浸食された。

Case1 と Case2 の実験の結果得られた累積経過時間と累積流出割合の関係を図-10に示す。縦軸には累積流出割合(%), 横軸に累積経過時間を取っている。累積流出割合とは各段階までの流出試料質量を実験前の模型試料の質量で除した値である。累積経過時間は、各回の流水

表-1 実験ケース

Case No.	珪砂層の層厚(cm)	碎石層の層厚(cm)	補強材の有無
1	5	0	×
2	5	0	○
3	0	5	×
4	0	5	○
5	4	1	×
6	4	1	○
7	2	3	×
8	2	3	○

図-6 Case6の実験時の断面

図-7 平均流速と流出速度の関係

図-8 Case1の各時間での断面変化

図-9 Case2の各時間での断面変化

図-10 実験結果 (珪砂 4 号)

図-11 実験結果 (碎石)

図-12 実験終了後の補強材の様子

時間を足し合わせたもので、例えば 2 回目の流水は 30 秒から 60 秒の間である。補強材を敷設した Case2 では試料の流出量は時間経過と共に増加していくが、Case1 と比較すると流出が著しく抑えられていた。補強材を敷設することで試料の流出が抑えられたと考えられる。

図-11 に Case3 と Case4 の実験結果を示す。Case3 では、実験開始直後から流出が顕著であり、実験開始約 10 秒後には跳水の発生が確認できた。一方、補強材を敷設した Case4 ではほとんど流出が生じず、実験終了(180 s)までに数粒程度の流出があっただけであった。このように補強材を敷設することで Case3 と比べて流出量が極端に抑えられた。また、実験終了後に補強材を確認したところ、図-12 に示すように補強材の目合いに碎石が詰まっているような形で残っているものが多数確認された。このことからすると、目合いよりも大きな粒子がある程度含まれていると、それが目合いに詰まることで補強材の隙間を埋めるために、流出抵抗が上がると考えられる。

一方で、Case1 と Case2 の比較のように、補強材の目合いよりもはるかに小さな粒径の地盤材料であっても、補強材を表面に敷設することで地盤材料の流出が抑えられた。この理由については、第一としては、ジオグリッドが流体抵抗となり、ジオグリッドの上側(流水側)と比べて下側(地盤側)の流速は大きく低下しているものと考えられる。また、ここでの土砂移動形態が掃流砂であることを考えると、ジオグリッドは掃流砂運動の一つである saltation(跳躍)を直接的に抑えるため、これもジオグリッドによる流出抑制効果となっている。なお、本実験では、ある程度、土砂侵食が進むと、ジオグリッド面と盛土模型表面との隙間が大きくなり、一種のキャビティー流れのような状況となる。すなわち、模型侵食が進むと、模型区間の上流端からの剥離が顕著となり、模型表面に作用する流下方向の底面剪断力が低下してしまう。本実験結果は、それらの効果を含む状況であるが、これらを完全に排除することは難しく、今後は実験模型の設定を含めて検討する必要がある。

(3) 珪砂と碎石の両方を用いた場合

Case5 から Case8 は珪砂と碎石の両方を用いた模型地盤のケースである。Case5 と Case6 の結果を図-13 に、Case7 と Case8 の結果を図-14 に示す。図-13、図-14 に示すように、碎石層が 1cm でも 3cm でも補強材を敷設した場合は実験終了時までほとんど流出は無かった。

また、図-15 に Case5、図-16 に Case7 の跳水発生時の様子を示す。Case5 は実験開始から約 10 秒後、Case7 は実験開始から約 25 秒後に跳水が発生したことが確認された。Case5 と Case7 の各ケースで 1 回目流水後 ($t = 30$ s) の最終的な試料の流出量に大きな差はなかったが、跳水発生時までの時間に差が見られた。また、跳水発生時の流出量は側面からの観察では明らかに Case5 のほうが大きく、その意味からは Case5 のほうが流出しやすい条件であった。また、侵食状況については、碎石層が流出して、珪砂層が表面に露出すると一気に全体が流出していくようになった。また、図-14 から分かるように、碎石は流水によって移動するものの、模型表面上に残るものもあり、流出試料の大半は珪砂であった。これは、碎石層の下にある珪砂のほうが碎石に比べると流出しやすいが、珪砂層が表面に達しなければ、珪砂層上

図-13 碎石層 1 cm の結果

図-14 碎石層 3 cm の結果

図-15 Case5 の断面の変化 (跳水発生時)

図-16 Case7 の断面の変化 (跳水発生時)

面の流速が非常に遅いことが考えられ、珪砂層が表面に出ることによって珪砂層上面の流速が大きくなり、珪砂が急激に流出する状態になったことが考えられる。

砂と碎石と補強材を用いたケースでは、下層の珪砂の流出はほとんど確認されなかった。これらの実験条件で、地盤の表面流速が 1m/s であるとする、地中での流速は非常に低いことから、地中では下から上へ流れが生じ、その時の圧力勾配から、砂はボイリングする条件となっていたと考えられる。しかし、補強材によって碎石の流出が抑えられ、珪砂が上向きに動こうとしたときにその動きを止める働きをしたためであると思われる。

このように、表面に碎石等の流出しにくい地盤材料を用い、下層に流出しやすい地盤材料を用いた二層の地盤があったときに、その地盤の表面に水を流したならば、補強材を用いなければ碎石等の層であっても流出が懸念され、ひとたび流出が生じると、下層の流出しやすい地盤材料の流出が一気に進むことが考えられる。その一方で、流出しにくい地盤材料の粒径と同程度の目合いのジオグリッドのような補強材を地盤の表面に用いることで上層の流出しにくい材料の流出を抑えることができ、結果的に下層の流出しやすい地盤材料の流出を抑えるため、全体として地盤材料の流出を抑制できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では模型実験を行いジオグリッド補強材の敷設が地盤材料の流出低減効果を検討した。①粒径と補強材の目合いとの関係による流出低減効果②珪砂と碎石の両方を用いた二層構造の場合の検討をしたところ、以下のことが分かった。

- (1) ジオグリッド補強材の目合いよりも最大粒径が十分小さい地盤材料であっても、ジオグリッド補強材を表面に敷設することで、一定の流出低減効果がある。
- (2) ジオグリッド補強材の目合いと同程度以上の粒径を持つ粒子が全体の 50 %程度含まれている地盤材料では、ジオグリッド補強材を表面に敷設することで高い流出低減効果が期待できる。
- (3) ジオグリッド補強材に接している地盤材料がジオグリッド補強材の目合いと同程度の粒径である場合はその下にある地盤材料の粒径がジオグリッド補強材の目合いより十分小さいものであっても高い流出低減効果を発揮する。

謝辞: 本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究 (A) (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

- 1) 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全性の評価, ジオシンセティックス論文集, Vol.27, pp. 61-68, 2012.

- 2) 小林貴瑠, 菊池喜昭, 兵動太一, 深津圭佑, 二瓶泰雄, 倉上由貴, 龍岡文夫：防潮堤の形状の違いが耐津波性能に及ぼす影響, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp. 1079-1080, 2016.
- 3) 青柳悠大, 山口晋平, 古川大祐, 川邊翔平, 菊池喜昭, 龍岡文夫, 藤井公博, 野中隆博, 渡辺健治, 飯島正敏：補強土防潮堤の津波の長時間越流を模擬した小型実験, 第 49 回地盤工学研究発表会, pp.1321-1322, 2014.
- 4) 深津圭佑, 菊池喜昭, 兵動太一, 小林貴瑠, 二瓶泰雄, 倉上由貴, 龍岡文夫：防潮堤の耐津波性能に及ぼす内部構造の違い, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.1081-1082, 2016.
- 5) 深津圭佑, 小林貴瑠, 菊池喜昭, 兵動太一, 二瓶泰雄, 倉上由貴, 龍岡文夫：GRS 防潮堤の耐津波特性に関する模型実験, 土木学会論文集 B3, Vol. 72 No. 2 pp. I_211-I_216, 2016.
- 6) 柿原 結香, 小林 貴瑠, 菊池 喜昭, 兵動 太一, 二瓶 泰雄, 倉上 由貴, 渡辺 健治, 工藤 敦弘, 龍岡 文夫：表流水による地盤材料の吸出し低減に対するジオグリッド敷設の効果 その 1, 第 52 回地盤工学研究発表会(投稿中).

(2017.2.2 受付)

REDUCTION EFFECT OF GEOMATERIAL EROSION WITH GEOGLID COVER

Takeru KOBAYASHI, Yoshiaki KIKUCHI, Taichi HYODO, Yuka KAKIHARA, Yasuo NIHEI, Yuki KURAKAMI, Kenji WATANABE and Atsuhiko KUDO

After the Tohoku Pacific Ocean Earthquake in 2011, GRS (Geosynthetic-Reinforced Soil) coastal dykes are proposed to be strong dykes against overflow of tsunami. The authors have studied the resistibility of GRS coastal dykes against overflow through hydraulic experiments with several types of GRS coastal dykes. The authors showed that shape of GRS coastal dykes and inner structure of them affect the resistibility of overflow. But the mechanism of improving resistibility of GRS coastal dykes are still not realized. In this research, the authors conducted a series of hydraulic experiments on the resistibility of geogrid covering the surface of GRS coastal dykes against erosion. The results of experiments showed that laying geogrids on the surface of the ground was remarkably effective in decreasing erosion of geo-materials. In addition, it was proved that geo-material erosion with geogrid cover was related to the grain size of adjacent geo-materials.