

ジオテキスタイル補強防潮堤の越流に対する転倒・滑動安定性

八戸工業大学大学院
八戸工業大学
三菱樹脂インフラテック株式会社

学生会員 ○小山 直輝
正会員 橋詰 豊・金子 賢治
正会員 間 昭徳

1. はじめに

防潮堤は、津波防災において最重要な構造物であり、背後の生活空間や人命を津波から守ることを主目的として海岸線から若干陸側に構築される。防潮堤の多くは盛土構造物であり、東日本大震災以降、“粘り強い”防潮堤の開発について活発に研究が進められてきてはいるが、その合理的な設計手法は未だ確立されていない。著者らは、越流津波のエネルギーをなるべく低減できる防潮堤盛土の開発を目指して研究を行ってきた。その結果、盛土勾配が大きい方が、よりエネルギーを低減できることがわかり、補強土技術を用いた急勾配防潮堤の有効性を示した¹⁾。本研究では、ジオテキスタイル補強防潮堤の壁高・勾配を一定として、盛土材・天端幅を変化させた防潮堤モデルについて、越流する段波を用いて水理実験を実施して、その転倒・滑動安定性について考察する。

2. ジオテキスタイル補強防潮堤の水理実験

(1) 実験の概要

本研究では、全ての実験において段波を作用波として用いる。作用波の波速は約 1.6m/s であり、1/100 の想定したフルードの相似則により実物大換算では約 50km/h となる。2011 年東北地方太平洋沖地震時に陸地付近で観測された津波の波速は、10km/h～百数 10km/h であり概ね妥当な波速と考えられる。段波の波高は 8cm (8m) 程度であり、4 秒間防潮堤に作用する。珪砂 5 号と珪砂より密度の大きい徐冷フェロニッケルスラグを最適含水比に調整し、それぞれ締固め度 90%、95%となるように盛土を作成した。実験に使用した盛土材の基本的性質を表-1 に示す²⁾。壁高を 8cm、海側・陸側共に勾配 75 度として、上から 1 層目は 0.8cm、2 層目からは 1.2cm 毎の 7 層に分けて締固めを行って防潮堤盛土を作成した。ジオグリッド模型は 1.2cm 間隔で敷設した。ジオテキスタイル補強盛土の設計においては、内的安定を考慮するが、ここでは 75 度勾配で自立可能な条件を設定した。ジオグリッドおよび壁面材の模型としてはポリプロピレン製の網戸 (目合 1mm × 1.03mm) を用いた。吸い出し防止材として、パルプ製のワイピングクロスを使用した。基礎地盤面はステンレス製の剛体で作成し、堤体と基礎地盤の境界には摩擦を確保するために両面テープによ

表-1 実験に用いた盛土材の基本的性質

試料名	珪砂 5 号	フェロニッケルスラグ
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.603	3.232
均等係数	2.29	28.89
曲率係数	1.21	0.75
最適含水比	15.492	8.282
最大乾燥密度	1.662	2.246
内部摩擦角 ϕ_d (°)	37	40

表-2 実験ケース

ケース No.	盛土材	天端幅 (cm)	間隙比 e	γ_t (kN/m ³)	γ'_t (kN/m ³)
ケース 1	珪砂 5 号 (締固め度 90%)	7.5	0.566	19.85	10.05
ケース 2		8.5			
ケース 3		10.0			
ケース 4	フェロニッケル スラグ (締固め度 90%)	3.0	0.439	25.03	15.23
ケース 5		5.0			
ケース 6		6.5			

表-3 実験結果

ケース No.	1	2	3	4	5	6
安定性	×	×	○	×	×	○
破壊形態	滑動	滑動	—	滑動	滑動	—
破壊開始時	定常時	定常時	—	衝撃時	定常時	—

り珪砂 5 号を接着した。また、天端の津波による浸食を防止するために、盛土全体を壁面材で覆っている。各実験の実験条件を表-2 に示す。

(2) 実験結果

実験の結果を表-4 に示す。それぞれの盛土材において最も天端の幅を大きくしたケース 3、6 は、安定性が高く越流後にも滑動・転倒などの破壊は見られなかった。一方、ケース 1、2、4、5 においては津波により全て滑動により破壊し、転倒により破壊したケースは無かった。図-1 にケース 4 とケース 5 の防潮堤モデル越流時の様子を例として示す。ケース 4 では、津波到達から 0.5s 後の衝撃波力を受けている状態で滑動し始めている。一方で、ケース 5 においては、衝撃波力の間では無く、1s 後の定常的な越流が生じてから滑動し始めている。ケース 1、2 の場合にもケース 5 と同様に定常的な状態となってから滑動が始まった。これは、盛土の滑動について、衝撃時の最大荷重で破壊しない場合でも、越流して堤体が水中に位置するようになった後、浮力が発生するためと考えられる。衝撃波力を受けている間を衝撃時、定常的な越流が生じている状態を定常時として、表-4 に破壊開始時を整理している。

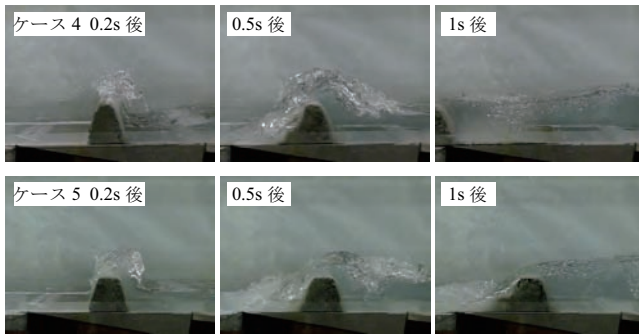


図-1 ジオテキスタイル防潮堤の越流時の様子

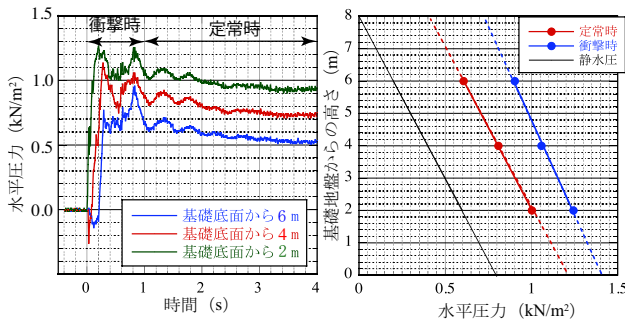


図-2 波力測定結果

3. 転倒・滑動安定性の検討

(1) 波圧の測定

上述の実験結果を考察するために、まず、本研究で用いた作用波による堤体に作用する波圧を測定した。変形する盛土においては波圧計により圧力を測定することが非常に困難なため、高さ8cm、幅4cmの直方体の剛体モデルを底盤に剛結して水平圧力を測定を行った。波圧計は高さの異なる3カ所に設置した。図-2左図は3つの波圧計で計測した津波による水平方向の圧力（実物大換算）の変化を示す。同図より、深さ方向に圧力が分布し、基礎地盤に近い程、大きい圧力が作用することがわかる。また、津波が防潮堤に到達した瞬間に、衝撃的に最大水平圧力が作用しその後、ほぼ定常的な圧力が作用する。図-2右図に、衝撃的に発生する最大衝撃圧力、定常時（最大荷重から2s後）の水平圧力と地表面からの高さとの関係を示す。これらは、5回の実験を行った平均値を示している。基礎地盤からの高さ防潮堤に作用する水平圧力の関係は、衝撃圧力・定常時圧力共に線形で近似でき、台形の圧力分布となると考えられる。これらの結果から、圧力を積分して単位奥行あたり水平荷重を求めると衝撃時には実物大換算で854.6kN/m、定常時には644.5kN/mとなった。また、作用高さはそれぞれ、3.58mおよび3.34mとなる。

(2) 安全率の算出

前節で計測した2種類の波力を基に転倒・滑動に対する安全率を計算する。衝撃荷重についての滑動安全率 $F_S = R/F$ ・転倒安全率 $F_M = M_r/M$ を算出した。 F は前節で求めた衝

表-4 各ケースの安全率

ケース No.	安全率 I (衝撃時)		安全率 II (定常時)	
	F_S	F_M	F'_S	F'_M
ケース 1	1.110	2.423	0.907	2.123
ケース 2	1.225	2.901	1.001	2.542
ケース 3	1.397	3.698	1.142	3.240
ケース 4	0.890	1.080	0.816	1.060
ケース 5	1.236	1.911	1.133	1.877
ケース 6	1.496	2.686	1.371	2.638

撃時の最大水平荷重、 $R = \tan \phi_d \gamma_t A$ は盛土底面における摩擦抵抗、 $M = Fl$ は F による陸側法尻における転倒モーメント、 $M_r = \gamma_t AB/2$ は陸側法尻における抵抗モーメントである。ここで、 γ_t は湿潤単位体積重量、 ϕ_d は内部摩擦角、 A は盛土面積、 l 作用点高さ、 B は底面幅である。文献2)においては、本実験のように基礎が剛な場合には上向きの揚圧力を考慮しないこととしている。しかし、実験の結果、衝撃時には無く防潮堤を津波が越流し完全に水没した状態で滑動が始まっていることから、浮力を考慮した場合についても $F'_S = R'/F'$ 、 $F'_M = M'_r/M'$ により安全率を求めた。 R' および M'_r は浮力を考慮した摩擦抵抗、抵抗モーメントであり、水中単位体積重量を用いて求める。水平荷重としては前項で示した定常状態となった後の水平荷重を F' として使用する。以上のようにして求めた6ケースの2種類の安全率を、表-4に示す。いずれのケースにおいても転倒にくらべて滑動の安全率が低く、4ケースで滑動により破壊したと一致する。また、衝撃時に破壊したケース4のみ衝撃時の安全率が1を下回っていることがわかる。定常時の安全率が1より小さいケース1および2については、定常時に浮力が発生することで摩擦抵抗が小さくなり破壊したと言える。ケース5については、定常時の安全率が1.1程度であるが破壊しており、越流津波に対する安全率の設定については今後の課題であるが、摩擦係数や波力に多少の不確かさがあるものと考えられる。以上、ジオテキスタイル補強防潮堤の転倒・滑動の基本的な考え方は概ね妥当であるが、津波による衝撃時の最大荷重のみでは無く、その後の定常的な荷重に対する浮力を考慮した検討が必要であると言える。また、フェロニッケルスラグのように密度の大きい盛土材を使用することで盛土全体を小さくすることが可能であり、安定性を確保しながらコストを削減するには有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 橋詰豊・小山直輝・金子賢治・野添重晃：ジオテキスタイル補強防潮堤の基礎的津波水理実験，ジオシンセティックス論文集，Vol.28，pp.237-244，2013.
- 2) 国際ジオシンセティックス学会日本支部編：ジオテキスタイルによる粘り強い強化防潮堤の設計・施工マニュアル（案），2014.