津波エネルギー低減と粘り強さを考慮した防潮堤の実験的検討

八戸工業大学大学院　学生会員　○小山　直輝
八戸工業大学　正会員　橋詰　豊
八戸工業大学大学院　正会員　金子　賢治

1.　はじめに

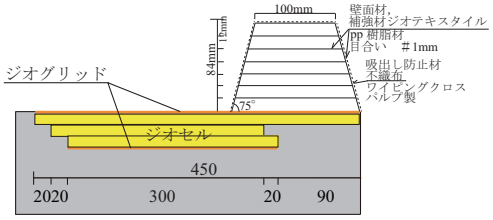
2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した大津波により多くの防潮堤が崩壊した．基本的に盛土構造物である防潮堤は津波防災上最も重要な構造物である．震災以降，それまで停滞していた防潮堤の研究が再度活発化し，種々の検討がなされている．著者らの研究グループにおいても震災以降，防潮堤についての実験的検討を進めてきた．本研究では，これまでの研究成果を総括し，現時点での理想的な防潮堤形状について提案し，その有用性について検討する．

2.　これまでの研究成果

防潮堤の主たる機能は，背後の地域の津波被害を低減することにある．したがって，数百年に一度の大津波において，越流したとしても防潮堤により津波のエネルギーを極力低減する必要がある．また，実際にはコンクリート製の壁面材を用いる事も多いが，コンクリートの劣化や施工精度の問題でコンクリートが流出する可能性は否定できない．したがって，越流津波に対しても土構造物のみで安定性を有する粘り強い構造物が必要である．著者らは，このように津波エネルギーを極力低減でき，土構造物のみでも耐津波安定性を有する防潮堤の検討を実施してきた．

まず，防潮堤の形状を変化させた剛体モデルによる津波水理実験を行って，津波エネルギーの低減といった意味での最適な防潮堤の形状について検討した[1)]．その結果，海側・陸側共に 75°〜90° の急勾配盛土とした場合に，越流して背後に流入する津波エネルギーを大幅に低減できることがわかった．次に，急勾配盛土を実現するための技術として，ジオテキスタイル補強土技術に着目し，補強土防潮堤の設計手法の確立に向けて，越流津波に対する堤体の安定性について基礎地盤を剛体とした水理実験により検討した[2)]．その結果，補強土技術を用いた急勾配防潮堤においては，越流することを前提として浮力を考慮して設計を行うことで，十分な安定性を有することが確認できた．さらに，防潮堤崩壊メカニズムの一つである越流による防潮堤裏法尻部の洗掘を防ぐための対策手法についても，剛体防潮堤と砂質基礎地盤を用いて実験的検討を行った[3)]．基礎地盤の洗掘対策についても，コンクリートブロックなどの固化体を用いなくても，ジオセルとジオグリッドなどのジオシンセティックス材料を適切に組み合わせることで洗掘が防止できるといった知見を得た．

本研究では，これらの研究成果を基に，現時点で考えられる越流津波に対して粘り強く，津波エネルギーを低減できる基礎地盤も含めた防潮堤形式を提案する．提案する防潮堤の安定計算を行い，設計した提案防潮堤モデルを作成し，津波エネルギー低減効果と安定性の検討を実験的に行う．



図–1　提案する防潮堤の概要図

表–1　提案する防潮堤の安全率

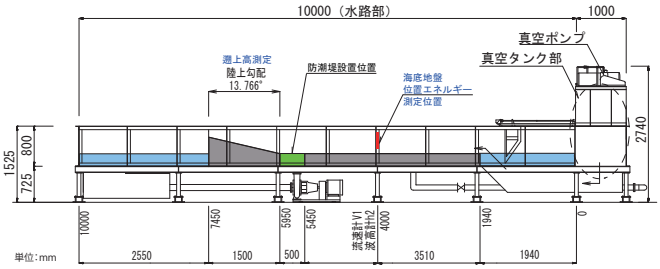
天端幅 (cm)	安全率 I（衝撃時）		安全率 II（定常時）	
	F_S	F_M	F'_S	F'_M
10.0	1.905	6.238	**1.344**	3.268

3.　提案する防潮堤の概要と設計

提案する防潮堤の模式図を**図–1** に示す．海側・陸側ともに 75° 勾配として，ジオグリッドを全面に敷設する．壁面には鋼製壁面材を設置し，その内側に土粒子の吸い出しを防止するために不織布等の吸い出し防止材を使用する．基礎地盤の洗掘対策として，ジオセルおよびジオグリッドを併用した補強手法を採用し，防潮堤堤体の安定性を向上させるために，防潮堤直下まで敷設する．

本実験では，長時間の越流を再現するために作用波として定常流を使用した．まず，縮尺 1/100 を想定し，高さ 8.4m（模型寸法 8.4cm，以下実物大換算の値で示す）の防潮堤の設計を行う．安定計算を行うための作用波による外力を設定する必要があるので，実験に用いる作用波を発生させて，基礎地盤に剛結した剛体モデルに波圧計を設置して高さの異なる 3 点において波圧を測定した． 基礎地盤からの高さと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った．この結果から，設計外力として圧力を積分して単位奥行きあた

Key Words: 防潮堤，安定性，ジオテキスタイル補強土
(〒 031-8501 八戸市大字妙字大開 88-1)



図–2 位置エネルギー測定位置

表–2 津波エネルギー低減効果

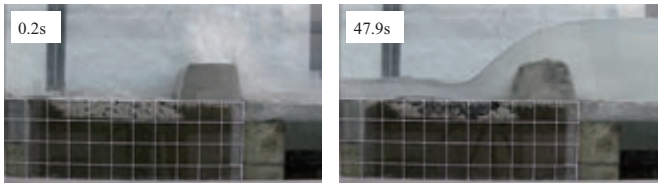
海側の全エネルギー	遡上高 h_2（cm）		
$V^2/2g+h_1$（cm）	防潮堤なし	提案した防潮堤	従来型防潮堤
18.772	18.539	13.564	15.229

りの水平荷重と作用高さを求めた．これらの結果と防潮堤の概要を基に，安定計算を行った結果を**表–1** に示す．文献 2) の知見に基づき，津波が最初にぶつかる際の衝撃荷重の場合には湿潤単位体積重量を用いて転倒・滑動安全率を求め，越流後の定常時においては浮力を考慮して水中単位体積重量を用いて求める．安全率の最小が 1.3 以上となるように防潮堤の天端幅を決定したところ，10m となった．

補強土防潮堤モデルは下から 12mm 毎に 7 層に分けて締固めて作成した．盛土材として徐冷フェロニッケルスラグを最適含水比に調整し，締固め度 95%になるように作成した．ジオグリッド模型は各層 12mm 毎に敷設した．ジオグリッドおよび壁面材の模型として PP 製の網戸（目合い 1mm × 1.03mm）を用いた．吸出し防止材として，パルプ製のワイピングクロスを使用した．基礎地盤は，青森県十和田市で採取した川砂を最適含水比で締固め度 90%になるように 100mm ずつ 2 層に分けて突き固めて作成した．盛土材や基礎地盤に用いた地盤材料の基本的性質は，文献 2), 3) を参照されたい．防潮堤陸側法尻部の基礎地盤には**図–1** に示すようにジオセルを深さ方向に 3 段重ねて設置した．ジオセルは OHP シートを使用して作成し，ハニカム状にするために帯状のシートをステープラーを用いて接合している．実物高さで 300mm，孔径約 500mm のジオセル想定して，縮尺 1/25 で高さ 25mm，孔径 20mm のジオセルを作成した．ジオセルの中詰め材として，粒径 4.75〜9.5mm の砕石を用いた．砕石を充填した後，粒径 0.05〜0.15mm の硅砂 8 号を砕石の空隙に水締めにより充填した．

4. 津波エネルギー低減効果と全体安定性の検討

まず，基礎地盤に洗掘対策を施した後に，提案した防潮堤と従来型防潮堤の 2 ケースを作成し，堤体と基礎地盤による津波エネルギー低減効果に着目して検討を行う．**図–2** にエネルギーを測定した位置を示す．地盤モデルは海底地盤の傾斜を無くし 3.5m の平場を設けた．その後，0.5m の



図–3 越流時の防潮堤の様子

区間を基礎地盤として設け，そこから陸上傾斜 13.8%を設けた．背後の傾斜板における遡上高を目視により計測し位置エネルギーに換算することで，防潮堤越流後の津波エネルギーとした．従来型防潮堤は壁高 8cm，海側・陸側勾配を 45° とし，上から 1 層目は 0.8cm，2 層目はからは 1.2cm の 7 層に分けて締固めた．次に，全体安定性の検討を行うために，定常的な越流状態を長時間維持させ，提案した防潮堤と基礎地盤の全体安定性の検討を津波エネルギー低減効果の検討と同様の実験条件で行った．

防潮堤に到達する前の津波の全エネルギーは流速 V と波高 h_1 を基に $V^2/2g+h_1$ として求めた．また，防潮堤背後に伝わるエネルギーは遡上高 h_2 により求める事とした．防潮堤が無い場合，提案した防潮堤，従来型の防潮堤の背後のエネルギーを海側のエネルギーと比較して**表–2** に示す．海側の全エネルギーと防潮堤が無い場合の比較により，防潮堤を設置しなくても底面や側面と津波との摩擦エネルギーにより 1.3%程度減少している．従来型の防潮堤を設置した場合には，摩擦損失を考慮しない防潮堤の効果として海側の全エネルギーの 17.6%を低減できることが分かる．提案した急勾配の防潮堤の場合には，26.5%低減できることがわかる．従来型の防潮堤と比較して 10%近くエネルギーを低減でき，非常に有用であると言える．

図–3 に越流時の防潮堤の様子を示す．安全率 I は 1.905 と 1 を大きく上回っているため，模型実験でも最大衝撃波の際には安定性を保っていた．しかし，越流後約 1 分までは安定を保っていたが，その後滑動により崩壊した．越流直後では無くしばらくは安定性を保っていたことから，水槽側面と防潮堤の隙間を中心に盛土材の細粒分が流出し，堤体重量が低下したことが原因と考えられ，今後検討が必要である．また，設計において考慮していないあるいは再検討が必要なパラメータが存在する可能性もあり，継続的な検討が必要である．

参考文献

1) 橋詰豊ほか：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) 小山直輝ほか：越流津波に対するジオテキスタイル補強防潮堤の転倒・滑動安定性の検討，ジオシンセティックス論文集，Vol. 29, pp.103–110, 2014.
3) 小山直輝ほか：ジオセルを用いた防潮堤基礎地盤の洗掘対策に関する実験的検討，ジオシンセティックス論文集，Vol. 30, pp.75–80, 2015.