

防波堤基礎補強の違いによる津波時の変位および傾斜抑制効果に関する検討

九州大学大学院 学○西村謙吾 正 ハザリカ・ヘマンタ 学 チョードゥリー・バプルー
九州大学 学 柳慎一郎 九州大学大学院 正 安福規之 正 石藏良平

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、三陸地方では防波堤や防潮堤などの海岸保全施設の多くが破壊され、沿岸部の地域では人命や財産に甚大な被害を受けた。災害報告によると、防波堤の被災はケーソン本体の損傷に由来するものではなく、基礎部分の洗掘による支持力低下と、水位差による強い水平力に押されてケーソンが滑動、滑落したことが原因であると推測されている¹⁾²⁾。また、笠間ら³⁾によると、マウンド内に発生する浸透流も支持力低下の要因となることも明らかになっている。したがって、防波堤の被災要因は洗掘、浸透流、水平力が挙げられており、これらの要因を総合的に考慮した上で発生が予測されている南海トラフ巨大地震等の地震と津波の複合災害に対して「粘り強い」構造を持つ防波堤を整備することが急務な課題となっている。

本研究では、ケーソン式混成堤（以下、「防波堤」）の模型を用いて防波堤に來襲する津波の越流状態を模擬した水理模型実験を実施した。補強を施していない条件と、ハザリカ⁴⁾が提案している鋼矢板と蛇籠を併用した基礎補強を施した条件を比較し、津波越流による洗掘、浸透流、水平力等の外的作用に対する防波堤の挙動および鋼矢板と蛇籠を併用した基礎補強の効果を検討した。

2. 津波の越流状態を模擬した水理模型実験の概要

2.1 実験装置の特徴

一方向の定常的な津波越流状態を再現可能で、かつ海底地盤を模擬した移動床を作製できる実験装置を使用した（図-1）。土槽の大きさは長さ5.0m、高さ1.0m、幅0.4mで、模型断面を可視できる。なお、実際の津波作用時は波状段波や砕波段波による衝撃段波波力が作用する場合もあるが、本研究では定常的な津波の越流状態の再現に焦点を当てているため段波は再現しない。実験に用いる各水理量はフルードの相似則に従うものとして決定した。

2.2 模型地盤の作製方法と実験条件

防波堤は、南海トラフ巨大地震における津波被害が予測されている宮崎港南防波堤を対象として作製し、長さの縮尺比（実物スケール/模型スケール）を64とした。

宮崎港の土質調査結果を参考に、豊浦砂を用いて、相対密度 $D_r=90\%$ の支持地盤を締固めで作製し、 $D_r=60\%$ の基礎地盤を空中落下法で作製した。マウンドは、碎石6号（5mm～13mm）のうち9.5mmふるい通過分を用いて作製した。鋼矢板模型は、長さ400mm、高さ250mm、板厚3.2mmの鋼板を用いた。蛇籠模型は、10t型の港湾築堤マットを参考に作製した。ケーソン模型は、土槽奥行き方向に3つ設置し、それぞれ独立した挙動を示すものとした。地盤とマウンド作製後に土槽下部から水道水を注入することで地盤の間隙を満たして飽和させた。計測機器は図-2に示すように変位計、加速度計、水圧計、間隙水圧計を設置した。

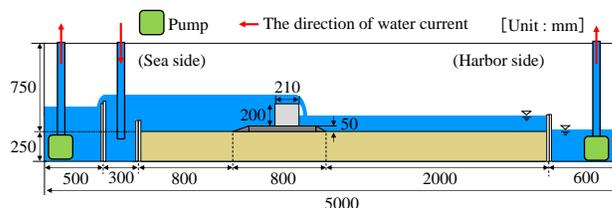


図-1 水理模型実験装置の概略（断面図）

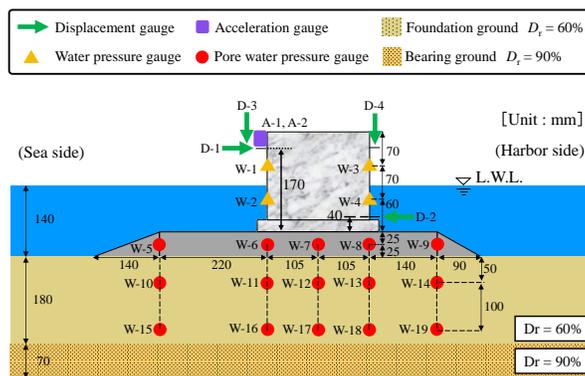


図-2 計測機器の配置（断面図）

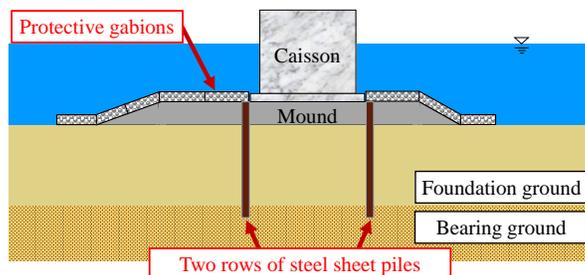


図-3 2列鋼矢板・蛇籠式被覆工の概略(Case 2)

宮崎港の L.W.L. (朔望平均干潮位) を想定して初期水位は 14.0 cm, 津波の流量は 440 L/min (越流水深は 3.5 ~ 4.0 cm) を維持するように設定した。無補強を Case 1, 図-3 に示すように 2 列鋼矢板と蛇籠式被覆工で基礎を補強した条件を Case 2 として実験を行った。Case 2 において, 鋼矢板模型はケーソン両端に設置し, 蛇籠模型はそれぞれ連結させず, 隣り合う蛇籠同士で水平方向の応力が発生しないように注意して配置した。

3. 実験結果と考察

写真-1 に, Case 1 の経時変化を津波前と実験終了時 (17.0 分後) の写真を比較して示す。水位差の発生によりマウンド内を港外側から港内側へ流れる浸透流が発生し, ケーソン直下のマウンドでは基礎地盤の吸い出しが確認された。同時に, 越流水塊の水流と渦によりマウンドの港内側の洗掘が確認された。以上より, 基礎地盤の吸い出しとマウンドの洗掘の継続したためにケーソンが大きく沈下した様子が確認された。写真-2 に, Case 2 の経時変化を津波前と実験終了時 (16.5 分後) の写真を比較して示す。ケーソンと鋼矢板とのわずかな隙間を通る浸透流が原因の吸い出しが確認されたが, Case 1 と比較すると吸い出し量は大幅に抑制された。さらに, 図-4 に示すように間隙水圧の上昇を抑制されたことも確認されたため, 鋼矢板は浸透流を遮蔽して吸い出しを抑制する効果を有していると推察される。また, 蛇籠式被覆工の設置によりマウンドの港内側の洗掘量は大幅に抑制された。しかしながら, 水流と渦が直撃するマウンドの港内側では蛇籠の散乱が確認された。

図-5 に, ケーソンの水平変位と鉛直変位を示す。Case 2 では, Case 1 に対して水平変位が 8 割程度, 鉛直変位が 5 割程度抑制されたことが分かる。また, Case 2 の鉛直変位が Case 1 と同等に達する時間は経時的に増加しているため, 基礎補強は破壊に至るまでの時間を遅らせる効果を有していると推察される。

4. まとめと今後の展望

防波堤模型を用いた水理模型実験の結果より, 以下の 1) ~ 3) に示す知見が得られた。

- 1) ケーソンの変位と傾斜は, 浸透流による基礎地盤の吸い出しと, 津波越流によるマウンドの洗掘に起因する。
- 2) 鋼矢板による浸透流の遮蔽と蛇籠によるマウンド防護は, ケーソンの変位抑制に対して高い効果を有する。
- 3) 鋼矢板と蛇籠で補強することにより, 津波時には防波堤が機能を失うまでの時間を遅らせる効果がある。

本基礎補強は, 津波時において優れた補強効果を有することが明らかになった。今後は, 鋼矢板のみ, 蛇籠のみの条件で試験を実施して各々の補強効果を把握し, さらには鋼矢板の最適な設置位置を決定していく必要がある。

謝辞: 本研究は日本鉄鋼連盟による「鋼構造・教育助成事業」の重点テーマ研究の助成金で賄われており, ここに記して感謝の意を表する。又, 本研究を進めるにあたり, 原忠氏(高知大学教授), 山崎直哉氏(高知大学大学院)から貴重な意見を頂き, ここに感謝の意を表する。(参考文献) (1) 国土交通省東北地方整備局港湾空港部: 東北港湾における津波・耐震対策について, 第 3 回東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会資料-3, 2011. (2) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン【参考資料 II】, 港湾構造物の津波による被害レビューと防波堤の耐津波設計を行う上での留意点, 2013. (3) 笠間清伸, 善功企, 春日井康夫: 浸透流に着目したケーソン式混成防波堤の安定性評価, 地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-発表論文集, pp.696-702, 2014. (4) ハザリカ・ヘマンタ: 鋼矢板と蛇籠マウンドによる防波堤の耐震・耐津波補強工法の構築, 一般社団法人日本鉄鋼連盟, 2013 年度「鋼構造研究・教育助成金事業」研究発表会, pp.83-88, 2012.

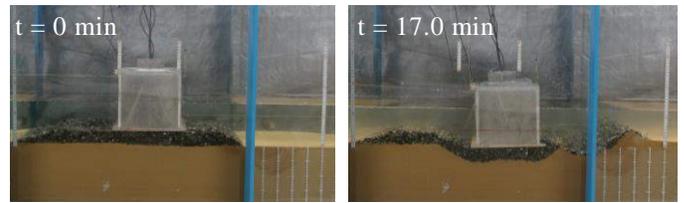


写真-1 実験前後の状況 (Case 1)

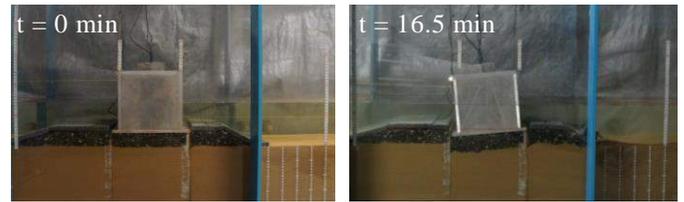


写真-2 実験前後の状況 (Case 2)

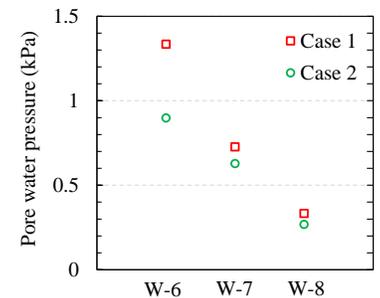


図-4 マウンド内の間隙水圧

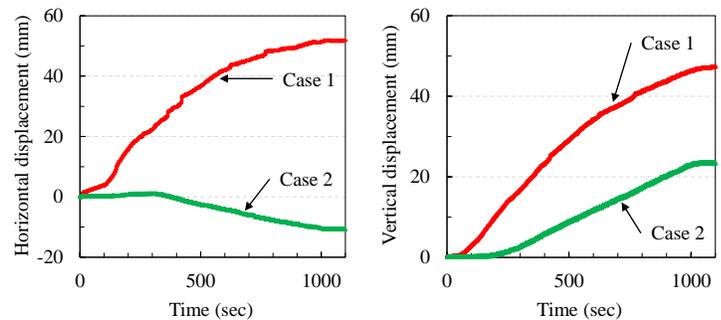


図-5 ケーソン模型の水平・鉛直変位