

津波に対する防波堤基礎マウンドの安定性の検証について

下関港湾空港技術調査事務所 設計室

◎鬼童 孝
○高木 隆之介
●増田 光

1. はじめに

1) 平成 23 年 東日本大震災時の津波による被災状況

平成 23 年 東日本大震災では、東日本の太平洋沿岸に大津波が来襲し、太平洋沿岸の防波堤に倒壊等の被害が発生した。津波の来襲により防波堤が倒壊したことにより、港内の静穏が確保されず、船舶による緊急物資輸送が困難となった。また、復興段階においても、しばらくの間、船舶による貨物輸送が不可となり、社会経済活動に支障を来たすこととなった。一方、一部の防波堤では、市内への浸水開始時間を遅らせる効果や津波高の低減効果も確認されており、地震の津波に対して、防波堤機能を如何に確保するのが重要な技術課題となっている。

2) 防波堤における最大規模の津波来襲時の「粘り強い化」について

発生頻度の高い津波（設計津波 ※以下、設計津波）に対してはもちろんのこと、最大クラスの津波に対しても「人命」や「社会経済活動」へ重大な影響を及ぼさないため、防波堤が多少の変形を生じつつも倒壊しない「粘り強い構造」を目指すため、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」が策定された。

九州南部太平洋側においても南海トラフの巨大地震時に大きな津波の発生が想定されていることから、九州南部太平洋側にあるM港防波堤において津波に対する防波堤の「粘り強い化」について検討を行った。

本報告は、①津波に対する破壊要因の確認、②対策案の検討、③水理模型実験結果を踏まえた最適断面の選定過程について報告する。

2. 津波による防波堤の主な破壊要因（防波堤の耐津波設計ガイドラインより）

東日本大震災による波発生時の防波堤の被災状況を分析した結果、その主な要因として、津波波力による直立部の滑動、越流による港内側の基礎マウンドや海底地盤の洗掘による支持力の喪失、基礎マウンド内の浸透流の影響による基礎の安定性の低下の可能性が指摘されている。津波作用時の被災要因の例を図-1に示す。

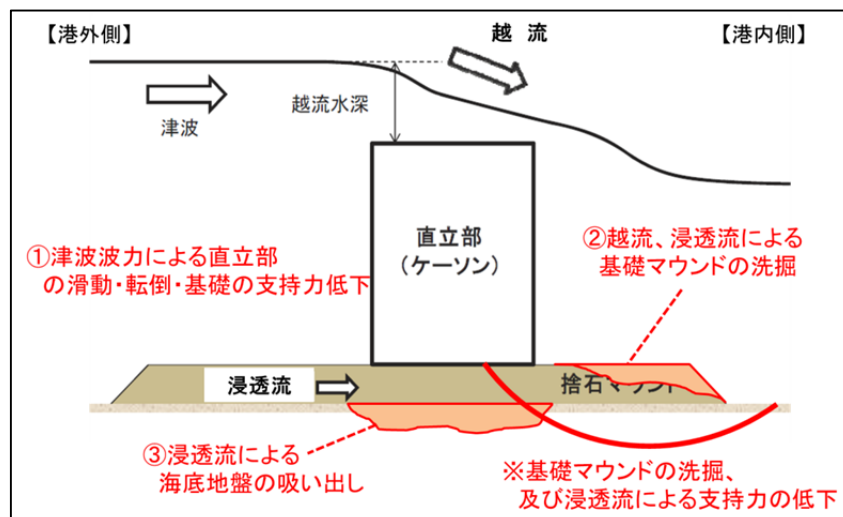


図-1 津波作用時の被災要因の例

3. M港防波堤の状況（現況断面・海底地盤の状況・想定津波高）

M港防波堤の現況断面を以下図-2 に示す。なお、当該防波堤においては過去の検討結果から以下の検討条件が整理されている。

1) 現況断面

M港は、九州南部太平洋側に位置することから大型の台風が来襲し、高波浪をもたらす。そのため、当該防波堤は高波浪時の波力に対して滑動しない構造となっている。

2) 海底地盤の状況

基礎マウンド下の海底地盤は細砂（中央粒径 0.14~0.2mm）であり、台風等の高波浪時には海底地盤が洗掘されやすく、隣接する工区では、その対策として洗掘防止工が施されている。一方、当該断面には洗掘防止工が設置されておらず、過去に最大1m程度沈下しており、津波作用時には港内側・港外側の水位差によって浸透流が発生し、海底地盤の吸い出しが懸念される。さらに、基礎マウンドの厚さが4m程度と近隣他港の防波堤よりは薄いため、マウンドが厚い場合と比べ、浸透流の影響を受けやすいことから海底地盤の吸い出しが懸念される。

3) 想定津波高

南海トラフの巨大地震による津波高は、震源付近の地域よりは低く、設計津波に対しては越流せず、最大クラスの津波に対しては越流高 4.5m 程度と想定されている。

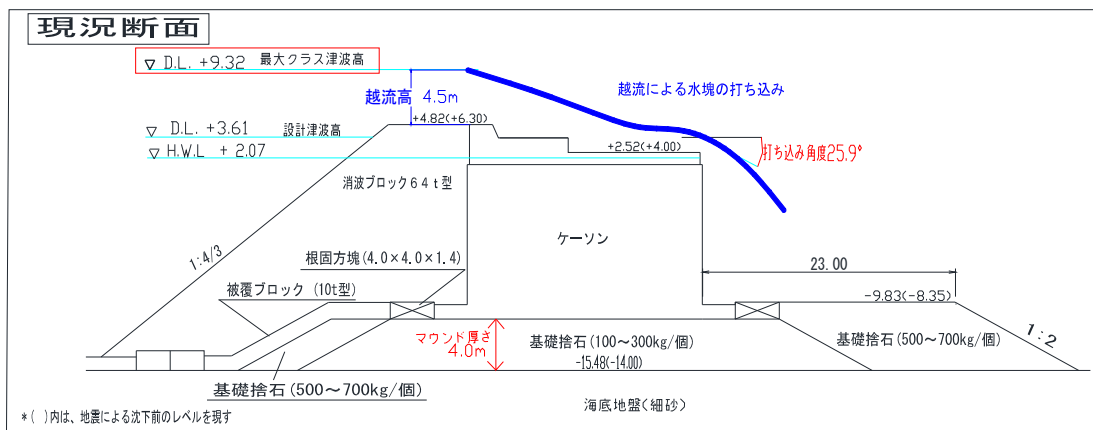


図-2 現況断面

4. 防波堤の主な破壊要因と有効な対策工法の選定

表-1 に破壊要因と対策工の関係を示す。M港防波堤は、大型台風による波力に対して滑動しないよう設計（堤体幅が広く、堤体重量も大きい）しており、最大クラスの津波波力に対しても堤体は安定することが確認された。

表-1 防波堤の津波による破壊要因とその基本的な対策工取りまとめ

横軸：対策工	宮崎港 (当該防波堤)	対策①	対策②	対策③	対策④	対策⑤	対策⑥
縦軸：破壊要因			重量を重くする。	抵抗力を上げる	構造の変更	背後を抑える	マウンド等を被覆する。
津波波力	- (問題なし)	上部工の形状変更、中詰材の比重変更	摩擦増大マットの敷設	本体の形状変更	腹付工等の設置	-	-
越流洗掘	○	-	-	-	腹付工等の設置	被覆・根固ブロック等の設置	上部工の形状変更等
地盤浸透流 (原地盤の吸出し)	○	-	-	本体の形状変更、マウンドの透水性の調整 (洗掘防止マットの設置等)	腹付工等の設置	被覆・根固ブロック等の設置	-

このことから、M港防波堤の現地状況等から懸念される以下の2つの破壊要因への対策工法を検討することとした。

- (1) 越流による港内側の基礎マウンドや海底地盤の洗掘
- (2) 浸透流による海底地盤の吸い出し

5. 実験断面の検討

図-3 に対策実験断面を示す。実験断面設定の考え方は下記のとおりとした。

- 1) 上記(1)洗掘対策と(2)海底地盤の吸出し対策の両方を満たす対策とした。
- 2) 表-1 洗掘対策⑥の「上部工の形状変更等」については、数値シミュレーションの結果、上部工前面の津波水位の上昇、浸透圧の増加により、海底地盤の吸い出しを助長する懸念があることが判明したため、対象外とした。

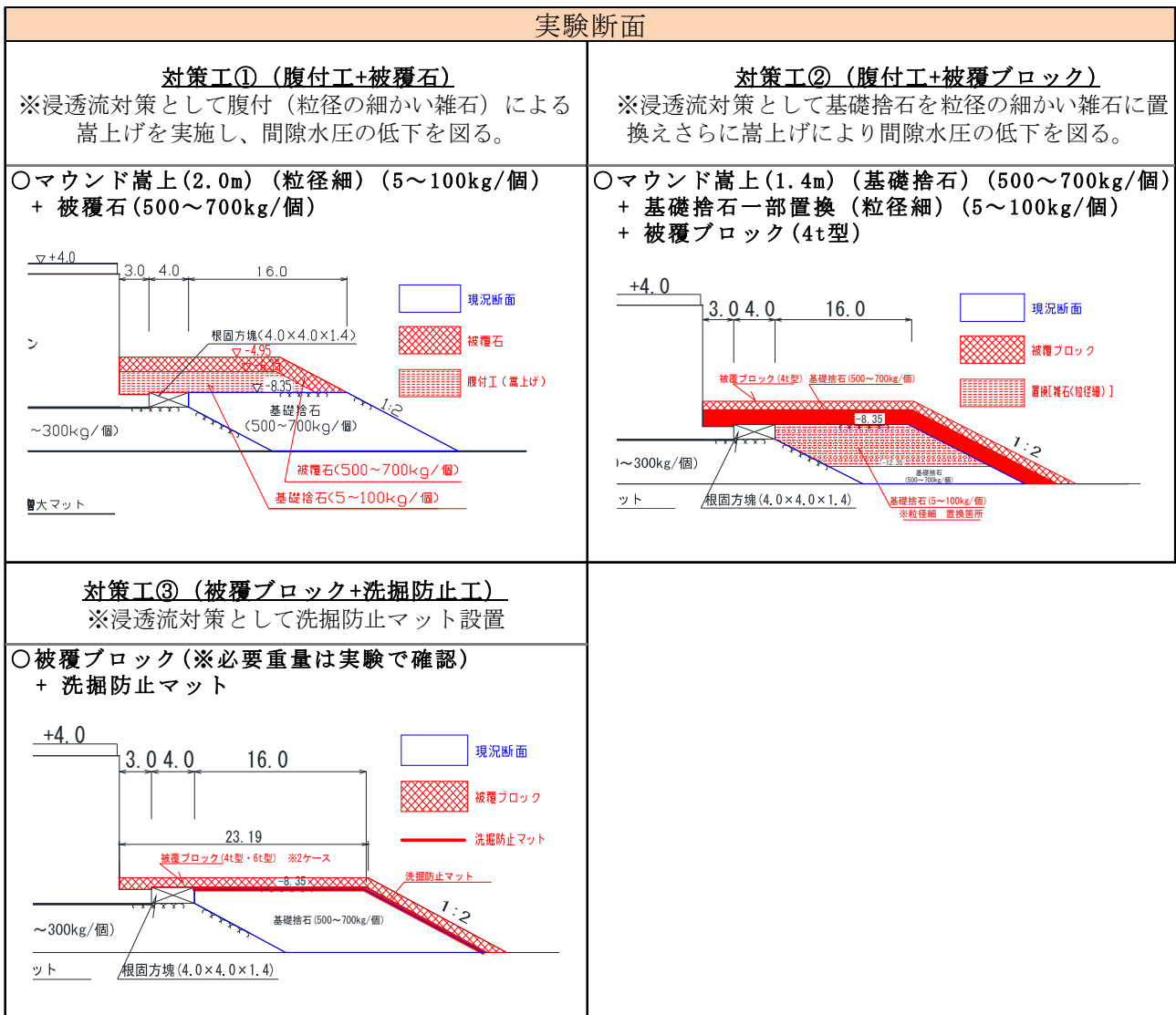


図-3 対策実験断面

また、各実験断面(対策工)の考え方は以下の通りである。

対策工①（腹付工+被覆石）

洗掘対策として、腹付工となる基礎捨石と被覆石を設置。また、吸い出し対策として嵩上げする基礎捨石には粒径の細かい石を用いることで、フィルター効果により浸透流が基礎捨石から出にくくした。さらに基礎マウンド厚さを増すことで、基礎マウンドからの浸透流を防ぐこととした。

対策工②（腹付工+被覆ブロック）

洗掘対策として腹付工となる基礎捨石と、その天端に被覆ブロックを設置。
吸い出し対策は対策工①と同様の考えより、基礎マウンドを粒径の細かい間詰石に置換した。

対策工③（被覆ブロック+洗掘防止工）

洗掘対策として被覆ブロックと洗掘防止マットを設置。吸い出し対策として洗掘防止マットの設置により、基礎捨石内の浸透流を抑え、吸い出しの抑制を図ることとした。

また、海底地盤が細砂で基礎マウンドからの吸い出しが懸念されるため、最大クラスの津波に対して安定性が確認された対策工断面について、別途、堤体の下に海底地盤（砂地盤）を再現し、砂の吸い出し状況と堤体の沈下量を確認することとした。

実験断面は 1/35 スケールで、使用できる砂の粒径が 0.2mm となるため、現地の粒径と合わない（同様のスケールで再現しようとする粘性土並みの粒径となる）。このことより、実験結果はあくまで傾向を大まかに把握するものとなるため、現況断面でも同様の実験を行い、両者を比較することで、吸い出し対策の効果の確認を行うこととした。

6. 実験結果と考察

1) 洗掘防止対策

実験の結果を図-4 に示す。

実験結果	
対策工①（腹付工の設置(粒径細) + 被覆石[500~700kg/個]）※港内側基礎マウンドの高上げ	
対策工②（腹付工の設置 + 基礎捨石の一部を置換(粒径細) + 被覆ブロック[4t型]）※港内側基礎マウンドの高上げ	
対策工③（被覆ブロックの設置 + 洗掘防止マットの設置）	
対策③-1 被覆ブロック「4t型」+洗掘防止マット	
対策③-2 被覆ブロック「6t型」+洗掘防止マット	

図-4 実験結果

実験結果は以下の通りである。

(1) 対策工①・対策工②について

○現況マウンドが洗掘

→越流高が大きい(4.5m)ことから腹付(基礎捨石)では越流による現況マウンドの洗掘を防ぐことが出来なかった。

- ・洗掘対策として設置した被覆材(被覆石・被覆ブロック[4t型])については、短時間で被災した。
- ・吸い出し対策として設置した粒径が細かい雑石は、重量も軽いことから洗掘量が増す結果となった。

(2) 対策工③について

○ブロック重量6t型+洗掘防止マットで安定した。

・洗掘対策として設置した被覆ブロック重量4tは、越流水塊の落下位置から一定の範囲のブロックが短時間で飛散した。

・被覆ブロック重量6tとして実験した結果、ブロックは1個も飛散しなかった。

※被覆ブロック4t型でブロックは飛散したものの、洗掘防止マットがあることで基礎マウンドは洗掘されなかったが、相似則を合わせることができないこと、港空研での実験において被覆ブロックが飛散した後、流速の影響を直接受けるとマットが破損した事例があることから、洗掘防止マット上には、最大クラスの津波による越流に対して被災しない重量の被覆ブロックを設置することとした。

2) 吸い出し防止対策

1)の結果より、越流による洗掘対策として必要な性能を満たす対策工③(被覆工+洗掘防止工)について、堤体下に砂を設置し、吸い出し状況の確認をおこなった。

図-4に吸い出しによる沈下量の確認結果を示す。



図-4 吸い出し実験

実験結果より以下の考察を記載する。

○ 現況断面 → 砂の吸い出しにより堤体が 0.55cm 沈下

○ 対策断面 (被覆ブロック+洗掘防止マット) → 砂の吸い出しにより堤体が 0.15m 沈下

- ・ 洗掘防止マットの設置により砂の吸い出しは抑制され、吸い出しによる沈下量は減少した。
- ・ 吸い出しが発生すると洗掘深が増加 (1.55m → 2.15m) した。これは、基礎マウンドの洗掘を受けた箇所は、基礎マウンド厚が減少することにより浸透流の出口までの距離が縮まることで、砂が吸い出されやすい状況となったと考えられる。(図-5)

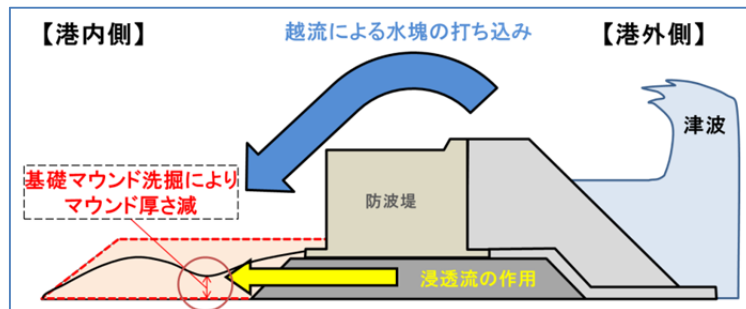


図-5 洗掘状況図

7. 津波に対する防波堤基礎マウンドの安定性検証のまとめ

防波堤の越流で発生する非常に速い流れに対する基礎マウンドや海底地盤の洗掘を防止するための対策の検討方法について、現時点ではその標準的な手法は存在していない。そのため、これらの洗掘対策の検討については、水理模型実験や数値解析を最大限活用することにより、具体的な洗掘対策の方法を決定する必要がある。

津波対策は各防波堤の状況や津波高によって異なるため、今回の実験結果をそのまま、今後の津波対策に活用することは難しいが、実験断面の設定に際して活用されることを期待して以下に今回の検証(水理模型実験)で明らかになったことをまとめる。

- 1) 表-2の対策工①、②のように浸透流対策として腹付を実施したケースでは、越流により基礎捨石が短時間で被災した。また、対策工①でフィルター効果により浸透流を抑制する目的で設置した間詰め石は粒径が細かく重量も軽いことから洗掘量が増加する結果となった。
- 2) 対策工③(被覆ブロック+洗掘防止工)で洗掘防止マットの上に被災しない重量の被覆ブロックを設置することで最大クラスの津波に対する安定性が確保できることが確認できた。
- 3) 実験床を砂にした移動床の実験では、砂が吸い出され、洗掘深の増加や堤体の沈下が確認された。マウンド天端に洗掘防止マットを敷設することで、砂の吸い出し抑制に効果があることが確認できた。