

# 須崎港防波堤における津波越流時の 洗掘対策の検討

上邨 知輝

四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 設計班（〒760-0017 香川県高松市番町1-6-1）

須崎港防波堤は、港内の静穏度を確保するとともに、背後地を津波被害から防護することを目的に整備が進められている。また、須崎港においては、東南海・南海地震等による被害が想定され<sup>1)</sup>、対策が急務となっており、最大クラスの津波の来襲を想定し被災後の港湾機能の早期復旧を目的とした構造の検討を行っている。一方、津波対策として腹付工の設置による対策が粘り強い構造として知られている<sup>2)</sup>が、津波来襲時には越流による腹付工の洗掘等が考えられ、腹付工を防護する被覆ブロックの安定性は明らかにされていない。そこで、本稿では須崎港防波堤で適用が想定される腹付工について、被覆ブロックの空隙率による効果及び洗掘防止マット敷設による洗掘抑制効果について水理模型実験から明らかにする。

キーワード 防波堤, 津波, 被覆ブロック, 洗掘防止マット

## 1. はじめに

須崎港防波堤(図-1)は、東南海・南海地震等による津波が想定され、防波堤を越流する設計津波を越える津波への対策として粘り強い構造化が進められている。一方、粘り強い構造としては腹付工の設置を基本とした津波対策や、基礎マウンドの洗掘を防ぎ堤体の滑落を防ぐ被覆工や洗掘防止工を敷設する構造が倒壊しにくい構造として知られている。

しかし、粘り強い構造の方針について示されている国土交通省港湾局「防波堤の耐津波設計ガイドライン」においては、腹付工を防護する被覆ブロックの安定性は明らかにされていない。そこで、本稿では後述の項目について水理模型実験により検証を行った。

- ①本防波堤における最大クラスの津波に対する安定性の確認を行う。
- ②被覆ブロックに空隙を設けることによる安定性に対する効果について明らかとする。
- ③洗掘防止マット敷設による効果について明らかとする。



図-1 須崎港防波堤

## 2. 要求性能

検討対象とする須崎港防波堤は、三つのレベルの津波を設定している。

一つ目の津波は、海岸施設として昭和南海地震津波を対象とし、防波堤に越流を生じさせず背後地の津波被害からの防護を目的とする。また、本防波堤の要求性能は被災後も即座に施設を共用可能な「使用性」とする。

二つ目の津波は、港湾施設として発生頻度の高い津波については東南海・南海地震津波(2003年中央防災会議)を対象とし、越流は許容しつつも防波堤の堤体の安定性を保つことを目的とする。また、本防波堤の要求性能は被災後も即座に施設を共用可能な「使用性」とする。

三つ目の津波は、港湾施設として最大クラスの津波については南海トラフ巨大地震津波(2012年内閣府)を対象とし、粘り強さを付与することでできる限りその場に留まり、背後地への津波到達時間の遅延や被災後の港湾機能の早期復旧を目的としていることから、要求性能は設定していない。

## 3. 腹付工等の粘り強い構造

腹付工等の粘り強い構造の効果としては、長時間繰り返される津波作用によって、越流する津波から防波堤背後の基礎マウンドが一気に洗掘されることを防ぐことで、ケーソン本体が大きく倒壊することを防ぐことを期待している(図-2)。

腹付工については、基礎マウンドを嵩上げすることにより、津波作用によるケーソン本体の滑動及び基礎マウンド等の洗掘を可能な限り低減できる効果を期待している。被覆工及び洗掘防止工については、越流する津波水塊が腹付工に

直接作用することを防ぎ、その結果として腹付工の洗掘速度を抑制する効果を期待している。

そこで、本防波堤では堤体の安定性確保の観点から腹付工を設置し、洗掘対策として被覆工と洗掘防止工で腹付工を覆うことを計画した。被覆工は腹付工上面を越流する津波の流速に対して所要質量を満たした被覆ブロックとした。また、洗掘防止工は洗掘防止マット(アスファルトマット)を敷設することとした。

なお、津波来襲時に港内外の水位差が大きい場合、基礎マウンドを流れる浸透流が発生し、基礎マウンドや腹付工の拘束圧の低下によって、支持力低下等の問題が指摘されている<sup>3)</sup>ことから、本防波堤においては、別途浸透流実験を実施した上で、浸透流による支持力低下等の効果は本防波堤においては支配的で無く、安定性には影響がないことを確認している。

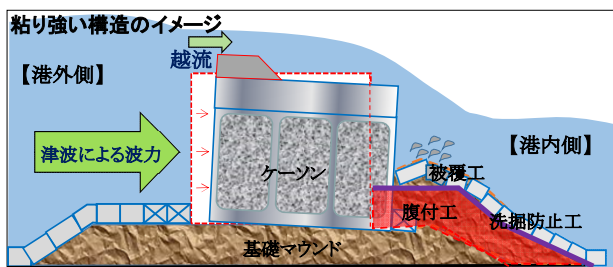


図-2 粘り強い構造のイメージ

#### 4. 水理模型実験<sup>4)</sup>

##### (1) 水理模型実験の概要

水理模型実験は港湾空港技術研究所所有の大規模波動地盤総合水路(長さ184.0m, 幅3.5m, 高さ12.0m)を使用し、津波高さや堤内外の水位差を変えて、基礎マウンドの被害率を確認する。模型断面は現地の1/12.5の縮尺とし、ケーソン背後の腹付工の上には被覆ブロックを敷設した。本実験においては、被覆ブロックの空隙率は0%, 8%, 24%となる3種類の被覆ブロックを用いて行った。形状による影響を受けないよう一般的な直方体とした。各ブロック重量は約3.1kgとなるよう重量を調整したものを用いた。なお、厚みは5.2cmの一定としている。洗掘防止マットは、強度の高いアスファルトマットとし、開口率20%の穴あきとした(厚さ4mm, 開口部φ17mm)。洗掘防止マットは被覆ブロックと腹付工の間に敷設し、ケーソン壁から法尻までの1枚ものとした。(以後寸法は実験スケールのものを記載する。)

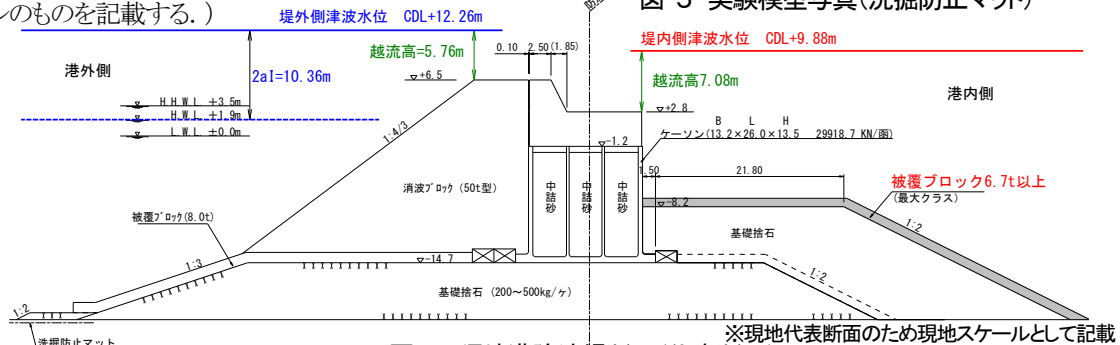
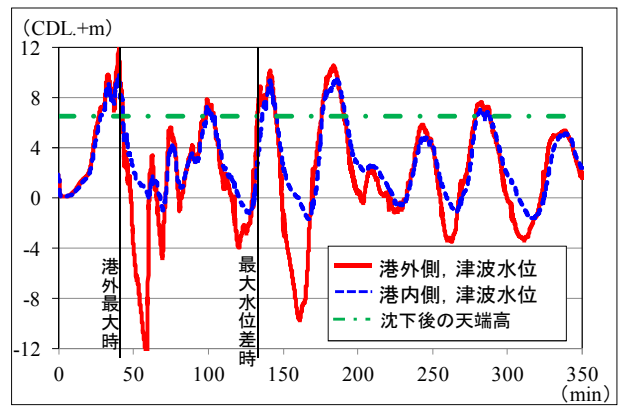


図-6 須崎港防波堤断面(代表断面)

##### (2) 津波条件

実験に用いる津波水位は、津波シミュレーションから設定した。最大クラスの津波の結果を図-3に示す。シミュレーションから地震発生後40分に堤外側最大水位12.26m, 堤内側水位9.88mとなり、水位差2.38mとなる。なお、境界条件として、防波堤に対して水位が大きくなるように防波堤背後の防潮堤は無限高に設定した。



ケース	堤外 (m)	堤内 (m)	水位差 (m)	時刻 (min)	
設計津波	港外最大時	10.27	8.89	1.38	35.6
	最大水位差時	6.51	4.67	1.84	29.5
最大クラス	港外最大時	12.26	9.88	2.38	40.0
	最大水位差時	7.18	2.97	4.21	133.2

図-3 津波シミュレーション(代表断面)



図-4 実験模型写真(被覆ブロック)

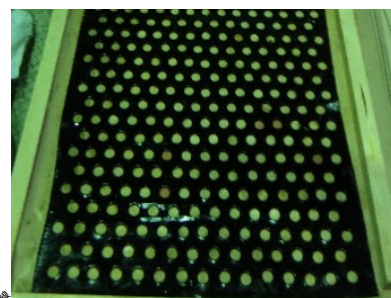


図-5 実験模型写真(洗掘防止マット)

### (3)防波堤の安定照査

実験に先立ち安定照査を行った結果を表-1に示す。なお、津波波力の計算は、国土交通省港湾局「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に示される方法に則り行った。また、変動状態の波浪の計算は、港湾の技術基準(平成19年7月)に示される方法に則り照査した。結果(表-1)を見ると偶発状態の安全率に余裕がある一方で、沈下後の変動状態は耐力側に余裕がないことが分かる。これは、本防波堤では津波による港内外の津波水位差が小さく越流した後の津波波力がそれほど大きくなかったことや、本防波堤において対象としている波浪が非常に大きいことが要因と考える。

表-1 安定性照査結果

	偶発状態 地震後(設計津波)	偶発状態 地震後(最大クラスの津波)	変動状態 地震後(波浪 50年確率波)
潮位	H.W.L	H.W.L	H.H.W.L
滑動	4.257 > 1.0	3.168 > 1.0	1.294 > 1.0
転倒	4.015 > 1.0	2.858 > 1.0	1.106 > 1.0

### (4)実験結果

#### 1)マウンド流速と質量比

実験結果を図-8及び図-9に示す。図-8よりマウンド中央部においては水位差が大きくなったとしても、流速の値は最大でも1.0m/s程度であるのに対し、マウンド法肩部では、水位差0.5m程度まではマウンド中央部と同様の挙動を示すが、水位差が0.8m程度になると流速が急激に上昇し、最大で3.0m/s程度となる。また、図-9より計算質量と模型質量の比を確認すると、マウンド中央部では本実験においては常に安定していたのに対し、マウンド法肩部では、水位差0.6m程度で必要質量が不足し水位差0.8m程度の箇所においては最大で60倍程度の質量が必要となる結果となった。

#### 2)ブロックの空隙率の違い

実験結果を図-10に示す。最大クラスの津波相当の水位差0.2m(※現地スケール2.38m)においては空隙率の違いに関わらず被覆ブロックの被害は確認されず安定していた。

水位差を最大クラスの津波相当の水位差より更に大きくしていくと空隙率の違いに対応し、空隙率0%は水位差0.41m、空隙率8%は水位差0.53m、空隙率24%は水位差0.63mからそれぞれ被覆ブロックの被害が生じはじめ、被害が生じはじめると空隙率に関係なく被害が急速に拡大していることが見て取れる。

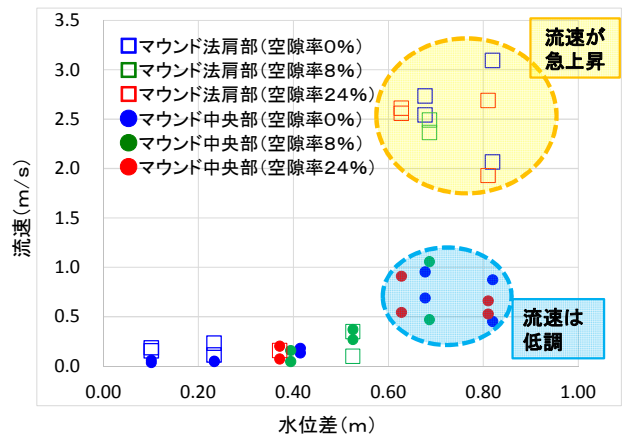


図-7 マウンド流速の関係図

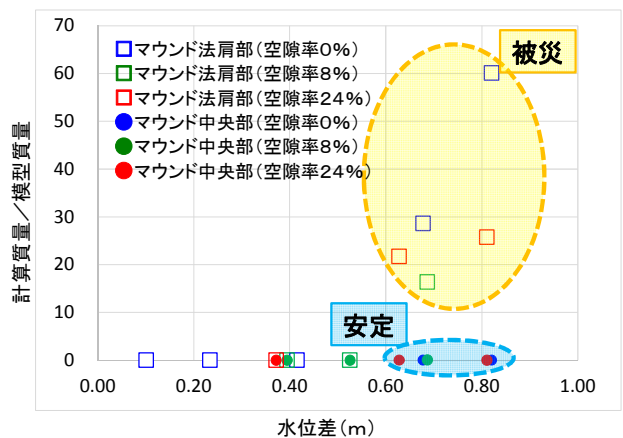


図-8 計算質量/模型質量と水位差の関係図

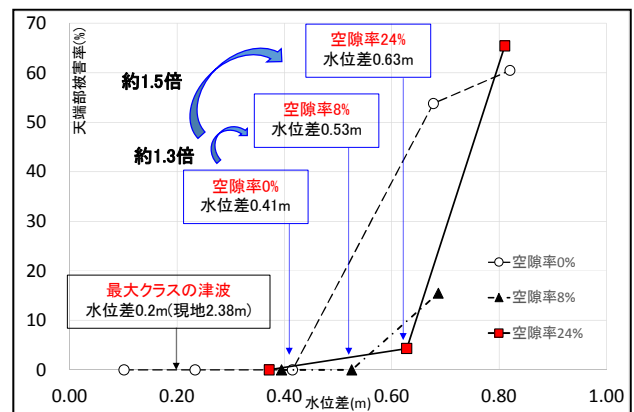


図-9 被害率の関係図(被覆ブロックの空隙率の違い)



図-10 実験時の被覆ブロックの散乱状況(左:空隙率0% 中:空隙率8% 右:空隙率24%)

### 3) 洗掘防止マットを敷設した場合

実験結果を図-11に示す。洗掘防止マットを敷設した場合においても、最大クラスの津波相当の水位差では被覆ブロックは安定していた。その後、2)と同様に水位差を最大クラスの津波相当の水位差より更に上昇させていくと水位差 0.66m 程度から被害が生じはじめ、0.87m で被害率 22%、0.92m で被害率 38%となった。

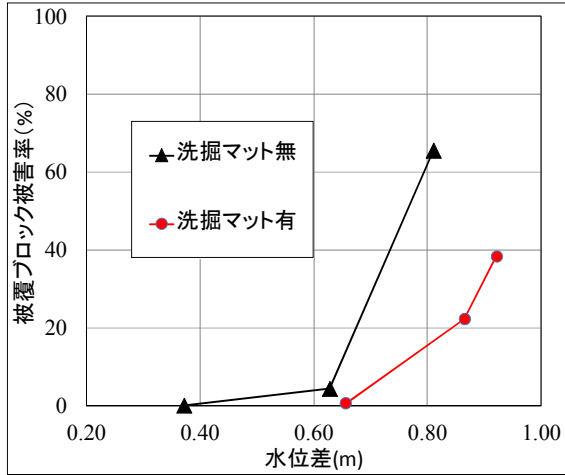


図-11 被害率の関係図(洗掘防止マット)

### (5) 実験結果の考察

#### 1) 堤体の安定性について

模型実験における堤体の安定性は、(3)防波堤の安定性照査における照査結果と同様に、最大クラスの津波相当では安定していた。また、被覆ブロックについても最大クラスの津波相当の水位差では被害は確認されなかったことから、堤体背後の洗掘は発生しないものと考えられる。

#### 2) 空隙により被害率に差が生じた要因について

被覆ブロックの上面と下面に生じた圧力を比較したところ(図-12)、空隙率 0%では下面の圧力が-3.6kPa 程度まで上昇すると、上面及び下面で圧力に乱れが生じ-4.0kPa 程度で被害の発生が確認された。しかし、空隙率 24%では下面に生じた圧力が-4.0kPa 程度から乱れが生じるものの、被害の発生は-5.1kPa 程度からとなっており被害発生までの圧力差が大きいことが見て取れる。また、空隙率 24%で作用する圧力を確認すると(図-13)、上下の圧力が連動していることがわかる。空隙率 0%ではこのような連動は見られなかった。よって、空隙率の大きいブロックほど急激な圧力差が生じず被害を受けにくい。このことが空隙率によって被害率に差が生じた要因であったと考える。

#### 3) 洗掘防止マットの効果について

洗掘防止マット無では、被害が発生すると急激に被害率が上昇し、被害率 50%を越える結果となった。一方で、洗掘防止マット有では、洗掘防止マット無と比較して、被害が発生しても被害の上昇が抑えられていた。このことから、洗掘防止マットを敷設することで、堤体背後の洗掘に対し効果があることを確認できた。

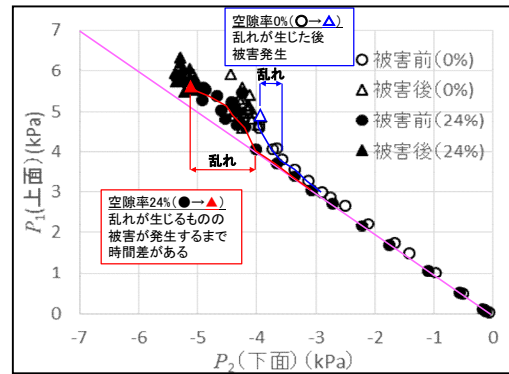


図-12 被覆ブロック上下の圧力変化(空隙率 0%, 24%)

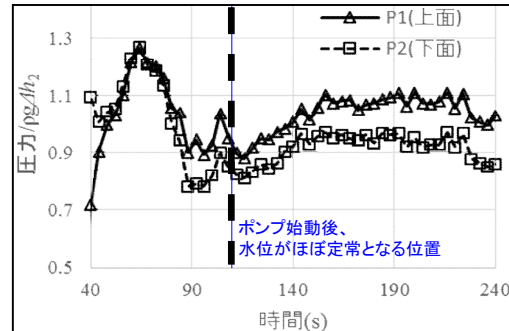


図-13 被覆ブロック上下の圧力の連動(空隙率 24%)

### 5. まとめ

模型実験より明らかとなった項目について以下に示す。

- ①本防波堤の想定する二つのレベルの津波(設計津波、最大クラスの津波)に対しては、堤体及び被覆ブロックは十分な安定性を有していた。
- ②被覆ブロックに空隙を設けることで、被覆ブロックの被害を抑制する効果を有していた。本実験では、空隙率 0%の被害発生時の水位差が水位差 0.41m であったのに対し空隙率 24%では被害発生時の水位差が 0.63m となり、1.5 倍程度の水位差まで抑制出来ていた。
- ③洗掘防止マットを敷設することで被覆ブロックに対する被害率の上昇を抑え、洗掘による被害を抑制できる効果を持っていることも分かった。

本防波堤のように設計津波を超える津波作用を受けた場合でも減災効果の発揮が求められる防波堤においては、対策の確実性を可能な限り高めることが重要である。そのため、洗掘対策としての腹付工を基本とした対策には、被覆ブロック及び洗掘防止マットの敷設が有効であると考えらる。

#### 参考文献

- 1)南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)
- 2)国土交通省港湾局:防波堤の耐津波設計ガイドライン,平成 25 年 9 月.
- 3)高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹:津波による浸透作用下の防波堤基礎地盤の安定性に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol.52 No.2, 2013
- 4)有川太郎, 岡田克寛, 下迫健一郎:防波堤の腹付け被覆ブロックの安定性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2