

# 高知港の耐津波防波堤の要求性能と高波浪時の安定性に着目した維持更新の考え方の提案

竹田 晃

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)

東南海・南海地震等による被害の軽減対策が急がれる高知港において、「多重防護」の考え方の下、「最大クラスの津波」の来襲も想定しつつ、「発生頻度の高い津波」に対して、港湾及び背後地を効率的、効果的に防護するための対策のあり方について検討が行われている。

そこで、高知港における要求性能に照らした防波堤の耐津波設計を行うことで、台風等による高波浪時の安定性も向上し、その安定性の限界点に着目した維持更新の考え方を提案する。

キーワード 防波堤, 耐津波設計, 衝撃砕波, 維持管理

## 1. はじめに

逼迫する東南海・南海地震等による被害の軽減対策が急がれる高知港において、「多重防護」の考え方の下、「最大クラスの津波」の来襲も想定しつつ、「発生頻度の高い津波」に対して、港湾及び背後地を効率的、効果的に防護するための対策のあり方について検討が行われている<sup>1)</sup>。一方で、第一線防波堤においては、過去に台風による被災経験があり、その多くは消波ブロックが沈下したことによる不完全被覆から発生する衝撃砕破力が原因であった。

本稿では、一般的な防波堤から耐津波設計として機能向上を図ることで、台風等による高波浪時の安定性も向上していることを説明し、その安定性の向上に着目した維持更新の考え方を提案するものである。



写真-1 高知港の第一線防波堤平面写真

## 2. 過去の被災と洗掘量の推定

### (1) 過去の被災と衝撃砕破力

高知港における過去の台風による被災年月を表-1に示す。また、被災した全国的な消波ブロック被覆堤を対象として、鈴木ら<sup>2)</sup>は模型実験を行い、消波ブロック前面の砕波によってブロック下部で沖へ向かう流れが発生し、浮遊した砂がこの流れによって沖合へ移動するという、洗掘のメカニズムを明らかにしている。高知港における過去の主要な被災原因も同様に、前面消波ブロック下部が洗掘を受け、沈下に伴う不完全被覆の状態から衝撃砕破力が作用したことで、ケーソン中詰材の流出等の被害を受けたものと考えられる。

表-1 過去の台風による被災年月

被災年月	台風
1998年10月	10号
2004年8月	16号, 18号
2011年7月	6号

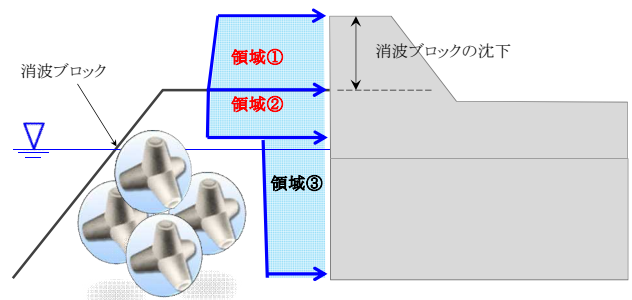


図-1 衝撃砕破力の波力分布図のイメージ図

ここでいう衝撃砕波力とは、高波浪時に消波工の天端が下がった不完全被覆状態となった場合に、波が消波工の天端が下がったところで砕波して、通常の波力分布とは異なり波力が増大されることをいう。図-1に衝撃砕波力の波力分布図のイメージを示し、消波工天端付近で考慮する衝撃砕波力の領域（領域①及び領域②）を示す<sup>3)</sup>。

## (2) 消波ブロック被覆堤の洗掘量の推定

過去の被災直後の調査資料から、防波堤（南）の対策前の代表断面（図-2）付近における消波ブロックの沈下量を平均すると約 2.8m であった。一方で、鈴木ら<sup>4)</sup>は洗掘量の推定式（a 式、b 式）を提案している。それには、洗掘量は数千波の作用で最大値に落ち着く傾向にあり、洗掘量の推定式で推定される洗掘量はその最大値であるとしている。なお、全国 19 の消波ブロック被覆堤を対象にした定性的な被災傾向と洗掘量の推定式による結果を比較検討することにより、推定式の妥当性が確認されている。

この推定式を用いて、防波堤（南）の対策前の代表断面における洗掘量（ $A_e/A_T$ ）を推定し、消波ブロックの沈下量を推定すると約 3.8m となった。このことから、過去の災害復旧は、洗掘量が最大となる前に、消波ブロックの積み上げ等による対応を実施したことが推測できる。

$$\frac{A_e}{A_T} = F_c \left( \frac{D_m}{B_{mb}} - \frac{800d_{50}}{h^{0.2}} \right) \quad (a)$$

$$D_m = \frac{H}{\sinh(2\pi h/L)} \quad (b)$$

ここに、

$A_e$ : 砂地盤の洗掘断面積 (m<sup>2</sup>)

$A_T$ : 消波ブロックの断面積(m<sup>2</sup>)

$D_m$ : 消波ブロック下部の水粒子軌道直径(m)

$H$ : 有義波高(m)

$L$ : 設置水深での波長(m)

$B_{mb}$ : ケーソン前面から消波ブロック法先までの長さ(m)

$d_{50}$ : 砂地盤表層の砂の中央粒径(m)

$h$ : 防波堤設置位置の水深(m)

$F_c$ : 消波ブロック下部の断面形状に関する係数

## 3. 要求性能等の設定

高知港の第一線防波堤において、二つのレベルの津波を設定している。一つは、2003 年中央防災会議「東南海、南海等の地震に関する専門調査会」公表のモデルを震源とした「発生頻度の高い津波」を設計津波とし、もう一つは、2012 年内閣府「南海トラフの巨大地震（第

二次報告）」公表のモデルを震源とした「最大クラスの津波」である。設計津波については、越流は許容しつつも防波堤の堤体でしっかりと防護することを目的とした「安全性」としている。設計津波を超える津波については、粘り強さを付与することでできる限りその場に止まることを目的とし、背後地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標としている。防波堤天端高は、津波に対する防護効果と被災後の防波堤の復旧時間短縮、延いては港湾機能の早期復旧を促す狙いから、地震後もできる限り現況天端高を維持できる高さとして、地震に伴う沈下量分を事前対策として嵩上げすることとしている。

表-2 高知港の第一線防波堤における要求性能等

津波のレベル		基本的な考え方
<p>●発生頻度の高い津波（東南海・南海地震(2連動、M8.6)津波断層モデル）</p> <p>※中央防災会議(東南海・南海地震等に関する専門委員会:2003)が公表した津波断層モデル</p>	<p>最大クラスに比べ発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波(数十年~百数十年の頻度)</p>	<p>【防災】</p> <p>○設計津波として、越流は許容しつつも防波堤の堤体でしっかりと防護することを目的とした「安全性」とする。</p>
<p>●最大クラスの津波（南海トラフ巨大地震津波断層モデル）</p> <p>※内閣府(南海トラフの巨大地震モデル検討会:平成24年8月29日)が公表した津波断層モデル</p>	<p>発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす津波</p>	<p>【減災】</p> <p>○設計津波を超える津波について、粘り強さを付与することでできる限りその場に止まることとする。</p> <p>○背後地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標とする。そのための防波堤天端高さは、津波に対する防護効果と被災後の防波堤の復旧時間短縮、港湾機能の早期復旧を促す狙いから沈下後もできる限り現況天端高を維持できる高さとする。</p>

表-3 高知港の第一線防波堤における性能規定等

	通常の設計		耐津波設計による機能向上	
	変動状態(波浪50年確率波)地震前(偶発状態作用前)	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(波浪50年確率波)地震後(偶発状態作用後)
解析の流れ	①	②	③	
作用させる波	50年確率波	設計津波	最大クラスの津波	50年確率波
安定性照査	破壊モード	破壊モード	破壊モード	破壊モード
	滑動 転倒	滑動 転倒	滑動 転倒	滑動 転倒
性能規定	耐力作用比1.0以上	安全率1.2以上	滑動安全率1.0以上 ※転倒は参考	耐力作用比1.0以上

## 4. 第一線防波堤の安定性照査

第一線防波堤のうち、防波堤（南）の代表的な対策断面と安定性照査結果を図-2と表-4に示す。なお、偶発状態の津波波力の計算は、国土交通省港湾局「防波堤の耐津波設計ガイドライン」<sup>5)</sup>に示される方法に則り、台風等による高波浪時（以下、変動状態）の波浪の計算は、港湾の技術基準（平成19年）に示される方法に則り照査した。そのため、偶発状態の結果は安全率で示し、変動状態の結果は耐力作用比で示すことを基本としている。

表-4から偶発状態にはかなりの耐力側に余裕があり、変動状態は耐力側に余裕がないことが分かる。これは、二つの要因から説明できる。一つは、津波波力の計算式の特徴で、計算に用いている静水圧差の式は、天端を越流した後の防波堤港内外の水位差が大きくなるほど、安定性を失うように計算式が成り立っている（図-3）。津波シミュレーションから防波堤（南）の港内外の時刻歴

水位を図-4に示す。図-4を見ると港内外の水位差はほとんど無く、特に天端を越流した後の水位差はかなり小さいことから、堤体に作用する津波波力はそれほど大きくはないことに要因がある。二つ目は、天端高の設定で述べたように、地震に伴う沈下後の波浪（50年確率波）（以下、設計波浪）で堤体が安定することを目的としていることにある。沈下前の変動状態と比較して、沈下後の変動状態は、堤体を受ける波力の増大に加えて、沈下に伴う浮力の増大によって多くの耐力を失ったことに要因がある。

設計波浪： $H_0=13.5\text{m}$ ,  $T_0=16.7\text{s}$ ,  $H_{\text{max}}=15.6\text{m}$ ,  $H_{1/3}=11.5\text{m}$   
 津波高： $a_1 \approx 3.7\text{m}$  (設計津波),  $a_2 \approx 5.3\text{m}$  (最大クラスの津波)

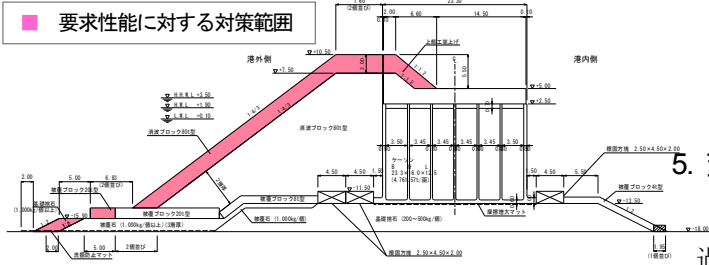


図-2 防波堤（南）の対策後の照査断面（代表断面）

表-4 第一線防波堤の安定性照査（代表断面）

	変動状態（波浪50年確率波） 地震前（偶発状態作用前）	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（波浪50年確率波） 地震後（偶発状態作用後）
潮位	H.H.W.L	H.W.L	H.W.L	H.H.W.L
滑動	$1.21 \geq 1.0$	$5.42 \geq 1.2$	$2.67 \geq 1.0$	$1.03 \geq 1.0$
転倒	$2.09 \geq 1.0$	$8.62 \geq 1.2$	$4.28 \geq 1.0$	$1.81 \geq 1.0$
底面反力	$443(\text{kN}/\text{m}^2)$	$243(\text{kN}/\text{m}^2)$	$316(\text{kN}/\text{m}^2)$	$470(\text{kN}/\text{m}^2)$
波力	$32,790(\text{kN}/\text{箇})$	$8,740(\text{kN}/\text{箇})$	$17,740(\text{kN}/\text{箇})$	$34,900(\text{kN}/\text{箇})$

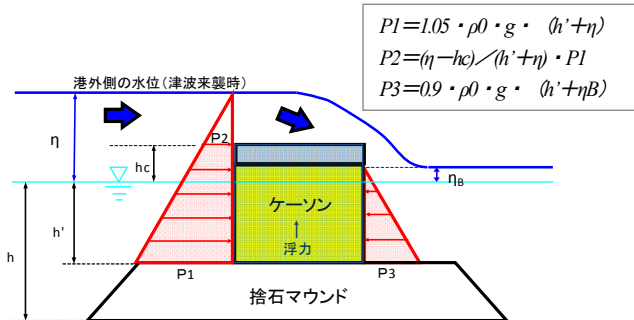


図-3 防波堤の耐津波設計ガイドラインに示す越流する場合の静水圧による算定式

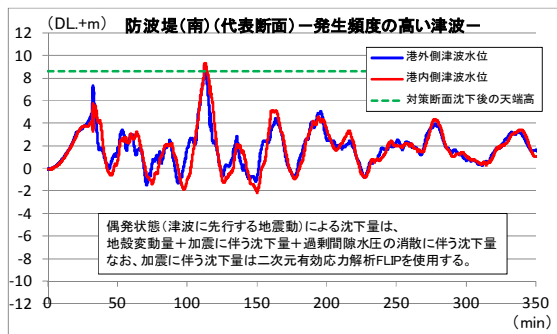


図-4 津波シミュレーション結果（代表断面）

ここで、地震に伴う沈下量は、地殻変動量、加震に伴う沈下量及び過剰間隙水圧消散に伴う沈下量の合計とし、代表断面では約3.0mとなったことから浮力の影響が大きいたことが分かる。加震に伴う沈下量は、二次元有効応力解析FLIPを用いて計算し、加震後の残留変形図を図-5に示す。

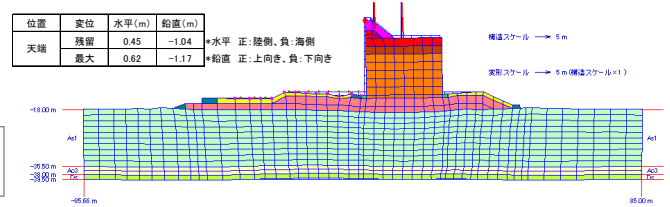


図-5 二次元有効応力解析FLIP（残留変形図）

### 5. 変動状態の破壊限界点の算定

過去の被災形態から不完全被覆を仮想することで、設計波浪に伴う破壊限界点を算定することで、定量的な評価を試みる。算定の前に、破壊限界点について、定義しておく必要がある。ここでいう破壊限界点とは、仮想する不完全被覆の状態において破壊モード（滑動、転倒）を算定し、破壊モードの安定性がクリティカルとなる不完全被覆の状態（設計天端高さから沈下した消波ブロック沈下量）を破壊限界点と定義する。

算定するケースは、以下2ケースを想定して行った。

ケース①（偶発作用前の変動状態を想定したケース）：  
 消波ブロック沈下量をパラメトリックに変化させ、沈下した消波ブロックと上部工天端の間に不完全被覆が生じたことを仮想する。仮想する沈下量毎に設計波浪を作用させ、破壊モードの安定性を計算する。

ケース②（偶発作用後の変動状態を想定したケース）：  
 ケース①と同様に、消波ブロックと上部工天端の間に不完全被覆を仮想する。仮想する沈下量毎に偶発作用（設計津波に先行する地震動が作用）による沈下量を加味した後、10年確率波（復旧までに1~3年程度の期間を想定）を作用させ、破壊モードの安定性を計算する。ただし、偶発作用による沈下量は、一定の約3.0mとして計算した。

ケース①②の算定結果を表-5に示す。ケース①（偶発作用前の変動状態）については、必要な耐力を十分有し、破壊限界点は最大で2.5mとなっている。ケース②（偶発作用後の変動状態）については、偶発作用後の復旧までの短い期間を想定した10年確率波を作用させたケースであるが、破壊限界点は最大で1.5mとなってい

る。この2ケースの算定結果から、高知港における要求性能等に対する耐津波設計を行うことで、構造的な安定性の向上を図ることが可能であることが分かった。一方で、地震前後の変動状態に応じて破壊限界点が異なることも分かった。

表-5 破壊限界点の算定結果（代表断面）

波浪	ケース①:変動状態(波浪) 地震前(偶発状態作用前)		ケース②:変動状態(波浪) 地震後(偶発状態作用後)	
	50年確率波		10年確率波	
潮位	H.H.W.L		H.W.L	
消波ブロック沈下量	滑動	転倒	滑動	転倒
0m	1.218 ≥ 1.0	2.093 ≥ 1.0	1.399 ≥ 1.0	2.391 ≥ 1.0
1.0m	1.171 ≥ 1.0	1.940 ≥ 1.0	1.187 ≥ 1.0	1.877 ≥ 1.0
1.5m	1.142 ≥ 1.0	1.856 ≥ 1.0	<b>1.057 ≥ 1.0</b>	1.617 ≥ 1.0
2.0m	1.085 ≥ 1.0	1.728 ≥ 1.0	0.958 < 1.0	1.437 ≥ 1.0
2.5m	<b>1.027 ≥ 1.0</b>	1.607 ≥ 1.0	0.878 < 1.0	1.301 ≥ 1.0
3.0m	0.972 < 1.0	1.497 ≥ 1.0	0.588 < 1.0	0.978 < 1.0

## 6. 安定性の向上に着目した維持更新の考え方

### (1) 港湾施設の老朽化対策の推進について

港湾施設においては、計画的な点検や補修等を規定した「維持管理計画」に基づく措置により、ライフサイクルコストを削減した的確な維持管理を確保することとしている。そして、的確なストックマネジメントを一層確保するために、平成25年度より「予防保全計画」を策定することで更なる老朽化対策の推進を行っている<sup>9)</sup>。

この予防保全計画は、施設単位で策定している維持管理計画の内容を踏まえつつ、港湾単位で俯瞰的な視点に立った老朽化対策の検討が可能となるものであり、施設の重要度、老朽化の状況及び利用状況等を総合的に勘案した上で、個々の施設をどのように維持管理・更新していくか等の対応方針を定めた上で、老朽化対策を講じる施設の優先順位等を設定する計画である。

### (2) 維持更新の考え方の提案

5. 変動状態の破壊限界点の算定では、想定する2つのケースにおいて定量的な評価を試みたところ、破壊限界点の算定結果から構造的な安定性が向上していることを示した。一つ目のケースでは、台風等の高波浪時に対して安定性が向上していることを示し、二つ目のケースでは、逼迫する東南海・南海地震等を見据え、発災後の復旧期間（1～3年程度の期間を想定）までに考えられる10年確率波に対して安定性が向上していることを示した。

これらのことから、今後、的確な維持管理を行う上で、消波ブロックの沈下量を定量的な維持管理目標として定めることが可能であると考えられる。つまり、防波堤施設の的確な維持管理によって、消波ブロックの沈下量が想定する破壊限界点に近づくと、早期に対策を施すこととなる。しかし、破壊限界点までには、まだ余裕があると判

断されれば、予防保全計画に基づき、他の施設を優先的に維持更新することも考えられる。ただし、維持管理目標を何処に設定するかについては、被災メカニズムが十分に解明できていないこと、復旧までの1～3年程度の期間に設計波浪相当の波が来襲する可能性も十分にあること等から慎重に検討する必要がある。

## 7. まとめ

本稿では、高知港における要求性能等に対する耐津波設計として機能向上を図ることで、変動状態の安定性の向上も図ることができることを定量的な評価から示した。一つ目のケースでは、台風等の高波浪時に対して安定性が向上していることを示し、二つ目のケースでは、逼迫する東南海・南海地震等を見据え、発災後の復旧期間（1～3年程度の期間を想定）までに考えられる10年確率波に対して安定性が向上していることを示した。

また、高度経済成長期に集中的に整備された港湾施設の更新時期を迎える中、港湾管理者においては厳しい財政事情の下、維持・改良費用の縮減が必要不可欠な状況である。そのため、港湾施設の的確な老朽化対策の推進として、予防保全計画を推進している。

以上のことから、安定性の向上に着目した定量的な維持管理目標を定めることで、維持管理費の縮減や更新施設の優先順位立案の判断として活用できる可能性がある。ただし、維持管理目標を何処に設定するかは、被災メカニズムが十分に解明できていないこと、復旧までの1～3年程度の期間に設計波浪相当の波が来襲する可能性も十分にあること等から維持管理目標の手前で対策を施すことが望ましい。

## 参考文献

- 1) 高知港における地震津波防護の対策検討会議：HP、  
[http://www.pa.skr.mlit.go.jp/kouchi/A/meeting/meeting\\_kochi.htm](http://www.pa.skr.mlit.go.jp/kouchi/A/meeting/meeting_kochi.htm)
- 2) 鈴木高二朗・高橋重雄：消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験—マウンドとブロック下部の洗掘—、海岸工学論文集第45巻、pp. 821-825
- 3) 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・石貫国朗：台風9918号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験、港研資料、No. 973
- 4) 鈴木高二朗・高橋重雄：消波ブロック被覆堤ブロック下部の洗掘量の推定について、沿岸技術研究センター論文集 No. 12(2012)
- 5) 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。
- 6) 港湾施設の維持管理等に関する検討会：HP、  
[http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan\\_mm5\\_000024.html](http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_mm5_000024.html)