

# 津波に対して粘り強い港湾構造物の設計手法に関する研究

細川 真也<sup>1</sup>・宮田 正史<sup>2</sup>・青木 伸之<sup>1</sup>・鴨打 浩一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>港湾局 技術企画課 技術監理室 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

<sup>2</sup>国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

東北地方太平洋沖地震に伴う津波による津波波力や越流に伴う防波堤背後の洗掘等によって釜石港湾口防波堤等の防波堤が大きな被害を受けた。本論文では、津波による防波堤の被災メカニズムを分析することにより、防波堤の耐津波設計の手法および発生頻度の高い津波を越える津波が来襲する場合においても粘り強く、津波減災効果を発揮する防波堤のあり方について検討した。さらに、今回の津波で被災した八戸港北防波堤における粘り強い構造の検討事例を紹介した。今後、新たに設置する防波堤と既存の防波堤の両方において、本論文の検討事項を参照することで粘り強く耐えられる防波堤の設計が可能となる。

キーワード 津波、港湾構造物、粘り強い構造、防波堤、越流、東北地方太平洋沖地震

## 1. はじめに

### (1) 東北地方太平洋沖地震に伴う津波による防波堤の被害

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波は、2万人近くの死者・行方不明者を出し、さらに人命だけでなく沿岸に立地する住宅や企業にも被害を出した<sup>1,2)</sup>。また、企業が浸水被害を受けただけでなく、沿岸域に津波対策として設置されていた堤防、護岸・水門、開門等の多くの施設が破壊された<sup>3)</sup>。

一方で、防波堤に着目すると、釜石港湾口防波堤、大船渡港湾口防波堤、八戸港八太郎地区北防波堤、宮古港藤原地区防波堤、相馬港沖防波堤等では津波による大きな被害が見られたが、多くの防波堤は壊滅的な被害に至らなかった<sup>3)</sup>。これは、外洋の厳しい波浪に対して設計されていた太平洋側の防波堤は大きな津波に対してもある程度耐えられる構造であったためであると考えられている<sup>3)</sup>。

このことは、防波堤は、波浪条件等の他の厳しい条件により断面が決まる場合、ある程度の規模の津波に対しても耐えられることを示している。

### (2) 本論文の目的

本論文では、東北地方太平洋沖地震に伴う津波で被災した防波堤の事例を参考として、津波に対して耐えられる新しい防波堤の設計方法について検討する。設計方法の基本としては、これまでと同様に、防波堤の基本断面

は設計で想定する程度の規模の津波に耐えられるものとし、それを越える規模の津波に対しては基本断面に付加的な構造上の工夫を施すことで、防波堤に粘り強さを与える。この方法により、既設の防波堤についても、粘り強さを付加することが可能となる。

本論文で検討対象とする防波堤は、港湾機能を維持するために津波発災直後から波浪に対して一定の港内静穏度を確保する必要がある防波堤や、津波を低減する効果を期待する防波堤としており、その構造形式としては、主に混成堤及び消波ブロック被覆堤を対象としている。これらの基本断面の設計については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>4)</sup>を参考にでき、本論文は設計で想定する規模を越えた津波に対して粘り強い防波堤の構造の検討方法について示す。

## 2. 津波に対して粘り強い防波堤の重要性

### (1) 津波に対する防波堤の効果

防波堤は、港湾内の水域の静穏を維持することにより、港湾内に侵入する波浪を低減するために整備されるものであるが、その配置によっては、津波に対しても効果を発揮する<sup>5)</sup>。

例えば、釜石港の湾口防波堤は、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波に対して、津波の第一波が防潮堤を越えるまでの時間を6分遅延させ、さらに、湾奥における津波高を約4割低減させたことが数値解析による検証

により確認されており<sup>3)</sup>、湾口防波堤の津波に対する減災効果は認識されている。

(2) 津波に対して粘り強い防波堤の重要性

a) 防波堤の被災事例

防波堤は、東北地方太平洋沖地震に伴う津波に対してよって、減災効果を有していたものの、ケーソンが滑動し防波堤の倒壊に至った場所があった。

例えば、大船渡港の湾口防波堤においては、津波の影響により、取付部を除きほとんどのケーソンが基礎マウンドから港内側へ滑動して倒壊した(図-1)。この防波堤は、チリ地震津波に対応して設計されており、それを大きく上回った東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって、このような被害が生じたものと考えられている<sup>3)</sup>。

波浪により基本断面が決まった防波堤として、釜石港

湾口防波堤と八戸港八太郎地区北防波堤がであり、これらの防波堤においては、ケーソンの被災の程度にはばらつきが見られた。釜石港湾口防波堤においては、浅部ケーソンのほとんどが滑動したものの、深部ケーソンは滑動していない場所があった。八戸港八太郎地区北防波堤は、隣り合った中央部とハネ部で被害の程度が異なっていた。

b) 防波堤の倒壊の原因

東北地方太平洋沖地震に伴う津波による防波堤の被災原因の一つとして、津波波力による堤体の滑動が考えられている。例えば、釜石港湾口防波堤では、浅部と深部で断面が異なることから滑動抵抗力に差があり、浅部と深部でケーソンの被災の程度に差が見られた<sup>9)</sup>。また、八戸港八太郎地区北防波堤ハネ部において中央部と比べて被害が大きかった理由としては、方向によって波浪条

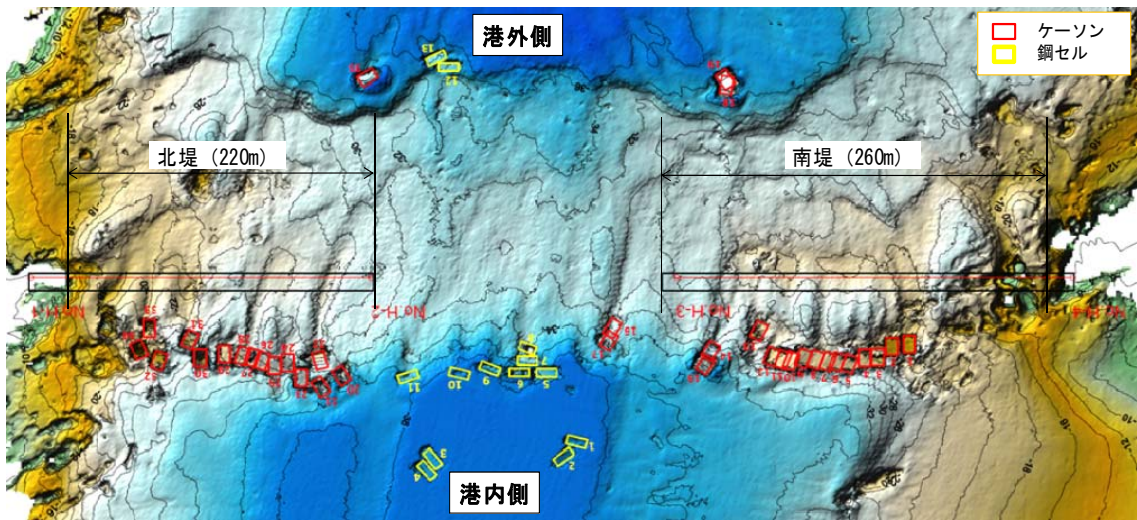
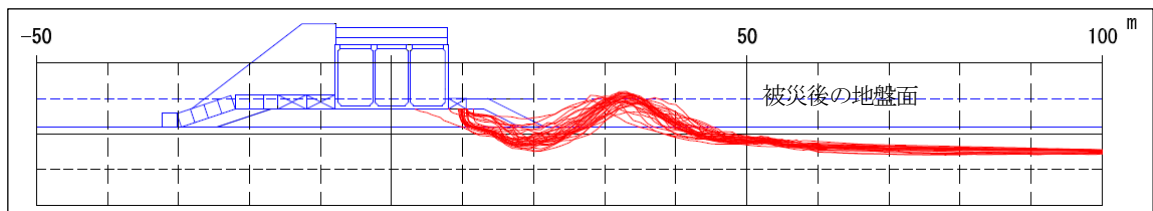
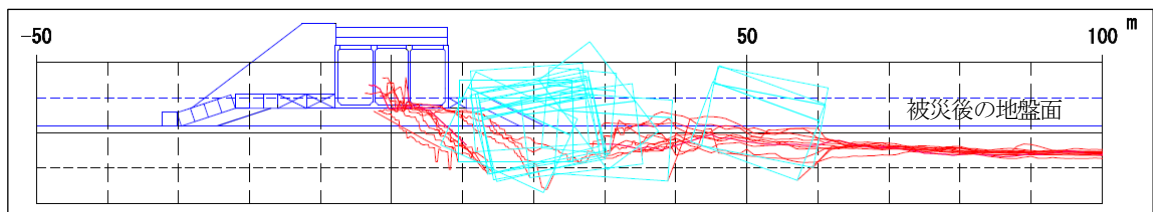


図-1 大船渡港湾口防波堤の被災例



(a) ケーソン残存部



(b) ケーソン滑落部

図-2 八戸港八太郎地区北防波堤 (11工区) における越流による被災状況

件が異なり、ハネ部の方が滑動抵抗が小さかったためであると考えられる。

多くの被災した防波堤は、津波波力により滑動していたが、滑動以外の被災原因として、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が考えられている。例えば、八戸港八太郎地区北防波堤の中央部においては、単純な滑動による被災ではなく、津波が防波堤を越流したことで防波堤背面の基礎地盤が洗掘され、支持力が失われたことにより倒壊した(図-2)。これは、これまでに想定されていなかった破壊形態である。

滑動と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以外にも、これらの複合的な作用による被災の可能性も考えられており<sup>3)</sup>、今後の詳細な実験等により、被災メカニズムを解明することが必要である。

### c) 粘り強い防波堤のあり方

巨大な津波に耐えられる防波堤を構築するにあたって、実際には技術的・予算的に妥当な範囲で構築できる防波堤を設計する必要がある。また、これまでに設置された防波堤を補強できるようにするためにも、既存断面で耐えられる規模を越える津波に対しては、付加した機能として、津波によって変形しつつも倒壊しない粘り強い構造とすることで、津波による被害を押し返すことができる防波堤になると考えられる。

## 3. 津波対策の基本的考え方と防波堤の必要性

### (1) 津波対策における二つのレベルの津波の設定

交通政策審議会港湾分科会防災部会は、「港湾における地震・津波対策のあり方(答申)」<sup>7)</sup>を公表し、津波を「発生頻度の高い津波」と「最大クラスの津波」の二つのレベルとして考え、防災と減災の目標を明確化することの必要性を示している。

具体的には、「発生頻度の高い津波」に対しては、可能な限り構造物で人命・財産を守りきる防災を目指し、「最大クラスの津波」に対しては、最低限人命を守るという目標のもとに、ハードによる減災効果を見込みつつ、土地利用や避難対策と一体として被害を可能な限り小さくする減災を目指すこととしている。

これまでの防波堤の耐津波設計にあたっては、既往の津波災害時の記録等から外力の設定が行われてきたが、この答申は、今後の防波堤の設計について、最大クラスの津波に対しても可能な限り粘り強い構造を目指す必要があることを示している点が、今後の防波堤耐津波設計にあたってのポイントとなる。

### (2) 防護目標の設定

対象港湾において、港湾内に位置する施設や地区毎にその重要度と費用対効果等に応じ、この二つのレベルの津波に対して防護目標を設定することになる(図-3)。この際、設計しようとしている防波堤の防護目標におけ

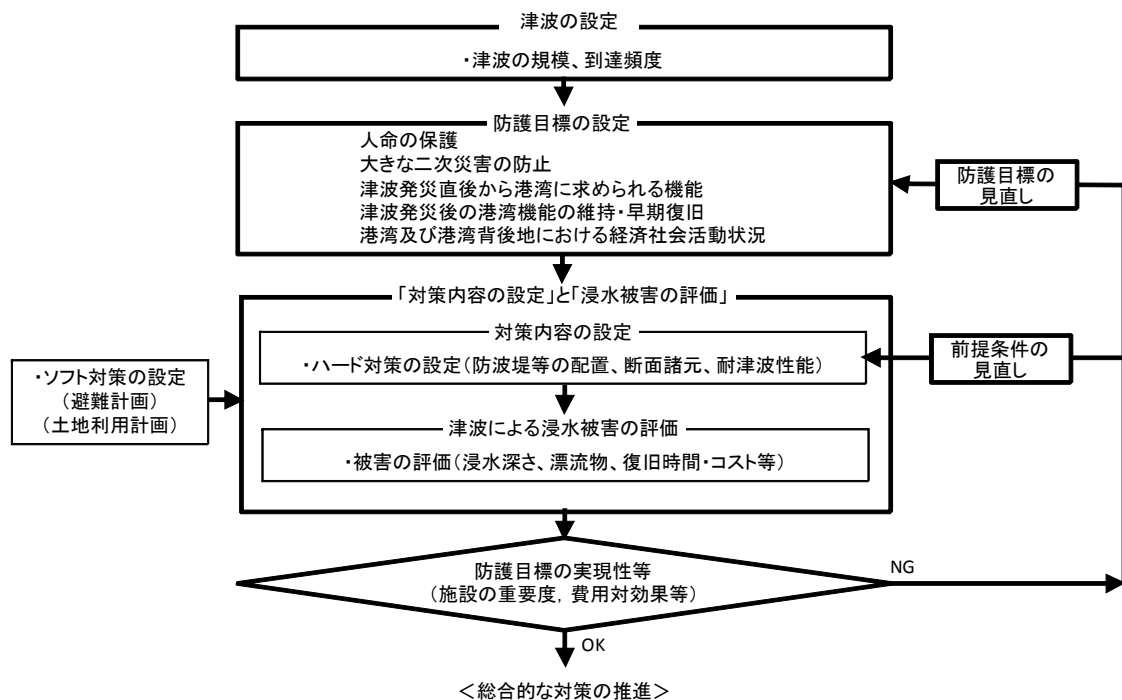


図-3 港湾における防護目標の設定手順例

る効果について、防波堤だけでなく既存ストックを最大限に活用して、港湾施設全体で重層的に防護するとの考え方のもとに、評価する必要がある。

また、防護ライン（港湾背後の市街地等を防護するための一連のライン）の海側に立地する港湾における産業・物流施設における労働者や利用者に対しても配慮し、防波堤によって津波を防ぐことの重要性を考慮する必要

性がある。

#### 4. 防波堤の耐津波設計

##### (1) 防波堤の耐津波設計の流れの概要

発生頻度の高い津波に対しては、これまでと同様に防

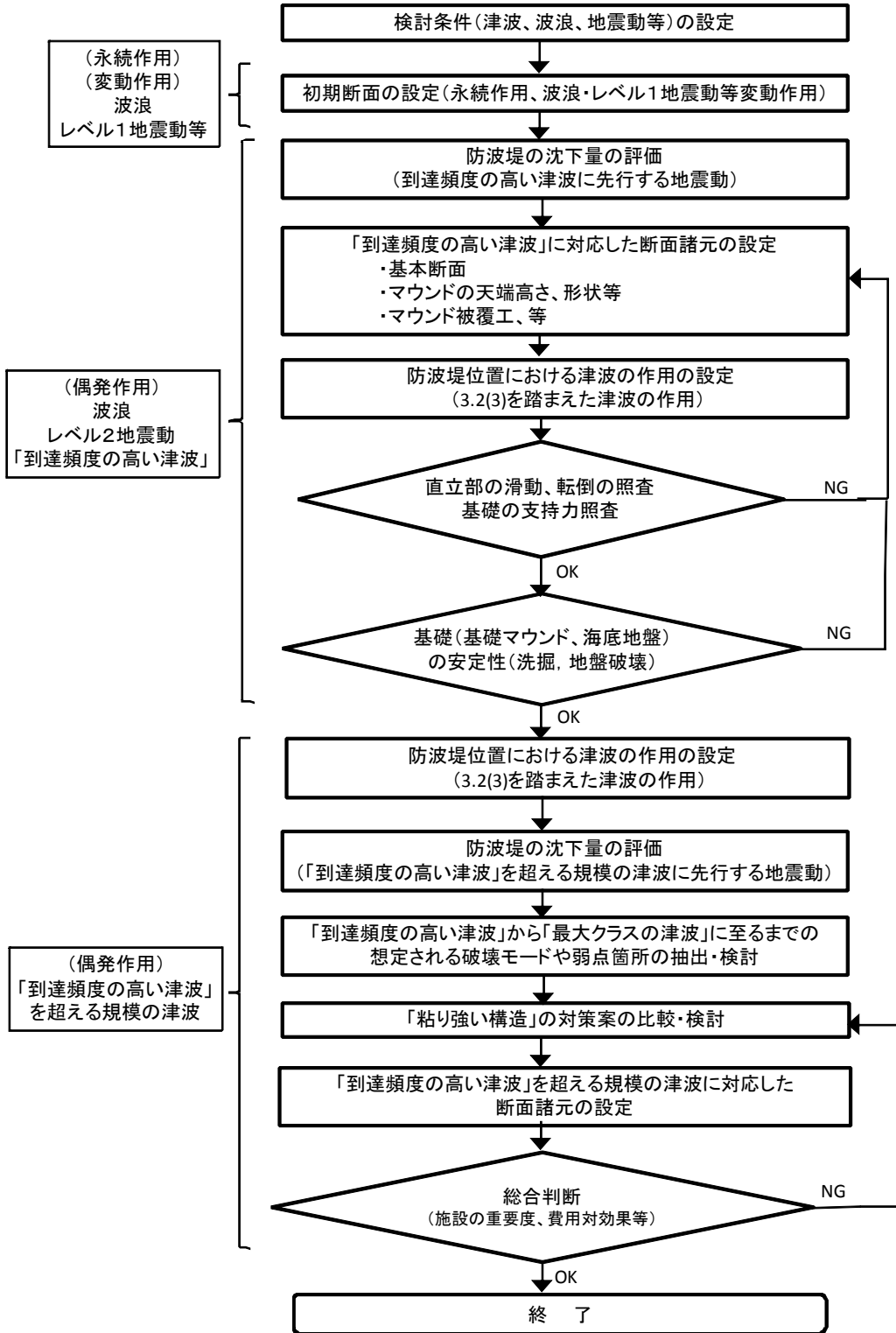


図-4 防波堤の全体安定性に関する総合的な検証手順の例

波堤の全体安定性について、津波だけでなく他の外力条件とともにそれぞれの影響を考慮して、その機能が維持されるよう、津波の波力に対する直立部の滑動、転倒及び基礎の支持力に対する照査をし、基本断面を決定することを基本とする（図-4）。

ただし、東北地方太平洋沖地震に伴った津波による被害を受けて得られた新たな課題として、津波が防波堤を越流する場合の安定性や津波の流れに対する基礎マウンド及び海底地盤の安定性等を検討することが必要である。また、この津波によって得られた課題とは別に、南海トラフの巨大地震のような津波を伴う巨大地震の発生の可能性を考えると、津波に先行する地震動による防波堤の沈下が防波堤の機能に影響する可能性についても検討し、この検討結果を踏まえて基本断面を決定する必要がある。

次に、発生頻度の高い津波を超える規模の津波が来襲する場合には、防波堤に求められる機能が可能な限り維持されるよう、基本断面に津波に対して倒壊しにくい粘り強い構造を加えて、減災効果を有する防波堤の構造を検討する。

## (2) 防波堤の耐津波設計

### a) 津波に先行する地震動の設定とその影響評価

津波に先行する地震動や地殻変動による防波堤の沈下

により、津波の越流の有無が変化する可能性があるため、津波来襲時の水位と防波堤の天端高さの関係を照査し、その影響を評価する。

### b) 発生頻度の高い津波に対する防波堤の設計方法

発生頻度の高い津波に対する防波堤の全体安定性について、津波が防波堤を越流する場合の安定性や津波の流れに対する基礎マウンド及び海底地盤の安定性等を検討することが必要である。以下では、津波が防波堤を越流する場合の波力の考え方、津波の流れに対する基礎マウンド及び海底地盤の安定性を確保するための設計法の考え方について示す。

#### 1) 津波の波力に対する直立部の照査

津波が防波堤を越流しない場合の波圧の作用は、津波波高（振幅）に2.2（谷本式）や3.0（修正谷本式）を乗じた衝撃波圧として考えるが、津波が防波堤を越流した場合、津波の力は流れとして防波堤に作用するため、過大な評価となってしまう。

そのため、ここでは、防波堤を軸として港内側と港外側の水位における静水圧を基本とした津波波力モデル（図-5）を提案し、その実用性を検討した。このモデルの実用化にあたっては、防波堤の港外側と港内側に静水圧を考え、そこに係数を乗じることで簡便に津波波圧を算定できる方法としている。なお、釜石港湾口防波堤を

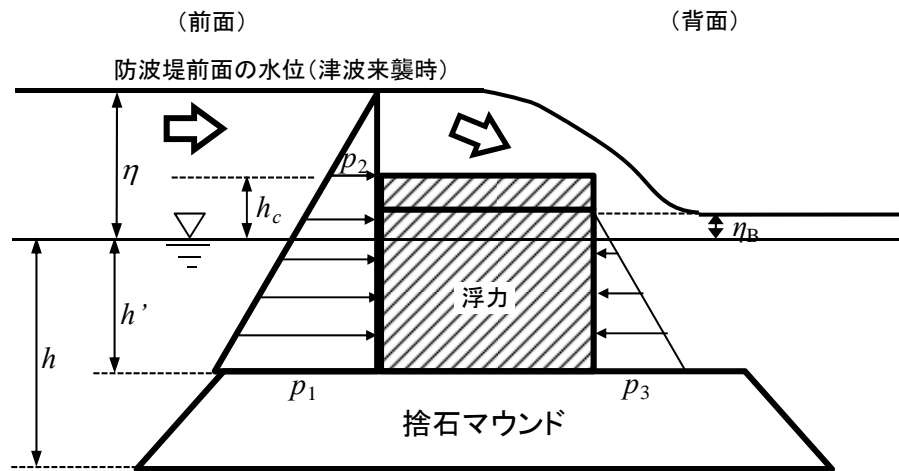


図-5 津波越流時における外力の作用モデル

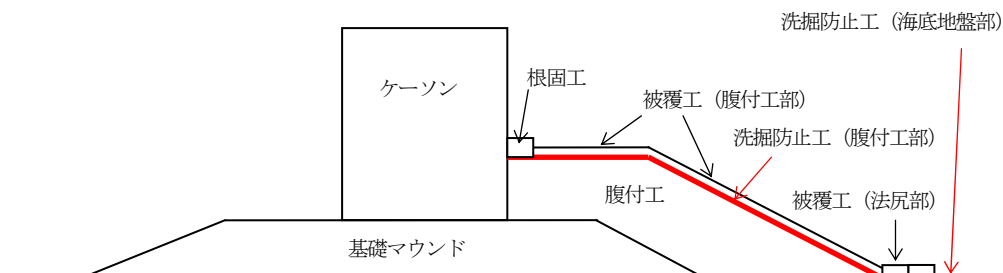


図-6 越流対策の断面設定例

モデルとした水理模型実験より、港外側と港内側の係数をそれぞれ1.05と0.90にすれば津波波力をよく表すことができることが確認されている<sup>8)</sup>。

#### ロ) 津波の流れに対する基礎マウンド及び海底地盤の安定性

東北地方太平洋沖地震に伴う津波では、八戸港北防波堤背後の基礎マウンド及び海底地盤に洗掘が発生し、防波堤に被災が生じた(図-2)。越流等の津波に伴う流れは、防波堤の基礎マウンド(根固工、被覆工を含む)や海底地盤を洗掘し、基礎の支持力を低下させて直立部(ケーソン)の倒壊の原因になる可能性がある。また、防波堤の堤頭部や開口部周辺においても、津波の流れが集中することにより流れが激しくなるため、基礎マウンドや海底地盤が洗掘されやすくなる可能性がある。

津波に伴う流れによる基礎マウンドや海底地盤の洗掘は、防波堤背後に腹付工の設置等の洗掘対策を施すことである程度防止することができる(図-6)。

#### シ) 発生頻度の高い津波を越える津波に対する防波堤の検討方法

発生頻度の高い津波を超える規模の津波に対しては、防護目標は防災から減災となる。減災目的としての防波堤の構造は、変形を許容しつつも倒壊しない粘り強さが求められる。

防波堤の粘り強い構造を検討する際には、発生頻度の高い津波を超えて津波の規模が段階的に大きくなっていく

くことを想定し、構造上の弱点部分に施す付加的な対策(構造上の工夫)の有効性を確認して、施設の重要度や費用対効果等を踏まえて具体的な対策断面を決定することが望ましい(図-7)。例えば、図-7中の防波堤Aにおいては、外力が穏やかな条件で基本断面が設計されており、発生頻度の高い津波を超えて津波の規模が段階的に大きくなっていくことを想定すると、最大クラスの津波に至る前の段階において(図中、黒丸で示す点)、基本断面で設計された直立部の滑動などに対して急激に安定しなくなる。このため、この点を境として、粘り強さを確保するために、大規模な付加的な構造上の工夫が必要になる。付加的な構造としては、b) 発生頻度の高い津波に対する防波堤の設計方法で示した防波堤背後に腹付工を設置する工法等が洗掘防止を兼ねて活用できる。一方、厳しい外力条件で基本断面が設計された防波堤B(例えば、外海に面した海域における防波堤)は、津波の規模が大きくなっても付加的な構造が比較的安価に対応できる。

防波堤がどの程度の規模の津波まで倒壊せず粘り強い構造を保持できるかについて、水理模型実験や数値解析を最大限活用することにより、施設の重要度や費用対効果も踏まえながら、様々な視点から総合的に評価する必要がある。

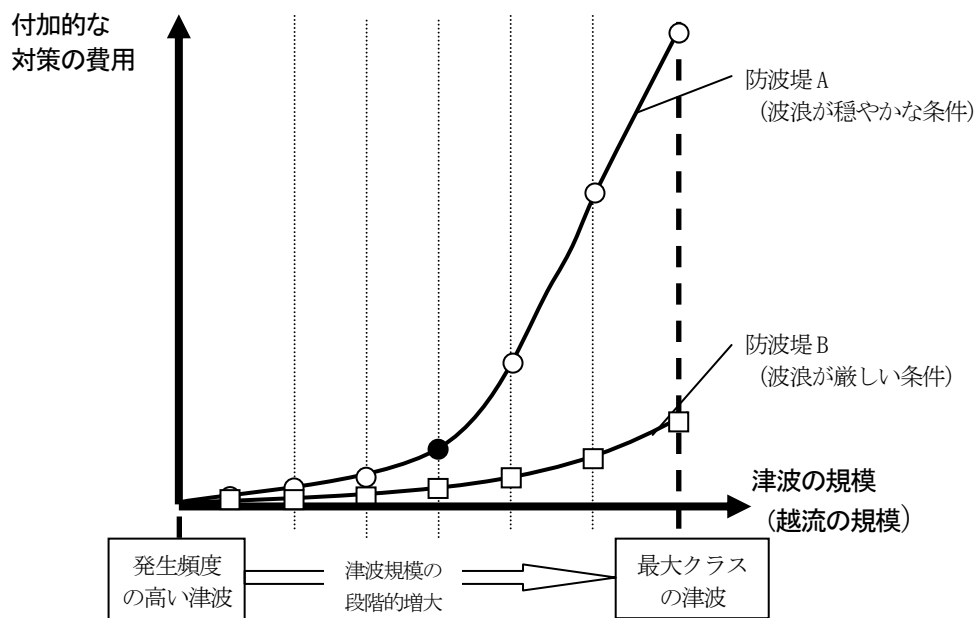


図-7 防波堤の発生頻度の高い津波を越える津波に対して粘り強さを付加する対策の段階的検討のイメージ  
横軸は、津波の規模を示している。縦軸は、「発生頻度の高い津波」に対して設定された防波堤断面を基準とした場合に、「発生頻度の高い津波」を超える規模の津波に対して防波堤を倒壊させない「粘り強い構造」とするための付加的な対策に必要な費用の増加を示している。

## 5. 被災した防波堤の実験結果

東北地方太平洋沖地震に伴う津波により被災した八戸港北防波堤中央部において、すでに復旧断面の検討が行われている。ここでは、粘り強い防波堤のあり方の参考とするため、その検討事例を紹介する。

### (1) 発生頻度の高い津波に対する耐津波設計

#### a) 直立部の滑動・転倒・基礎の支持力の照査

発生頻度の高い津波について、明治三陸地震（1896年）を想定し、その津波高さを4 mとした。明治三陸地震の津波諸元によりシミュレーションを行ったところ、天端上越流水深が0.5 m、越流時間が155 sとなった。また、この諸元では、波状段波は発生しないことから修正谷本式を用いる必要がないことと判断され、かつ、津波が越流することから、本論で示した静水圧を基本とした津波波力モデルにより直立部の滑動・転倒・基礎の支持力の照査を行った。この結果、断面は発生頻度の高い津波によって決まるのではなく、波浪で決定された。

#### b) 基礎の安定性の照査（津波の越流に対する検討）

直立部の滑動・転倒・基礎の支持力の照査と同じ外力条件でフルードの相似則により1/40の縮尺で水理模型実験を行い、津波が防波堤を越流することによる基礎の安定性の照査を行った。この結果、防波堤背後マウンドにおける流速が小さかったため、基礎マウンド被覆石（現

地換算で1t/個）は被災せず、防波堤の安定性が評価された。

### (2) 発生頻度の高い津波を越える規模の津波に対する粘り強さの検討

発生頻度の高い津波を越える規模の津波については、東北地方太平洋沖地震に伴う津波を想定した。実験のケースとして、東日本大震災を想定した潮位における津波第一波の港外水位を6.3 mとし、最も越流量が大きくなる条件として、H.W.L.における津波来襲時の港外水位を8.5 mとして実験を行った。この津波に対する防波堤の

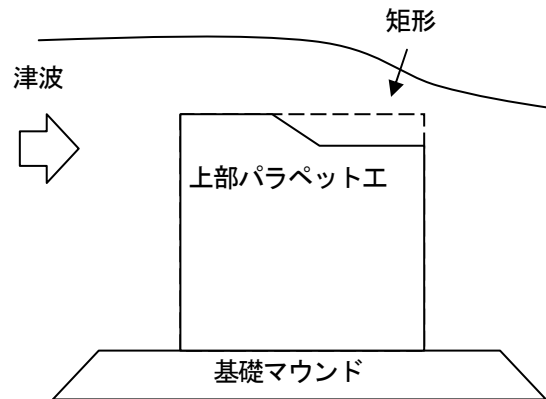


図-8 矩形もしくは上部パラペット工の違い

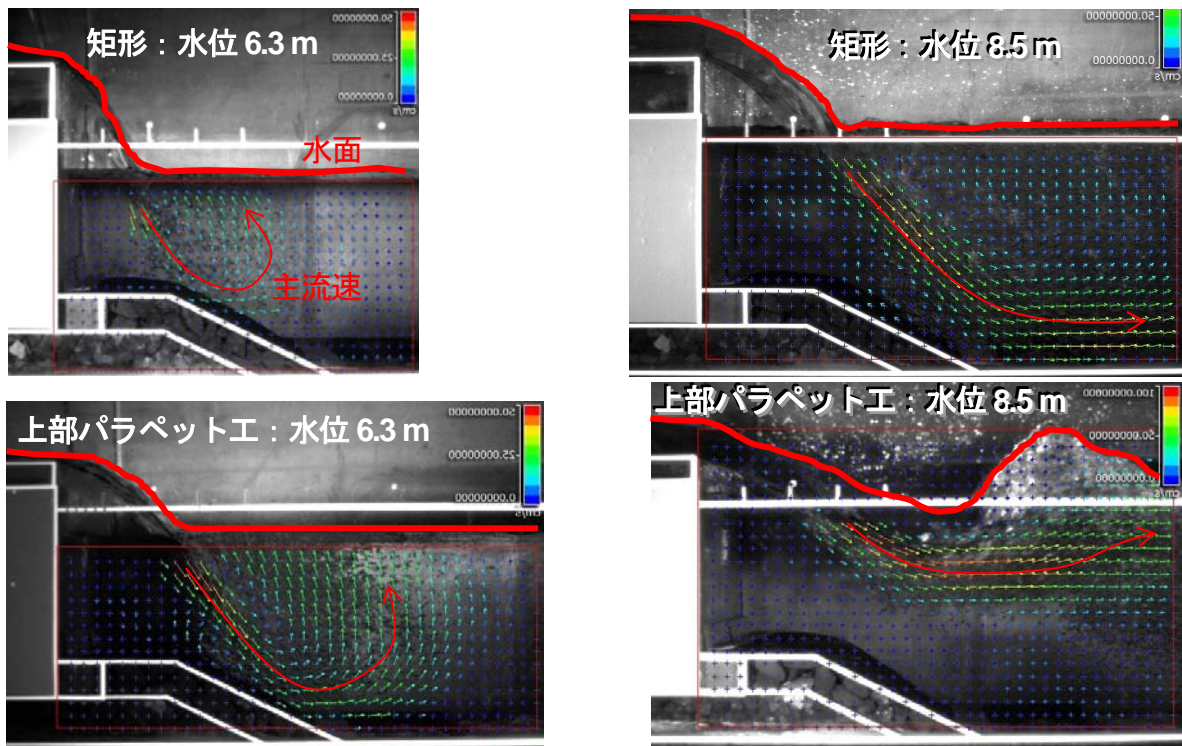


図-9 東北地方太平洋沖地震に伴う津波を想定した津波の防波堤上越流水理模型実験。天端を矩形もしくは上部パラペット工とした場合の越流水塊の着水位置の違い

粘り強さについては、防波堤の天端の形状を矩形と上部パラペット（パラペット高さは現地換算で1.5 m）の2つ（図-8）について、同一条件下の水理模型実験を行って検討した。

この結果、防波堤の天端を上部パラペット工にすることで、越流水の防波堤上部における水平流速を大きくすることができ、防波堤背後への打ち込み角度を小さく（水平方向に近く）させることができた（図-9）。これにより、越流水が防波堤背後に影響を与える場所を防波堤から離すことができ、基礎マウンド被覆材への影響が抑えられた<sup>9)</sup>。

上部パラペット工は、設置することで洗掘位置を防波堤の背後から遠くすることでケーソンの安定性が保持できることから、防波堤の粘り強い構造の1つとしての機能を有していると判断される。しかしながら、本論文で示したのは二つの水位条件による実験結果のみであり、他の水位によっては、上部パラペット工の高さとの関係により、被覆材へ影響する可能性もあるため、実際の施工においては、様々な水位を想定して、総合的な判断によって上部パラペット工の採用を決める必要がある。上部パラペット工を採用した場合にはその諸元についても、実験等の結果により決定する必要がある。

## 6. 今後の課題等

本論文で示した内容は、東北地方太平洋沖地震後に得られた防波堤の耐津波設計方法に関する新たな知見の一部であり、今後も継続して実施される様々な調査研究や民間を含む技術開発の成果等を最大限に取り込んでいくことが必要である。

例えば、今後の調査研究や民間を含む技術開発等において期待される成果としては、以下のようなものが考えられ、今後の検討の充足に努めたい。

- a) 防波堤（側壁、底版、天端面）に作用する津波越流時の圧力分布の特性
- b) 津波水位差による捨石マウンドや海底地盤における浸透流及び基礎の支持力の特性
- c) 浸透流による防波堤の全体安定性に及ぼす影響の評価（特に大水深の防波堤でヘッド差が大きくなる場合には、浸透流によりパイピングが発生する可能性が大きく、基礎マウンドの支持力に影響を及ぼす可能性がある。）
- d) 津波に先行する地震動が防波堤の全体安定性に及ぼす影響の評価
- e) 越流に対する防波堤背後の基礎マウンドや海底地盤の洗掘防止対策の具体化（防波堤の天端形状の工夫、被覆工の工夫、追従性と耐久性のある被覆工、等）

- f) 津波の波力に対して防波堤が粘り強さを発揮できる方法（構造）の具体化（腹付け対策、その他の構造的な対策、等）
- g) 防波堤の全体安定性・変形の評価に係る確認手法の高度化・効率化
- h) リサイクル材料の活用（腹付工、被覆工等）
- i) 開口部、堤頭函部に作用する速い流れが及ぼす影響の評価
- j) 隅角部における津波波力及び流れが及ぼす影響の評価

**謝辞：**本論文は、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」をとりまとめたものであり、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」のとりまとめに当たっては、「港湾における防波堤・防潮堤の津波設計ガイドラインに関する検討会（座長：磯部雅彦、東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）」において、学識経験者から貴重なご助言を頂いた。ここに、感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 警察庁、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置、<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higajokyo.pdf>
- 2) 国土交通省、東日本大震災による被災現況調査結果について（第1次報告）、  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/city07\\_hh\\_000053.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/city07_hh_000053.html)
- 3) 高橋重雄ら（2011）2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No. 1231, pp200.
- 4) 日本港湾協会（2007）港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 5) 小田勝也・早川哲也・直井秀市（2005）港湾における防波堤の津波対策効果に関する考察、海岸工学論文集、第52巻、291－295.
- 6) 国土交通省東北地方整備局港湾空港部、第3回東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会、  
<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kakyoin/PDF/3shiryou.pdf>
- 7) 交通政策審議会（2012）港湾における地震・津波対策のあり方（答申）～島国日本の生命線の維持に向けて～
- 8) 有川太郎ら（2012）釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討—水理特性を中心とした第一報—、港湾空港技術研究所資料、No. 1251, pp52.
- 9) 佐藤正勝ら（2012）一般防波堤の津波越流による港内側マウンドの洗掘と対策、土木学会論文集B3（海洋開発）、No. 68, No.4.（2012年11月出版予定）