

防波堤の耐津波設計ガイドライン

平成25年9月

国土交通省 港湾局

はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、2 万人近くもの死者・行方不明者を出す未曾有の大災害を引き起こした。特に、地震によって引き起こされた巨大津波はすさまじい破壊力をもって沿岸に押し寄せ、今回の震災による死者の 9 割以上がその津波による水死であったと言われている。また、人命だけでなく、東北沿岸に立地する多くの企業も被害を受け、我が国の経済は大きな損害を被った。

防波堤等の港湾構造物の多くも被災したが、その原因としては、防波堤に作用した巨大な水平力に加え、防波堤の天端を越流した津波が防波堤背後で強い流れとなり基礎マウンドや海底地盤を洗掘して防波堤の安定性を低下させたものと考えられている。これは、防波堤の耐津波設計の考え方を根底から見直させるものであった。

今回の震災を受け、今後の港湾における津波対策のあり方を検討するために「交通政策審議会港湾分科会防災部会」が平成 23 年 5 月 2 日に設置され、平成 24 年 6 月 13 日に「港湾における地震・津波対策のあり方（答申）」がとりまとめられた。答申においては、津波の規模や発生頻度に二つのレベルを想定し、「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、発生頻度は極めて低い沿岸域への影響が甚大な「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被害をできる限り小さくする「減災」を目指すことを示している。また、「発生頻度の高い津波」を超える規模の津波に対して、防波堤が変形しつつも倒壊しない「粘り強い構造」であれば、津波の防波堤背後への流入量が抑制され、背後地への津波の到達時間が遅れるなど、防波堤の背後を守ることにつながるため、設計津波高を超える津波に対しても、このような「粘り強い構造」を今後の防波堤に求めている。事実、外洋に面する港湾に整備される防波堤は、台風や冬季風浪等の非常に厳しい波浪条件によって断面諸元が決まっているため、相当規模の津波に対しても耐え得ることができる構造であり、今回の東北地方太平洋沖地震に伴う津波によっても一部は倒壊せずその背後の被害を低減させた。

上記を踏まえ、本ガイドラインは、東北地方太平洋沖地震に伴う津波による防波堤の被害の調査結果や震災後に実施された一連の水理模型実験結果等を総合的に検討し、粘り強い防波堤を設計するための基本的考え方をとりまとめたものである。本ガイドラインが、研究・技術開発を担う研究者、調査・設計等を担う現場技術者に有意義なものであるとともに、「粘り強さ」のあり方に係る知見をさらに深めることに役立つことを期待したい。

本ガイドラインのとりまとめにあたっては、「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）」を通じて、学識経験者から貴重なご助言を頂いた。末筆ながら、各位に深甚なる謝意を表す。

国土交通省港湾局

「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」委員名簿

区分	氏名	所属・役職
委員	磯部 雅彦	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授（座長）
	井合 進	京都大学 防災研究所地盤研究グループ 教授
	今村 文彦	東北大学 災害科学国際研究所副所長 教授
	清宮 理	早稲田大学 理工学部 社会環境工学科 教授
	佐藤 慎司	東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
	中野 晋	徳島大学 工学部 建設工学科 教授
	平石 哲也	京都大学 防災研究所 教授
委員	(独立行政法人 港湾空港技術研究所)	
	高橋 重雄	理事長
	(菊池 喜昭) 山崎 浩之	特別研究官 地盤・構造研究担当
	栗山 善昭	特別研究官 海洋・水工研究担当
	菅野 高弘	特別研究官 地盤防災研究担当
	下迫健一郎	海洋研究領域長 兼 耐波研究チームリーダー
	富田 孝史	アジア・太平洋沿岸防災研究センター 副センター長
関係者	(国土交通省)	
	(渡邊 和重) 松永 康男	港湾局 技術企画課 技術監理室長
	(伊藤 博信) 永井 一浩	港湾局 海岸・防災課 海岸・防災企画官
	(石橋 洋信) 田中 知足	港湾局 技術企画課 技術監理室 技術基準審査官
	(佐藤 正勝) 東山 和博	東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所長
	米山 治男	関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所長
	浦辺 信一	国土技術政策総合研究所 副所長
	(戀塚 貴) 鈴木 武	国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部長
	長尾 毅	国土技術政策総合研究所 港湾研究部長
	根木 貴史	国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部 沿岸防災研究室長
	宮田 正史	国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長
	(独立行政法人 港湾空港技術研究所)	
	渡部 要一	地盤研究領域長／土質研究チームリーダー
	有川 太郎	海洋研究領域 耐波研究チーム 上席研究官 耐波設計担当
	佐々 真志	地盤研究領域 動土質研究チームリーダー
	野津 厚	地震防災研究領域 地震動研究チームリーダー
	小濱 英司	地震防災研究領域 耐震構造研究チームリーダー

※（ ）書き氏名は前任者。

目次

1. 概要	1
1. 1 ガイドラインの位置付け	1
(1) 適用対象施設	1
(2) 技術開発の推進	1
1. 2 防波堤の津波に対する効果と粘り強い構造	2
(1) 防波堤による港内静穏度の確保（津波来襲後の本来機能確保）	2
(2) 防波堤による津波減災効果（津波来襲時の減災効果）	2
(3) 防波堤の「粘り強い構造」による津波減災効果の発現	3
(4) 越流に対する防波堤の機能維持と「粘り強い構造」	3
1. 3 津波の有する特性への対応	4
(1) 津波の作用に係る特性	4
(2) 港内への津波の流れの影響	4
2. 港湾における津波対策の基本的考え方	5
2. 1 津波の設定	5
(1) 二つのレベルの津波の定義	5
(2) 二つのレベルの津波の考え方	5
(3) 設計津波の設定	6
2. 2 防護目標の設定	7
(1) 防護目標の明確化	7
(2) 防護目標の設定に係る基本的考え方	8
(3) 対策内容の設定	8
(4) 津波による浸水被害の評価	8
(5) 三大湾等における留意点	9
3. 防波堤の耐津波設計	10
3. 1 防波堤の耐津波設計の基本的考え方	10
(1) 「設計津波」に対する耐津波設計の基本的考え方	10
(2) 「設計津波」を超える規模の津波に対する粘り強さの発揮	10
3. 2 防波堤の性能照査	11
(1) 東北地方太平洋沖地震津波による防波堤の被災原因	11
(2) 防波堤の全体安定性に関する総合的な検証	11
(3) 津波の作用に係る留意点	13
(4) 水理模型実験や数値解析を活用した性能照査	13

1. 概要

1. 1 ガイドラインの位置付け

本ガイドラインは、港湾の施設としての防波堤を対象とした耐津波設計の基本的考え方を示すものであり、防波堤の耐津波設計を行う際に「港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成 19 年)」に対して付加的に考慮すべき点を取りまとめたものである。

(解説)

(1) 適用対象施設

本ガイドラインの適用対象施設は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成 19 年)」^{*1)} (以下、「基準・同解説」という。) に示す外郭施設としての防波堤のうち、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である。なお、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。

防波堤の耐津波設計の検討にあたっては、「基準・同解説」を踏まえた上で、本ガイドラインの内容を考慮するものとする。

(2) 技術開発の推進

本ガイドラインは、「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」に伴い発生した津波による防波堤の被災事例の検証や水理模型実験等による成果を踏まえとりまとめたものである。ただし、防波堤の耐津波設計に関しては、未だ十分に解明されていない点も多く、今後も継続して技術的検討を進めていく必要がある。そのため、防波堤の耐津波設計に係る調査研究や技術開発を推進するとともに、民間の技術開発の成果等を含め、それらの成果を順次、本ガイドラインに反映していくこととする。

1. 2 防波堤の津波に対する効果と粘り強い構造

防波堤の耐津波設計の検討にあたっては、防波堤による港内静穏度の確保や津波を低減する効果を踏まえた上で、設計で対象とする津波レベルを超える規模の津波が来襲する場合であっても、津波の波力や越流等により防波堤の機能が可能な限り損なわれないように付加的に対策を施し、津波に対して倒壊しにくい「粘り強い構造」を目指すものとする。

(解説)

(1) 防波堤による港内静穏度の確保 (津波来襲後の本来機能確保)

防波堤は、港湾内の水域の静穏を維持することにより、船舶の安全な航行、停泊又は係留、貨物の円滑な荷役及び港湾内の建築物、工作物その他の施設の保全を図ることを目的として、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。

津波が来襲した後も防波堤による波浪の低減効果が維持され、一定の港内静穏度が確保されていれば、津波発災直後でも耐震強化岸壁等を利用した船舶による緊急物資輸送が可能となり、さらにその後も港湾における産業・物流機能の早期復旧に大いに寄与する。このため、港湾に津波が来襲した後も、防波堤の本来機能である港内静穏度が確保されるように、必要となる対策を講じておくことが望ましい。

(2) 防波堤による津波減災効果 (津波来襲時の減災効果)

防波堤は、津波が沿岸域に向かって来襲する際に、津波の作用を最初に受ける施設であり、その配置によっては防波堤背後に侵入する津波を効率的に低減することができる^{※2)}。すなわち、防波堤が存在することにより、港内への津波の流入量が抑制され、港内における津波による水位の高さと流速が低減し、津波の到達時間を遅らせるといった防波堤の津波減災効果が発揮される場合がある。この場合、係留施設等の港湾施設に対する浸水被害の軽減や防護ライン*よりも海側に立地する産業・物流施設の浸水被害の低減、さらには港湾労働者等の確実な避難に資するなど、港湾の津波に対する災害対応力を向上させることができる。また、防波堤の津波減災効果は、防護ラインに到達する津波高さの低減や到達時間の遅延にも寄与するため、港湾のみならず港湾背後地にも及ぶものである。

*港湾背後の市街地等を防護するために設置する一連のライン。通常は、堤防・胸壁等の海岸保全施設を線的に設置されることによりラインが構成される。

特に、釜石港など湾奥が広く、かつ湾口部の幅が狭い地形の場合には、湾口部に防波堤を設置することにより、効率的に津波を低減することができる^{※3)}。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震による津波を対象として釜石港の湾口防波堤の効果について数値解析を用いて検証した結果からは、防波堤により湾奥での津波高を約4割低減させた効果が確認されている^{※4)}。また、津波の第一波が防潮堤を越えるまでの時間についても、防波堤がない場合と比較して6分間遅延させる効果が確認されている^{※4)}。

また、外洋に面した港湾であっても、多方向からの波浪に対して港内静穏度を確保

する必要があるため、第一線の防波堤は航路部等を除き港湾全体を取り囲むように配置されることが多く、津波を効率的に低減する効果を有している場合がある。2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波の際にも、八戸港等、通常の防波堤において津波を低減する効果が確認されている^{※5)}。

この他、防波堤の津波を低減する効果については、既に多くの研究等でも明らかにされており^{※3)}、港湾における津波対策の検討を行うにあたっては、防波堤の波浪に対する港内静穏度を確保する機能に加えて、津波を低減する効果を適切に評価することが重要である。

(3) 防波堤の「粘り強い構造」による津波減災効果の発現

2011年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波のように非常に大きな規模の津波が来襲する場合であっても、防波堤が多少の変形を生じつつも倒壊しなければ（粘り強さの発現）、(1)で述べたとおり津波発災直後から港内静穏度の確保が可能となり、さらに(2)で述べたとおり防波堤による津波減災効果が発揮できる。このため、防波堤の耐津波設計の検討にあたっては、必要に応じて付加的な対策を施し、可能な限り倒壊しにくい「粘り強い構造」を目指すことが重要である。

(4) 越流に対する防波堤の機能維持と「粘り強い構造」

一般に、外洋に面する港湾に整備される防波堤は、台風や冬季風浪等の非常に厳しい波浪条件によって断面諸元が決まっていることから、規模の大きな津波に対してもある程度まで耐えることができる構造になっていると考えられる^{※6)}。

しかしながら、津波の規模が大きくなると、津波の波力が増大するとともに、長時間にわたる一方向の強い流れが発生し、特に、防波堤を津波が越流する場合には、防波堤背後の基礎マウンドや海底地盤（原地盤）が洗掘されやすく、防波堤の直立部（ケーソン）の倒壊に至る危険性が増大する。

そのため、防波堤の「粘り強い構造」を実現するためには、越流に対する背後基礎マウンドや海底地盤に対する洗掘対策を適切に検討する必要がある。また、増大する津波波力に対する直立部（ケーソン）の滑動及び転倒の評価に加え、基礎（基礎マウンドと海底地盤）の支持力に関しても基礎マウンド内を流れる浸透流の影響を考慮した上で適切に評価しておく必要がある。

1. 3 津波の有する特性への対応

防波堤の耐津波設計の検討にあたっては、津波が波と流れの二つの特性を有するとともに、押し波と引き波が繰り返し発生し、必ずしも第一波が最大規模になるとは限らないといった点を十分に踏まえた上で、防波堤の安定に対して最も危険側の作用となる津波の条件を適切に設定する必要がある。

(解説)

(1) 津波の作用に係る特性

防波堤の耐津波設計の検討にあたっては、「3. 2 (3) 津波の作用に係る留意点」を十分に踏まえた上で、場合によっては、引き波が危険側の条件になり得ることや、第二波以降の津波が最大規模になり得ることも考慮して、防波堤に作用する津波の条件を適切に設定する必要がある。

(2) 港内への津波の流れの影響

港内への津波の流入については、防波堤の天端からの越流、基礎マウンド中を浸透する流れおよび防波堤開口部からの流入、という三つの流れが存在する。防波堤の配置によっては、防波堤開口部から流入する流れの影響がより大きくなる場合もあり、港湾における津波対策の検討にあたっては、この点について留意する必要がある。また、開口部の堤頭函周辺は、押し波と引き波に伴う流れの集中により流速が極度に速まることもあり、そのような強い流れに対するケーソン、基礎マウンドおよび海底地盤の安定性の確保についても留意する必要がある。

2. 港湾における津波対策の基本的考え方

2. 1 津波の設定

港湾における津波対策の検討にあたっては、「発生頻度の高い津波」及び「最大クラスの津波」の二つのレベルの津波を踏まえ、地域防災計画や海岸保全基本計画等を踏まえた上で、背後の構造物等の重要度に応じて、「発生頻度の高い津波」から「最大クラスの津波」までの間で設計外力としての津波を「設計津波」として設定する。

(解説)

(1) 二つのレベルの津波の定義

港湾における津波対策の検討にあたっては、「交通政策審議会港湾分科会防災部会 答申 港湾における地震・津波対策のあり方～島国日本の生命線の維持に向けて～(平成 24 年 6 月 13 日)」^{※6)}(以下、「防災部会 答申」という。)を踏まえ、以下の二つの津波を設定する。

一つは、「発生頻度の高い津波」であり、偶発作用として対象施設を設置する地点に到達すると想定される津波のうち、「最大クラスの津波」と比較して発生頻度が高く、かつ、人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を及ぼす恐れのある規模の津波であり、防波堤の耐津波設計で対象とする津波である。もう一つは、「最大クラスの津波」であり、偶発作用として対象施設を設置する地点に到達すると想定される津波のうち、発生頻度は極めて低いものの、人命、財産又は社会経済活動に極めて重大な影響を及ぼす規模の津波であり、「発生頻度の高い津波を超える規模の津波」に対して防波堤の津波に対する「粘り強い構造」を検討する際に考慮する津波である。

また、中央防災会議では、「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 報告(平成 23 年 9 月 28 日)」^{※7)}において二つのレベルの津波を想定している。一つは、住民避難を柱とした総合的防災対策を構築する上で想定する津波で、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「最大クラスの津波」である。もう一つは、防波堤等の構造物によって津波が内陸へ浸入するのを防ぐ海岸保全施設等の建設を行う上で想定する津波で、「最大クラスの津波」に比べて津波高は低いものの発生頻度が高く、大きな被害をもたらす「発生頻度の高い津波」である。

(2) 二つのレベルの津波の考え方

a) 発生頻度の高い津波

「発生頻度の高い津波」については、「基準・同解説」(「第 3 編 作用及び材料強度条件編」「第 2 章 気象・海象」「5 津波」)に基づき、対象地域における既往最大津波、比較的多くのデータが揃っている近年の津波で防災上適切と考えられる津波、地震空白域における想定地震に基づいた津波を踏まえて適切に設定するものとする。

なお、「発生頻度の高い津波」の設定にあたっては、2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した津波による被害を受けた地域における、速やかな海岸保全施設の復旧計画の

策定に資することを目的として、平成 23 年 7 月 8 日に農林水産省及び国土交通省により通知された「設計津波の水位の設定方法等について」^{※8)}を踏まえ、痕跡高や歴史記録・文献等の調査で判明した過去の津波の実績と、必要に応じて行うシミュレーションに基づくデータを用いて、一定頻度（数十年から百数十年に一度程度）で発生する津波を設定する方法も参考とすることもできる。

b) 最大クラスの津波

「最大クラスの津波」については、出来るだけ過去に遡って地震・津波の発生等をより正確に調査し、古文書等の史料の分析、津波堆積物調査、海岸地形等の調査等の科学的知見に基づく調査を行い、その調査結果を対象港湾周辺の防災の観点から幅広く整理・分析し、あらゆる可能性を考慮した「最大クラスの津波」として設定するものとする^{※7)}。

なお、「最大クラスの津波」の設定にあたっては、中央防災会議等により公表された最大クラスの津波を引き起こす津波断層モデルを参考とすることもできる。また、その設定にあたっては、「津波対策の推進に関する法律」（平成 23 年法律第 77 号）及び「津波防災地域づくりに関する法律」（平成 23 年法律第 123 号）の内容に十分留意するものとする。

(3) 設計津波の設定

設計外力とする「設計津波」の設定は、一般的には、「発生頻度の高い津波」を「設計津波」として設定するケースが多いと考えられるが、発電所等の重要度が著しく高い施設を守る場合や、人・財産・産業等の極度に集積している地域を守る場合などは、当該防波堤等の重要度に応じて、「最大クラスの津波」も踏まえて「設計津波」を適切に設定する。

2. 2 防護目標の設定

港湾における津波対策の検討にあたっては、津波による人命、財産または社会経済活動への影響を十分に考慮した上で、津波の規模や発生頻度に応じて港湾の防護目標を適切に設定する。

(解説)

(1) 防護目標の明確化

港湾における津波対策の検討にあたっては、「設計津波」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、「設計津波」を超える規模の津波に対しては、最低限人命を守るという目標のもとに被害を可能な限り小さくする「減災」を目指すこととし、防護目標を明確化することを基本とする。対象港湾における防護目標は、港湾内に位置する施設や地区毎に、その重要度等に応じて、以下に示す項目等を考慮して設定することが望ましい。図 2-1 に、港湾における防護目標の設定手順の例を示す。

- ・人命の保護
- ・大きな二次災害の防止
- ・津波発災直後から港湾に求められる機能
- ・津波発災後の港湾機能の維持・早期復旧
- ・港湾及び港湾背後地における経済社会活動状況、等

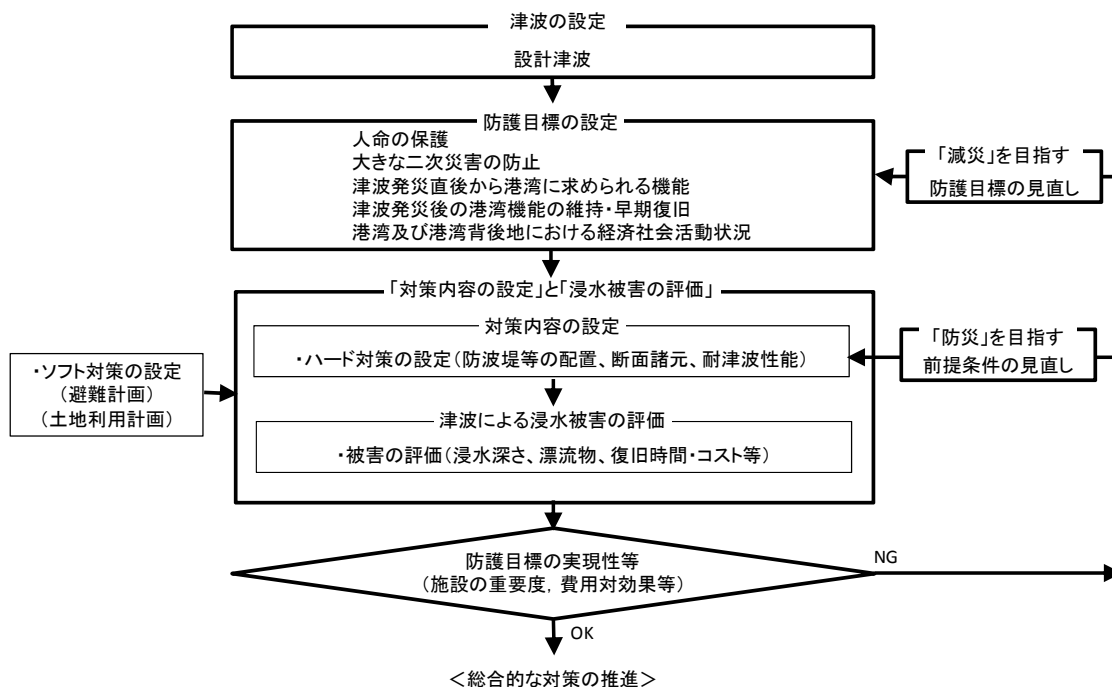


図 2-1 港湾における防護目標の設定手順例

(2) 防護目標の設定に係る基本的考え方

港湾の津波対策の検討にあたっては、既存ストックを最大限に活用しつつ、第一線防波堤と防潮堤を含む港湾施設全体で重層的に防護（多重防護）するという考え方が重要である。

しかしながら、港湾における産業・物流施設は、大部分が背後の市街地等を防護する防護ラインの海側に立地しているため、その機能の防護のためには、防波堤等の港湾施設で津波を防ぐことが効果的である。ただし、防波堤によって津波を完全に防ぐことは困難な場合もあり、「設計津波」に対して港湾施設が浸水することも想定されるため、港湾における産業・物流施設等で働く人々や利用者に対しては、津波発災後直ちに避難させることが基本となる。その際、防波堤の津波を低減する効果によって浸水の程度が緩和されるほど避難の時間も確保しやすくなるとともに、産業・物流施設の浸水による被害を最小化し、早期の復旧も期待できることから、防波堤からの越流や防波堤開口部からの流入による港湾施設の浸水深さを一つの指標とするなどして、津波発災後にも維持すべき港湾機能や施設が有する重要度も踏まえながら、その防護目標を適切に設定する必要がある。

(3) 対策内容の設定

防波堤の耐津波性能については、当該防波堤の法線が津波の来襲方向に対して有効な向きにあつて、津波を低減する効果が期待できる状況にあることが前提となる。その上で、耐津波性能を付与する防波堤については、設計で対象とする「設計津波」を超える規模の津波が来襲する場合であっても、津波の波力や越流等により防波堤の機能が可能な限り損なわれないようにするため、付加的な対策の有効性等について検討し、目標とする防波堤の耐津波性能が適切に設定されるように総合的に検討する必要がある。

(4) 津波による浸水被害の評価

a) 津波の浸水シミュレーション

津波による浸水被害の評価については、津波の浸水シミュレーションを実施し、その結果に基づいて行うことが望ましい。

b) 被害評価の視点の例

- ①浸水深さ
- ②漂流物
- ③復旧時間
- ④復旧コスト

なお、津波シミュレーションの結果に基づき、各種施設における被害程度や津波による漂流物の有無について評価する際に参考となる情報について、「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」に伴い発生した津波による被災事例から得られた知見も含めて、**参考資料 I** に整理している。

(5) 三大湾等における留意点

港湾及び港湾背後地に人、財産及び社会経済活動が高密度に集中・集積する三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）等においては、津波による被害が一旦発生した場合、その影響があまりに大きくなることが予想される。また、地域によっては、「設計津波」と「設計津波」を超える規模の津波によって港湾に來襲する津波高さの差が僅かである場合もある。このため、津波の規模等から画一的に港湾の防護目標を設定するのではなく、港湾背後のゼロメートル地帯や地下街への津波浸水被害等を可能な限り抑止することを含め、各港湾の現状を十分に考慮して防護目標を設定する必要がある。

なお、上述した以外の地域であっても、十分な津波対策が講じられていない脆弱な地域においては、住民等の避難を柱とした津波対策を基本としつつも、各港湾の現状を十分に考慮して適切に防護目標を設定した上で、津波に対する減災対策についても検討していく必要がある。

3. 防波堤の耐津波設計

3. 1 防波堤の耐津波設計の基本的考え方

防波堤の耐津波設計にあたっては、「設計津波」に対して防波堤に求められる機能が維持されるとともに、「設計津波」を超える規模の津波が来襲する場合であっても、防波堤に求められる機能が可能な限り維持されるように津波に対して倒壊しにくい「粘り強い構造」を目指すものとする。

(解説)

(1) 「設計津波」に対する耐津波設計の基本的考え方

「設計津波」に対する防波堤の耐津波設計は、背後の港湾機能や施設の重要度等に応じて、津波発災直後から防波堤による港内静穏度の確保（1. 2 (1) 参照）等の機能が維持されていることや、越流の可能性も考慮しつつ防波堤の津波減災効果（1. 2 (2) 参照）が発揮されることに配慮する必要がある。そのため、波浪作用に加えて、「設計津波」が作用しても防波堤の機能が損なわれないような断面諸元を設定することが基本となる。

(2) 「設計津波」を超える規模の津波に対する粘り強さの発揮

「設計津波」を超える規模の津波に対しては、(1) により設定した防波堤の断面諸元を基本とし、「設計津波」を超える規模の津波に対しても防波堤の津波減災効果（1. 2 (2) 参照）を可能な限り発揮できるように、施設の重要度や費用対効果等も踏まえながら、防波堤に付加的な対策を施し、大きな規模の津波に対して変形は許容するが倒壊しにくい「粘り強い構造」とすることが基本となる。

付加的な対策の検討にあたっては、「設計津波」を超えて津波の規模を段階的に大きくしていくことを想定し、津波の規模に応じた防波堤の破壊形態（基礎マウンドや海底地盤の洗掘、直立部の滑動等）について十分に検討を行った上で、津波の規模に応じた防波堤構造の弱点を抽出し、その弱点部分に構造上の工夫を施すことによって「粘り強い構造」を目指すといったアプローチが考えられる。

なお、「粘り強い構造」の検討にあたっては、水理模型実験や数値解析を活用し、その効果を検証していくことも重要である。

3. 2 防波堤の性能照査

防波堤の性能照査にあたっては、津波による防波堤の破壊形態を踏まえ、港湾の地形や施設配置等の諸特性を十分に考慮し、想定する津波及び津波に先行する地震動に対して防波堤の全体安定性について総合的に検証するものとする。

なお、防波堤の全体安定性については、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安定性、津波の流れに対する基礎マウンド及び海底地盤（原地盤）の安定性について照査し、防波堤の要求性能に応じて、損傷の程度が限界値以下であることを確認するものとする。

（解説）

（1）東北地方太平洋沖地震津波による防波堤の被災原因

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震では、東日本の太平洋沿岸に大津波が来襲し、太平洋沿岸の諸港湾に甚大な被害をもたらすとともに、防波堤に倒壊等の被害が発生した。八戸港北防波堤、釜石港湾口防波堤、大船渡港湾口防波堤、相馬港沖防波堤等が被災し、これら防波堤の被災状況を分析した結果、その主な原因としては、津波の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、あるいはこれらの複合的な作用によるものと考えられている。また、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も指摘されている。なお、防波堤の被災状況については、**参考資料Ⅱ**に詳細を示す。

（2）防波堤の全体安定性に関する総合的な検証

津波及び津波に先行する地震動が作用した場合における防波堤の全体安定性に関する総合的な検証手順例を図 3-1 に示す。

本手順では、まず始めに津波以外の作用に対する初期断面を設定する。次に、「設計津波」に対して防波堤の全体安定性が損なわれないように、「3. 4 「設計津波」に対する耐津波設計」に基づき断面諸元を設定する。最後に、「3. 5 「設計津波」を超える規模の津波に対する「粘り強い構造」の検討」に基づき、施設の重要度や費用対効果等を踏まえて「粘り強い構造」の断面を総合判断して設定する。

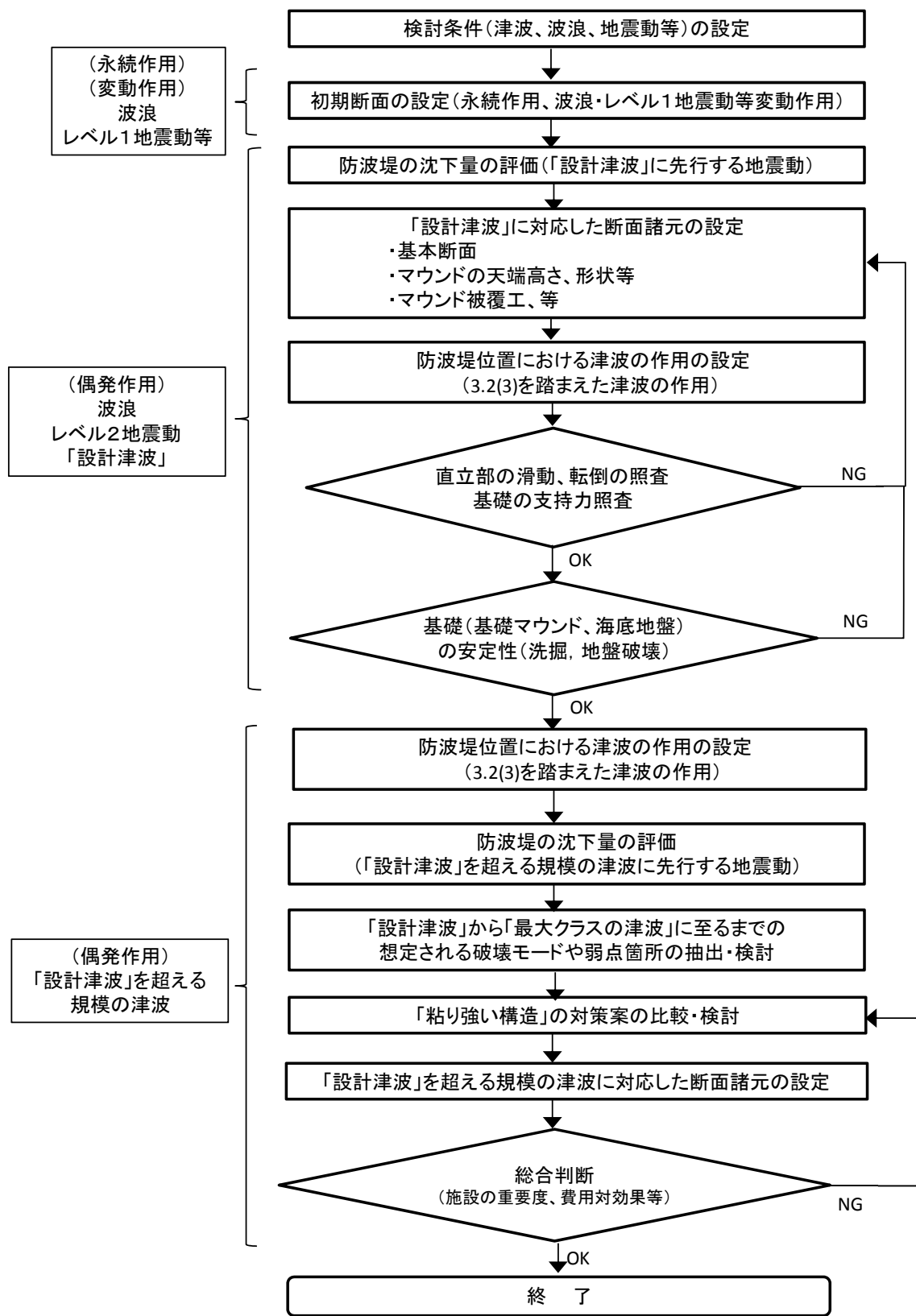


図 3-1 防波堤の全体安定性に関する総合的な検証手順の例

(3) 津波の作用に係る留意点

a) 津波の作用に影響する諸特性

津波の作用による防波堤の被災箇所、被災程度、被災形態等は、対象とする津波や港湾の諸特性によって大きく影響を受ける。このため、防波堤の性能照査で考慮すべき津波の波力や流速等の津波の作用は、以下に示すような諸特性について、数値解析（津波シミュレーション）や水理模型実験等の結果を十分に検討した上で適切に設定する必要がある。

- ・津波の特性： 対象とする津波の津波高、流速、来襲方向、周期特性、時間変化特性、継続時間、等
- ・港湾の特性： 地形、水深、防波堤の施設配置（開口部の位置・幅等）や天端高（越流の有無）、等

b) 津波の作用の時間変化特性の考慮

津波は、継続時間が長く、また押し波と引き波が繰り返し発生し、かつ津波の来襲方向や周期特性も時間的に大きく変化する。このため、津波の波力による防波堤の安定性照査、基礎マウンドや海底地盤の洗掘対策等の照査においては、最大津波高や最大流速に加えて、時間変化特性や継続時間を十分に考慮して防波堤の全体安定性を照査する必要がある。

(4) 水理模型実験や数値解析を活用した性能照査

津波に対する照査方法に関しては、現状、必ずしも十分な知見が得られているわけではない。そのため、性能照査にあたっては、水理模型実験や数値解析を最大限活用することにより、防波堤の全体安定性を確認することが望ましい。

3. 3 津波に先行する地震動等の設定とその影響評価

防波堤の性能照査にあたっては、津波に先行する地震動及び地殻変動を適切に設定し、その影響を評価するものとする。

(解説)

(1) 津波に先行する地震動の設定

防波堤の性能照査にあたっては、津波に先行する地震動を適切に設定し、影響を適切に評価する必要がある。

a) 「設計津波」に先行する地震動の設定

「設計津波」に先行する地震動は、「設計津波」を引き起こす地震に対して断層モデルを設定し、「基準・同解説」の「第3編 第4章 1.3 施設の性能照査に用いるレベル2地震動」に示されている手法を用いて、工学的基盤面の時刻歴波形を設定するものとする。

b) 「設計津波」を超える規模の津波に先行する地震動の設定

「設計津波」を超える規模の津波に先行する地震動については、a)と同じ手法で設定することも可能な場合もあるが、便宜的に以下の地震動を勘案して適切な地震動を設定することができるものとする。

- ①耐震設計で設定されているレベル2地震動（海溝型地震を対象とする場合のみ）
- ②その他（強震動パルス生成域を考慮した断層モデルによる地震動（50%非超過以上）^{※9)}等）

(2) 津波に先行する地殻変動の設定

地殻変動の設定にあたっては、対象とする地震の特性及び過去の地震に伴う地殻変動量を参考に、適切に評価するものとする。

(3) 防波堤の全体安定性に及ぼす影響の評価

津波に先行する地震動により、防波堤直下の基礎地盤が液状化等により軟化するなどして支持力が低下し、防波堤が沈下する可能性がある。また、地殻変動によっても防波堤の沈下の可能性がある。防波堤が沈下した場合、津波が防波堤を越流しやすくなることから、結果として背後の基礎マウンドや海底地盤の洗掘が発生しやすくなり、防波堤の全体安定性が損なわれる危険性が増大する。また、防波堤に作用する浮力及び波力が増大し、直立部の滑動等に対する安定性が低下する可能性もある。

そのため、防波堤の全体安定性の照査にあたって、津波に先行する地震動及び地殻変動による防波堤の沈下量の影響について適切に評価する必要がある。

なお、海底地盤の液状化等による防波堤の沈下量の算定にあたっては、過去の防波堤の沈下事例や調査研究を踏まえつつ、基礎マウンドや海底地盤のせん断変形や体積圧縮に伴う沈下量を見込むものとする。また、必要に応じて、防波堤の沈下量に対応した余裕高を、予め防波堤の天端高に見込むことについても検討するものとする。

3. 4 「設計津波」に対する耐津波設計

3. 4. 1 断面諸元の設定

防波堤の耐津波設計においては、「設計津波」による作用および津波に先行する地震動によって、防波堤の全体安定性が損なわれないように、適切な断面諸元を設定する。

(解説)

防波堤の耐津波設計において、設定すべき主な断面諸元を以下に示す。

- 基礎マウンド： マウンド形状、天端高、幅、捨石規格（重量）
- 直立部： ケーソン幅・天端高、天端形状（パラペット、落差等）
- 根固工： 根固工の規格、個数、配置
- 被覆工： 被覆工（被覆石、被覆ブロック）の規格、配置等
- 消波工： 消波工規格（津波は透過するので津波に対しては効果なし）
- 腹付工： 腹付工の高さ、幅、形状
腹付工の被覆工の規格（腹付工天端は、強い流れが当たる）
- 海底地盤の洗掘防止工： 洗掘防止工（洗掘防止マット等）の規格、配置

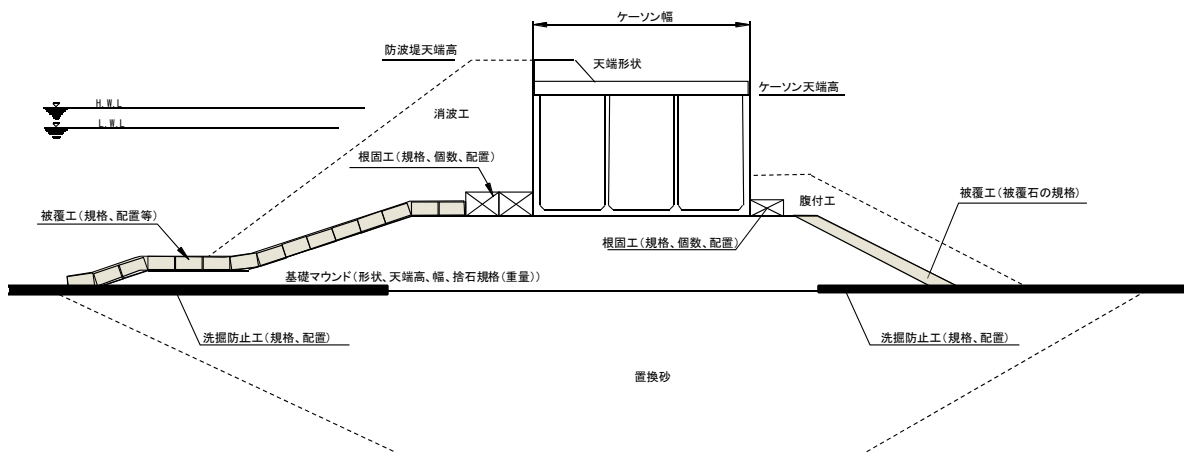


図 3-2 断面諸元の設定例

3. 4. 2 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安定性照査

「設計津波」に伴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安定性照査にあたっては、直立部に作用する津波の波力を適切に評価するとともに、津波の流れが基礎マウンドや海底地盤に及ぼす影響を適切に評価するものとする。

(解説)

(1) 基本事項

a) 直立部に作用する津波の波力の設定

防波堤の直立部には、津波（押し波または引き波）が来襲する前面側および背面側の側壁に作用する水圧、底面に作用する水圧、天端面に作用する水圧が作用する（図3-3参照）。直立部の安定性照査にあたっては、これらの水圧の大きさと分布特性を適切に評価し、直立部に作用する津波波力を設定する必要がある。

なお、越流を伴う場合の防波堤に作用する津波波力については、現時点では汎用的に適用できる波力式はないので、水理模型実験や数値解析の結果等を用いて適切に評価することが望ましい。

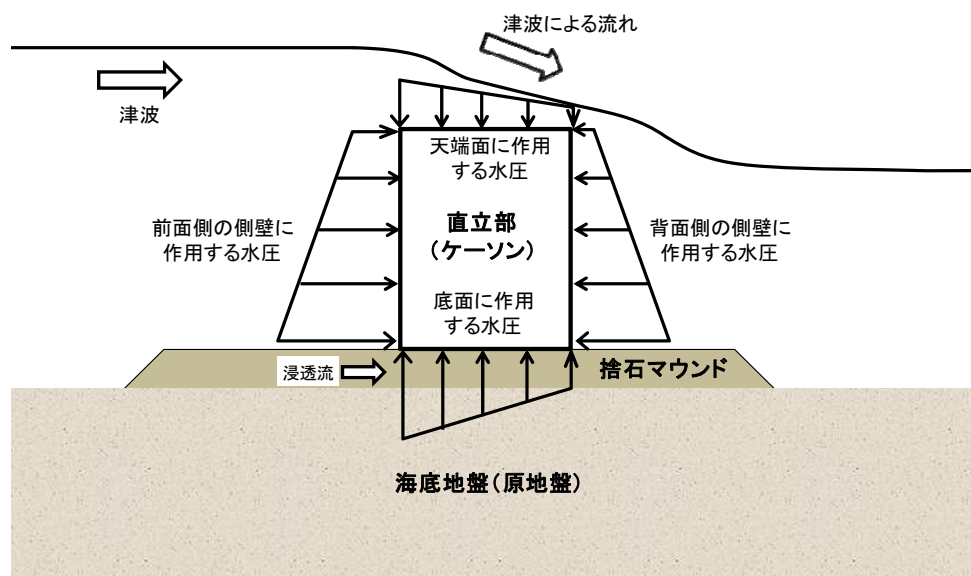


図3-3 直立部の側壁・天端面・底面に作用する津波による水圧（イメージ）

b) 直立部の滑動、転倒及び基礎の支持力に対する安定性照査

津波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安定性については、一般に、「基準・同解説」の「第4編 第4章外郭施設 3 通常の防波堤」に準じて、以下の「【参考①】直立部の滑動、転倒及び基礎の支持力に対する安定性照査式」に示す方法により照査することができる。

ただし、以下の照査式を適用するにあたっては、津波の作用に影響する諸特性に応じて、設計対象となる防波堤に作用する津波波力を適切に評価した上で特性値を設定する必要がある。また、基礎マウンド内の浸透流の影響（パイピングや間隙水圧の上

昇による捨石の有効応力の低下に伴うせん断強度の低下等) や海底地盤の液状化等による地盤の軟化等、直立部の安定性に影響を及ぼすその他の要因についても十分に検討し、摩擦係数や地盤材料のせん断強度等を適切に評価した上で特性値を設定する必要がある。

なお、構造解析係数は、防波堤に要求される性能に応じた適切な値を設定する必要がある。

【参考①】直立部の滑動、転倒及び基礎の支持力に対する安定性照査式

滑動については式(1)、転倒については式(2)、基礎地盤の支持力不足による破壊に対する安定性の検討については式(3)を用いることができる。なお、以降の式において、記号 γ はその添字に関する部分係数であり、添字 k 及び d はそれぞれ特性値及び設計用値を示す。

① 滑動

$$f_d(W_d - P_{B_d} - P_{U_d}) + P_{R_d} \geq \gamma_a P_{H_d} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

- f : 壁体底面と基礎との摩擦係数
- W : 堤体の重量 (kN/m)
- P_B : 浮力 (kN/m)
- P_U : 津波の揚圧力 (kN/m)
- P_H : 津波の水平波力 (kN/m)
- γ_a : 構造解析係数
- P_R : 補強した割石あるいは方塊の滑動抵抗力 (kN/m)

② 転倒

$$a_1 W_d - a_2 P_{B_d} - a_3 P_{U_d} \geq \gamma_a a_4 P_{H_d} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- W : 堤体の重量 (kN/m)
- P_B : 浮力 (kN/m)
- P_U : 津波の揚圧力 (kN/m)
- P_H : 津波の水平波力 (kN/m)
- $a_1 \sim a_4$: 各作用のアーム長 (m)
- γ_a : 構造解析係数

③ 基礎地盤の支持力

$$\frac{\sum [\{ c'_d s + (w'_d + q_d) \tan \phi'_d \} \sec \theta / (1 + \tan \theta \tan \phi'_d / F_f)]}{\left[\gamma_a \left[\sum \{ (w'_d + q_d) \sin \theta \} + a_1 P_{H_d} / R \right] \right]} = F_f \geq 1.0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- P_H : 津波の水平波力 (kN/m)
- a_1 : 津波の水平波力のアーム長 (m)
- c' : 粘性土地盤の場合においては、非排水せん断強さ、砂質土地盤の場合においては、排水条件における見掛けの粘着力 (kN/m²)
- s : 分割細片の幅 (m)
- w' : 分割細片の重量 (kN/m)
- q : 分割細片に作用する上載荷重 (kN/m)
- ϕ' : 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角 (°)
- θ : 分割細片の底面となす角 (°)
- F_f : 耐力の設計用値と作用効果の設計用値の比を示す補助パラメータ
- R : すべり円弧の半径 (m)
- γ_a : 構造解析係数

$$X_d = X_k \cdot \gamma_X \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(1)～式(3)の設計用値は、式(4)に示すように、パラメータ X の特性値に部分係数を乗じることにより求めることができる。部分係数は、構造解析係数を除き全て1.00を用いても良い。構造解析係数は、防波堤に要求される性能に応じた適切な値を設定する。

(2) 「設計津波」に対する当面の安定性照査手法

a) 留意事項

防波堤の耐津波設計にあたって、暫定的に適用する照査手法を以下に示す。

ただし、本照査手法は、現時点でのとりまとめ結果であり、今後の水理模型実験や調査研究等の成果を踏まえた変更の可能性もあるため、設計者において適用可否の判断を行った上で利用する必要がある。

なお、港湾空港技術研究所における防波堤の安定性照査に係る現状の知見について、そのとりまとめ結果を**参考資料Ⅲ**に示す。

b) 当面の安定性照査手法の一つの考え方

- ① [3. 4. 2 (1) b)] に示す「直立部の滑動、転倒及び基礎の支持力に対する安定性照査」を適用する。
- ② 防波堤に作用する津波による水平波力、揚圧力、浮力については、【参考②】**防波堤（混成堤）に対する津波波力の算定手順**に示す方法で算定する。
- ③ 部分係数は、構造解析係数を除き全て 1.0 を用いる。
- ④ 「設計津波」に対して安定性照査を行う際の構造解析係数については、下表に示す値を参考とする。

表 3-1 構造解析係数の参考値

照査項目	構造解析係数
直立部の滑動	1.2
直立部の転倒	1.2
基礎の支持力	1.0

c) 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波の作用を受けた防波堤の被災事例

最大クラスの津波であった 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波の作用を受けた港湾^{*}の第一線防波堤を対象として、防波堤の大規模な被災の発生有無^{**}について、防波堤の直立部の滑動に対する安全率^{***}と越流水深（防波堤の天端面からの津波水位の高さ）を指標として整理した結果を図 3-4 に示す。なお、越流水深は、防波堤の天端上からの港外側における津波水位までの水深として定義する。

※ : 八戸港、大船渡港、釜石港、相馬港、久慈港、仙台塩釜港、小名浜港

※※ : 防波堤の設計工区内で防波堤が滑動した場合を被災有りとしている。

※※※ : 滑動に対する安全率は、参考①に示す式(1)について部分係数を全て 1.0 とするとともに、腹付工からの滑動抵抗力 P_{Rd} をゼロとして求めた式(1)' に示す構造解析係数のことを言う。

$$f_d(W_d - P_{B_d} - P_{U_d}) + P_{R_d} \geq \gamma_a P_{H_d} \quad \dots\dots (1)$$

$$\gamma_a = \frac{f_d(W_d - P_{B_d} - P_{U_d})}{P_{H_d}} \quad \dots\dots (1)'$$

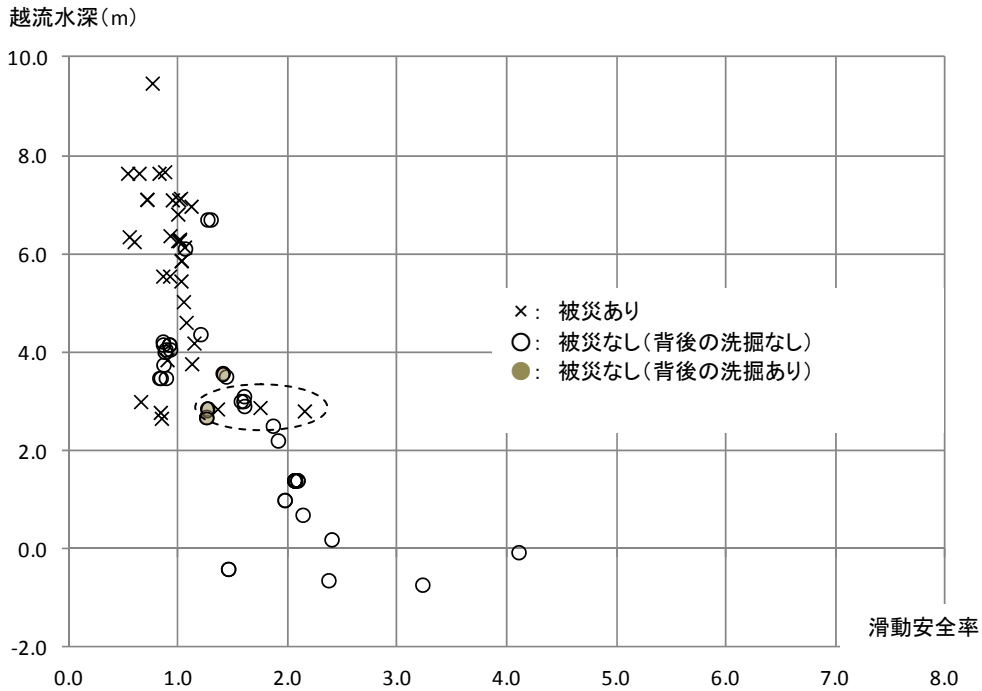
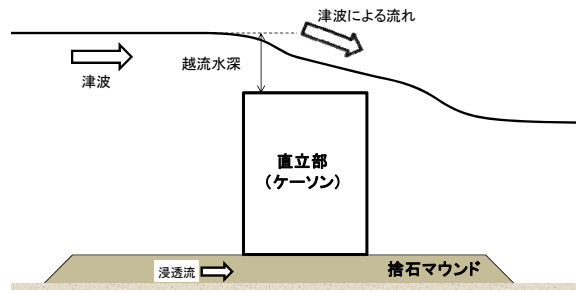


図 3-4 越流水深と滑動安全率の関係における防波堤の被災有無
(2011 年東北地方太平洋沖地震の被災事例)

本図より、滑動安全率が概ね 1.2 程度を下回ると防波堤が被災している事例が多くなっていることが分かる。一方、滑動安全率が 1.2 を上回っている場合であっても被災している事例（図中の点線で囲んだ領域内の×で示した 3 つの事例）がある。これらの事例は、越流により背後マウンドや海底地盤が洗掘されたことが被災の要因であると考えられている（3. 4. 3 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参照）。さらに、ケーソンの移動は無かったものの、越流によって背後マウンドと海底地盤に洗掘された痕跡が残っていた事例もあった（図中、灰色の丸印で示す事例）。

以上の結果から今回の被災事例の特徴をまとめると、以下のとおりとなった。

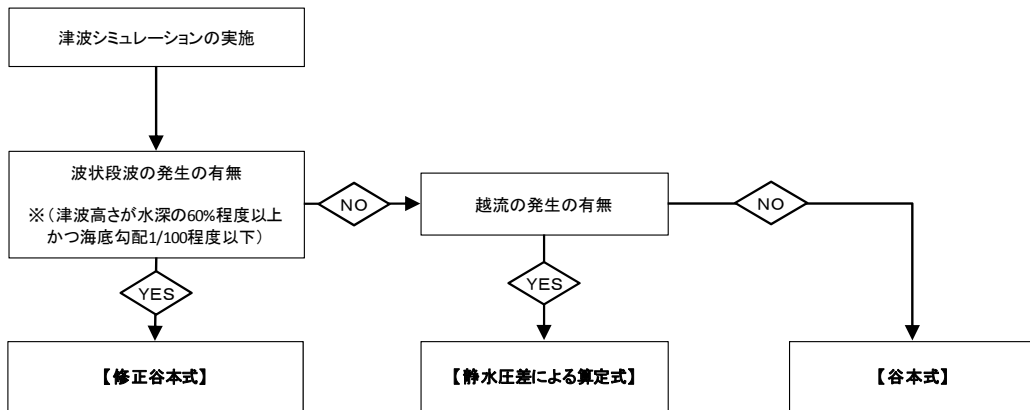
- ・滑動安全率が 1.2 を下回ると被災事例が多くなる。
- ・越流水深が約 2 m を超えると洗掘による被災が発生している。

【参考②】 防波堤（混成堤）に対する津波波力の算定手順（その1）

(1) 基本事項

a) 津波波力の算定手順

- ・津波波力の算定方法については、津波シミュレーションの有無、波状段波、越流の発生の有無を考慮して、参考図-1に示す算定手順をもとにして適切な波力算定式を用いる。

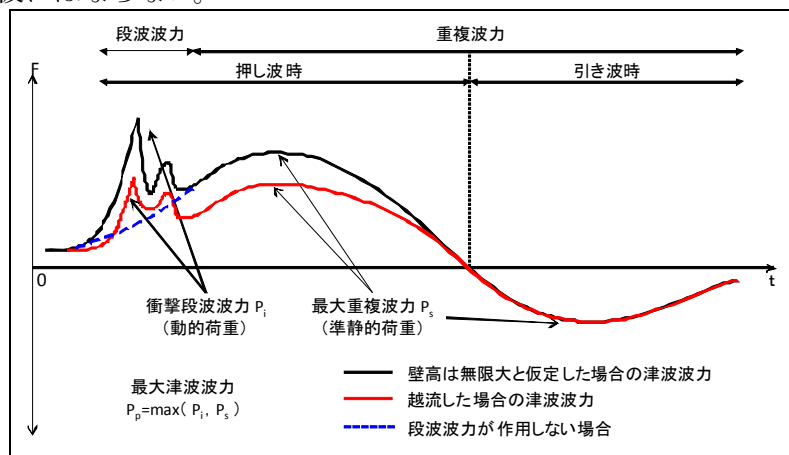


参考図-1 防波堤に対する津波波力算定手順

b) 津波波力式の適用の考え方

①波状段波が発生する場合は、修正谷本式を適用

津波は、まず段波状かそうでないかに分類でき、波長の長い津波先端部が短周期の複数の波に分裂（ソリトン分裂）しながら段波形状になった波状段波については、衝撃段波波力が極めて大きな値となり、谷本式では明らかに過小評価になるため適用できない。海底勾配が非常に緩やかであると波状段波となり、また、波高水深比（津波高さ／水深）が小さい場合や海底勾配が比較的急な場合には、段波にはならない。



参考図-2 段波波力と重複波力の区分イメージ

このため、波状段波が発生する場合には、津波波力が大きくなるため、これに対応した修正した谷本式（修正谷本式）を波力算定に用いる。波状段波波力を考慮する条件は、おおむね入射津波高さが水深の30%以上（シミュレーション等による津波高さが水深の60%以上）で、かつ海底勾配が1/100程度以下の遠浅である場合と考える。

【参考②】 防波堤（混成堤）に対する津波波力の算定手順（その2）

②波状段波が発生しない場合で、かつ越流が発生しない場合は、谷本式を適用

①に示す波状段波が発生しない場合で、かつ越流が発生しない場合には、「基準・同解説」に記載されている谷本式を適用する。

③波状段波が発生しない場合で、かつ越流発生の場合は、静水圧差による算定式を適用

①に示す波状段波が発生しない場合で、かつ越流が発生する場合には、ケーソン前面と背面に作用する静水圧差を補正した算定式を適用する。なお、若干越流している状態に静水圧差による算定式を適用する場合は、それより水位の低い越流直前の状態に谷本式を適用した方が高い波力となる可能性があるため、両者を比較して高い方を採用する必要がある。

c) 津波シミュレーションを行う場合の静水面の設定

・ 基準水面は一般的に朔望平均満潮面（H.W.L.）を基準水面として取り扱う。

d) 谷本式および修正谷本式における「入射津波の基準面上の高さ」の設定

- ・ 防波堤に作用する津波波力を求めるための津波高さの算定にあたっては、防波堤を考慮した数値シミュレーションを行うことを原則とする。
- ・ 現行の港湾基準では、便宜上防波堤前面における最大津波高さの 1/2 の高さを入射する津波高さとして設定することとしているが、実際には防波堤前面以外の場所でも防波堤および陸域からの反射の影響を含んでいる。
- ・ このため、谷本式に用いる a_I （入射津波の静水面上の高さ）は、数値シミュレーション等による津波高さ（基準水面からの高さ）の 1/2 を入射津波高さとして定義し、波力算定にはこれを用いるものとする。

$$a_I = \text{シミュレーション等津波高さ（基準面からの高さ）の } 1/2$$

基準面：津波が作用する面において津波高を算定するための基準となる水位

- ・ なお、一般に、津波高さという場合には、浸水等の影響を考慮するための水位（反射波の影響を含む）である。したがって、基本的には、これらの津波高さについても、原則としてその 1/2 の値を入射津波高さ a_I とする。こうした津波高さは、一般に T.P. 上の水位で表されていることが多いので、設計潮位（通常は H.W.L.）上の高さに換算してから 1/2 にする必要がある。

【参考②】 防波堤（混成堤）に対する津波波力の算定手順（その3）

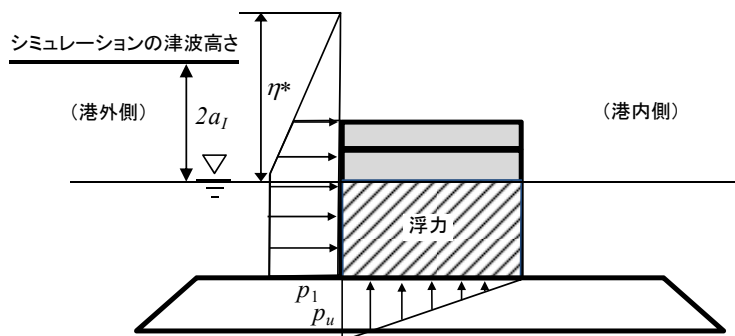
(2) 津波波力の算定

【 a) 修正谷本式（基準面の無次元強度を 3.0 に割増した谷本式）】

- ・ 谷本式における基準面の波圧に関する係数（無次元波圧強度）を **2.2 から 3.0** に割り増して検討を行う。（池野らの提案している分裂砕波直後の津波本体重複波衝突時の波圧算定式（2005））
- ・ 基準面上の波力の作用高さは変わらないものとする。（ $\eta^* = 3.0a_I$ ）

① 背面の水位が押し波時に基準面より下がらない場合

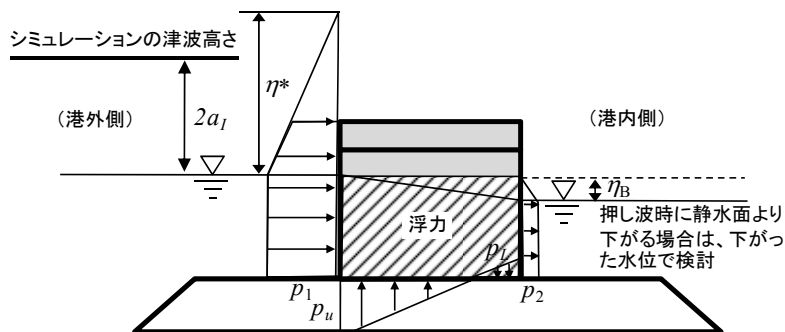
$\eta^* = 3.0a_I$	η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
$p_1 = 3.0\rho_0ga_I$	a_I : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
$p_u = p_1$	ρ_0g : 海水の単位体積重量 (kN/m ³)
	p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m ²)
	p_u : 直立壁前面下端における揚圧力(kN/m ²)



② 背面の水位が押し波時に基準面より下がる場合

- ・ 背面の水位が押し波時に基準面より下がる場合には（引き波初動時あるいは2波目以降に限る）、必要に応じて下がった水位で検討を行う。

$\eta^* = 3.0a_I$	η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
$p_1 = 3.0\rho_0ga_I$	η_B : 直立壁背面で静水面から下がった水位(m)
$p_2 = \rho_0g\eta_B$	a_I : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
$p_u = p_1$	ρ_0g : 海水の単位体積重量 (kN/m ³)
$p_L = p_2$	p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m ²)
	p_2 : 直立壁背面における負圧(kN/m ²)
	p_u : 直立壁前面下端における揚圧力(kN/m ²)
	p_L : 直立壁背面下端における揚圧力(kN/m ²)



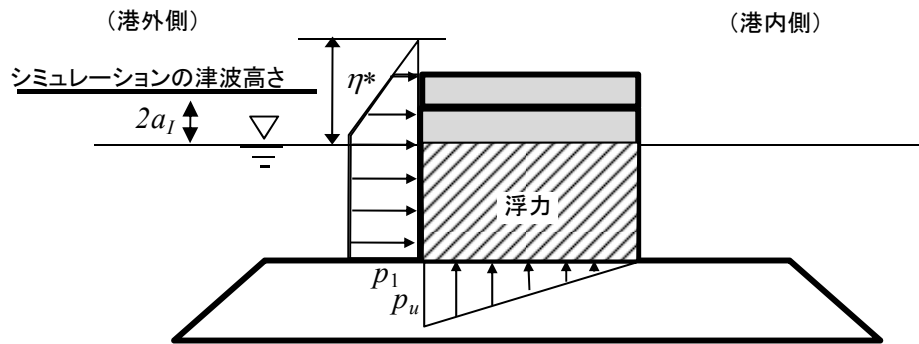
※1 浮力については前面静水面を背面まで考慮した場合の容積（斜線の部分）として計算すること。

【参考②】 防波堤（混成堤）に対する津波波力の算定手順（その4）

【 b）谷本式（津波が防波堤を越流しない場合）】

①背面の水位が押し波時に静水面より下がらない場合

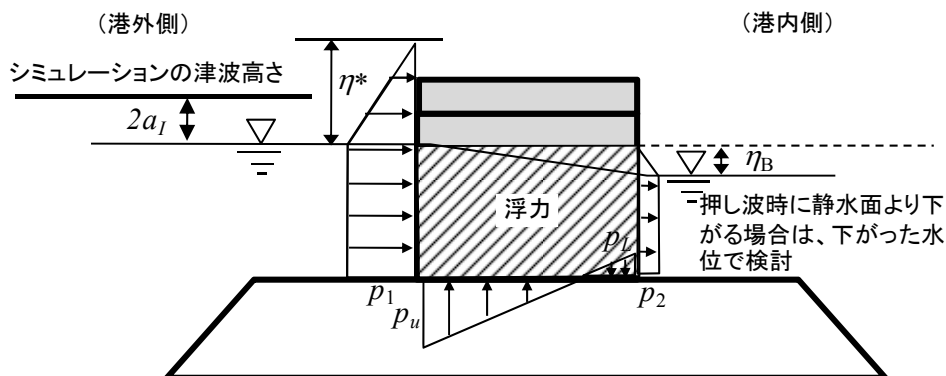
$\eta^* = 3.0a_I$	η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
$p_1 = 2.2\rho_0ga_I$	a_I : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
$p_u = p_1$	ρ_0g : 海水の単位体積重量 (kN/m ³)
	p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m ²)
	p_u : 直立壁前面下端における揚圧力(kN/m ²)



②背面の水位が押し波時に静水面より下がる場合

- ・背面の水位が押し波時に静水面より下がる場合には（引き波初動時あるいは2波目以降に限る）、必要に応じて下がった水位で検討を行う。

$\eta^* = 3.0a_I$	η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
$p_1 = 2.2\rho_0ga_I$	η_B : 直立壁背面で静水面から下がった水位(m)
$p_2 = \rho_0g\eta_B$	a_I : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
$p_u = p_1$	ρ_0g : 海水の単位体積重量 (kN/m ³)
$p_L = p_2$	p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m ²)
	p_2 : 直立壁背面における負圧(kN/m ²)
	p_u : 直立壁前面下端における揚圧力(kN/m ²)
	p_L : 直立壁背面下端における揚圧力(kN/m ²)



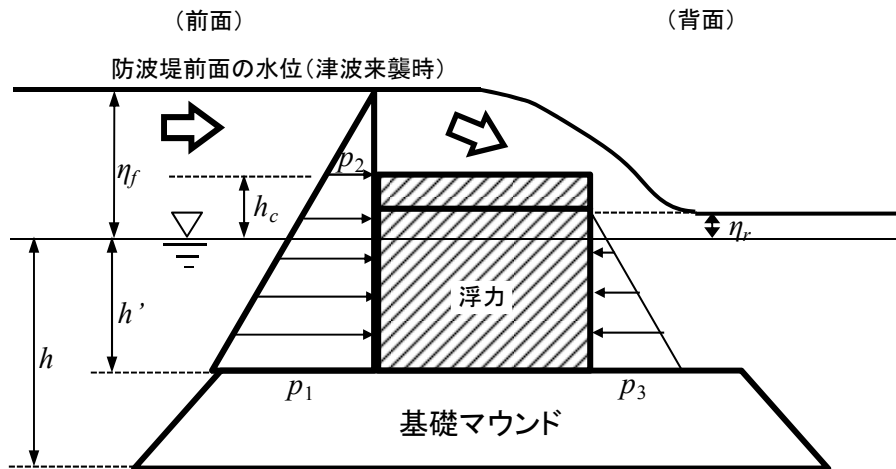
※1 浮力については前面静水面を背面まで考慮した場合の容積（斜線の部分）として計算すること。

【参考②】 防波堤（混成堤）に対する津波波力の算定手順（その5）

【 c）静水圧差による算定式（津波が防波堤を越流する場合）】

- ・防波堤前面と背面の最大水位差を算出し、防波堤の前背面における静水圧差を用いて防波堤の安定性を確認する。
- ・水理模型実験による結果により、現時点では、前面の静水圧に $a_f=1.05$ 倍、背面の静水圧に $a_r=0.9$ 倍した静水圧を用いる。

$p_1 = \alpha_f \rho_0 g (\eta_f + h')$ $p_2 = \frac{\eta_f - h_c}{\eta_f + h'} p_1$ $p_3 = \alpha_r \rho_0 g (\eta_r + h')$	<p>p_1 : 直立壁前面の底面における波圧強度(kN/m²)</p> <p>p_2 : 直立壁前面の天端面にける波圧強度(kN/m²)</p> <p>p_3 : 直立壁背面の底面における波圧強度(kN/m²)</p> <p>$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)</p> <p>h' : 直立壁の底面の水深(m)</p> <p>h_c : 静水面から直立壁天端面までの高さ(m)</p> <p>η_f : 直立壁前面の静水面からの津波高さ(m)</p> <p>η_r : 直立壁背面の静水面からの津波高さ(m)</p> <p>a_f : 直立壁前面の静水圧補正係数</p> <p>a_r : 直立壁背面の静水圧補正係数</p>
--	--



- ※1 浮力については、水没している堤体全体（前面水位を背面まで考慮した場合の容積：斜線の部分）として計算すること。揚圧力については考慮しない。
- ※2 若干越流した状態に静水圧差による算定式を適用する場合は、越流直前の状態に谷本式を適用した場合と比較し、堤体の安定性に対して不利となる方を採用する。

3. 4. 3 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

「設計津波」に伴う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の検討にあたっては、基礎マウンド及び海底地盤に対する越流や浸透流等の津波の流れによる作用を適切に評価するとともに、直立部の安定性を損なうような洗掘及び基礎の破壊が発生しないように適切な対策を講じるものとする。

(解説)

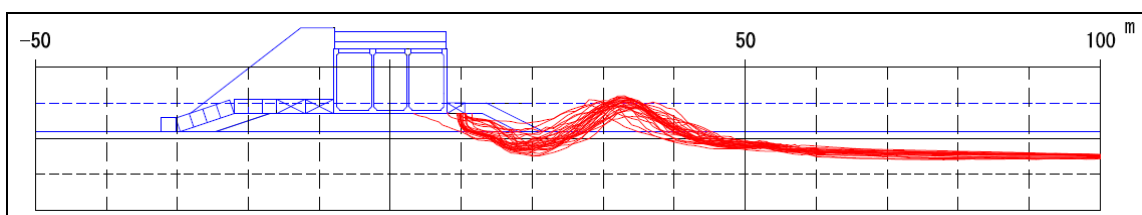
(1) 基本事項

a) 洗掘対策の重要性

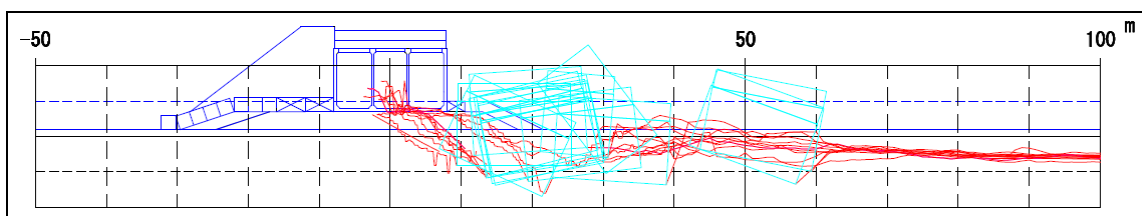
津波の規模が大きくなると、津波の波力が增大するとともに、長時間にわたる一方向の強い流れが発生する。越流や浸透流等の津波の流れによって、防波堤の基礎マウンド(根固工、被覆工を含む)や海底地盤が洗掘を受けると、基礎の支持力が低下し、直立部の倒壊に至る可能性がある。

特に、防波堤を津波が越流する場合には、防波堤背後の基礎マウンドや海底地盤が洗掘されやすく、防波堤の直立部の倒壊に至る危険性が增大する。具体的な事例として、**図 3-5 (a) (b)**に最大クラスの津波である 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波により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事例(八戸港北防波堤 11 工区)を示す。**図 3-5(a)**は、直立部が残存した測線の被災断面図を重ね合せた図である。**図 3-5(b)**は、同工区において直立部が滑落した測線の被災断面図を重ね合せた図である。

これらの図より、直立部が移動しない場合であっても防波堤背後の基礎マウンド及び海底地盤が大きく洗掘されていることが確認できる。また、洗掘された箇所背後には洗掘された土砂等が堆積している様子も確認できる。防波堤背後の海底地盤の洗掘が進行すると、直立部を支持する基礎マウンドと海底地盤が直立部を支持できなくなり、直立部が洗掘された部分に落ち込むようにして被災が発生すると推察される。



(a) 直立部残存部



(b) 直立部滑落部

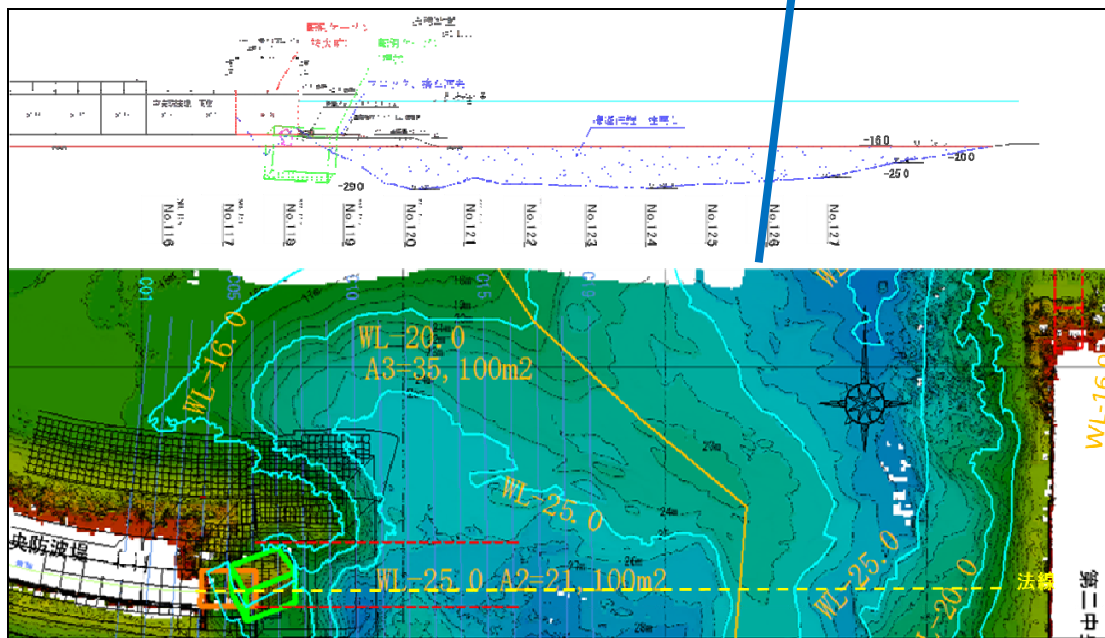
図 3-5 八戸港北防波堤 11 工区の越流による被災状況 (図中赤線:被災後の地盤面)

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、防波堤の直立部の倒壊に至る危険性が增大する。堤頭部や開口部周辺で洗掘が発生した具体的な事例として、図 3-6 に 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって八戸港で発生した洗掘の状況を示す。図 3-6 (a) より、防波堤の堤頭部や開口部において、原地盤からの深さが 10m を超えるような洗掘が発生していることが分かる。図 3-6 (b) は、中央防波堤・第二中央防波堤の間に位置する航路部における被災後の深浅測量の結果を示しているが、航路中央部を中心として洗掘が発生しており、洗掘の影響により堤頭部のケーソンが倒壊していることが分かる。



(a) 洗掘発生箇所（八戸港）



(b) 開口部の流れによる洗掘状況（中央防波堤と第二中央防波堤との間の航路部）

図 3-6 基礎マウンド及び海底地盤の洗掘状況（八戸港）

さらに、2011 年東北地方太平洋沖地震津波では防波堤の内外に生じる水位差も大き

く、津波シミュレーションによる検証では、八戸港の北防波堤において港内側水位が基礎マウンドの天端面付近まで下がった結果が得られている（図 3-7 参照）。このことは、次に津波水位が上昇する際に、基礎マウンドの空隙内に一気に浸透流が発生する可能性があることを示している。

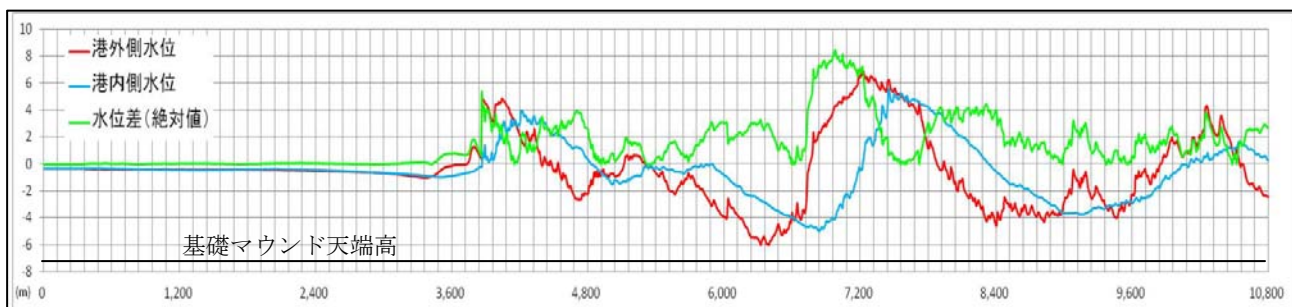


図 3-7 八戸港八太郎地区北防波堤（1 1 区）の水位変動状況
（2011 年東北地方太平洋沖地震津波の再現シミュレーション結果）

以上のことから、津波の流れに対する基礎マウンドや海底地盤の洗掘対策は、防波堤の耐津波設計を行う上で、最も重要な検討事項の一つであり、適切な対策を検討する必要がある。

なお、洗掘対策等の付加的な対策よりも、小規模な本体構造の強化により津波を防ぐ効果が飛躍的に増加するケースも考えられる。そのような場合には、施設の重要度や費用対効果を踏まえつつ、直立部の拡幅や天端高さの引き上げ等の対応も考えられるが、天端高さを引き上げると、結果として防波堤に対する波浪の影響が大きくなる点に注意が必要である。

b) 洗掘対策の検討に係る留意点

「設計津波」の場合であっても、開口部や堤頭部で流速が大きくなる場合、また、津波が防波堤を越流する場合は、防波堤の耐津波性能に大きく影響するため、波浪作用に加えて「設計津波」に対して基礎マウンド及び海底地盤の洗掘を発生させないことが洗掘対策の基本となる。ただし、海底地盤等に一切の洗掘を発生させないことが困難である場合には、洗掘が発生した場合であっても、連鎖的に基礎マウンドが崩れ、直立部の安定性が損なわれることがないように配慮する必要がある。

なお、越流に対する洗掘対策の検討にあたっては、防波堤前面の津波高さが最大となる状態が、基礎マウンドや海底地盤の洗掘に対して最も厳しい条件となるとは限らないため、対象とする津波に対して、以下に示す水位等の時間変化特性に留意する必要がある。

- 押し波時（港外側から港内側へ津波の流れが作用する場合）
 - ・ 前面側（港外側）の津波水位の範囲
 - ・ 背面側（港内側）の静水面水位の範囲
 - ・ 防波堤の沈下量（隆起も含めて）の範囲
 - ・ 越流の継続時間

○引き波時（港内側から港外側へ津波の流れが作用する場合）

・押し波時と同じ項目について検討

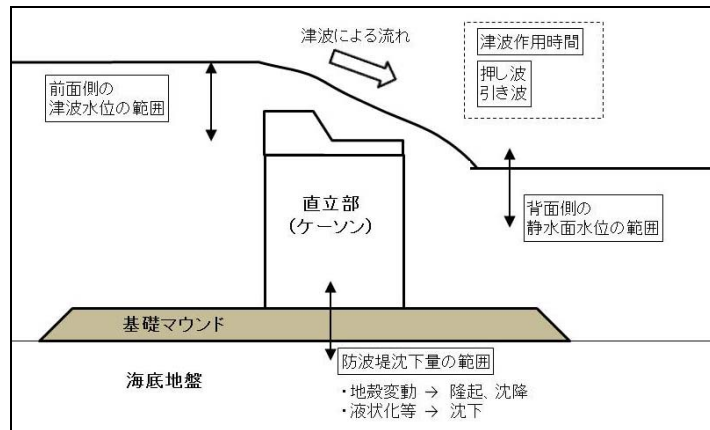


図 3-8 洗掘対策の検討条件の設定イメージ

なお、被覆工については、津波来襲時にその機能を果たせるように、材料の耐久性にも十分留意する必要がある。

c) 水理模型実験による洗掘対策の検討

防波堤の越流や堤頭部・開口部周辺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ことが望ましい。

d) 基礎の破壊

基礎（基礎マウンドと海底地盤）の安定性については、3. 4. 2に示す「基礎の支持力に対する安定性照査」において、直立部の底版から基礎マウンド天端面に作用する荷重に対して、簡易ビショップ法を用いて基礎の支持力破壊について照査することが基本となる。

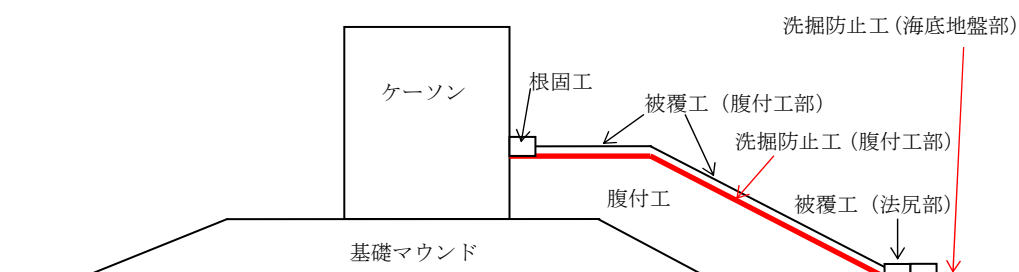
しかしながら、大きな規模の津波が作用する場合や水位が極端に下がった状態で防波堤の片側に大きな水位が作用した場合など、通常の波浪を対象とした防波堤の設計では想定していない極端な条件の場合には、基礎マウンド又は海底地盤の破壊形態は、基礎マウンド内に発生する浸透流の影響もあり、必ずしも簡易ビショップ法で想定した破壊モード（円弧すべり）とはならず、基礎マウンド内の直線的なすべり破壊等となる可能性も考えられる。ただし、現時点では、上述のような基礎の破壊形態について十分な知見が得られていないため、水位が極端に低下するような状態が想定される場合には、水理模型実験等を活用して、基礎の破壊について適切に検討し、基礎の安定性を照査することが望ましい。

(2) 「設計津波」に対する当面の洗掘対策の検討方法

a) 越流に対する洗掘対策

津波が防波堤を越流する場合、洗掘に対する対策が必要となる。このため、当面の越流に対する洗掘対策の検討は、参考資料Ⅳ「2011年東北地方太平洋地震に伴う津波により被災した防波堤の復旧断面の検討事例」や参考資料Ⅲ「津波に対する防波堤の安定性及び粘り強い構造の検討に係る現状の知見」に示すような水理模型実験を最大限活用することによって、具体的な洗掘対策の断面を決定することが望ましい。

なお、参考資料Ⅲ等に示す水理模型実験結果から、以下に示すような腹付工の設置を基本とした洗掘対策を施すことにより、津波の規模が大きくなった際にも倒壊しにくい防波堤構造になると考えられる。このため、水理模型実験を実施することが困難な場合などにおいては、以下に示す洗掘対策の方針を設計者の判断に基づき活用することもできるものとする。



箇所	機能・効果等
腹付工	<ul style="list-style-type: none"> 腹付工を設置しない場合、滑動安全率又は支持力（偏心傾斜荷重）の安全率（基礎マウンド中の浸透流による水圧変化等は無視）が概ね1.0付近になると、直立部が一気に倒壊する結果となった。【参考資料Ⅲ】 一方、腹付工（直立部の高さの1/3程度の高さ）を設置した断面では、上記と同じ津波条件を作用させると、腹付工は時間の経過とともに徐々に洗掘が進行するものの、防波堤の破壊には至らなかった。さらに、津波規模を大きくすると、同様に洗掘は進行するものの、津波波力（水平成分）としては、約1.4倍まで耐え得る結果となった。【参考資料Ⅲ】
根固工	<ul style="list-style-type: none"> 根固工（根固方塊）を設置することにより、ケーソン背面の腹付工天端付近の捨石が波浪（打ちこみも含む）や流れによって洗掘・吸出されないようにするとともに、津波時の越流に対する腹付工の洗掘を防止し、目地付近の強い流れによる捨石の流出を防止する効果を期待できる。
<ul style="list-style-type: none"> 被覆工（腹付工部） 洗掘防止工（腹付工部） 	<ul style="list-style-type: none"> 被覆工（腹付工部）の洗掘状況の観察結果から、洗掘防止工（洗掘防止マット）及び被覆工については、防波堤背後から落ち込む水塊を腹付工の石材に直接作用するのを防ぎ、その結果として腹付工の洗掘の進行速度を抑制する効果を有していた。【参考資料Ⅲ】
<ul style="list-style-type: none"> 被覆工（法尻部） 洗掘防止工（海底地盤部） 	<ul style="list-style-type: none"> 丸山ら（2012）の実験結果によると、大型の被覆ブロックを法尻部に設置することにより、港内外に洗掘対策として設置された消波ブロックの安定化を図ることができる。 海底地盤の洗掘防止工の設置により、海底地盤の洗掘防止を図ることができる。 被覆工（法尻部）は、洗掘防止工の飛散防止としても有効である。

図 3-9 越流対策の断面設定例

3. 5 「設計津波」を超える規模の津波に対する「粘り強い構造」の検討

「設計津波」を超える規模の津波に対する防波堤の「粘り強い構造」の検討にあたっては、津波の規模に応じた防波堤の破壊形態と構造上の弱点について十分な検討を行った上で、その弱点部分に付加的な対策を施すことによって、「設計津波」を超える規模の津波に対しても可能な限り防波堤の全体安定性を損なわない「粘り強い構造」となるように、港湾の防護目標に応じて断面諸元を設定するものとする。

(解説)

(1) 防波堤に対する「粘り強い構造」の考え方

「設計津波」を超える規模の津波に対する防波堤の検討にあたっては、波浪及び「設計津波」に対して設定された断面に対して(3. 4参照)、外力としての津波の規模が「設計津波」を超えて段階的に大きくなっていくことを想定し、水理模型実験等も活用しながら、津波の規模に応じた防波堤の破壊形態と構造上の弱点について十分な検討を行った上で、施設の重要度や費用対効果等を踏まえつつ、その弱点部分に付加的な対策を施すことによって、「設計津波」を超える規模の津波に対しても防波堤が変形しつつも倒壊しない「粘り強い構造」とし、可能な限り防波堤の全体安定性が損なわれないようにする必要がある。

(2) 付加的な対策の段階的検討

「設計津波」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した場合、防波堤の越流規模は段階的に変化するため、防波堤構造に現れる弱点から構造被害が拡大していくものと考えられる。このため、防波堤の「粘り強い構造」を検討する際には、「設計津波」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、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3-10に段階的な対策検討のイメージ図を示す。横軸は、津波の規模を示している。縦軸は、「設計津波」に対して設定された防波堤断面を基準とした場合に、「設計津波」を超える規模の津波に対して防波堤を倒壊させないような「粘り強い構造」とするための付加的な対策(構造上の工夫)を行うために必要となる費用の増加イメージを示している。

図中において、防波堤Aは波浪が穏やかな条件下で設計された防波堤をイメージしており、波浪によって防波堤に作用する水平波力は「設計津波」による津波波力よりは大きい、「最大クラスの津波」による津波波力よりは小さい、というケースをイメージしている。この場合、「設計津波」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、すなわち波浪で決定している断面が耐えることができる津波の規模(図中、黒丸で示す点)に達すると、直立部の滑動などに対する安定性が急激に損なわれることになる。このため、この津波の規模を境として、さらに規模の大きな津波に対しては、防波堤背後に腹付工を設置する等の「粘り強さ」を確保するための大規模な構造上の工夫が必要になると考えら

れる。

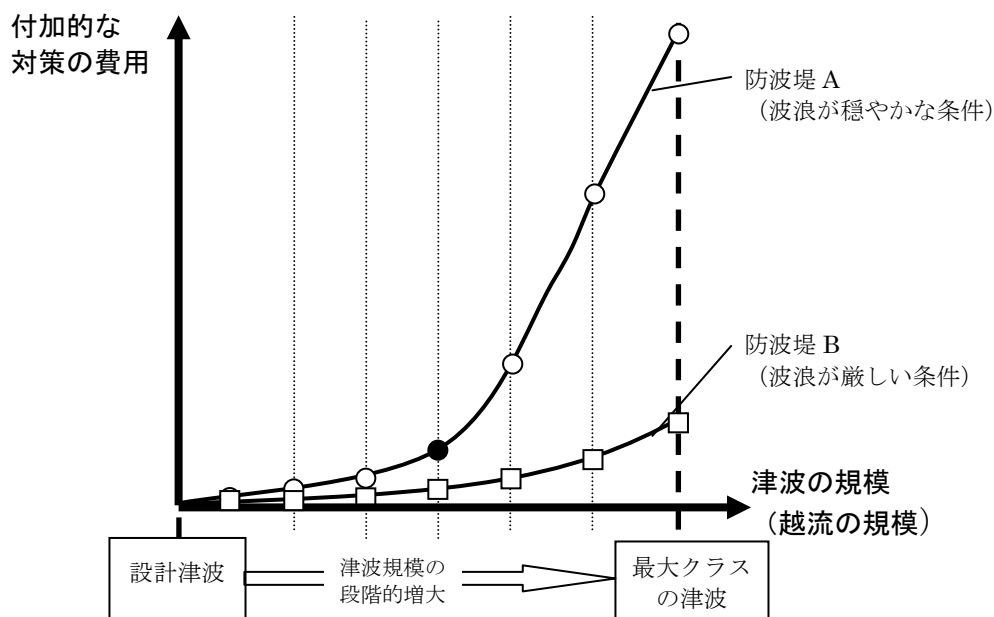


図 3-10 付加的な対策の段階的検討のイメージ

一方、防波堤 B は波浪が厳しい条件下で設計された防波堤をイメージしており、波浪によって防波堤に作用する水平波力は「最大クラスの津波」による津波波力と同等程度のケースをイメージしている。この場合は、最大クラスの津波に至る前の段階においても、直立部の滑動などに対する安定性は急激に損なわれず、越流に対する洗掘対策という小規模の構造上の工夫を施せば、「最大クラスの津波」に至るまで「粘り強さ」を保持できる可能性があると考えられる。

(3) 防波堤の「粘り強い構造」の効果の確認

防波堤の「粘り強い構造」の効果については、実際の変形モードを適切に評価した上で、防波堤の変形に対する安定性について確認する必要がある。特に、直立部と基礎マウンドの変形モードに関して、腹付工を施した場合、浸透流の影響がある場合、鋼管杭等により構造的な補強を施した場合、摩擦増大マット等により捨石を抱き込んだ場合等、様々な状況下における変形モードを適切に評価する必要がある。

しかしながら、現時点では、そのような変形モードに対する安定性を適切かつ定量的に評価することは困難であることから、簡便的・間接的な手法として、直立部の滑動・転倒や基礎の支持力（3. 4. 2 (1) b)）に示した照査式において、腹付工からの受動抵抗等を加味した形で津波波力に対してどの程度の余裕を有しているか、すなわち「3. 4. 2 (2) c)」に示す滑動安全率等が 1.0 を上回るレベルが「粘り強さ」の一つの目安になると考えられる。なお、このような「粘り強さ」の確認については、洗掘対策の効果の確認を含め、水理模型実験を用いて具体的な対策の有効性について確認することも検討する必要がある（参考資料Ⅲ、Ⅳ）。

最終的には、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、その対策の効果について慎重に検討を行い、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。

3. 6 今後の成果の取り込み

(1) 対応の方向

本ガイドラインは、防波堤を対象とした耐津波設計の基本的考え方を示したものであるが、その内容は現時点において得られている知見に基づくものであり、耐津波設計に係る様々な課題の全てが必ずしも明確になっているわけではない。

そのため、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重要であり、新たな知見が得られ次第、その成果を柔軟に本ガイドラインに反映していくこととしたい。

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る。

[堤体]

- ・津波越流時に側壁、底版、天端面に作用する波圧分布の特性
- ・津波に対する粘り強い構造の具体化（腹付け対策その他の構造的な対策等）

[上部工]

- ・天端形状の工夫による防波堤背後基礎マウンドの洗掘防止対策方法

[被覆工]

- ・防波堤背後の被覆工の工夫による洗掘防止対策工法
（追随性と耐久性のある被覆工）

[基礎マウンド・海底地盤]

- ・津波水位差による浸透流の評価手法
- ・浸透流が基礎の支持力と全体安定性に及ぼす影響の評価手法
（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。）

[地震動]

- ・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手法

[洗掘]

- ・海底面の洗掘・埋没のシミュレーション手法

[防波堤の線形]

- ・開口部、堤頭函及び隅角部に作用する津波波力及び速い流れが及ぼす影響の評価手法

(2) その他

本ガイドラインは、重力式の混成堤及び消波ブロック被覆堤を主たる対象としており、その他の構造形式への展開については今後の課題である。

また、港湾における防潮堤、水門、陸閘、胸壁等の耐津波設計の基本的考え方についても今後とりまとめていく予定である。

【参考文献】

(本文引用)

- ※¹⁾ 港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成19年), (社)日本港湾協会
- ※²⁾ 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
- ※³⁾ 後藤智明・吉田行秀・山木滋(1991), 湾口防波堤による津波波高の低減効果, 海岸工学論文集第38巻
- ※⁴⁾ 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
- ※⁵⁾ 富田孝史(2011), 港湾における津波被害、東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, pp.69-73
- ※⁶⁾ 港湾における地震・津波対策のあり方～島国日本の生命線の維持に向けて～, 交通政策審議会港湾分科会防災部会, 平成24年6月13日
- ※⁷⁾ 中央防災会議, 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告, 平成23年9月28日
- ※⁸⁾ 農林水産省・国土交通省, 設計津波の水位の設定方法について, 海岸における津波対策検討委員会
- ※⁹⁾ 野津厚(2012), 南海トラフの地震(Mw9.0)を対象としたSPGAモデルによる強震動評価事例, 土木学会第32回地震工学研究発表会講演論文集

(参考文献)

- 1) 国土交通省港湾局, 最大クラスの津波に対する防波堤の津波被害軽減効果評価手法検討業務 報告書
- 2) 平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方, 海岸における津波対策検討委員会, 平成23年11月16日
- 3) 東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会
- 4) 釜石港湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討ー水理特性を中心とした第一報ー, 港湾空港技術研究所資料 No.1251
- 5) 丸山草平・松本朗・半沢稔(2012)、防波堤港内側マウンド被覆材の津波に対する安定性に関する実験、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol. 68、No.2