

ISSN 1346-7328

国総研資料 第810号
平成26年9月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.810

September 2014

東北地方太平洋沖地震津波による 防潮壁の被災特性に関する検討

浅井 正

Characteristics of Damages of Coastal Protection Facilities in Ports due to the 2011 off the Pacific Coast of
Tohoku Earthquake and Tsunami

Tadashi ASAI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

東北地方太平洋沖地震津波による 防潮壁の被災特性に関する検討

浅井 正*

要 旨

東北地方太平洋沖地震津波では、設計津波を超える津波により多くの海岸保全施設が被災した。そこで、海岸保全施設のうち港湾内で一般的に用いられている防潮壁を対象にして、施設の種類や構造諸元、津波の諸元を用いて被災状況の傾向を分析した。分析の結果より、設計津波を超える津波による波力や越流により生じる洗掘が被災に与える影響が大きいと考えられたため、防潮壁の代表的な断面を設定して、天端を超える津波による越流の影響について、数値計算を行って検討を行った。

キーワード：東北地方太平洋沖地震，津波，被災調査，数値シミュレーション，越流，洗掘，海岸保全施設，防潮壁，被災メカニズム

*沿岸海洋・防災研究部沿岸防災研究室長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5024 Fax：046-844-5068 e-mail: asai-t92y2@ysk.nilim.go.jp

Characteristics of Damages of Coastal Protection Facilities in Ports due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami

Tadashi ASAI*

Synopsis

Coastal protection facilities were heavily damaged by tsunami larger than the design tsunami in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Therefore, the characteristics of damages to seawalls, which are a common type of coastal protection facility in port areas, are examined based on field survey data obtained after the Earthquake. Then the characteristics of the tsunami overflow exceeding seawall type of coastal structures and their effect on scouring are discussed through numerical analysis. Profiles of tsunami overflow and wave forces acting to the seawalls and to the ground surface behind them are examined to understand the failure mechanism.

Key Words : 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Tsunami, Damage Survey, Numerical Simulation, Overtopping Flow, Coastal Protection Facilities, Seawall, Failure Mechanism

*Head of Coastal Disaster Prevention Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-44-5024 Fax : +81-468-44-5068 e-mail:asai-t92y2@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 東北地方太平洋地震津波における防潮壁の被災状況およびその要因	1
2.1 検討方法	1
2.2 被災状況調査の概要	1
2.3 防潮壁の被災状況	2
2.4 防潮壁の構造諸元と津波諸元の関係	5
3. 防潮壁の被災に対する越流の影響に関する数値計算	6
3.1 防潮堤の被災に対する越流の影響	6
3.2 CADMAS-SURF 2Dによる越流の数値計算	6
3.3 洗掘形状が越流および堤体背後の流れに与える影響	7
3.4 堤体に作用する圧力	9
3.5 浸水深が越流および堤体背後の流れに与える影響	10
3.6 洗掘幅が越流および堤体背後の流れに与える影響	11
4. まとめ	12
謝辞	12
参考文献	12

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震による津波は、これまでに想定されていた津波高さをはるかに超える規模であった。この津波により、沿岸の施設は甚大な被害を受けた。対策を検討するにあたり、設計津波を超える津波による被災に対して、これまでの知見の蓄積がない。地震以降、さまざまな研究機関で検討が進められてきたが、海岸保全施設、とくに港湾でよく見られる防潮壁に対する検討事例がほとんどなく、被災のメカニズム等が明らかでない。

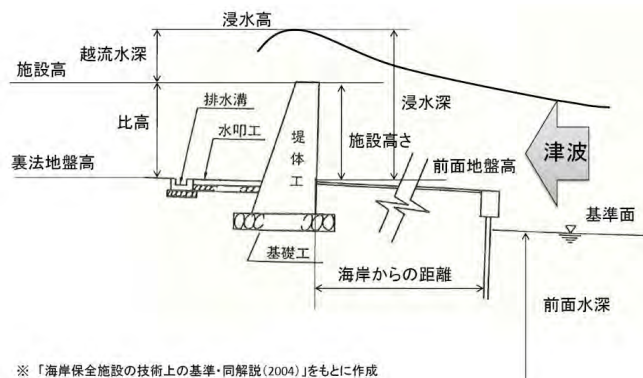
このため、東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設の被災調査結果に対して、施設の種類や構造諸元、津波の諸元を用いて被災状況の傾向を分析した。分析は、海岸保全施設のうち、港湾内で一般的に用いられている防潮壁を対象に行っている。分析の結果より、設計津波を超える津波による波力や越流により生じる洗掘が被災に与える影響が大きいと考えられたため、防潮壁の代表的な断面を設定して、天端を超える津波による越流の影響について、数値計算を行って検討し、被災のメカニズムや対策法について考察する。

本資料の構成は、以下のとおりである。はじめに、本研究の背景・目的を示す。次に、東北地方太平洋沖地震津波における防潮壁の被災調査結果をもとに、被災の状況およびその要因について検討する。そして、防潮壁の被災に対する津波越流の影響に関する数値計算を行って検討する。最後にこれらの検討で明らかになった事項についてとりまとめる。

2. 東北地方太平洋沖地震津波における防潮壁の被災状況およびその要因

2.1 検討方法

防潮壁とは、海岸法上の胸壁と同形式の構造物であり、港湾等の施設が海岸線に存在し、利用の面から海岸線付近に防護施設の設置が困難な場合に設置される。防潮壁の標準的な断面は図-2.1に示すコンクリート構造の堤体が多く、海岸線から離れた場所に設置される。このため、国総研・港空研による被災調査速報^{1)~3)}などでも、いわゆる三面張りの海岸堤防とは被災状況が異なることが報告されている。そこで、港湾等における防護施設の津波対策の考え方のとりまとめに向けて、防潮壁の被災に着目して被災状況調査データを収集し、被災パターンの分析を行った。



※「海岸保全施設の技術上の基準・同解説(2004)」をもとに作成

図-2.1 防潮壁の標準的な断面と各諸元の定義

2.2 被災状況調査の概要

岩手県、宮城県の防潮壁が設置されている港湾（岩手県4港、宮城県4港）を対象として、港湾管理者等が実施した被災状況調査のうち防潮壁の被災に関する結果を収集した。この時、施設台帳上は護岸等と記載がある施設についても、施設の海側に水たたき等の構造物がある場合には今回の調査結果に含めている。また、港湾における防潮壁の被災事例が少なかったため、漁港（岩手県30港、宮城県29港）の被災事例⁴⁾も対象とした。データの収集項目は表-2.1に示すとおりであり、分析の対象とした港湾および漁港の一覧は表-2.2に示すとおりである。

表-2.1 被災状況調査データの収集項目

	データ項目
施設名等	港名, 施設名
計画津波高	計画津波高
構造諸元	延長, 施設高, 裏法地盤高, 比高 (= (施設高) - (裏法地盤高)), 海岸線からの距離, 前面の水深
津波高	浸水高, 越流水深 (= (浸水高) - (施設高))
被災状況	被災延長 被災の種類 (移動/転倒/洗掘/沈下/クラック/目地開き/目地づれ等) 防潮壁前面および背後の舗装状況, 舗装厚み, 被災の有無

各港湾内の防潮壁延長と浸水高を表-2.3に示す。なお、浸水高は、防潮壁に痕跡が残されている場合にはその痕跡高を用いており、痕跡が残されていない場合には周辺で観測された浸水高を用いている。各データの下段のカッコ内の数字は同一市町村にある漁港（隣接漁港）の値を示している。港湾局所管海岸に占める防潮堤の防護延長は、岩手県では港湾局所管海岸延長の約15%、宮城県

では港湾局所管海岸延長の約 13%であり、両県の港湾局所管海岸延長の和 185km に対して約 14%であった。港湾内の浸水高は、松島港を除いて隣接漁港より小さな傾向にあった。津波伝播時に波高が低減する要因として、港湾は湾奥に立地するものが多いことや防波堤等の構造物が設置されていることによる遮蔽の影響が考えられる。

表-2.2 分析の対象とした港湾および漁港の一覧

港 湾	
(岩手県)	
久慈市	久慈
宮古市	宮古
釜石市	釜石
大船渡市	大船渡
(宮城県)	
気仙沼市	気仙沼
東松島市, 石巻市	石巻
塩竈市, 七ヶ浜市長, 仙台市	仙台塩釜
松島町	松島
漁 港	
(岩手県)	
洋野町	種市
田野畑村	島の越
宮古市	津軽石, 音部
山田町	織笠, 大沢, 船越, 山田
大槌町	大槌
釜石市	室浜, 桑ノ浜, 平田, 佐須, 箱崎, 白浜 (鵜住居), 両石, 小白浜, 釜石
大船渡市	小石浜, 蛸ノ浦, 泊里, 越喜来, 綾里, 門之浜, 大船渡
陸前高田市	只出, 根岬, 大陽, 広田, 長部
(宮城県)	
気仙沼市	鶴ヶ浦, 川原, 横沼, 駒形, 鮎立, 松岩, 波路上, 気仙沼
南三陸町	港, 田浦, ばなな, 葦浜, 細浦, 清水, 荒砥, 平磯, 水戸辺, 伊里前, 志津川, 波伝谷
石巻市	小淵, 給分, 侍浜, 雄勝, 桃の浦
松島町	磯崎
塩竈市	寒風沢
七ヶ浜町	菖蒲田
亘理町	荒浜

表-2.3 港湾内の防潮壁延長と浸水高さ
(下段のカッコ内は同一市町村にある漁港での値)

県	港名	防潮壁延長 (km)	浸水高 (m)		
			最大	最小	平均
岩手県	宮古港	1.406	9.58	9.58	9.58
		(0.736)	(13.84)	(13.84)	(13.84)
	釜石港	1.947	10.17	9.77	9.87
		(3.767)	(17.89)	(9.51)	(11.97)
	大船渡港	3.285	10.77	7.88	9.27
(3.576)		(16.37)	(8.72)	(12.14)	
久慈港	2.625	8.55	6.02	7.90	
		(-)	(-)	(-)	(-)
小計		9.263	港湾局所管海岸線延長の約 15%		
宮城県	気仙沼港	0.579	11.79	3.79	7.72
		(3.164)	(12.17)	(6.45)	(9.86)
	石巻港	3.813	6.27	3.43	4.62
		(1.520)	(16.25)	(7.66)	(12.57)
	仙台塩釜港	11.248	2.89	2.48	2.74
		(0.660)	(7.86)	(7.86)	(7.86)
	松島港	0.787	22.79	3.79	7.72
(0.329)		(2.21)	(2.21)	(2.21)	
小計		16.427	港湾局所管海岸線延長の約 13%		
合計		25.690			

2.3 防潮壁の被災状況

(1) 被災パターン分析

図-2.2 は被災パターン別に施設延長とその割合を示したものである。被災ありとされた施設の延長の割合は、対象全体の約 1/4 (24.9%) であった。このうち、比較的大規模な被災である移動及び転倒に限ると 9.1%であり、1割以下である。防潮堤は延長が数百 m から数 km の規模があり、堤体が 1箇所移動・転倒するとその部分に流れが集中し、開口部周辺に激しい洗掘が見られた。この場合、本調査では、移動・転倒した施設及びその周辺の洗掘を受けた施設のみの延長が、被災延長として計上される。

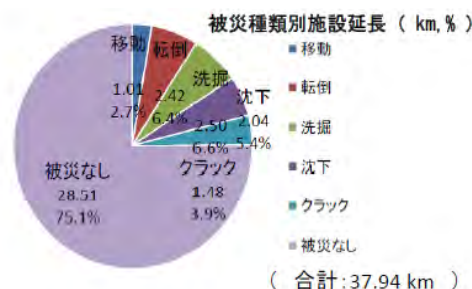


図-2.2 被災パターン毎の被災延長の割合

写真-2.1 に示す石巻港雲雀野地区の防潮堤（比高=1.4m）では、基礎地盤とともに堤体が流出していた。この施設は比較的小規模であり、先行する地震の影響でゆるんだ地盤に津波が来襲した可能性が考えられる。また、写真-2.2 に示す山田漁港の防潮壁は、堤体背後に越流によるものと思われる激しい洗掘の後が見られる。



写真-2.1 防潮壁の被災事例（石巻港雲雀野）



写真-2.2 防潮壁の被災事例（山田漁港）

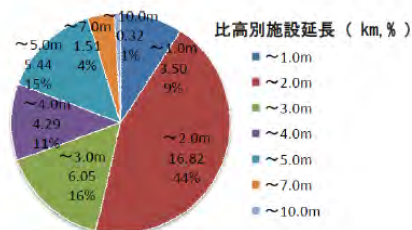
(2) 堤体の高さ（比高）が被災パターンに与える影響

図-2.3 (a) は堤体の高さの指標である比高別の施設延長の割合を示し、(b) は防潮壁の比高別の施設延長を示している。また、(c) は比高別に見た被災割合（施設延長ベース）を示している。

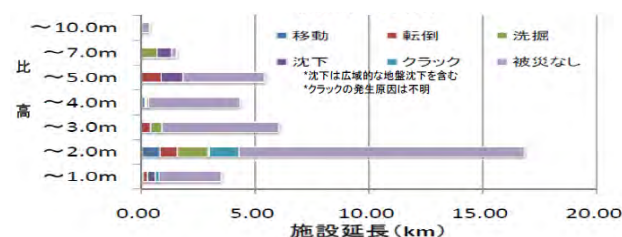
調査対象施設では、図-2.3 (a) 及び (b) より、比高 2.0m 以下の施設が 16.8 km であり、全体の 1/2 強 (53%) を占め、比高 5.0m 以下の施設が 95% を占めていた。

被災パターンについては、図-2.3 (c) より、比高が大きくなると津波による波力の作用点が高くなるため、滑動より転倒による破壊モードが支配的になると考えられるが、図から明確な傾向は見られない。比高が 5.0 m か

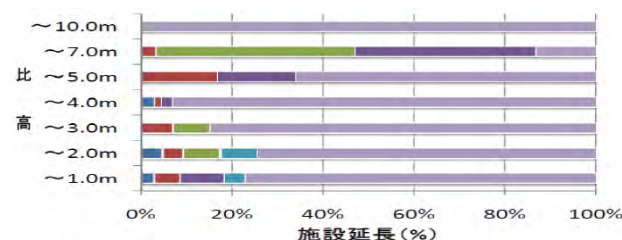
ら 7.0 m までの施設（「～7.0 m」と表記）においては、洗掘及び沈下による被災が施設延長割合として高い。比高が大きくなると越流の落差が大きくなるが、被災との関係は明確ではない。



(a) 比高別の被災延長割合



(b) 比高別の施設延長 (km)



(c) 比高別の被災パターンの割合 (%)

図-2.3 比高別にみた被災延長と被災パターン

(3) 津波高さ（浸水深）が被災パターンに与える影響

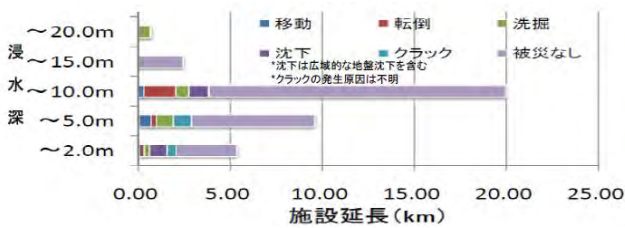
図-2.4 (a) は防潮壁上での津波高さを示す指標である浸水深別の施設延長の割合を示し、(b) は浸水深別の施設延長を示している。また、(c) は浸水深別に見た被災割合（施設延長ベース）を示している。

調査対象施設では、(a) 及び (b) より、浸水深が 5.0 m から 10.0 m までの施設（「～10.0 m」と表記）が 19.96 km (53%) であり最も長かった。また、浸水深が 5m 以下であった施設が全体の約 4 割 (39%) を占め、浸水深が 10m 以下の施設がほとんど (92%) であった。

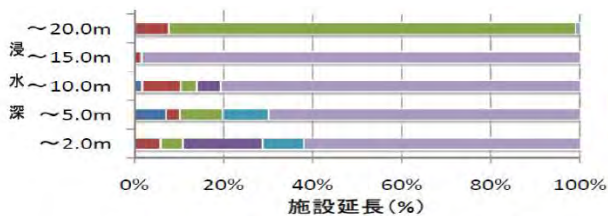
被災パターンについては、(c) より、全体として明確な傾向は見られない。浸水深が 15.0 m から 20.0 m までの施設（「～20.0 m」と表記）においては、大部分が洗掘で被災している。また、転倒で被災した施設及びその周辺の施設にも洗掘が見られる。



(a) 浸水深別の被災延長割合



(b) 浸水深別の施設延長 (km)



(c) 浸水深別の被災パターンの割合 (%)

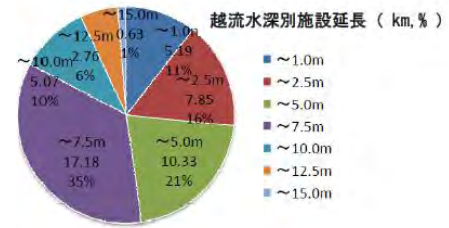
図-2.4 浸水深別にみた被災延長と被災パターン

(4) 天端上の越流 (越流水深) が被災パターンに与える影響

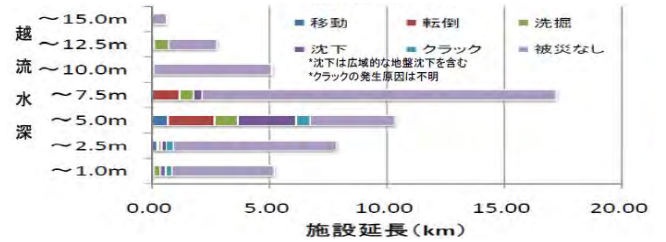
図-2.5 (a) は防潮壁天端上の越流の大きさを示す指標である越流水深別の施設延長の割合を示し, (b) は越流水深別の施設延長を示している. また, (c) は越流水深別に見た被災割合 (施設延長ベース) を示している.

(a)及び(b)より, 越流水深が 2.5m 以上の施設が 3/4 弱 (73%) であり, 5m 以上の施設が約 1/2 (52%) であった.

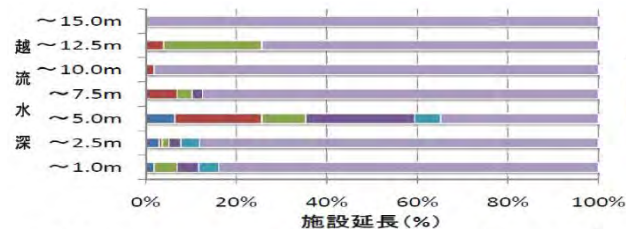
被災パターンについては, (c) より, 越流水深 2.5m 以上の施設 (「~1.0m」及び「~2.5m」を除いたもの) で被災の割合が比較的大きくなっているように見える. また, 越流水深が 5.0m から 12.5m までの施設 (「~7.5m」, 「~10.0m」, 「~12.5m」と表記) においては, 転倒または洗掘で被災している施設が多い.



(a) 越流水深別の被災延長割合



(b) 越流水深別の施設延長 (km)



(c) 越流水深別の被災パターンの割合 (%)

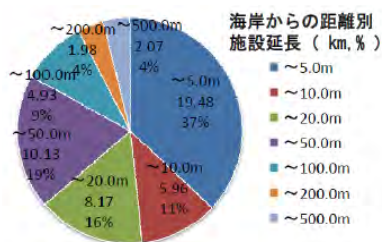
図-2.5 越流水深別にみた被災延長と被災パターン

(5) 海岸線からの距離が被災パターンに与える影響

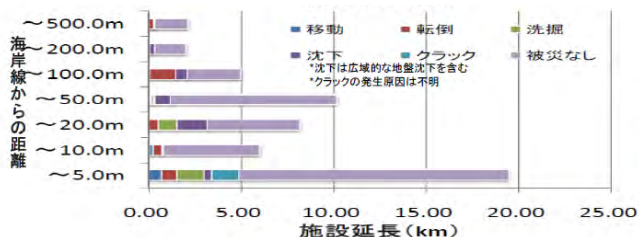
図-2.6 は防潮壁の海岸線からの距離別の施設延長を示し, (b) は海岸線からの距離別の施設延長の割合を示している. また, (c) は海岸線からの距離別に見た被災割合 (施設延長ベース) を示している.

(a) 及び (b) より, 海岸線から防潮壁の設置場所までの距離は最大で 500m であり, 海岸線からの距離が 100m 以下の施設が全体の 9 割強 (92%) を占め, 10m 以下の施設で約 1/2 (48%) であった.

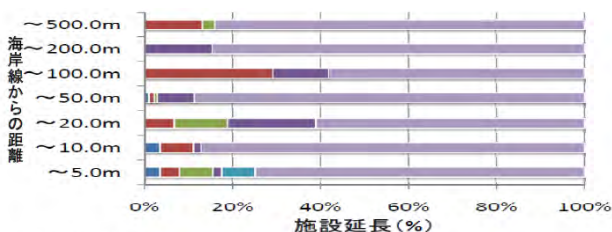
被災パターンについては, (c) より, 全体として明確な傾向は見られない. 海岸線からの距離が最大となる 200.0m から 500.0m までの施設 (「~500.0m」と表記) においても転倒による被災事例が見られている.



(a) 海岸線からの距離別の被災延長割合



(b) 海岸線からの距離別の施設延長 (km)



(c) 海岸線からの距離別の被災パターンの割合 (%)

図-2.6 海岸線からの距離別にみた被災延長と被災パターン

2.4 防潮壁の構造諸元と津波諸元の関係

防潮壁の被災時の状況を明確にし、被災のメカニズムを検討する資料とするため、防潮壁の構造諸元と津波諸元の関係についてグラフに示し、その傾向について考察した。検討にあたり、防潮堤の構造諸元の指標としては、堤体の規模や重心の位置、越流の落差を表す比高と遡上後の津波波力の低減を表す海岸線からの距離を用いた。津波の状態を表す指標としては、堤体上での津波高さを表す浸水深や、越流の規模を表す越流水深を用いた。

(1) 比高と浸水深の関係

図-2.7 は堤体の高さを示す指標である比高と防潮壁上の津波の高さの指標である浸水比の関係を示している。浸水深の変化に対する被災の発生状況については、ほとんどの施設で (浸水深) / (比高) は 1.0 を超え、津波が施設を越流していたことがわかる。

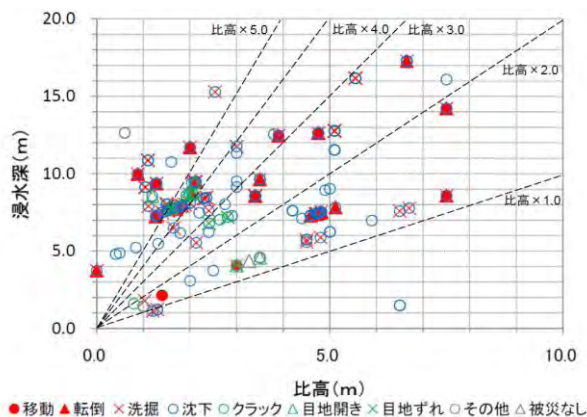


図-2.7 比高と浸水深の関係

(2) 比高と越流水深の関係

被災の拡大の要因と考えられる洗掘は、堤体の天端を越える流れが堤体背後の地盤に打ち付けられることにより発生する。図-2.8 は比高と越流水深の変化に対する被災の発生状況を示している。比高は { (越流水深) + (比高) } で無次元化し、越流が地盤に落下する高さを表している。比高が大きくなると、越流水深が小さな場合でも被災しており、越流の高さが大きくなることにより洗掘等が発生しやすくなっていることが考えられる。

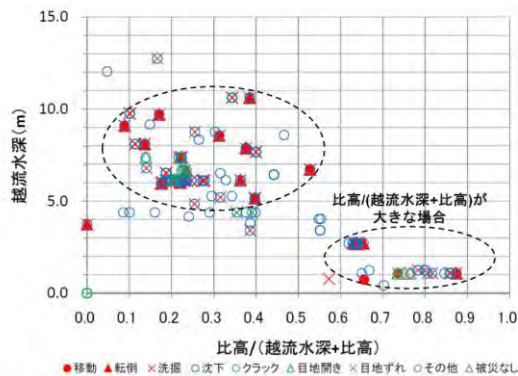


図-2.8 比高と越流水深の関係

(3) 海岸線からの距離の影響

図-2.9 は、海岸線からの距離と浸水深の関係を示している。浸水深は各施設に入射した津波痕跡高さの最大値を表している。海岸線からの距離による被災傾向の差は認められない。国土交通省住宅局⁵⁾は、今次津波による建築物の被災事例を分析し、堤防や前面の建築物等による軽減効果が見込まれる場合のうち海岸等からの距離が離れている場合 (500m 以上) は津波荷重が低減できるとしている。本論文の対象防潮壁は、沖合に防波堤が設置されているもののそのほとんどは海岸線からの距離

が 100m 以内にあり、津波波力の低減が期待できないと考えられる。

また、海岸線から 10m 以内に設置された施設では浸水深が小さくても被災する場合があります、前面の護岸や岸壁等を通する際の急激な水深の変化により衝撃的な波力が作用していることが考えられる。

図-2.10 は、海岸線からの距離と海岸線前後の水深変化の関係を示している。(浸水深) / { (浸水高) + (前面水深) } は、護岸や岸壁の前後の水深変化を表すパラメータであり、海岸線を通する際の波浪変形(砕波やエネルギー逸散等)の影響を表している。海岸線からの距離により、被災傾向に明確な差は認められない。このことは急激な水深の変化による被災への影響は、限定的であり、護岸や岸壁近傍のみで現れることを示すと考えられる。

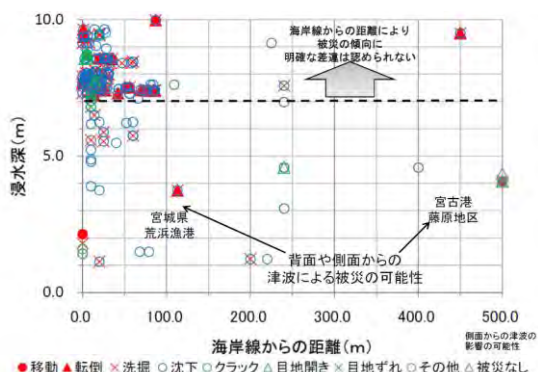


図-2.9 海岸線からの距離と浸水深の関係

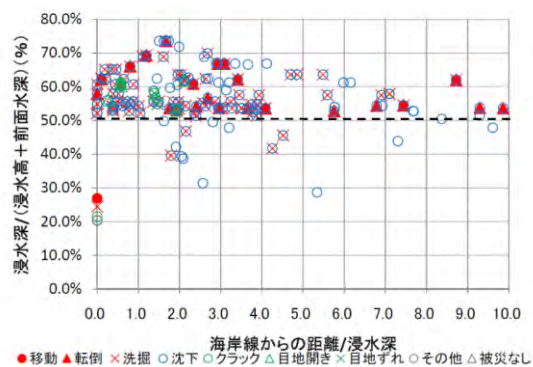


図-2.10 海岸線からの距離と海岸線前後の水深変化の関係

3. 防潮壁の被災に対する越流の影響に関する数値計算

3.1 防潮堤の被災に対する越流の影響

2. では、岩手県・宮城県の防潮壁の被災調査結果から、地盤面から天端までの高さが大きな場合に越流水深が小

さくても被災が発生する傾向を示し、その原因として防潮壁では越流の落差が大きくなることにより洗掘等が発生しやすくなっている可能性を示している。

越流による防波堤の被災メカニズムについては有川ら⁹⁾等、海岸堤防・護岸については加藤ら⁷⁾、八木ら⁸⁾等により検討が進められているが、防潮壁のように陸側の地盤に直接越流が打ち付けるような場合についての検討はなされていない。

そこで、以下の節では、防潮壁の被災メカニズムの検討のための基礎的な知見を得ることを目的として、堤体の天端から陸側の地盤に越流が発生した場合の数値計算を行い、越流時の堤体陸側の流況や堤体に作用する圧力分布を整理した。数値計算は、CADMAS-SURF 2D⁸⁾を用いて、津波により被災した防潮壁の断面形状をモデル化して、津波水位を数種類変えて検討を行った。洗掘形状による越流の流況や渦の発生、底面の圧力分布の差異について検討し、洗掘の進行やこれによる防潮壁の被災への影響について考察した。

3.2 CADMAS-SURF 2D による越流の数値計算

(1) 対象断面および計算領域

計算対象とした断面の諸元は、被災事例から押し波により被災し、堤体陸側に洗掘がみられた重力式防潮壁を抽出した。また、防潮壁および海側にある物揚場の形状は、メッシュ近似により設定した。対象断面の概要を図-3.1、構造物の諸元を表-3.1に示す。計算領域について

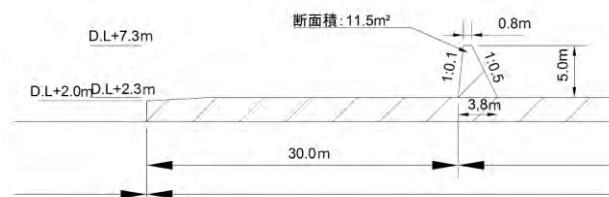


図-3.1 数値計算の対象断面

表-3.1 構造物の諸元

	設定条件
防潮壁	<ul style="list-style-type: none"> 天端高 : DL+7.3m 表法勾配 : 1 : 0.1 裏法勾配 : 1 : 0.5 岸壁地表面の高さ : DL+2.3m 岸壁から法先までの距離 : 30m
岸壁・物揚場	<ul style="list-style-type: none"> 天端高 : DL+2.0m 勾配 : 1/20
海底勾配	<ul style="list-style-type: none"> 水平

は、海側の領域を沖側から岸壁先端までの 150m、陸側の領域を岸壁先端から終端までの 94m に設定した。水平方向のメッシュ間隔は沖側から 165m の範囲を 0.5m 刻み、165m から 204m（防潮壁法先から海側に 15m の地点から陸側に 39m）の範囲を 0.1m 刻み、204m から陸側終端の範囲を 0.5m 刻みに設定した。

(2) 計算条件

数値解析では、海側の境界から津波を一様流で与え、法先前面の浸水深がほぼ一定になった状態の水位、流速および圧力値を算出した。浸水深は、岩手県津波防災技術専門委員会⁹⁾が現地調査結果にもとづき対象港湾内の津波の伝播を追算結果から現地の痕跡高さ(DL+9.6m)程度、防潮壁堤体の天端高(DL+7.3m)程度およびその中間の3種類とした。

それぞれの浸水深を与える流速 u は、予備計算の結果にもとづき、 $u=0.1\text{m/s}$ (浸水深 DL+7.66m)、 1.0m/s (同 DL+8.74m) および 2.0m/s (同 DL+9.65m) と設定した。岩手県(2011)の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によれば、現地の津波流速として $1.0\text{m/s}\sim 3.0\text{m/s}$ の範囲の値が得られており、妥当な値であると考えられる。

(3) 洗掘形状

数値計算では、堤体陸側の地盤が洗掘された場合の越流の状況を計算し、洗掘なしの場合との比較を行い、洗掘の進行にともなう堤体周辺の応力状態の変化について検討した。洗掘形状は固定して計算を行っている。津波被災時の洗掘状況に関する情報はほとんど得られていないため、正弦曲線、矩形、台形でそれぞれ近似した場合について計算した。端部の形状が計算結果に与える影響について流況等から検討し、被災時の堤体や地盤に作用する圧力の状態を議論した。

洗掘の最大深さ D については、越流により背後に生じる定在渦の直径に等しいと仮定して設定した。定在渦の直径については、野口ら¹⁰⁾が護岸を対象とした水理模型実験結果から提案した算定式(3-1)～(3-3)を用いて算出した。

$$R \sim g^{1/4} q^{1/2} z_f^{1/4} \tag{3-1}$$

$$D = 2.1R \tag{3-2}$$

$$q = 0.35 \eta \times (2g\eta)^{1/2} \tag{3-3}$$

ここで、 R : 洗掘深と等しいと仮定した定在渦の直径(m)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 q : 落下水の流量 ($\text{m}^3/\text{m/s}$)、

η : 越流水深(m)、 z_f : 護岸天端からの背後地盤面までの高さ(m)、 D : 最大洗掘深(m)であり、それぞれの定義は、図-3.2の模式図に示すとおりである。

洗掘幅 X については、鳩貝ら¹¹⁾が海岸堤防を対象とした水理模型実験の結果から得られた D と X の比 (X/D) を参考に設定した。ただし、鳩貝らの実験では緩傾斜の海岸堤防を対象にしているため、本研究では越流水の落下角度の補正を加えて $X/D=5.4$ と設定した。しかし、3.6に示すように、いくつかの計算結果で洗掘部の流れが不安定であったことや渦が水平方向に2つ見られたことなどから、その1/2の値である $X/D=2.7$ と再設定した。

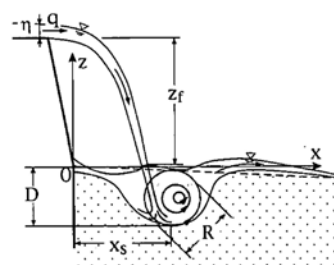


図-3.2 洗掘深さの設定に関する模式図¹⁰⁾

3.3 洗掘形状が越流および堤体背後の流れに与える影響

図-3.3の(a)～(d)は、それぞれ洗掘なし、洗掘あり(正弦近似)、同(矩形近似)、同(台形近似)の場合の越流状況に対する計算結果のスナップショットを示す。

3.5に示す計算結果の比較にもとづき、越流の流速は、 $u=2.0\text{m/s}$ としている。また、図-3.4の(a)～(d)は、それぞれの計算における水面形状(時間平均)ならびに水平方向の各位置での底面における圧力水頭、速度水頭および全水頭を示している。ここで、水平方向の原点は防潮壁表法先とし、原点から40m陸域背後地まで計測した。

設計津波をわずかに超える津波越流を与えた場合($u=0.1\text{m/s}$)、越流水深が小さく、越流が堤体の陸側側面に沿って流れ、地盤を打ち付けるような強い流れが発生しなかった。このため、越流による洗掘への影響は小さいと判断し、洗掘形状による影響の検討対象から外した。

洗掘なしの場合(図-3.3(a))は、越流が堤体陸側に放物線状に流出した後、陸側5m地点で地盤面に衝突して大きな乱れを形成している。圧力水頭は5m地点で急激に増加するが10m地点までに減衰する。10m地点以降、スナップショットでは流れに乱れがみられるが、図-3.4(a)～(d)に示されるそれぞれの水頭の値はほぼ一定である。

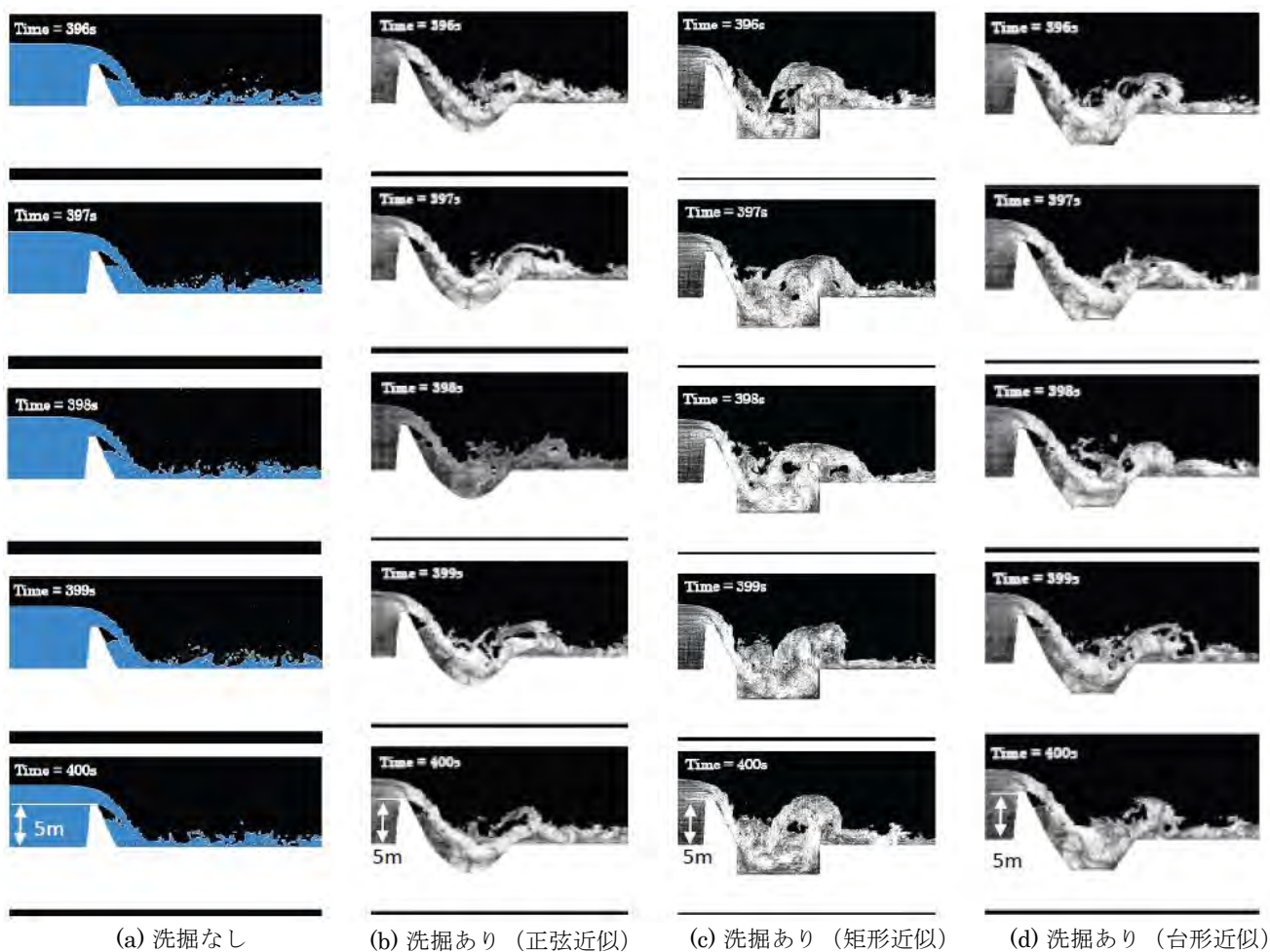


図-3.3 洗掘形状による越流の計算結果の比較

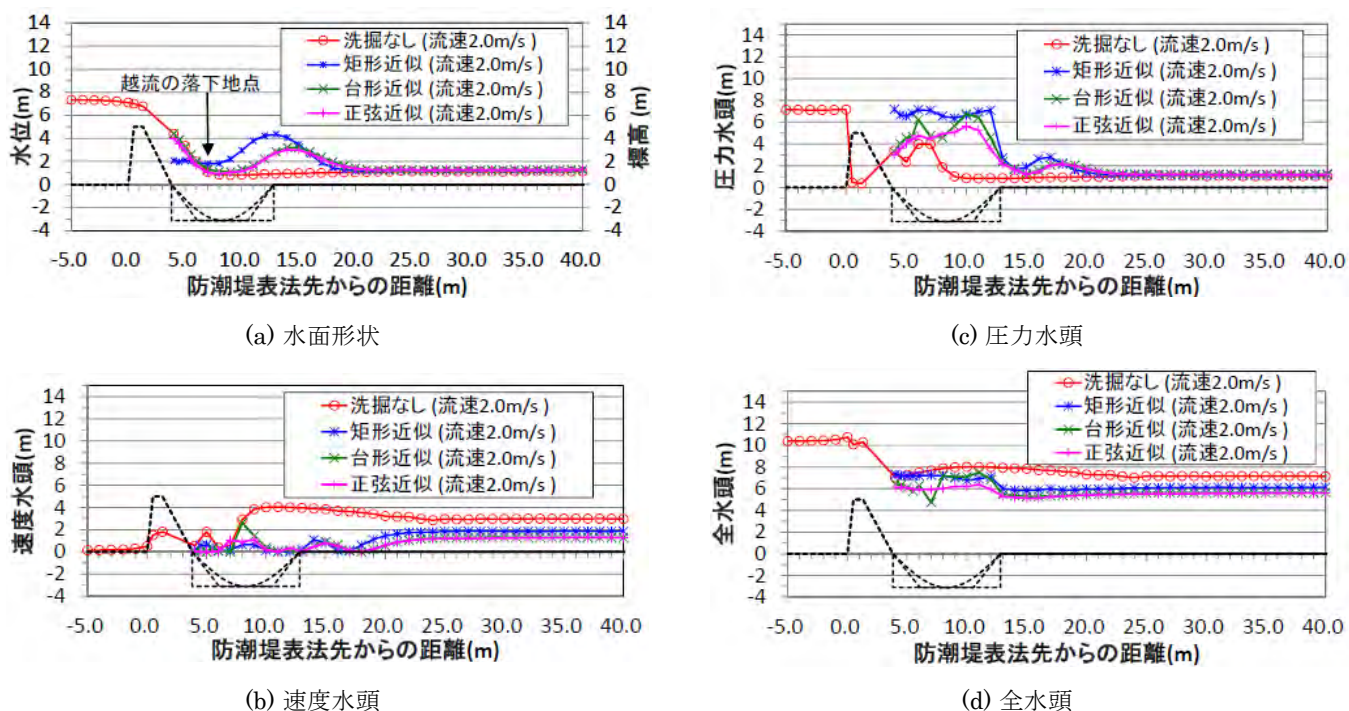


図-3.4 洗掘の有無による水面形状と水頭の比較

この状況は、津波の越流した流れが地盤に打ちつけている状態を示していると考えられる。図-3.4(a)に示す流れの落下場所と同地点において、図-3.4(c)に示す圧力水頭が最大になっており、この圧力に対して地盤から底質が浮遊もしくは流出する場合に洗掘が始まるものと考えられる。洗掘ありの場合では、図-3.3(b)に示す洗掘形状を正弦曲線で近似した場合では、洗掘部分に大きな渦が発生しているのが特徴的である。最大洗掘深さは 3.1m と設定している。渦部の方では水深が深くなるため圧力水頭が大きくなるが、洗掘なしの場合のような尖ったピークは見られない。速度水頭は、18m 地点以降で大きくなり、25m 地点以降はほぼ一定となる。その値は洗掘なしの場合の約 40%であった。渦によるエネルギーの散逸による影響と考えられ、乱れによる散逸のほか、堤体陸側の地盤面へ洗掘の原因となる運動量として与えられると考えられる。

洗掘形状を矩形や台形で近似した場合図-3.3(c) および(d)では、正弦曲線で近似した場合と同様な傾向が見られるが、洗掘部分の陸側端の 13m 地点でも乱れが発生する。乱れにより圧力水頭、速度水頭ともに上昇している。25m 地点以降の速度水頭は矩形近似では洗掘なしの場合の約 62%であり、台形近似では約 41%であった。

矩形近似や台形近似では、越流の落下地点や洗掘部の陸側端で圧力水頭が大きく、陸側端では水位の上昇もみられ、局所的に洗掘が進むと考えられる。正弦近似の場合は、圧力水頭が洗掘深さとほぼ同じなので静水圧程度の圧力となり、洗掘がほぼ安定した状態と考えられる。

3.4 堤体に作用する圧力

計算結果から得られる圧力をもとに、堤体の各面に作用する圧力分布を算出し堤体海側圧力、揚圧力、堤体陸側圧力、天端面圧力をそれぞれ整理した。そして、防波堤に対する津波波圧の式である谷本式¹²⁾、水工研提案式⁷⁾および静水圧差から堤体の各面に作用する波力を算出し、比較した。堤体の各面に作用する圧力のイメージを図-3.5 に示す。堤体の揚圧力を計算するため、3.3 で検討した堤体と同一形状の堤体について、下面を透水性のある捨石地盤と仮定して再計算した。

図-3.6 の(a)~(d)は、それぞれ洗掘なしの断面について越流の流速 $u=2.0\text{m/s}$ とした場合の堤体海側圧力、揚圧力、堤体陸側圧力および天端面圧力の計算結果を示している。

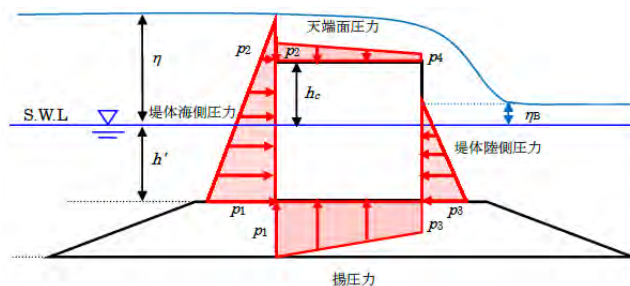
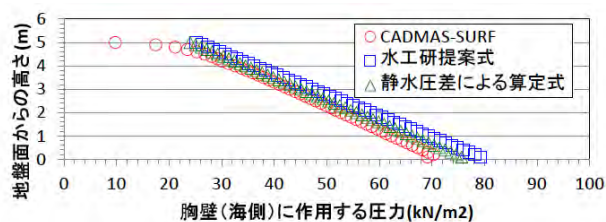
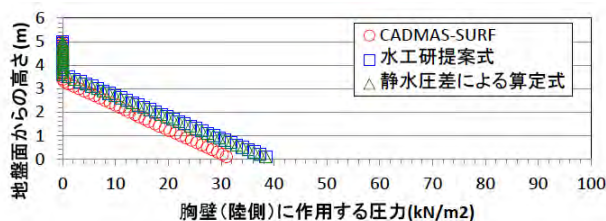


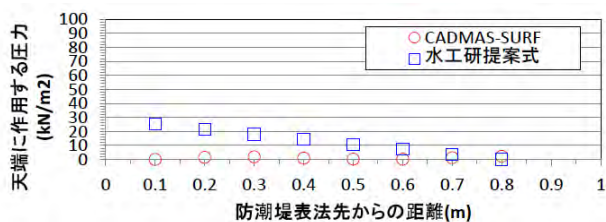
図-3.5 堤体価格面に作用する圧力のイメージ



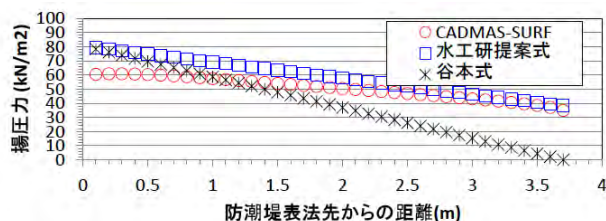
(a) 防潮壁堤体側面（海側）に作用する圧力



(b) 防潮壁堤体側面（陸側）に作用する圧力



(c) 防潮壁天端面に作用する圧力



(d) 防潮壁に作用する揚圧力

図-3.6 防潮壁各面に作用する圧力

堤体海側圧力および堤体陸側圧力は、天端付近で計算値と波力公式の値はよく一致しており、堤体の滑動や転倒の検討に活用できると考えられる。詳細に見ると、堤体の上端および下端で水工研提案式および静水圧は計算結果より大きくなっている。堤体に作用する波力（圧力の積分値）は海側および陸側でそれぞれ計算結果の約 1.1 倍、約 1.3 倍である。堤体に沿った流れが生じるため、計算結果では圧力が小さくとなると考えられる。

天端面の波力は、計算値とくらべて波力公式の値は約 12 倍になり、大きな値となった。これは側面の圧力が上端で小さくなるのと同じく、流れの影響と考えられる。天端面圧力は滑動抵抗力を増大させる方向にはたらくため、波力公式の値は危険側の値になっており、今後、水理模型実験等で妥当性を確認する必要がある。

揚圧力については、谷本式は堤体の陸側端でゼロと仮定しているため、全体的に小さな値を示している。また、水工研提案式は堤体の海側端で大きな値となり、波力で約 1.3 倍の値になっている。

図-3.7 は、堤体海側圧力、堤体陸側圧力、天端面圧力および揚圧力をそれぞれ積分して得た数値計算結果と波力公式の波力を示す。波力公式は水工研提案式を用いている。いずれの値も波力公式の方が今回の数値計算の値より大きくなっており、安全側になっている。

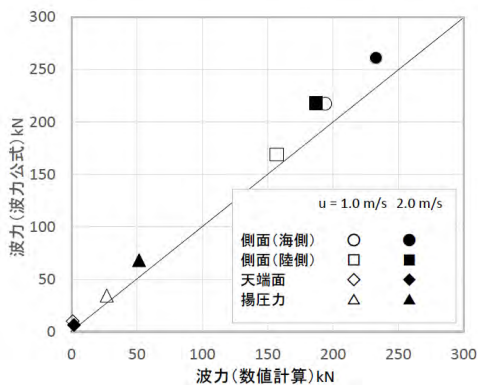


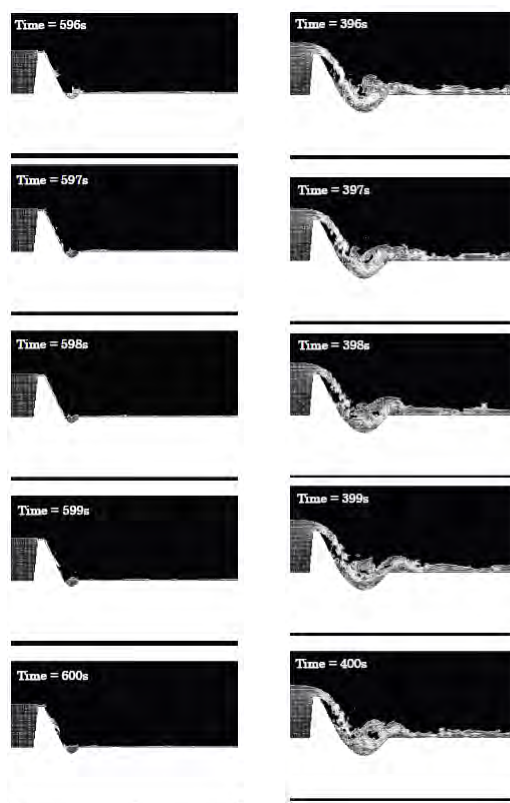
図-3.7 数値計算結果と波力公式の波力の比較

3.5 浸水深が越流および堤体背後の流れに与える影響

図-3.8 の(a)および(b)は、洗掘あり（正弦近似）の場合でそれぞれ $u=0.1\text{m/s}$ （浸水深 DL+7.66m）および 1.0m/s （同 DL+8.74m）の場合の計算結果のスナップショットを示す。いずれも堤体幅は $x/D=2.7$ としている。

浸水深が小さく堤体の高さとはほぼ同じである（DL+7.66m）場合は、越流する量が小さく天端を超えた後も

堤体陸側の側面に沿って流れている。洗掘箇所では、窪んでいる部分をあふれた水がわずかな乱れをとめないながら流れていく様子が見られる。これに対して、浸水深が大きな場合（DL+8.74m）は、天端を越えた流れが陸側の側面から剥離して後方に流れており、その落下点はほぼ洗掘箇所の中央である。洗掘部分に落下した流れは渦を形成した後、乱れをとめないながら後方に流れている。この傾向は、図-3.3 (b)に示すさらに浸水深が大きな場合（DL+9.66m）でも同じである。

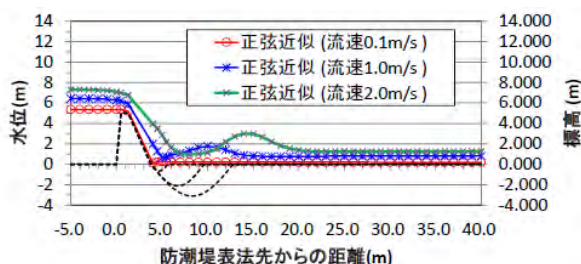


(a) 浸水深が小さい場合 ($u=0.1\text{m/s}$) (b) 浸水深が大きい場合 ($u=1.0\text{m/s}$)

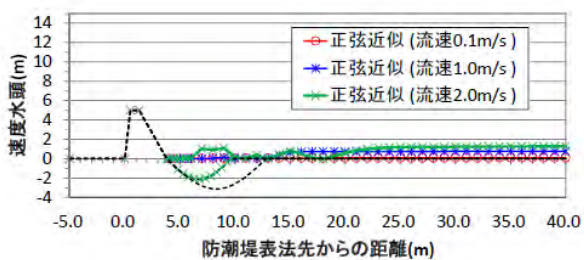
図-3.8 浸水深が越流等を与える影響

洗掘あり（正弦近似）場合の水面形状ならびに水平方向の各位置での底面における圧力水頭、速度水頭および全水頭をそれぞれ図-3.9 の(a)~(d)に示す。図の各諸元の算定方法は、図-3.4 と同じである。図-3.9(a)より、 $u=0.1\text{m/s}$ の場合は水位がほぼフラットであることがわかる。これに対して、 $u=1.0\text{m/s}$ および 2.0m/s の場合は、それぞれ洗掘部上の 12m 地点と 16m 地点で水面にピークができています。洗掘部を過ぎた流れはほぼ水平になっている。図-3.11 の(b)の速度水頭も水面ピーク地点で小さくなり、その後ほぼ一定となっている。図-3.11 の(c)の圧力水頭は、 $u=0.1\text{m/s}$ 、 1.0m/s および 2.0m/s のいずれの場合

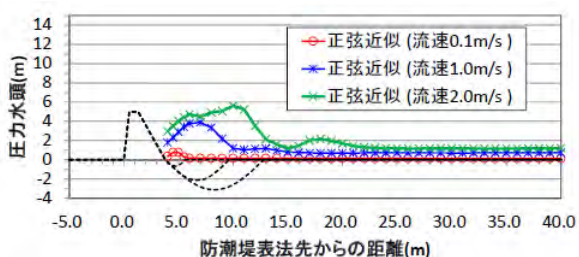
合でも、洗掘部の中央部分でピークとなっている。



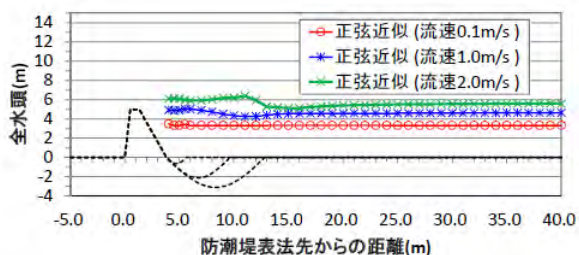
(a) 水位：浸水深による影響 ($X/D=2.7$)



(b) 速度水頭：浸水深による影響 ($X/D=2.7$)



(c) 圧力水頭：浸水深による影響 ($X/D=2.7$)



(d) 全水頭：浸水深による影響 ($X/D=2.7$)

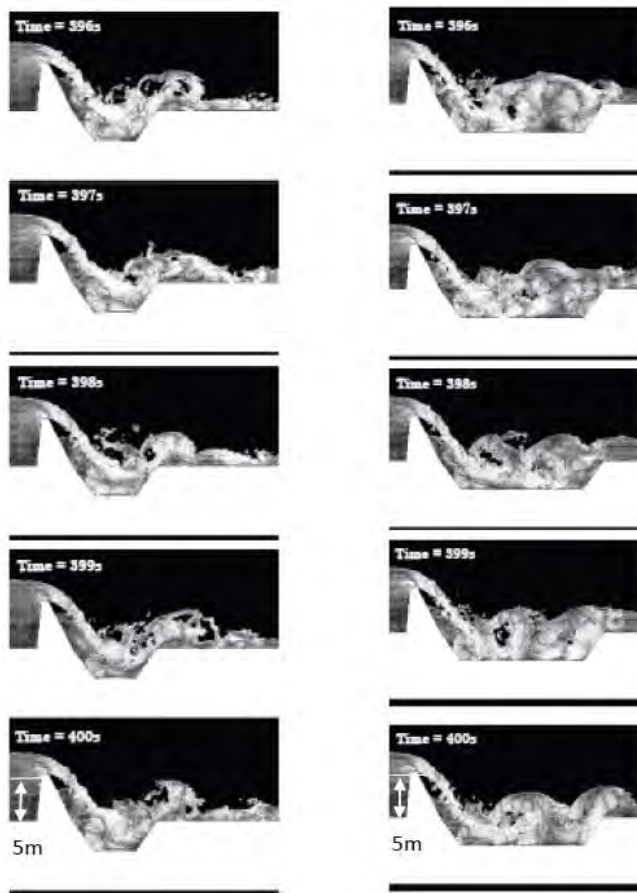
図-3.9 洗掘幅が水位形状や水頭に与える影響 ($X/D=2.7$ の場合)

3.6 洗掘幅が越流および堤体背後の流れに与える影響

図-3.10の(a)および(b)は、洗掘あり(台形近似)の場合でそれぞれ $X/D=2.7$ および 5.4 の場合の計算結果のスナップショットを示す。いずれも越流の流速

$u=2.0\text{m/s}$ である。

洗掘幅が短い ($X/D=2.7$) 場合は、洗掘部に渦が1つ形成され、洗掘部の直後で水位が大きくなった後、乱れを形成しながら後方に流れる。洗掘幅が長い ($X/D=5.4$) 場合の計算結果では、洗掘部の流れが不安定であり、水平方向に渦が2つみられる。

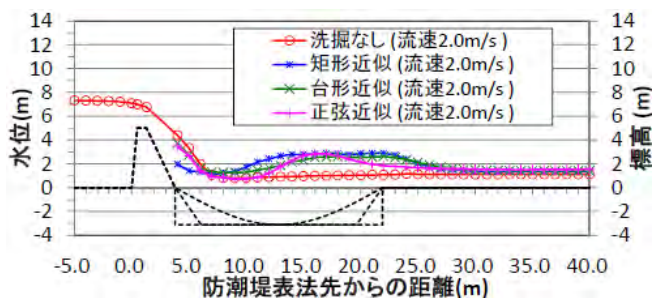


(a) 洗掘幅が短い場合 ($X/D=2.7$)

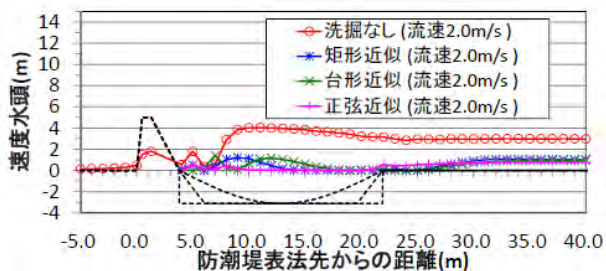
(b) 洗掘幅が長い場合 ($X/D=5.4$)

図-3.10 洗掘幅が越流等に与える影響

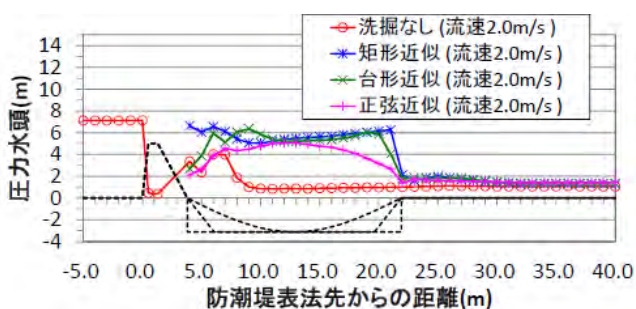
$X/D=5.4$ の場合の水面形状ならびに水平方向の各位置での底面における圧力水頭、速度水頭および全水頭をそれぞれ図-3.11の(a)~(d)に示す。図の各諸元の算定方法は、図-3.4と同じである。図-3.11(a)より、洗掘部上の17m地点と22m地点の2箇所水面にピークができています。また、図-3.11(c)よりピークの部分で圧力は減少している。実際の現象では、水面がピークになる場所では越流した流れが滞留するため、その地点で地盤の洗掘が緩やかになり、安定した洗掘形状になると考えられ、現象の再現には洗掘幅の設定も重要であると考えられる。



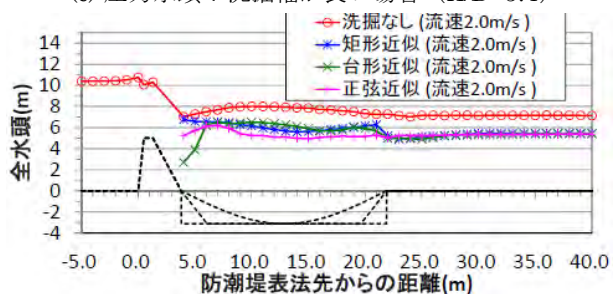
(a) 水位：洗掘幅が長い場合 ($X/D=5.4$)



(b) 速度水頭：洗掘幅が長い場合 ($X/D=5.4$)



(c) 圧力水頭：洗掘幅が長い場合 ($X/D=5.4$)



(d) 全水頭：洗掘幅が長い場合 ($X/D=5.4$)

図-3.11 洗掘幅が水位形状や水頭に与える影響 ($X/D=5.4$ の場合)

4. まとめ

本研究では、重力式の防潮壁を対象に、現地での被災調査結果にもとづき、その特性を整理するとともに、天端を超える津波による越流を用いた数値計算により再現し、防潮壁への作用圧力、防潮壁陸側の洗掘に影響するエネルギー変化について整理し、被災メカニズムへの影

響について検討した。得られた知見についてまとめると以下のとおりである。

- (1) 防潮壁の被災パターンについて、堤体の高さ、津波の高さ、越流の状況、海岸線からの距離との関係を明らかにし、被災の拡大を防ぐために洗掘対策が重要であることを示した。さらに被災における越流および海岸線からの距離の影響について考察した。
- (2) 洗掘がない場合、越流の落下地点で圧力水頭が大きくなり、洗掘の進行に寄与すると考えられる。洗掘がある場合、とくに正弦近似した場合には、圧力水頭が静水圧程度であった。洗掘部で発生する渦のためエネルギー散逸が大きくなり、堤体陸側の速度水頭は洗掘なしと比べて約40%であった。
- (3) 防潮壁堤体に作用する圧力分布の形状は水工研提案式でよく表現できたが、積算値と比較すると側面で計算結果の1.1~1.3倍、天端部で約12倍であり、滑動の検討において過大評価となっている可能性がある。
- (4) 洗掘形状や洗掘幅により数値計算で得られる越流や圧力の状態は変化する。越流による堤体陸側地盤への影響を適切に評価するためには、実際の現象にあわせて洗掘形状を適切に与える必要がある。

(2014年9月1日受付)

謝辞

最後に、港湾の被災調査データの入手にあたっては、国土交通省港湾局、東北地方整備局、岩手県、宮城県の各位には多大な協力をいただいた。漁港の被災調査データについては水産庁からご提供いただいた。データのとりまとめにあたっては、前沿岸防災研究室の永廣迪研究員に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 戸田和彦, 菊池喜昭, 菅野高弘, 栗山善昭, 山崎浩之, 長尾毅, 下迫健一郎, 根木貴史, 菅野甚活, 富田孝史, 河合弘泰, 中川康之, 野津厚, 岡本修, 鈴木高二朗, 森川嘉之, 有川太郎, 岩波光保, 水谷崇亮, 小濱英司, 山路徹, 熊谷兼太郎, 辰巳大介, 鷲崎誠, 泉山拓也, 関克己, 廉慶善, 竹信正寛, 加島寛章, 伴野雅之, 福永勇介, 作中淳一郎, 渡邊祐二: 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, 200p., 2011.

- 2) 熊谷兼太郎, 渡邊祐二, 長尾憲彦, 鮎貝基和 : 2011年東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設の被害調査, 国土技術政策総合研究所資料 No. 658, 39p., 2012.
- 3) 熊谷兼太郎, 永廣迪, 浅井正, 宮田正史, 松田茂, 鷲谷忠彦, 鎌木雅之 : 2011年東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設の被害調査(その2), 国土技術政策総合研究所資料, No. 781, 50p., 2014.
- 4) 水産庁ほか : 平成 23 年度海岸保全施設設計条件等緊急調査報告書, 2011
- 5) 国交省住宅局長 : 津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等にかかる追加的知見について(技術的助言), 国住指第 2570 号, 2011.
- 4) 海岸における津波対策検討委員会 : 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, 2011.
- 5) 有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・巖駿 : 津波越流時における防波堤の安定性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.916-920, 2013.
- 6) 加藤史訓・野口賢二・諏訪義雄・木村晃・河合雅史・高木利光・小俣雅志 : 東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野南部での海岸堤防被災・洗掘に関する調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1396-1400, 2012.
- 7) 八木宏・杉松宏一・中山哲巖・西敬浩・三上信雄・佐々木崇之・林健太郎 : 東北地方太平洋沖地震津波による漁港施設(防波堤)の被災状況とその原因について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1341-1345, 2012.
- 8) 一財 沿岸技術研究センター : CADMAS-SURF 実務計算事例集, 沿岸技術ライブラリー, No.30, p.220-227, 2008.
- 9) 岩手県 : 第 6 回岩手県津波防災技術専門委員会参考資料(岩手県 HP より), 2011.
- 10) 野口賢二・佐藤慎司・田中重信 : 津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集第 44 巻, pp.296-300, 1997.
- 11) 鳩貝聡・諏訪義雄・加藤史訓 : 津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.406-411, 2012.
- 12) 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野晋・平石哲也 : 1983 年日本海中部地震津波の実態と二, 三の考察, 港湾技術研究所資料, No.470, pp.299, 1983.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 810 September 2014

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018