

# 国土技術政策総合研究所 プロジェクト研究報告

PROJECT RESEARCH REPORT of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.52

June 2016

津波からの多重防御・減災システムに関する研究

Research on Multiple Protection and Mitigation Systems against Tsunami-induced Disasters

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

津波からの多重防御・減災システムに関する研究

諏訪 義雄 (2011.4 ~ 2015.3) \*

Research on Multiple Protection and Mitigation Systems  
against Tsunami-induced Disasters

Yoshio SUWA (2011.4 ~ 2015.3) \*

概要

東日本大震災のような大規模な津波に備えるには、ハード・ソフト施策の総動員する「多重防御」による「減災システム」が必要である。

本研究は、①東日本大震災の実態調査、②津波外力の設定、③海岸・河川における津波防護方策の開発、④津波ハザード評価・氾濫流制御の研究、⑤避難・危機管理支援、土地利用等による安全性向上・減災方策の研究を行うことを目的に、平成 23 年度から平成 26 年度までの 4 年間実施した。本報告は、その研究成果をまとめたものである。

キーワード : 津波、多重防御、減災、海岸、河川、建築、都市計画、避難

Synopsis

Preparing for a large-scale tsunami, like the 2011 Great East Japan Earthquake, requires disaster mitigation systems with multiple protection, combining both structural and non-structural measures.

This four-year project research, started in FY 2011, aims at understanding the 2011 Great East Japan Earthquake, determining tsunami load, developing tsunami adaptation methods along coast and river, assessing tsunami hazard, researching flood control methods on land and researching improvement of safety and disaster mitigation methods with evacuation / risk management support and land use.

Key Words : Tsunami, Multiple Protection, Disaster Mitigation, Coast,  
River, Building, Urban Planning, Evacuation

## 目 次

### プロジェクト研究実施者名簿

1. 研究の概要	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究内容	1
1.3 研究体制	2
1.4 研究スケジュール	3
2. 津波災害実態調査	5
2.1 津波痕跡調査	5
2.2 地形変化調査	10
2.3 海岸堤防被災調査	18
2.4 河川堤防被災調査	31
2.5 建築物被害調査	37
2.6 都市防災拠点機能の喪失・回復等の実態調査	44
2.7 2章のまとめ	51
3. レベル1津波・レベル2津波の設定方法	53
3.1 既往津波痕跡調査整理	53
3.2 設計津波高設定法	54
3.3 3章のまとめ	57
4. 海岸線等における津波防護方策	58
4.1 海岸堤防の被災分析	58
4.2 越流に対する構造上の工夫の検討	74
4.3 河川への津波遡上対策	102
4.4 4章のまとめ	116
5. 陸地における氾濫流制御等による減災方策	118
5.1 津波ハザードの評価手法	118
5.2 氾濫流制御による被害軽減の試算	121
5.3 自然・地域インフラの活用可能性	127
5.4 5章のまとめ	141
6. 避難、危機管理支援、土地利用等による安全性向上・減災方策	142
6.1 避難ビルの構造上の要件等に係る基準の見直し	142
6.2 予想津波高に応じた津波浸水域検索システム	149

6.3 避難安全性評価手法、減災のための市街地整備計画手法開発 .....	155
6.4 津波防災都市づくりにおける防災拠点機能の確保策の検討 .....	162
6.5 6章のまとめ .....	167
7. 研究成果と今後の取り組み .....	168
謝辞 .....	169
付録	
(1) 研究成果・所外発表論文等一覧 .....	170
(2) 広報・技術支援実績一覧 .....	176
(3) 参考論文一覧 .....	178

プロジェクト研究実施者名簿

所属	役職	氏名	担当期間	担当
河川研究部 河川研究室	室長	服部 敦	H23.4～H27.3	2章、4章、7章
	主任研究官	福島 雅紀	H23.4～H26.3	
	主任研究官	松浦 達郎	H24.4～H26.3	
	主任研究官	森 啓年	H26.4～H27.3	
	研究官	鈴木 宏幸	H26.4～H27.3	
	研究員	中村 賢人	H26.4～H27.3	
河川研究部 海岸研究室	室長	諏訪 義雄	H23.4～H27.3	研究総括、1章～ 7章
	主任研究官	加藤 史訓	H23.4～H26.6	
	主任研究官	竹下 哲也	H26.7～H27.3	
	主任研究官	山田 浩次	H23.4～H25.3	
	主任研究官	野口 賢二	H23.4～H24.3	
	研究官	鳩貝 聡	H23.4～H25.3	
	研究官	渡辺 国広	H23.4～H27.3	
	研究官	姫野 一樹	H25.4～H27.3	
建築研究部 基準認証システム 研究室	室長	深井 敦夫	H23.4～H25.3	2章、6章、7章
	室長	安藤 恒次	H25.4～H27.3	
	主任研究官	壁谷澤 寿一	H24.4～H27.3	
都市研究部 都市計画研究室	室長	木内 望	H26.4～H27.3	2章、6章、7章
都市研究部 都市防災研究室	室長	木内 望	H23.4～H26.3	2章、6章、7章
	室長	竹谷 修一	H26.4～H27.3	
総合技術政策研究 センター 建設経済研究室	室長	竹谷 修一	H23.4～H26.3	
	主任研究官	岩見 達也	H23.4～H26.3	

# 1. 研究の概要

## 1.1 研究の背景と目的

東日本大震災では、東北地方太平洋沖地震に起因する大規模な津波の発生で甚大な被災が生じた。このような大規模津波に備えるには、ハード整備だけでは限界があることからハード・ソフト施策を総動員する「多重防御」による「減災システム」が必要である。

このため、本研究は、東日本大震災の教訓を踏まえた多重防御による減災システム構築を行う上で必要となる①津波災害実態調査、②レベル1津波・レベル2津波外力の設定方法、③海岸線等における津波防護方策、④陸地における津波ハザード評価・氾濫流制御等、⑤避難・危機管理支援、土地利用等による安全性向上・減災方策に関する研究を行うことを目的としたものである。

## 1.2 研究内容

本研究は、以下の内容から構成される。

- ①「津波災害実態調査（2章）」では、東北地方太平洋地震における津波痕跡、海岸堤防の被災実態、津波による海岸部の地形変化、避難実態調査に基づく避難行動分析等を現地調査等により把握し今次津波の教訓を整理した。
- ②「レベル1津波・レベル2津波の設定方法（3章）」に関する研究では、既往津波の痕跡調査結果の整理や津波シミュレーションを用いてレベル1、レベル2の2段階の津波外力を設定する手順・方法を取りまとめた。
- ③「海岸線等における津波防護方策（4章）」に関する研究では、海岸堤防の被災分析・越流や地震に対する解析・水理実験を通じて既往海岸堤防の構造別破壊曲線の試作、耐力を高める構造上の工夫を取りまとめた。また、水理実験を通じて河川への津波遡上に対する考え方を整理した。
- ④「陸地における津波ハザード評価・氾濫流制御等（5章）」に関する研究では、津波ハザードの評価と避難地の設定やゾーニングを行うために必要な津波浸水シミュレーションの標準的手法を手引きとして取りまとめた。また、二線堤や盛土等による氾濫流制御の効果と制御施設に必要な安全性能を取りまとめた。
- ⑤「避難、危機管理支援、土地利用等による安全性向上・減災方策（6章）」に関する研究では、市街地における安全確保のための避難ビルの構造上の要件等に係る基準の見直し、頻度の高い津波の津波警報や避難指示・勧告等の防災情報の信頼性を高めることに寄与する予報津波高と施設状況に対応した浸水範囲を迅速に表示できる津波浸水域検索システムの開発、車両避難を考慮した避難安全性を評価できる津波避難シミュレータと津波防災都市づくりのための防災拠点機能の確保策の検討を行った。

本報告書における各研究項目と、代表的な成果との関連について、図-1.2.1に示す。

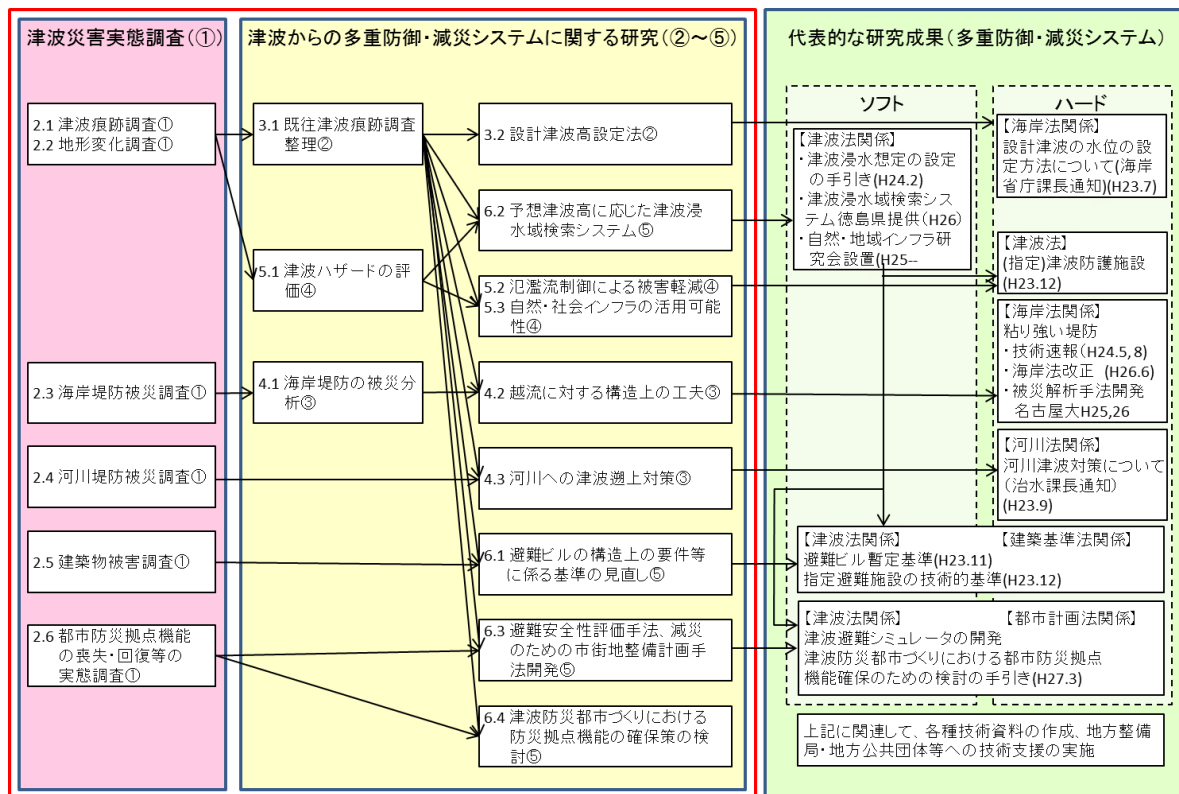


図-1.2.1 本研究の各項目の関連図（赤枠が本研究成果）

### 1.3 研究体制

研究体制について、図-1.3.1 に示す。所内では河川研究部、都市研究部、建築研究部、防災・メンテナンス基盤センター（旧総合技術政策研究センター）（建設経済研究室）がそれぞれ研究課題を持ち、連携しながら参画した。また、津波防災地域づくり法等の法令、関連技術指針類の検討主体である本省関係課とも連携するとともに、東日本大震災の復旧・復興や、南海トラフ巨大地震等に対する津波防災地域づくりに資するため、地方公共団体や地方整備局に対し、技術支援を行った。また、学会との意見交換や、検討委員会の設置等による学識者との連携を図った（図-1.3.2）。

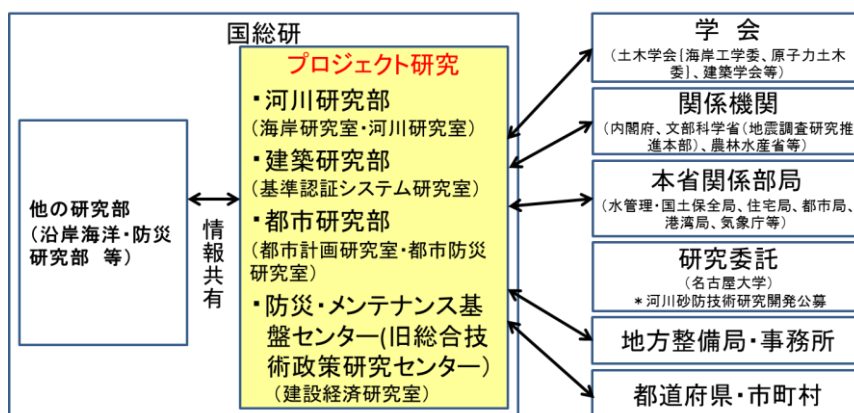


図-1.3.1 研究体制

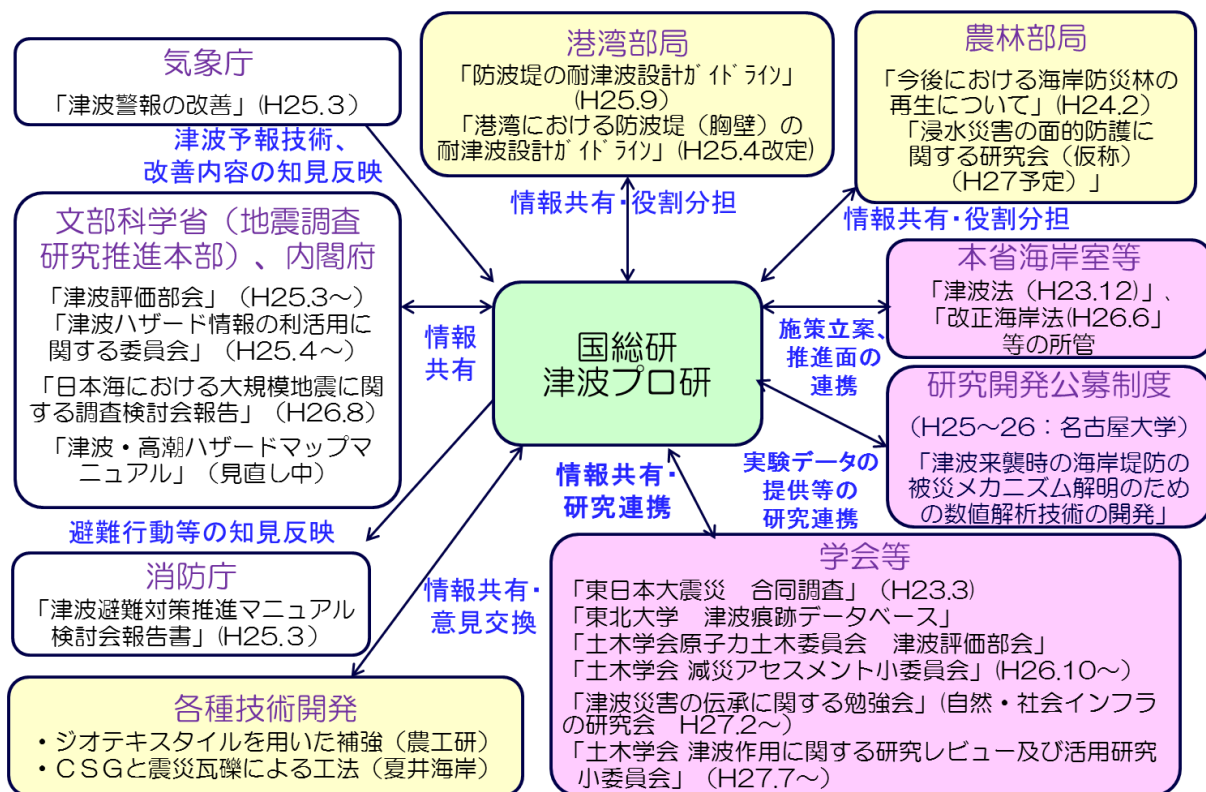


図-1.3.2 他機関等との連携

#### 1.4 研究スケジュール

本研究のスケジュールを表-1.4.1に示す。東日本大震災の復旧・復興への支援についてはその緊急性に鑑み、H23年度で大部分の成果を得て復旧・復興に反映した。また、被災地のみならず東海・東南海・南海等西日本の津波対策検討等の事態の進展に応じて、研究範囲の見直し等について柔軟に対応した。



表-1.4.1 研究スケジュール

区分	実施年度				
	H22	H23	H24	H25	H26
①津波災害実態調査	実態調査、被災分析				
②レベル1津波・レベル2津波の設定方法	既往津波痕跡調査整理	設計津波高設定法			
③海岸線等における津波防護方策（海岸堤防の津波越流対策）	海岸堤防の被災分析	越流に対する構造上の工夫			
③海岸線等における津波防護方策（河川への津波遡上対策）			河川への津波遡上対策		
④陸地における氾濫流制御等による減災方策	津波ハザードの評価	氾濫流制御による被害軽減の試算	自然・地域インフラ活用可能性		
⑤避難・危機管理支援、土地利用等による安全性向上・減災方策	避難ビルの構造上の要件等に係る基準の見直し	予想津波高に応じた津波浸水域検索システム	避難安全性評価手法、防災拠点機能の確保策検討		

## 2. 津波災害実態調査

### 2.1 津波痕跡調査

#### 2.1.1 調査方法及び調査項目

国総研では、2011年の東北地方太平洋沖地震による津波直後の3月19～20日に、仙台平野において海岸研究室直営で津波痕跡調査を行った。地面から痕跡までの高さ(浸水深)を測定したものに、LP(レーザプロファイラー)測定データ等で測定した地面の高さを足して津波痕跡の標高を得た。津波の高さと浸水深、痕跡高(=浸水高)、遡上高の関係を図-2.1.1に示す。

仙台平野については地盤の高さは震災後のLP測定データを用いているので地盤沈下も考慮されているものである。国総研の技術指導の下、国土交通省仙台河川国道事務所が実施した痕跡調査(2011年3月30日～4月7日)から、仙台平野内の痕跡データを補完した。仙台河川国道事務所の痕跡調査は、石巻平野、北上川下流においても実施された。

なお、当該調査は土木学会等との合同調査により実施し、得られた津波痕跡は、東北大学津波痕跡データベースに登録され、都道府県が設定する津波浸水想定や設計津波水位の検討の際に活用されている。

当該調査結果の詳細は、国総研資料第646号「平成23年東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報」<sup>1)</sup>に掲載しているが、本報告では、その概要について以下に述べる。

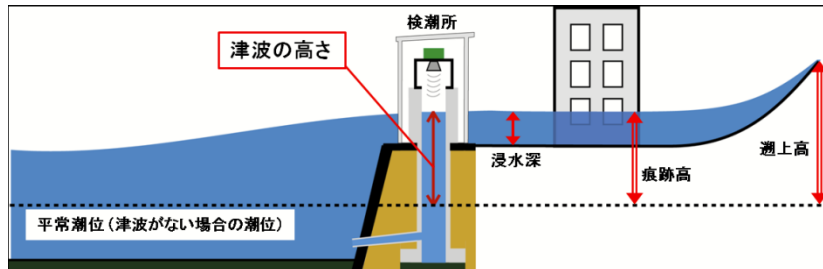


図-2.1.1 津波の高さ、浸水深、痕跡高、遡上高 (出典：気象庁ホームページ)

#### 2.1.2 津波遡上痕跡特性の把握

測定した痕跡調査結果をもとに、仙台平野、石巻平野において津波痕跡水深及び痕跡標高断面分布を整理した。図-2.1.2は仙台平野における海岸研究室と仙台河川国道事務所の痕跡水深測定結果すべてを横軸に堤防からの距離をとってプロットしたものである。図から痕跡水深が遡上方向に減衰していることがわかる。測定した痕跡水深を津波来襲時の潮位または震災後のLPデータから標高に補正し、図-2.1.3に示す16の遡上方向測線で痕跡標高の断面分布図を作成した。結果を図-2.1.4～図-2.1.19に示す。図-2.1.4の仙台新港背後測線から図-2.1.15の吉田浜測線までは痕跡標高も遡上方向に減衰していることが読み取れる。図-2.1.16の笠野海岸測線から図-2.1.19の磯浜漁港測線までは遡上に伴う減衰が見られなくなる。これは、平地が狭くなり遡上距離が短くなるためと考えられる。

津波・高潮ハザードマップマニュアル(平成16年4月、内閣府・農林水産省・国土交通省)では、浸水予測手法の一つとして、想定される浸水量を陸上に一律に湛水させる手

法（レベル湛水法）が例示されているが、水勢による遡上や建物等による遡上低減が考慮されないため、最大クラスの津波浸水想定の設定においては、これらの事項が考慮できる津波浸水シミュレーションの必要性が今回の調査を通じて改めて確認できた。

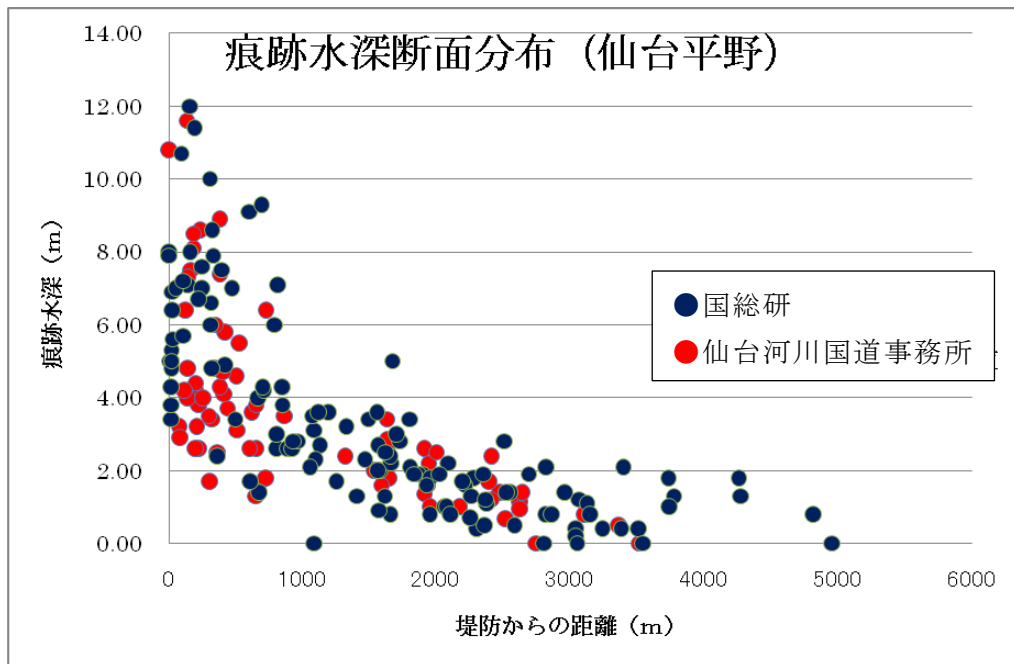


図-2.1.2 仙台平野の痕跡水深断面分布



図-2.1.3 断面分布測線 (仙台平野)

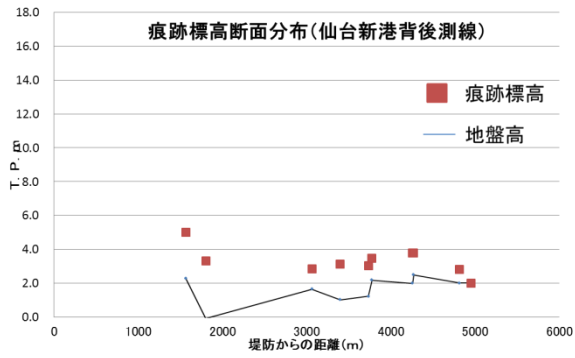


図-2.1.4 痕跡標高断面分布(仙台新港背後測線)

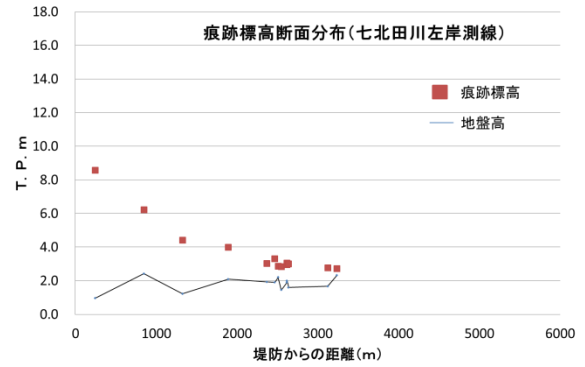


図-2.1.5 痕跡標高断面分布(七北田川左岸測線)

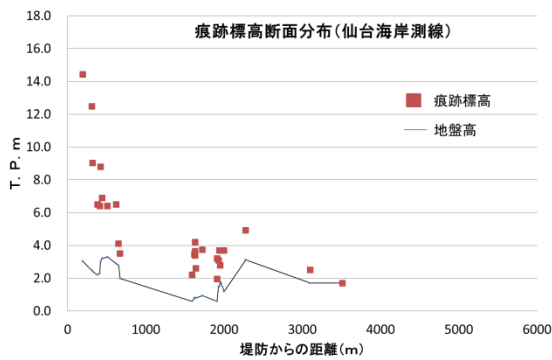


図-2.1.6 痕跡標高断面分布(仙海岸測線)

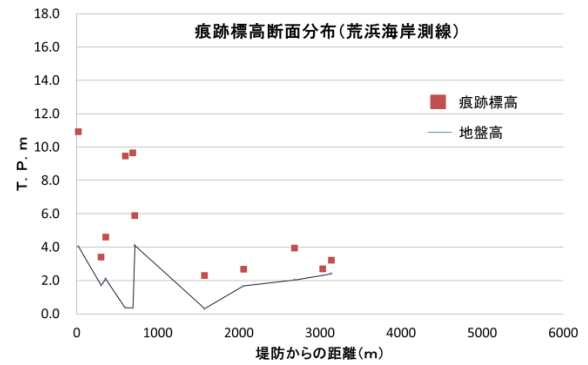


図-2.1.7 痕跡標高断面分布(荒浜海岸測線)

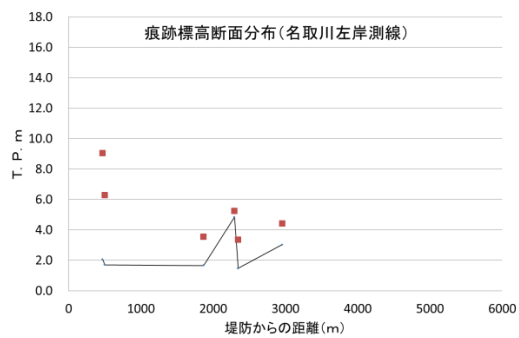


図-2.1.8 痕跡標高断面分布(名取川左岸測線)

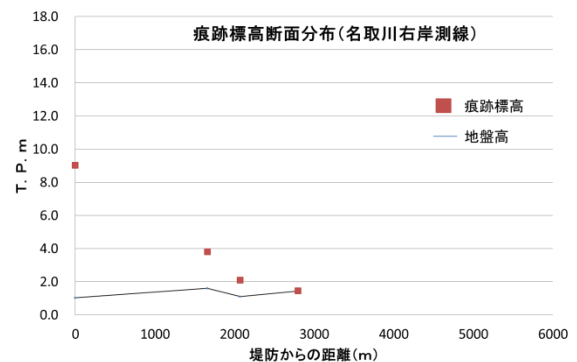


図-2.1.9 痕跡標高断面分布(名取川右岸測線)

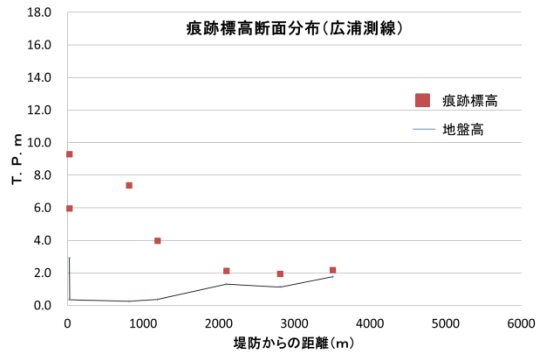


図-2.1.10 痕跡標高断面分布(広浦測線)

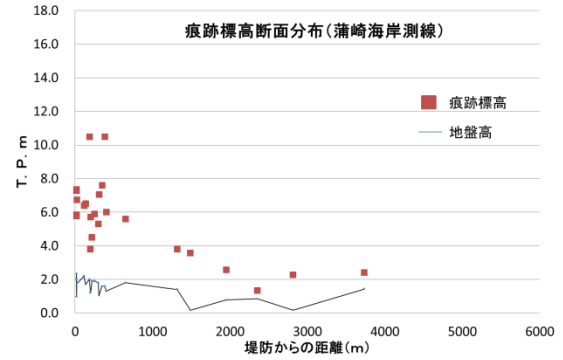


図-2.1.11 痕跡標高断面分布(蒲崎海岸測線)

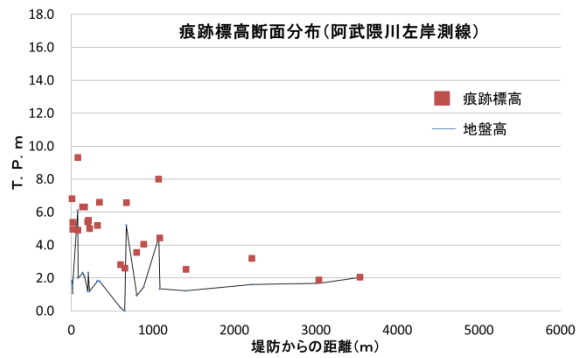


図-2.1.12 痕跡標高断面分布(阿武隈川左岸測線)

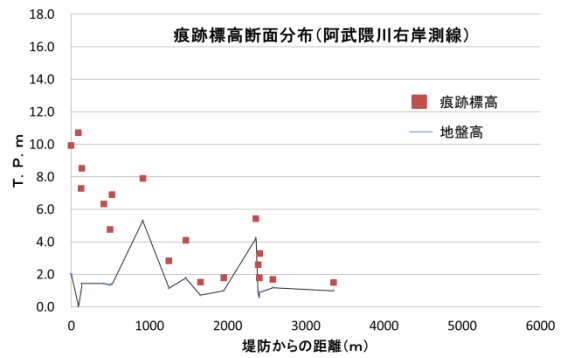


図-2.1.13 痕跡標高断面分布(阿武隈川右岸測線)

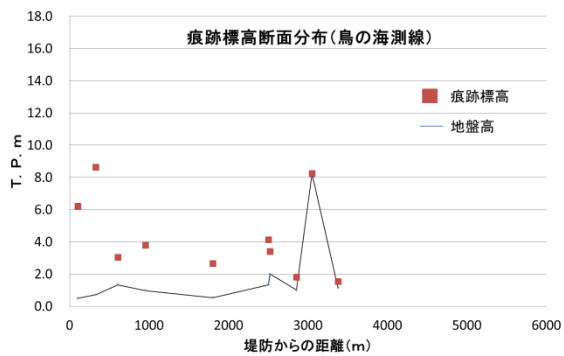


図-2.1.14 痕跡標高断面分布(鳥の海測線)

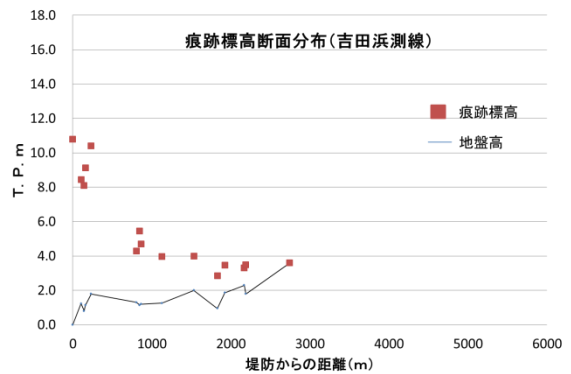


図-2.1.15 痕跡標高断面分布(吉田浜測線)

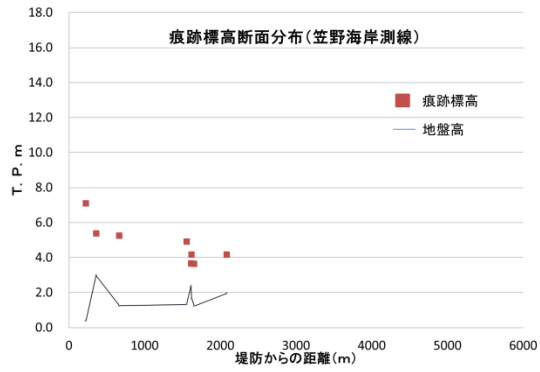


図-2.1.16 痕跡標高断面分布（笠野海岸測線）

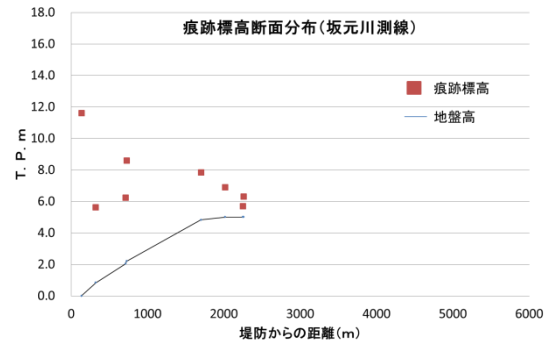


図-2.1.17 痕跡標高断面分布（坂元川測線）

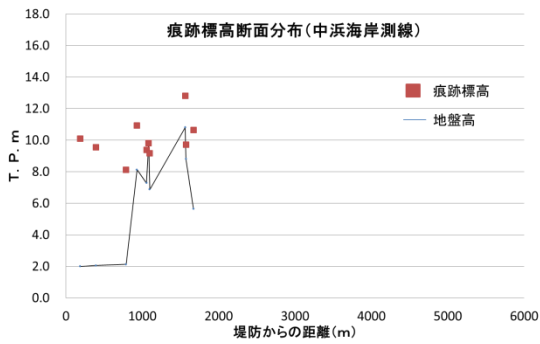


図-2.1.18 痕跡標高断面分布（中浜海岸測線）

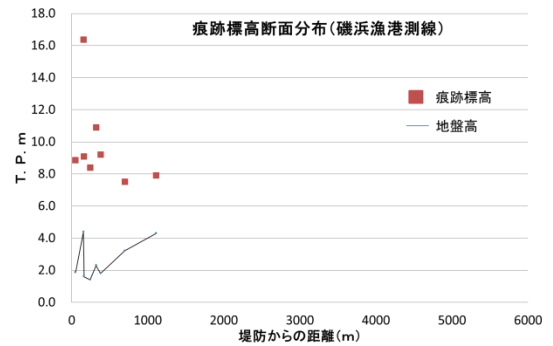
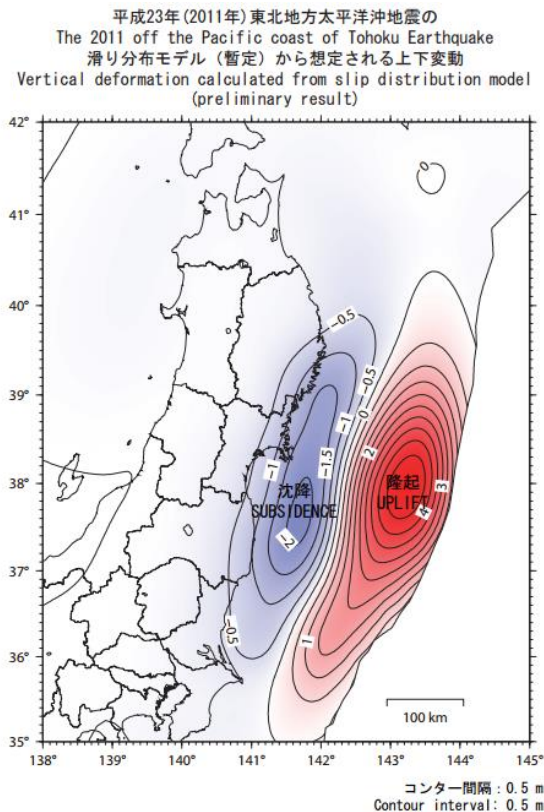


図-2.1.19 痕跡標高断面分布（磯浜漁港測線）

## 2.2 地形変化調査

今回の津波の波源は、岩手県から福島県にかけて延長が長くかつ海底地盤変動も広範囲にわたっていた<sup>2</sup>。このため、岩手県・宮城県では陸地が沈降域と重なり津波来襲前に地盤沈下が生じたことが特徴として挙げられる(図-2.2.1, 2.2.2)。

地盤沈下は、津波浸水想定における浸水深や浸水範囲に大きな影響を与えるため、最大クラスの津波浸水想定の設定にあたっては、地震による地盤沈下を計算上考慮する必要があることが分かった。



※この上下変動図は、電子基準点(GPS連続観測点)データからプレート境界面上での滑り分布モデルを推定し、そのモデルから想定される上下変動の推定値を図示したものです。従って実際の変動量とは必ずしも一致するものではありません。

国土地理院  
Geospatial Information Authority of Japan

図-2.2.1 東北地方太平洋沖地震の  
想定上下変動

また、被災箇所について、地形変化を調査<sup>3</sup>したところ、堤防が決壊した箇所について海岸線の後退が多く見られた。図-2.2.3, 2.2.4は岩手県船越南海岸の津波前後の写真であるが、破堤及び海岸線の後退が見られた。また、図-2.2.5, 2.2.6は宮城県仙台平野沿岸であるが、干潟の前面に存在していた砂浜や河口砂州等背後に堤防・護岸がない砂浜が津波後に消失している事例が見られた。

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における断層運動と上下変動の関係

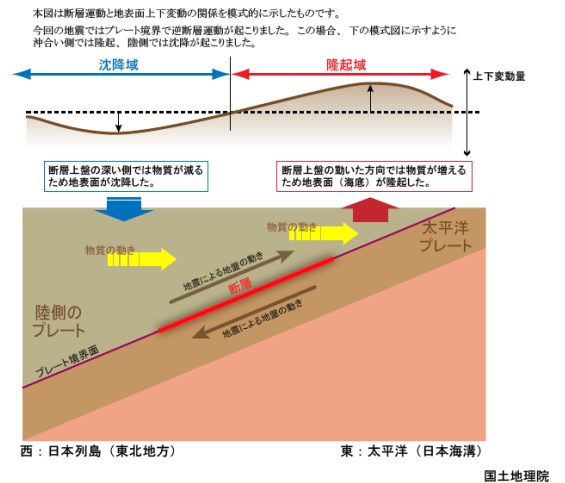


図-2.2.2 東北地方太平洋沖地震の  
断層運動と上下変動の模式図



図-2.2.3 岩手県船越南海岸津波前空中写真

[画像データ:Google, GeoEye, ZENRIN, Geocentre Consulting]



図-2.2.4 岩手県船越南海岸津波後空中写真

[画像データ:Google, GeoEye, ZENRIN, Geocentre Consulting]



## 下水処理場から仙台港



図-2.2.5 仙台平野沿岸（七北田川北側干潟）空中写真（左：津波前、右：津波後）

## 閉上漁港から北貞山運河



図-2.2.6 仙台平野沿岸（名取川北側干潟）空中写真（左：津波前、右：津波後）

■空中写真による海岸線の変遷

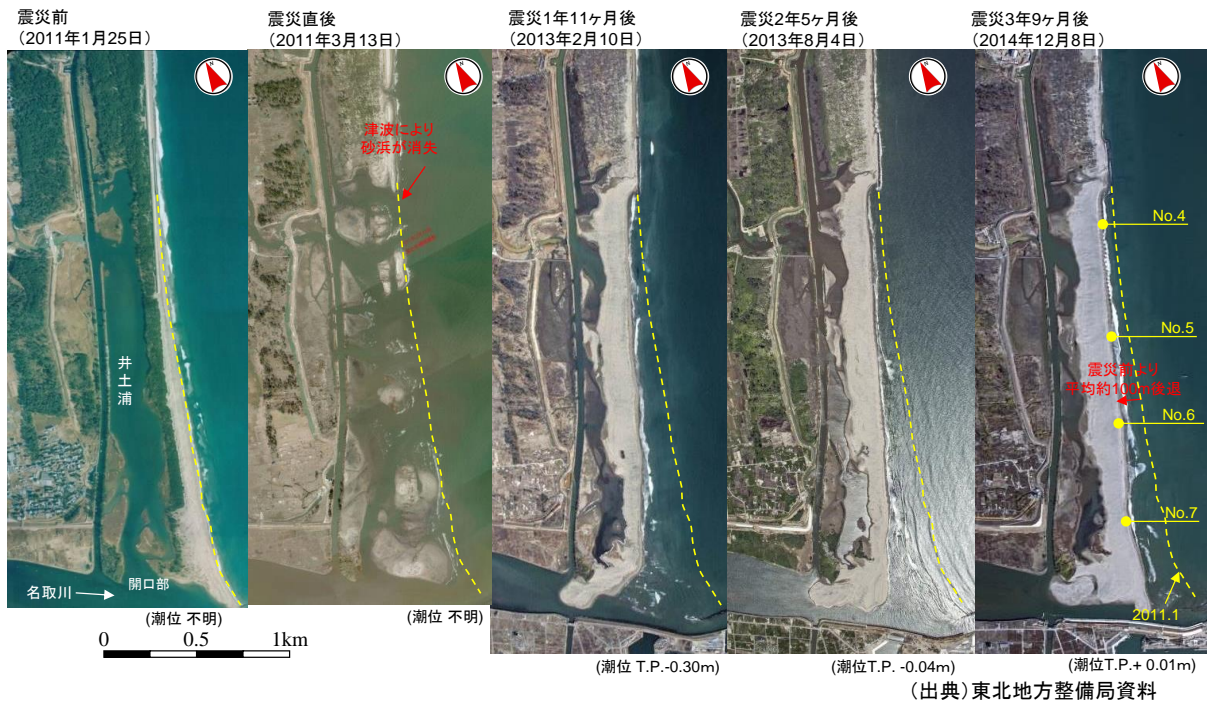
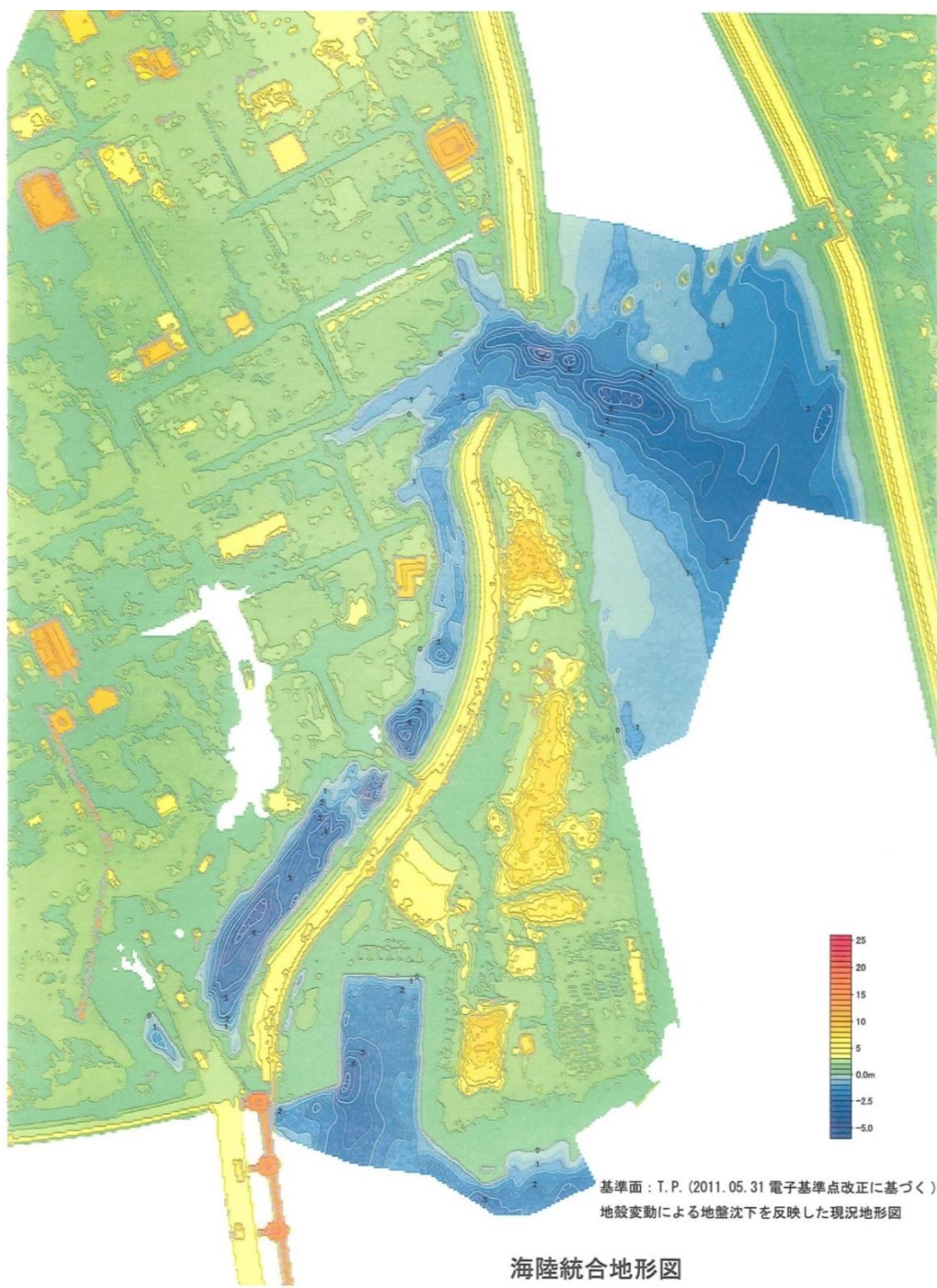


図-2.2.7 仙台平野沿岸（名取川北部干潟）の震災後の海岸線の変遷

図-2.2.7は、仙台平野沿岸における震災後3年9ヶ月後までの海岸線の変遷である。震災直後に砂浜が消失して以降、次第に砂浜は回復してきたものの、震災前に比べて後退した位置で安定しており、震災前まで海岸線が回復していないことが分かる。津波災害後の復旧や海岸保全にあたっては、こうした砂浜の回復状況をモニタリングした上での対応が必要である。

図-2.2.8、2.2.9は、岩手県大槌漁港海岸の破堤箇所周辺の洗掘状況を水中地形測量により調査した結果である。破堤口から海に向かう深掘れ跡があることが分かり、津波の引き波時の流路と考えられる。



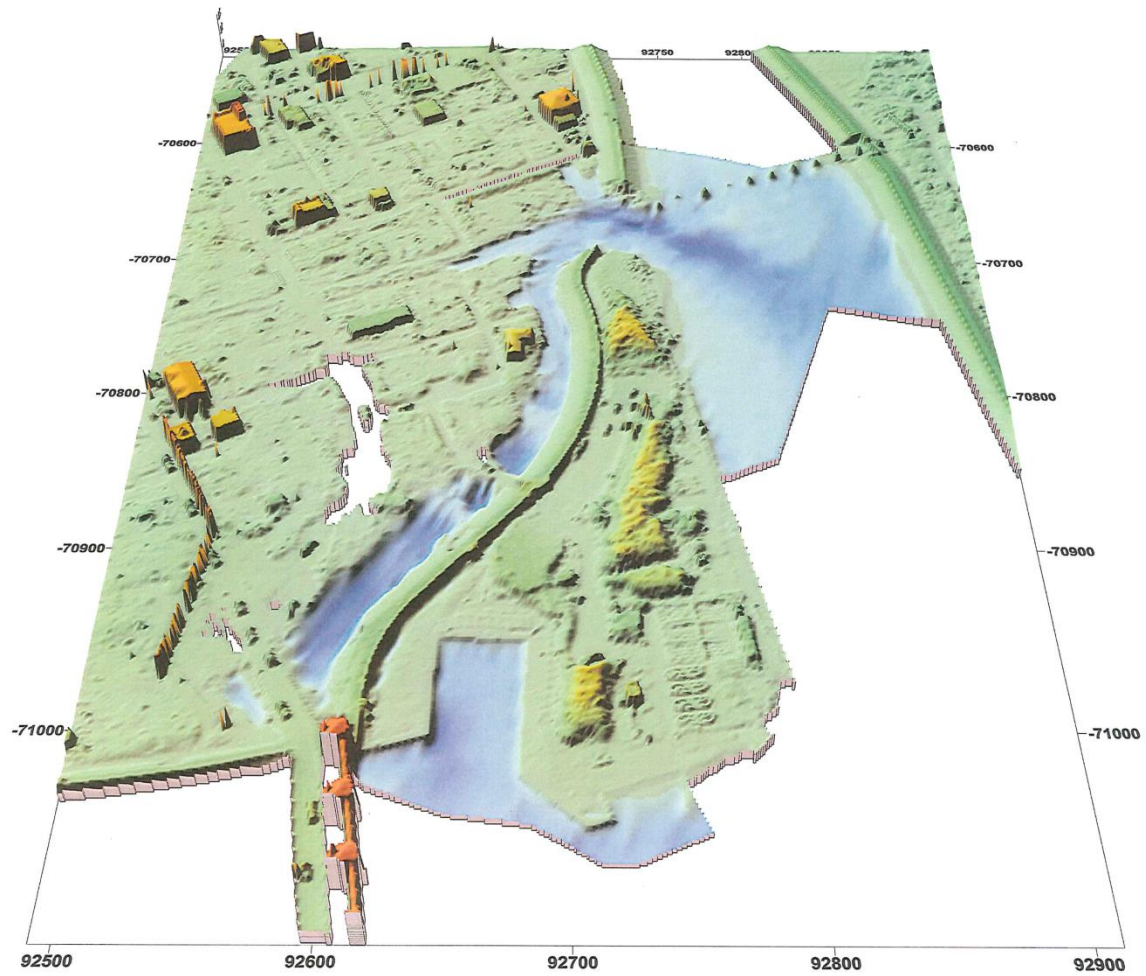
大槌町大槌川河口

海陸統合地形図

平成23年度

海岸保全施設周辺津波洗堀等調査業務

図-2.2.8 岩手県大槌漁港海岸の水中洗堀状況調査結果



海陸統合地形鳥瞰図

地殻変動による地盤沈下を反映した現況地形の鳥瞰図

標高の基準面：T.P. (2011.05.31 電子基準点改正に基づく)  
 地形データの格子間隔：1m 格子

大槌町大槌川河口

平成 23 年度 海岸保全施設周辺津波洗掘等調査業務

図-2.2.9 岩手県大槌漁港海岸の詳細測量調査結果

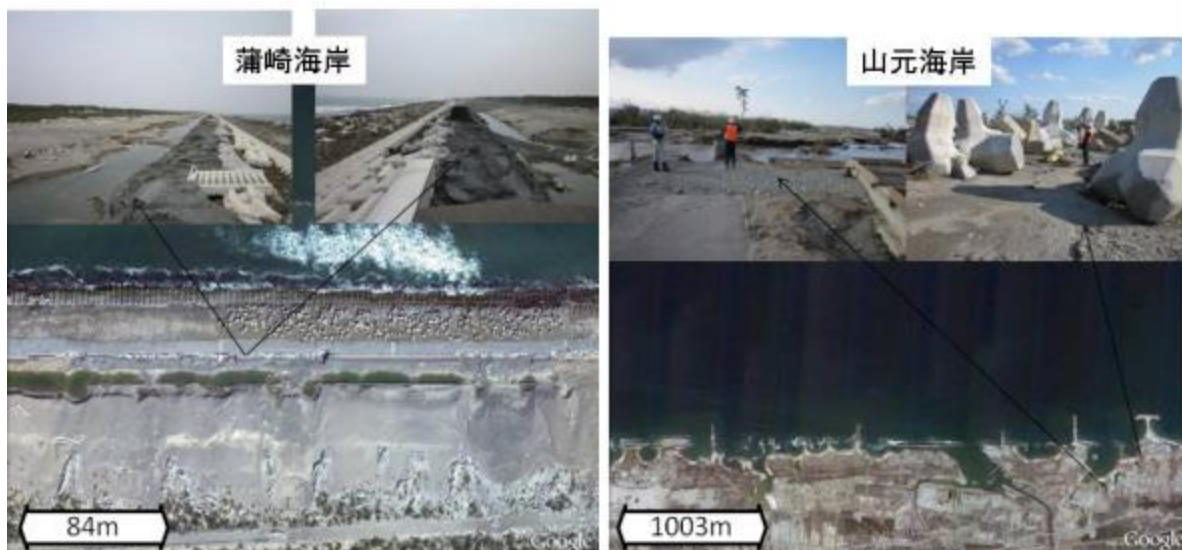


図-2.2.10 堤防決壊の有無による地形や背後地状況の違い（宮城県）  
 [上空からの画像データ（左下、右下）：Google、ZENRIN]

また、図-2.2.10は宮城県蒲崎海岸と山元海岸の被災後の写真であるが、蒲崎海岸は堤防が被災しているものの残存しているために海岸線の後退に至っていない。一方、堤防決壊が多く発生した山元海岸では、地面の侵食や海岸線の後退等が発生しており、両者を比較すると、堤防が残存することによる減災効果が見て取れる。

図-2.2.11～13は陸前高田海岸の被災前後の写真である。津波の押し波（裏法被覆工）・引き波（表法被覆工・波返し工）によって砂浜・堤防・松林が流失するなどの被災を受け、海岸線が大きく後退している。また、堤防が残存した箇所では洗掘、海岸線の後退が軽減され、砂浜が保持されている。

このように、堤防の有無や決壊は、浸水範囲の拡大だけでなく、海岸線の後退や洗掘の発生といった地形変化をもたらすことが分かった。このため、海岸堤防の全壊の可能性を少しでも減らす「粘り強い堤防構造」は、避難時間を稼ぐだけでなく、地形変化の面からも減災に貢献することが期待される。



図-2.2.11 陸前高田海岸津波前 [画像データ:Google, GeoEye, ZENRIN, Geocentre Consulting]

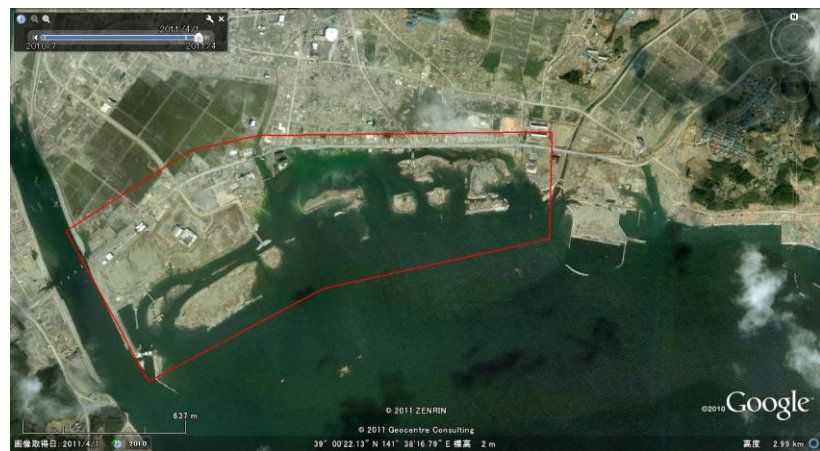


図-2.2.12 陸前高田海岸津波後 [画像データ:Google, ZENRIN, Geocentre Consulting]



図-2.2.13 残存堤防が砂浜を保持

[画像データ (左下) :Google, GeoEye, ZENRIN, Geocentre Consulting]

[画像データ (右下) :Google, ZENRIN, Geocentre Consulting]

## 2.3 海岸堤防被災調査

### 2.3.1 海岸堤防被災調査の概要

東北地方太平洋沖地震では、海岸堤防や護岸を中心に海岸保全施設の被災が発生した。そこで、本章では、特に被害が大きかった岩手、宮城、福島の各県を中心に、海岸堤防等の被災状況を概観する。

なお、一部の海岸では、海岸堤防、護岸のほか、離岸堤、突堤、ヘッドランド（T字型の人工の岬等）の沈下やブロック飛散が生じている。離岸堤や突堤等は、風波やうねりの消波や漂砂制御を機能とする施設であり、津波の低減を期待するものではなく、津波や地震に対する安全性を要求されていない。施設設計において考慮されていない津波の作用である速い流れや洗掘によって、これらの施設は被災したものと考えられる。

#### (1) 岩手県での被災状況

岩手県では、ほぼ全延長にわたり海岸保全施設に何らかの被害が生じた。その例として、田老海岸と高田海岸の被災状況を紹介する。

宮古市の田老海岸には、**図-2.3.1**のように、T.P. +10.0mの堤防が漁港沿い（**図-2.3.1**中の白線）と陸側（**図-2.3.1**中の赤線）に整備されていた。漁港沿いの堤防は海岸線にほぼ沿って配置されていたのに対し、陸側の堤防は遡上した津波を東側にそらすように配置されていた。東北地方太平洋沖地震では、津波の浸水高はT.P. +16.3mに達し、陸側の堤防も越流した。その結果、漁港沿いの堤防は**図-2.3.2**のように破堤したが、陸側の堤防は一部で裏法が洗掘されたもののほぼ原形を保った（**図-2.3.3**）。この被災事例から、一線堤や遡上による津波の減衰に加えて、津波をそらしたことで二線堤の被災を軽減できた可能性があったと考えられることから、津波の遡上方向を考慮した海岸堤防の法線の設定方法を考えるべきであると示唆される。



図-2.3.1 田老海岸の堤防（白線：一線堤、赤線：二線堤） [画像データ:Google, GeoEye]



図-2.3.2 田老海岸の一線堤の被災状況



図-2.3.3 田老海岸の二線堤の状況

陸前高田市の高田海岸では、海岸堤防の被災だけでなく、海岸の地形そのものが変わってしまった。震災前には砂浜と松原が約2kmに渡って延びていた高田海岸には、1960年のチリ地震による津波の後、松原の海側に高さT.P. +3.0mの一線堤が、松原のすぐ背後にT.P. +5.5mの二線堤が整備されていた。二線堤の陸側には古川沼があり、川原川水門を通じて排水されるようになっていた。東北地方太平洋沖地震では、津波は海岸堤防を大きく越流し、市街地の多くが浸水し、海岸堤防付近での浸水高はT.P. +13m程度となった。このため、図-2.3.4のように、二線の海岸堤防のほとんどが破堤し、松林も一本を残して消失した。また、2011年5月の測量で得られた図-2.3.5のように、地震前に松林があった領域の多くは水没しており、海岸が全体的に侵食された。





図-2.3.4 高田海岸の堤防の被災

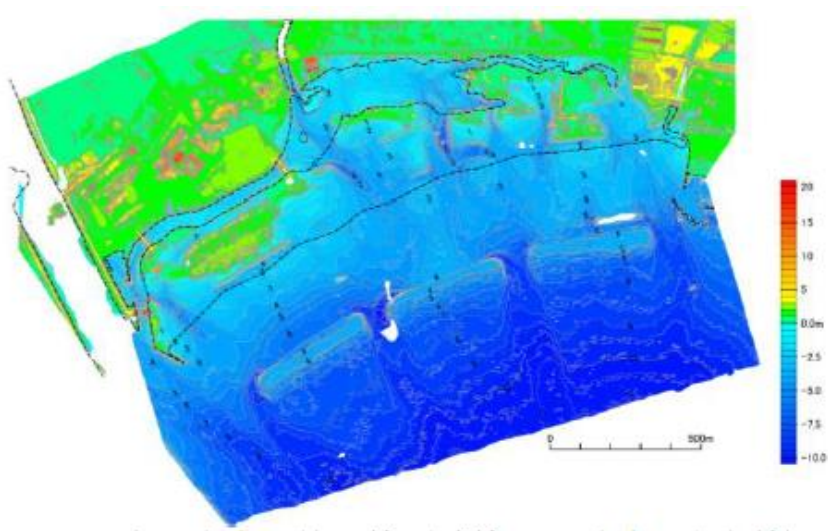


図-2.3.5 高田海岸の等深線（破線：地震前の水際線）



図-2.3.6 普代村の太田名部海岸と宇留部海岸

なお、津波が越流しなかった普代村の太田名部海岸（図-2.3.6）では、海岸堤防の本体は被災せず、背後地も浸水を免れた。これは、津波が海岸堤防を越流しなければ、海岸堤防の機能は確保され、背後地の浸水を防止する事例と考えられる。また、同じ普代村の宇留部海岸（図-2.3.6）では、津波が普代水門（図-2.3.6）の天端を少し上回る程度であり、管理橋は破損したものの、背後地の浸水はわずかな範囲であった。

## （2）宮城県での被災状況

宮城県でも、ほぼ全延長にわたり海岸保全施設に被害が生じた。宮城県の各地での被害概要については既に報告されているが、本稿では、仙台平野南部（七北田川河口～福島県境）での被災状況を、地形変化を交えて紹介する。

仙台平野南部はT.P. +6.2～+7.2mの堤防が整備されている区間が多いが、阿武隈川より北には無堤や砂丘堤の区間が存在する。また、阿武隈川より南には、侵食対策としてヘッドランドが設置されている区間がある。東北地方太平洋沖地震では、津波が海岸堤防を越流し、海岸付近の浸水高は一部でT.P. +10.0mを越えた。このため、海岸堤防が広範囲で被災し、一部では図-2.3.7のように全壊に至っていた。海岸堤防が全壊した箇所では汀線が大きく後退しており、海岸堤防の破堤によって海岸の地形が大きく変化したことを示している。また、引き波による流れが旧河川や排水路に集中し、その流路が大きく侵食されたことが指摘されている。



図-2.3.7 仙台平野南部での海岸堤防の破堤状況

図-2.3.8は、航空レーザ測量（2011年3月実施）で得られた1mメッシュの標高データを用いて、堤防断面の欠損率（被災後の堤防の横断方向の断面積の欠損量／被災前の堤防の横断方向の断面積）を算定した結果を示している。対象海岸の堤防はさまざまな構造のもの

のがあることから、海岸の所管および構造タイプをふまえて海岸を24分割した上で、各区分における欠損率の平均値を算出した。なお、構造タイプは、表法勾配に応じて、直立堤（2割未満）、傾斜堤（2割以上）に分類した。堤防断面の欠損率は、No.4（仙台海岸深沼地区（南部））、No.14（亶理海岸横須賀地区）、No.19（山元海岸中浜地区）で80%を超える一方、No.2（深沼漁港海岸）、No.3（仙台海岸深沼地区（南部））、No.23および24（磯浜漁港海岸）で20%以下であった。欠損率は破堤区間の割合と概ね対応していた。

図-2.3.9は、仙台平野南部における海岸堤防陸側での洗掘の幅を示している。洗掘幅は東北地方太平洋沖地震後の航空レーザ測量によって取得されたものである。長さ約40kmに渡るこの砂浜海岸において、洗掘幅は平均で約30mであった。その中でも、破堤した海岸堤防の割合が大きかった南部において、洗掘幅が大きかった。

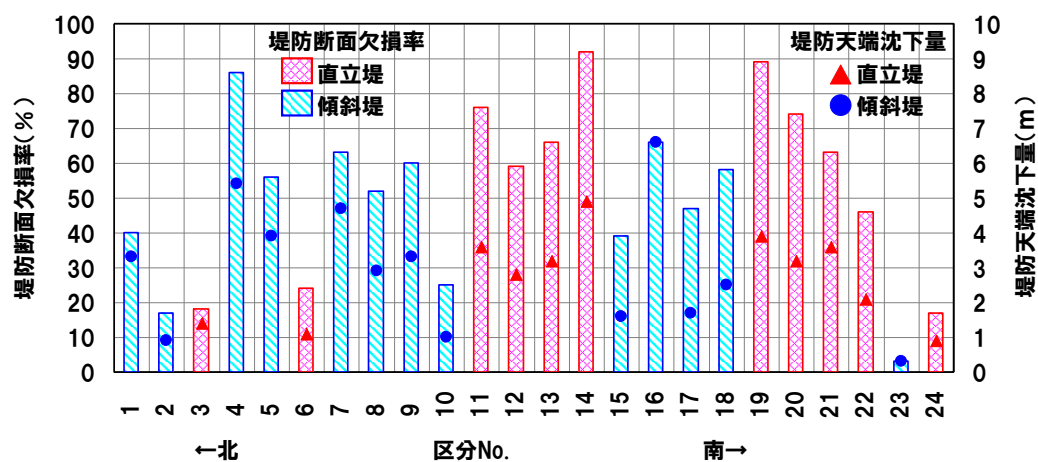


図-2.3.8 堤防断面(横断方向)の欠損率および天端沈下量

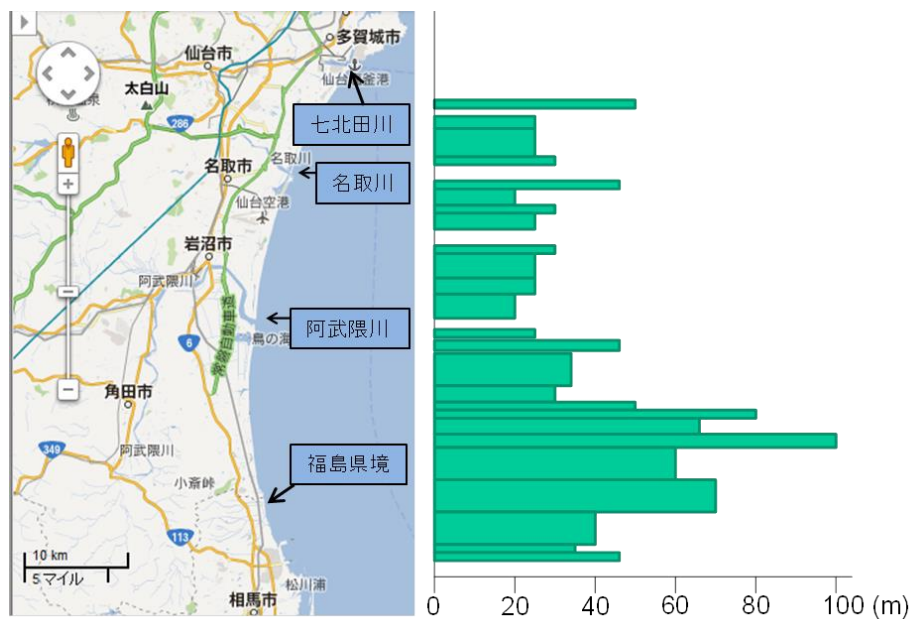


図-2.3.9 仙台平野南部での平均洗掘幅

### (3) 福島県での被災状況

福島県においても、海岸堤防や護岸の決壊、消波工や沖合施設の沈下や飛散等の被害が各地で生じた。本稿では、いわき市の植田岩間地区海岸の被害状況を紹介する。



図-2.3.10 植田岩間地区海岸での波返工の破損状況

鮫川河口の左岸側に位置する植田岩間地区海岸には、波返工を有する護岸（天端高 T.P. +4.5m）が整備されていた。東北地方太平洋沖地震による津波の浸水高は T.P. +8.7m であり、地震による地盤が 0.4m 程度沈下したことを考慮すると、越流水深は 4.6m 程度であったと推定される。このような津波の越流により、図-2.3.10 のように波返工が破壊されており、破壊した波返工の割合は全延長の 71% と報告されている。なお、隣接する植田佐糠地区海岸は、波返工の天端高が T.P. +6.2m と高く、波返工の破損は限定的であった。

### 2.3.2 海岸堤防の減災効果の試算

仙台平野南部を対象に、津波浸水計算を行い、被災した海岸堤防が果たした減災効果を試算した。

計算条件は、**図-2.3.11**～**図-2.3.12**に示すとおりである。計算は海岸堤防なし（ケース1）、海岸堤防あり（ケース2）、津波来襲前に海岸堤防被災（ケース3）、津波が堤防天端を越流した時点で被災（ケース4）の4ケースについて行った。堤防被災状態については津波後のLPデータから読み取った被災後天端高情報をもとに被災後堤防天端高を設定した（**表-2.3.1**）。

#### ○計算条件

対象地震：東北地方太平洋沖地震

断層モデル：藤井・佐竹モデルver4.0(すべり量をチューニング仙台平野では1.2倍)

基礎方程式：非線形長波方程式(海岸堤防の越流量は本間の越流公式で算定)

地盤高：地震前の地盤高データから地盤沈降量(仙台平野では一律に-50cmを設定)を差し引く

潮位条件：T.P.0m

盛土構造物の扱い：河川堤防、東部道路は地形として考慮。ただし、東部道路のカルバートは実態に応じて設定

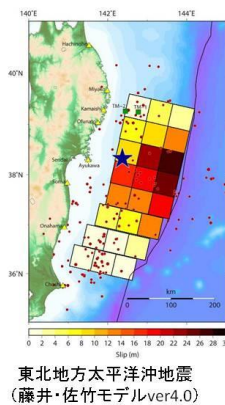


図-2.3.11 津波浸水計算（断層モデル等）

表-2.3.1 計算ケース

ケース	海岸堤防の状態
ケース1	海岸堤防無し
ケース2	海岸堤防があり、被災せず機能発揮
ケース3	津波来襲前に津波後の状態に被災
ケース4	津波が天端を越流した時点で、津波後の状態に被災

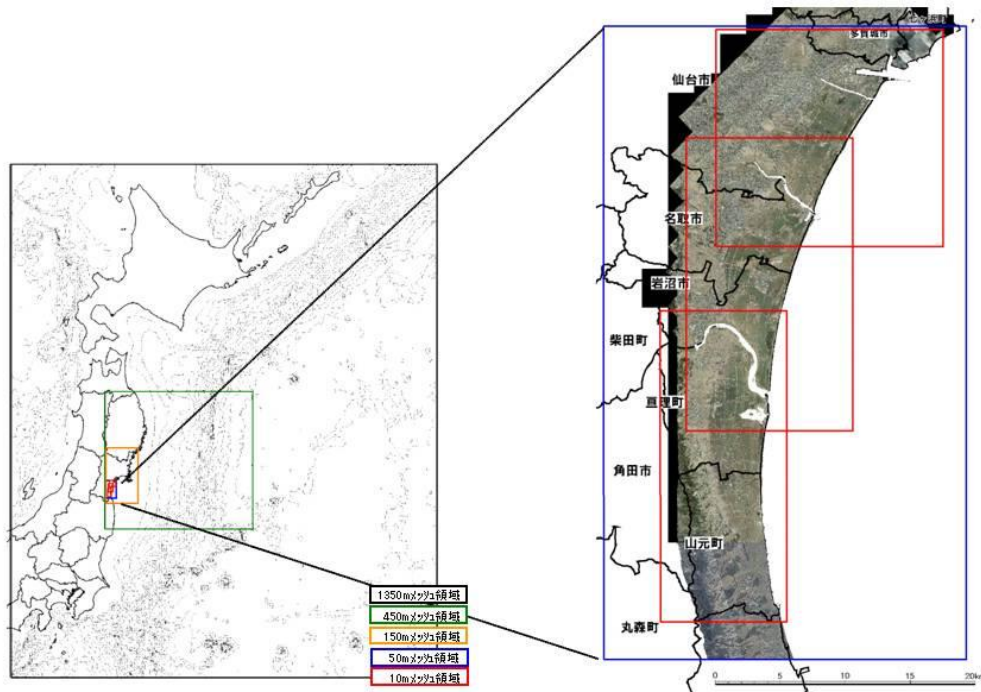


図-2.3.12 計算条件（メッシュ分割）

最大浸水深平面図の比較を図-2.3.13に示す。図から、ケース2では他のケースよりも、浸水面積が減少しており、海岸堤防が効果を発揮することで浸水面積が減少と考えられる。また、ケース3, 4はほとんど違いがなく、ケース1の堤防なしの状態と比較して総浸水面積で5%程度、水深2m以上の浸水面積では6%程度、水深5m以上の浸水面積では30%程度減少させる効果があると試算された。

図-2.3.14は、最大浸水標高の断面分布を示したものである。図から、堤防が被災していないAB断面では大きな浸水深低減効果が見られた。CD、EF断面でも浸水深を減少させる効果が見られた。

図-2.3.15は最大流速の平面分布を比較したものである。図から、被災した状態でも海岸堤防は最大流速を軽減する効果があることがわかった。

図-2.3.16、図-2.3.17は、浸水深の時系列変化を比較したものである。図-2.3.16は堤防背後での浸水深時系列変化の比較であるが、ここでは海岸堤防に浸水時間を遅らせる効果は見られなかった。図-2.3.17は遡上域内での浸水深時系列を比較したものであるが、ここでは海岸堤防があることにより、1から数分程度浸水を遅らせる効果が見られた。南部の堤防被災が多いF地点では遅らせる効果は見られなかった。

以上から、海岸堤防については津波が越流した場合でも、浸水深や水勢（流速）の低減効果があり、全壊の可能性を少しでも減らすことで減災効果を有することが分かった。

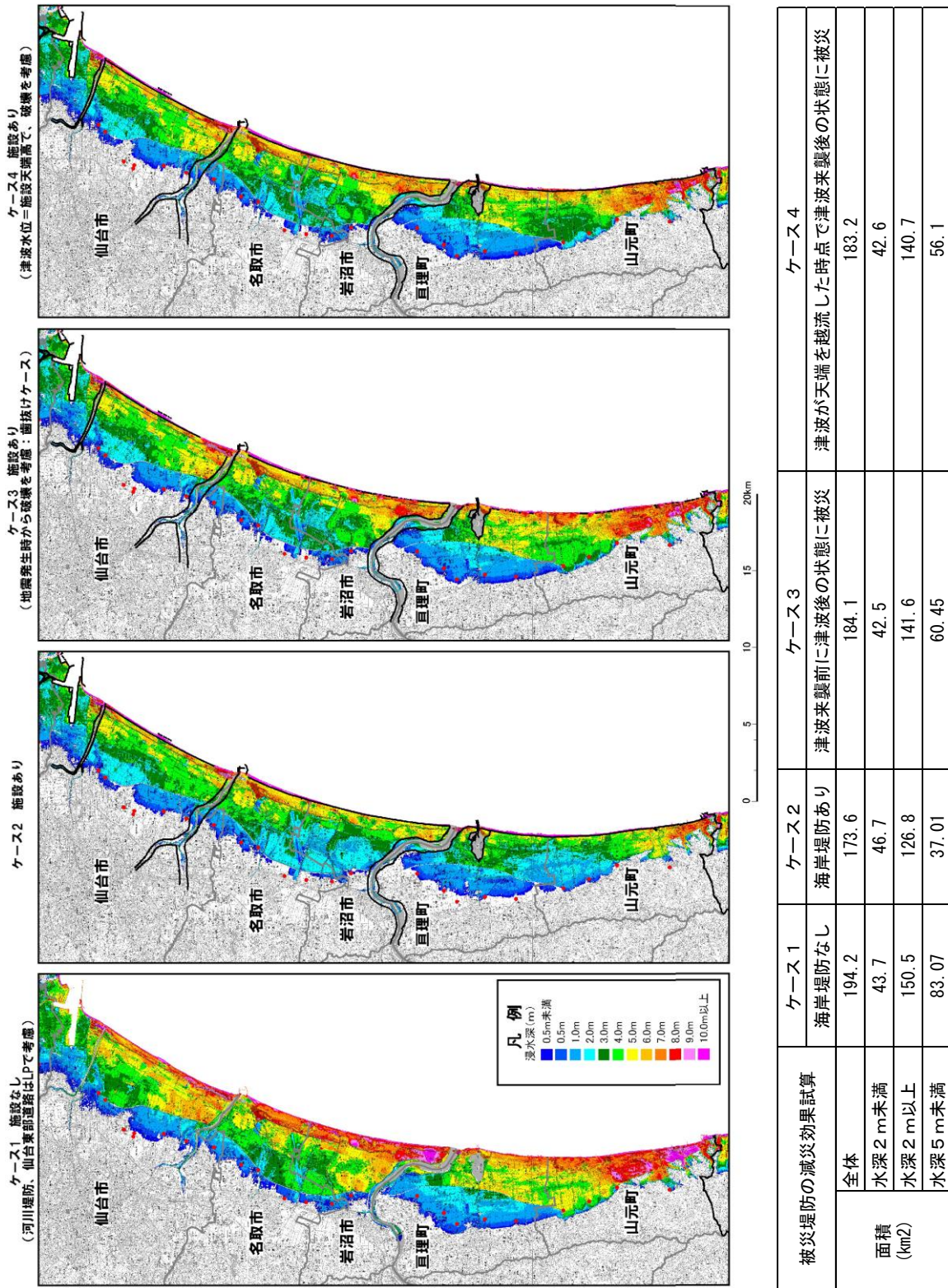


図-2.3.13 計算結果 (最大浸水深図)

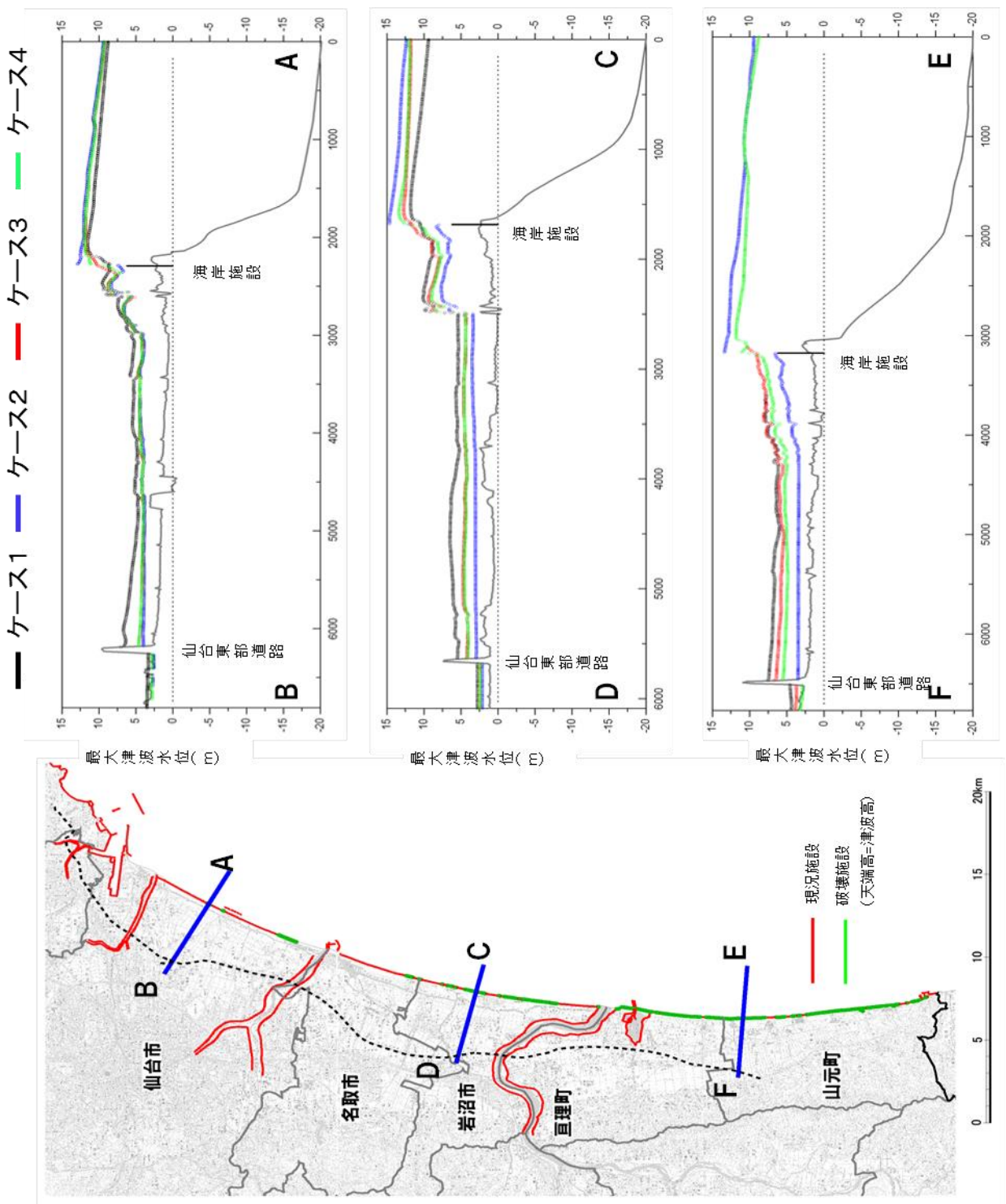
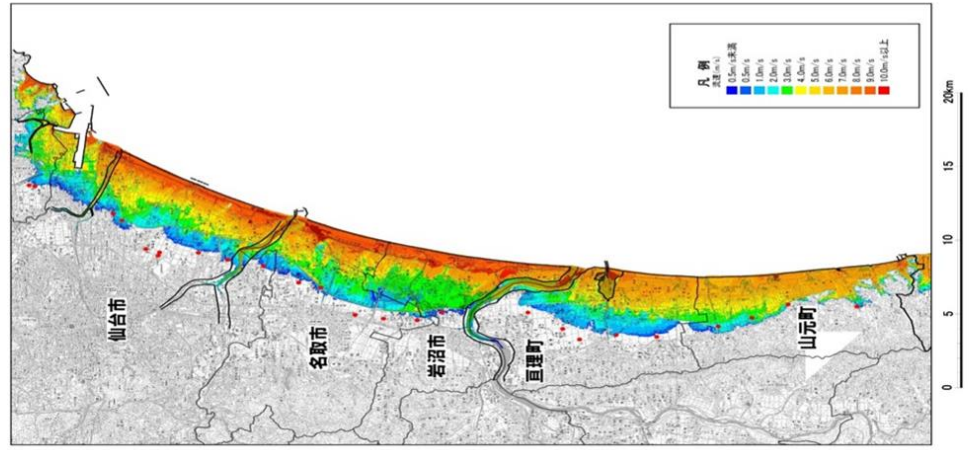


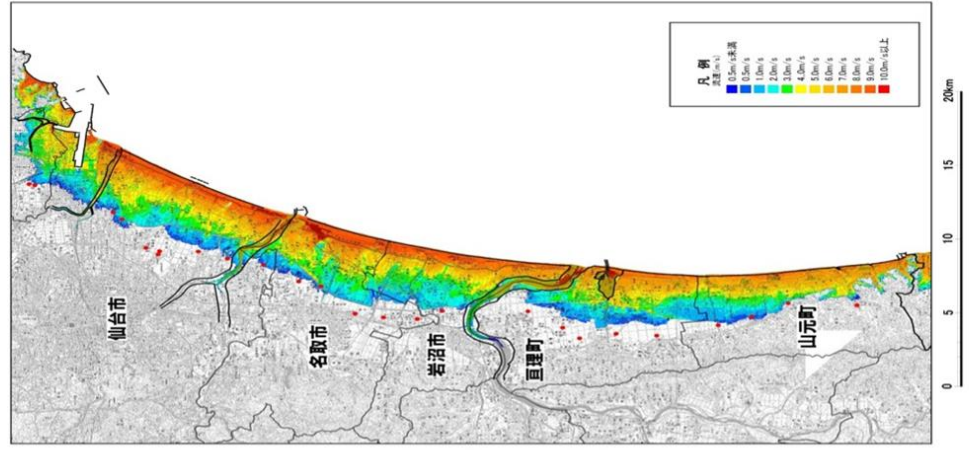
図-2.3.14 計算結果 (最大浸水標高断面図)



ケース4 海岸堤防有り  
 (津波水位＝施設天端高の時点で施設破壊を考慮)



ケース2 海岸堤防有り  
 (被災せず機能発揮)



ケース1 海岸堤防無し  
 (河川堤防、仙台東部道路は考慮)

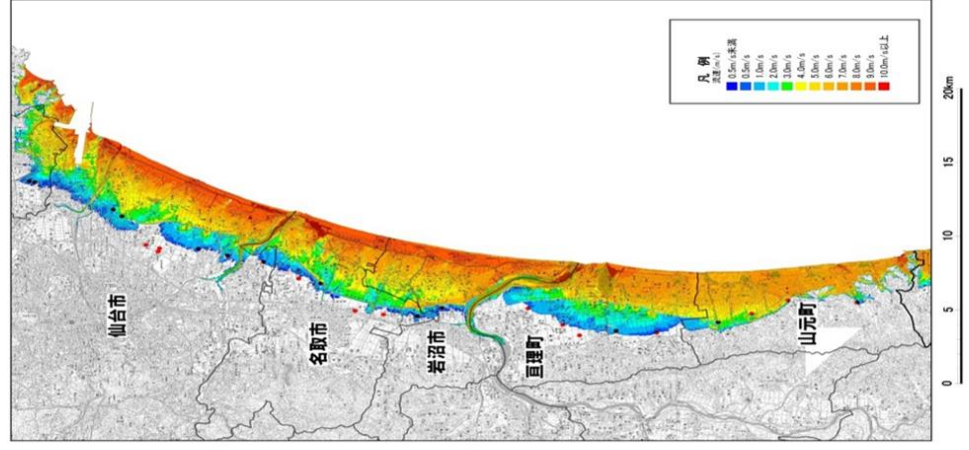


図-2.3.15 計算結果 (最大流速分布)

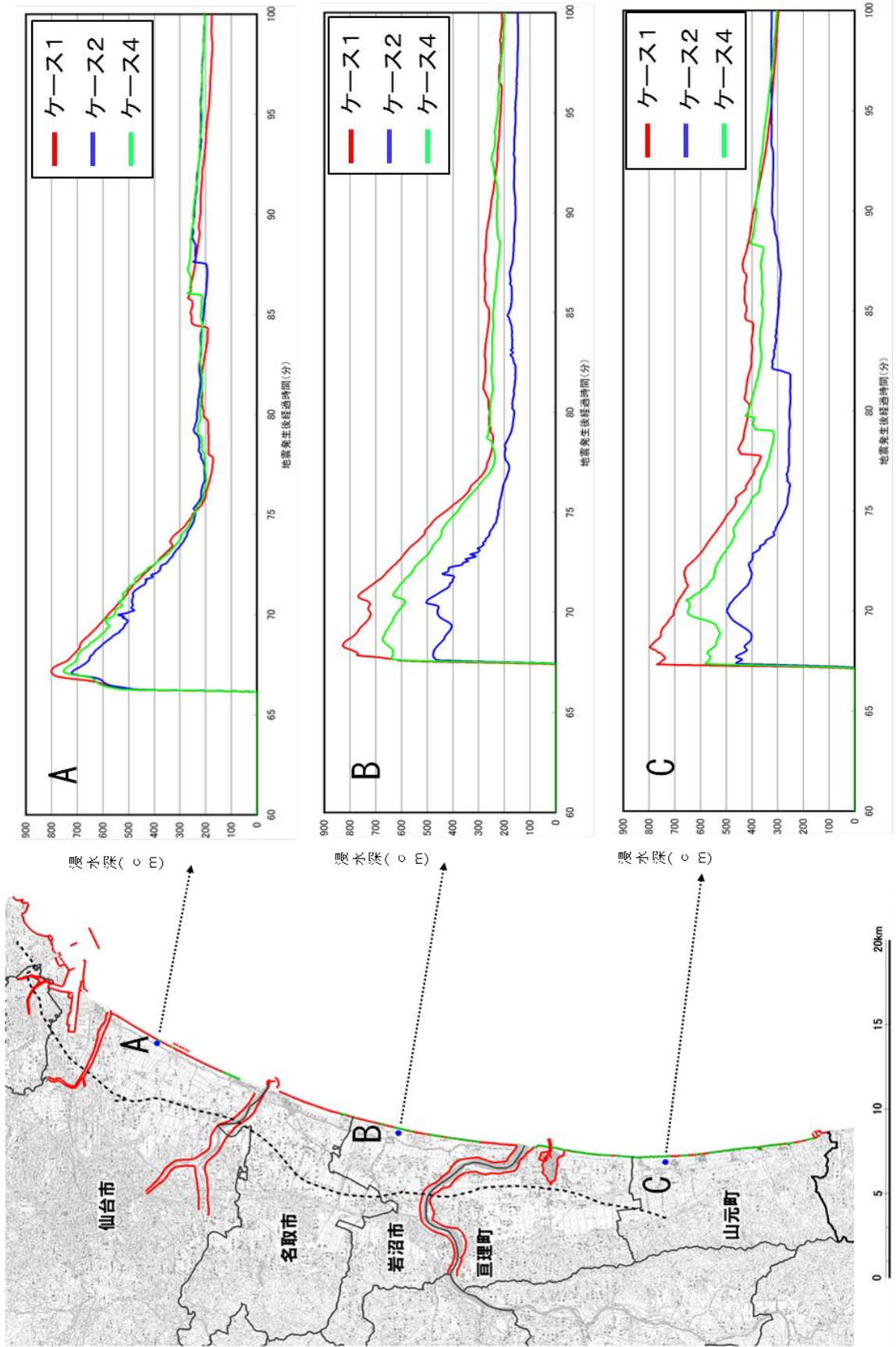


図-2.3.16 計算結果（浸水深時系列 堤防背後）

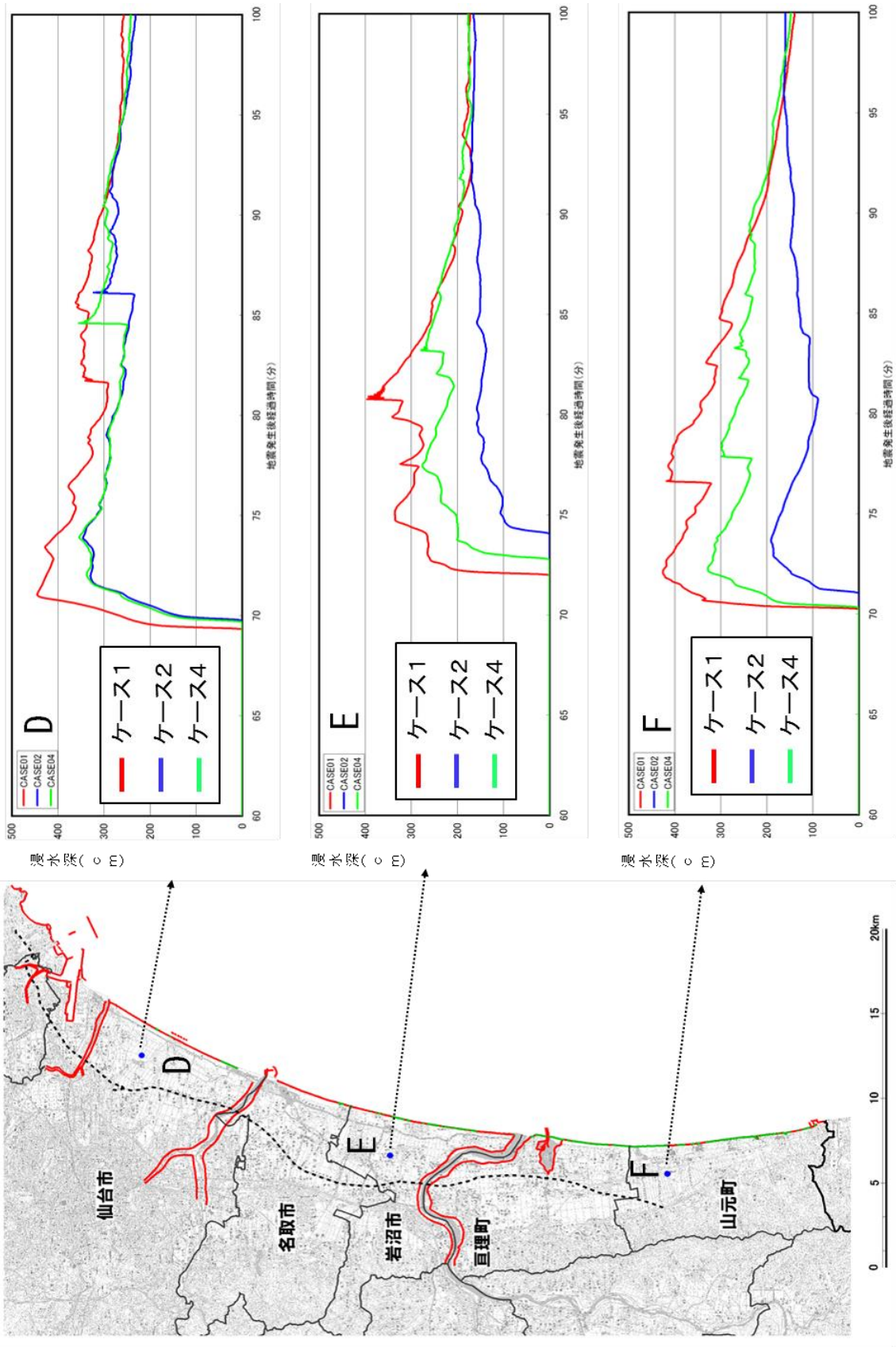


図-2.3.17 計算結果（浸水深時系列 遡上域）

## 2.4 河川堤防被災調査

### 2.4.1 研究の背景と目的

国総研では、津波の作用による河川堤防の被災について、被災の形態・程度のカテゴリとその空間的分布、それらと痕跡水位縦断分布との対応、越流による堤体侵食の程度と越流の水深・継続時間の関係などについて整理し、被災の特徴について分析した。

### 2.4.2 河川堤防の被災の特徴

東北地方管内の直轄河川管理施設の地震及び津波による被災箇所数は1195箇所を上り、北は馬淵川、南は阿武隈川上流まで広い範囲で被災した。堤防被災箇所773箇所のうち、堤防決壊・崩落等の大規模な被災は北上川、鳴瀬川、阿武隈川に集中しており、「決壊・崩落」、「陥没・沈下、亀裂」の被災は、堤防被災箇所全体の約6割を占め、その延長は約66kmであった。なお、堤防が決壊した箇所は、新北上川左岸2.8kp付近（月浜第二水門取付け部）及び右岸4.2kp付近、鳴瀬川右岸0.2kp付近の特殊堤、阿武隈川河口左右岸の海岸堤防との接続部と限定的であった。破堤に次いで大きな被災は、越流に伴う堤防裏のり及び背後の堤内地盤であり、津波遡上に伴う高流速によるのり面の被災は軽微であった。

本項では、破堤に次いで大きな被災であった越流に伴う堤防裏のり及び背後の堤内地盤の侵食について、阿武隈川を対象として、津波による被災の程度と津波遡上時に作用した外力との関係を整理する。



図-2.4.1 津波痕跡水位と堤防高の関係及び被災状況（写真は国土地理院撮影）

図-2.4.1は、被災直後に撮影された阿武隈川河口付近の航空写真に、痕跡水位と堤防天端高との関係、河川堤防裏のりの被災状況について、以下に従ってそれぞれの区間を示す。図-2.4.2に示すとおり痕跡水位と堤防天端高との関係については、現地踏査や津波痕跡調査結果を参考にして、水没区間、越流区間、堤防高以下遡上区間の3区間に分けた。

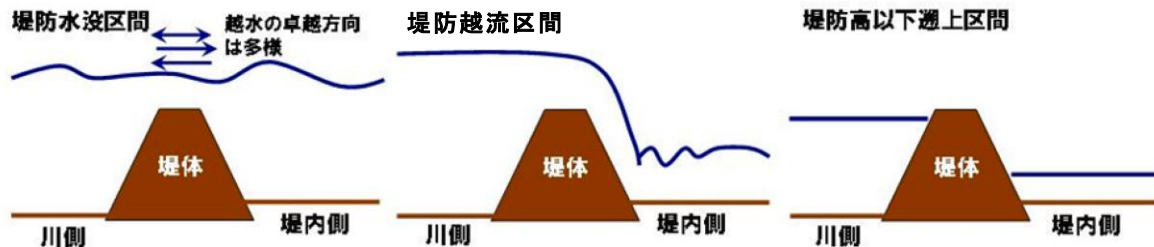


図-2.4.2 河川への津波遡上状況の三分

表-2.4.1 被災状況の分類

被災レベル	裏のり面
I	草本植物が流れの作用で倒伏しているが、剥離はほとんど見られない。
II	部分的なりのり面植生の剥離、堤体の侵食が生じた状態。落堀の形成はない、または軽微。
III	全面的にのり面が侵食・崩壊し、鉛直に切り立った状態。落堀の形成を伴う場合がある。
IV	のり面が流失し、さらに天端まで侵食・崩壊が及んだ状態。落堀の形成を伴う場合がある。

被災状況については、表-2.4.1の通り4つの被災レベルに分類した。被災レベルが記入されていない区間は特筆すべき被災が生じていない。なお、裏のり面はコンクリート等で覆われておらず、草本植物が繁茂していた。水没区間は河口部周辺に限られ、上流に向かって、越流区間、堤防高以下遡上区間が現れることから、遡上に伴い津波水位が減衰したことを確認できる。ただし、越流区間の延長は左右岸で大きく異なり、左岸では0.5 km程度の延長であるのに対して、右岸では2km程度と長い。河口部右岸を除くと、亘理大橋右岸で堤防高を5m近く超える津波痕跡水位が確認されており、津波の遡上に対して湾曲部外岸側となった右岸側で津波水位が高かったことを推定できる。河口部付近の水没区間では、河川堤防と海岸堤防との接続部において左右岸とも堤防が決壊している。その地点を除くと、左岸では0.55km地点の水門周辺で被災レベルⅢとなったが、大半が被災レベルⅠであるのに対して、右岸ではⅢ～Ⅳと被災レベルが高くなっていた。越流区間でも同様に、左右岸の被災の程度が大きく異なり、左岸側では被災レベルⅠであるのに対して、右岸側では約2kmにわたる広い範囲で被災レベルⅡやⅢとなっていた。さらに、越流区間の右岸では、被災レベルⅠであった0.8～1.2km区間の上流で被災レベルⅡやⅢの区間が生じている。

亘理大橋右岸側において、その下流に比較して高い痕跡水位が確認されていたことを踏まえると、被災レベルは越流水深とある程度対応していると推察されるが、そのみで左

右岸での被災レベルの差異を全て説明できるとは考えにくい。この点については、堤内地が河川側からの越流に先んじて湛水することで、もしくは越流後短時間で堤内地が湛水することで、ウォータークッションの効果が働き（図-2.4.3）、裏のり面及び法尻の侵食が抑制されたと考えた。以下では、今次津波を対象とした津波遡上シミュレーション結果（以下、再現計算）から、被災の程度を分けた要因を定量的に検討する。

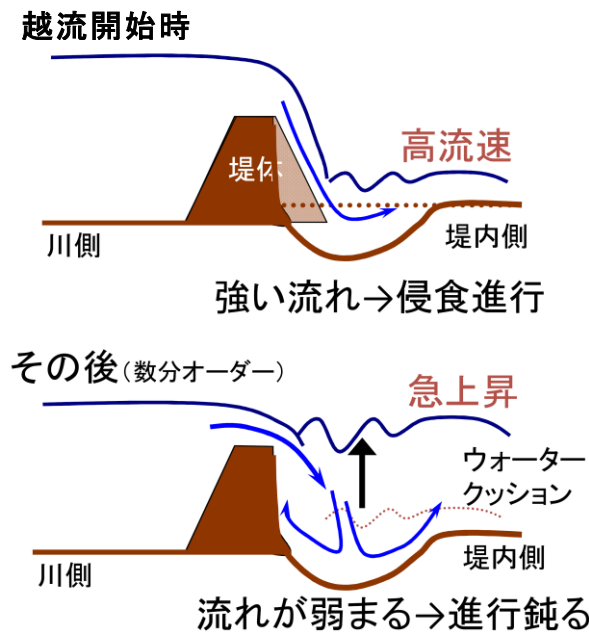
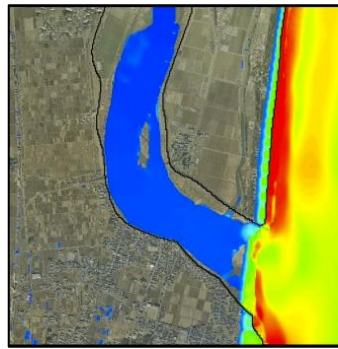
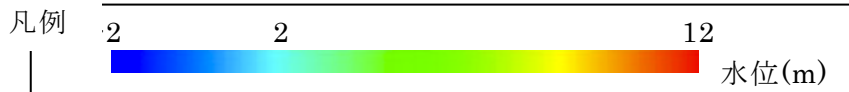
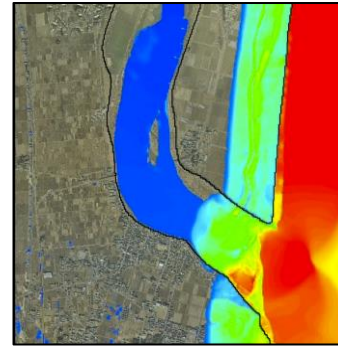


図-2.4.3 堤内側の水位急上昇による侵食進行の抑制イメージ

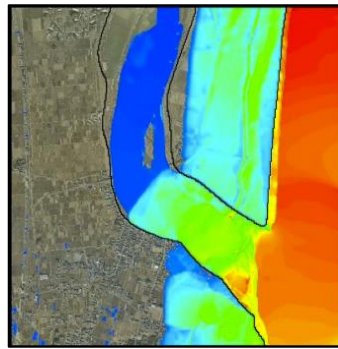
再現計算から得た津波の伝播状況を図-2.4.4に示す。海岸堤防を越えた津波は、左右岸とも同程度の伝播速度で遡上し、海岸堤防越流3分後には左岸側河川堤防によって津波の遡上が止まり、右岸側ではさらに遡上を続けている。左岸側堤防際では、津波が河川を遡上するのとほぼ同時に、水位が6m程度（凡例の緑系）まで上昇している。一方、右岸側堤防際では、津波が河川を遡上した後に水位3m以下（凡例が青系）の低水位領域が確認される。この堤防法線が津波遡上に対して離れていく配置となっていた右岸側では、区間によって継続時間に差があるものの、堤内地の湛水深が小さい状態で越流が生じていたこととなる。その顕著な例が、海岸堤防越流3分後の状況であり、赤い点線で囲んだ箇所では、堤内地を遡上する津波が堤防際に到達する数分前に越流が生じている。



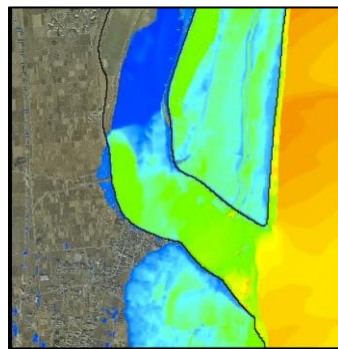
(1) 海岸堤防越流直後



(2) 海岸堤防越流 1 分後



(3) 海岸堤防越流 2 分後



(4) 海岸堤防越流 3 分後

図-2.4.4 津波の伝播状況 (写真は国土地理院撮影)

この状況を詳細に確認するため、図-2.4.1の地点A~Fで河川側水位と堤内側水位の時間変化を再現計算から抽出し、越流時間や被災レベルと合わせて図-2.4.5に示した。越流時間等に付した括弧内の数字は、単位を秒とする越流時間及び初期越流時間である。ここで、越流時間は河川側水位が堤防高を超えている時間であり、地点Eのように堤内側水位が河川側水位を上回った場合には、その時間までを越流時間とした。初期越流時間は、河川側水位が堤防高を超えた時点から、越流水が法尻付近で跳水する程度に、堤防際が湛水までの時間とした。なお、これをウォータークッションの効果が働く湛水位と考えた。

水没区間の地点Aと地点Eでは、越流時間は同程度であり、最大の越流水深が地点Aでは約6m、地点Eでは約3mと異なるものの、河川堤防の越流に対する脆弱性を考えると、ともに大きな値である。初期越流時間を見ると、地点Aでは6分程度であるのに対して、地点Eではゼロと越流開始時点でウォータークッションの効果が働いていたことを確認できる。したがって、地点Eの被災の程度はウォータークッションによって低減されたと考えられる。

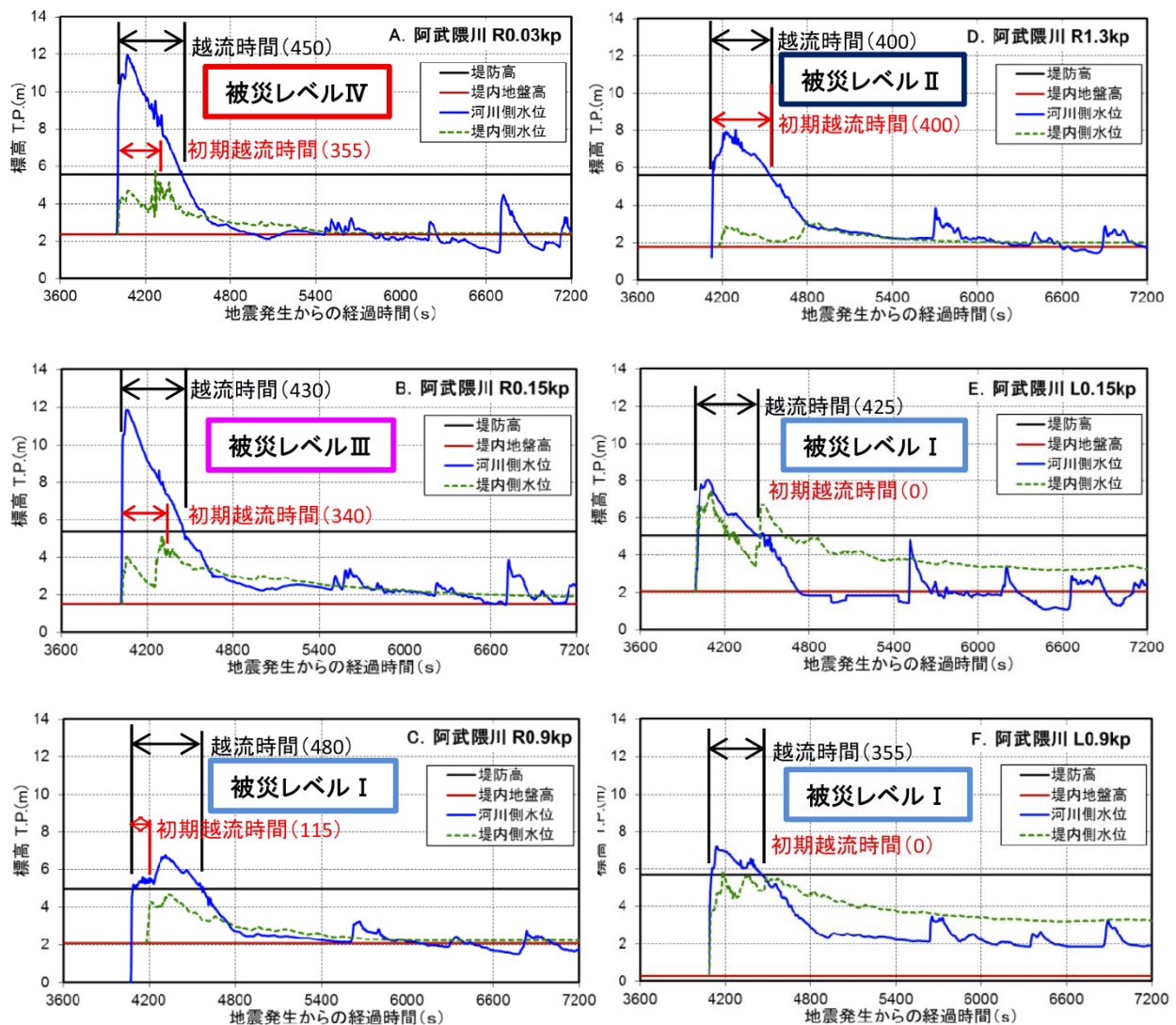


図-2.4.5 津波の伝播状況 (写真は国土地理院撮影)

越流区間の左右岸で比較すると、右岸側の地点B、C、Dでは最大の越流水深が左岸側の地点Fに比べ大きめであるが、越流時間は6~8分程度と左右岸で大きな差はない。初期越流時間で比較すると、地点Fでゼロであるのに対して、地点B、C、Dでは2~7分程度と差がある。これらの越流区間の4断面の結果を見ると、初期越流時間が長いほど、またその間の越流水深が大きいほど、被災レベルが大きくなる。右岸で見られた区間ごとの被災レベルの違いは、地点B、C、Dの3断面で見たように、堤内地の湛水状況によって説明できるようである。

上記で6断面について確認した結果を水没区間及び越流区間の全断面で比較し、堤防の被災の程度を分けた要因として初期越流時間が重要であることを示す。

被災の程度を評価するにあたって、現地調査から大まかに分けた区間設定でなく、より客観的な指標で堤防の被災の程度を表現することを考える。堤防を堤内地盤も含めて10m間隔で輪切りにした断面を作成し、裏のり面及び堤内地盤について侵食された面積を欠損面積とする。欠損面積を、図-2.4.6の中央付近に示す裏のり基準断面積で割り、欠損割合



とする。堤防の欠損割合を算定するにあたり、地震の影響で生じた地盤の水平・鉛直変位を補正した、地震発生前後の航空測量データ及び定期横断測量成果を用いた。堤防欠損量を踏査結果に代えて用いるにあたり、両者の関係を比較した（図-2.4.6参照）。被災レベルⅠのほとんどが欠損割合0-2%であり、被災レベルⅣは全て欠損割合100%以上となっている。被災レベルⅡとⅢは異なる欠損割合に分散しているが、Ⅱは小さい欠損割合に多く、Ⅲは大きい欠損割合に多くなっており、欠損割合は被災の程度と整合する。このことから、被災レベルに代えて、欠損割合を用いることができると考える。

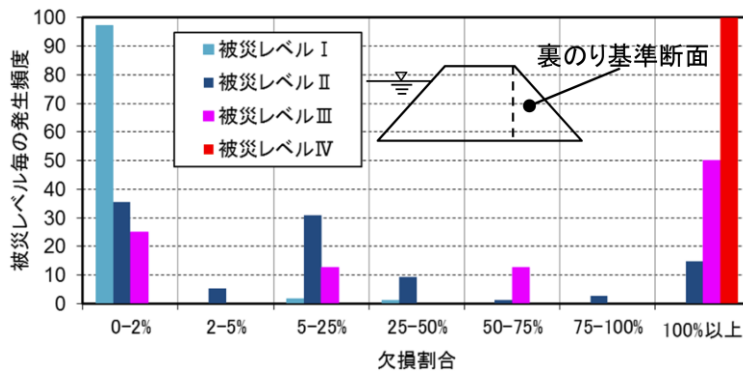


図-2.4.6 堤防の欠損割合と被災レベルの関係

図-2.4.7は、越流時間を横軸に、平均越流水深を縦軸とし、欠損割合ごとにプロットの形状を変え、越流条件に応じてプロットした結果である。また、プロットの色を分けている。ここで、平均越流水深は越流時間で生じた越流水深の平均値である。図では右上に行くほど越流条件が激しくなり堤防の欠損割合も大きくなると考えられるが、欠損割合ごとのプロットの境界が曖昧である。図-2.4.8は、図-2.4.7の縦軸を初期越流時間における越流水深の平均値とし、横軸も初期越流時間で整理し直した結果である。赤い点線で囲んだ一部の範囲を除き、欠損割合ごとの境界が明確となる。

以上の結果から、同程度の越流条件でありながら被災の程度が異なった理由は堤内地の湛水状況であり、湛水せずに越流を受けていた時間が長い断面ほど、大きな侵食を受けたと考えられた。

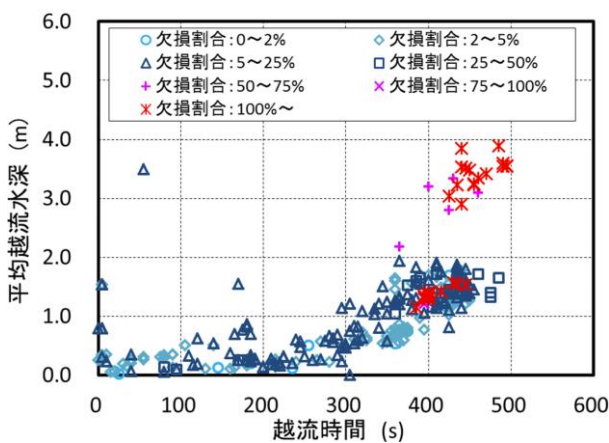


図-2.4.7 越流状況と堤防欠損割合の関係

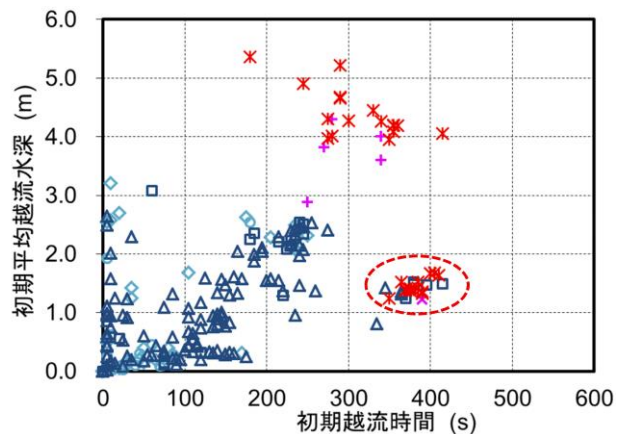


図-2.4.8 越流状況と堤防欠損割合の関係  
(堤内地の湛水状況を考慮)

## 2.5 建築物被害調査

### 2.5.1 調査概要

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では東北地方沿岸部をはじめ広範囲において津波による被害が発生した。一部の地域では計測された浸水深が10mを超え、木造建築物のみならず、鉄筋コンクリート造（以下、RC造）建築物や鉄骨造建築物にも層崩壊や転倒などの甚大な被害が少なからず生じている。国土交通省 国土技術政策総合研究所では独立行政法人 建築研究所(当時)と合同の自主調査という位置づけで地震発生から約3週間経過した3月30日から岩手県および宮城県において建築物の津波被害調査を実施した。3回に及ぶ現地調査において合計約100棟の建築物や工作物等の被害事例を収集した。また、建築研究所は国土交通省 建築基準整備促進事業における津波避難ビル等の構造設計法等の検討委員会(委員長: 東京大学生産技術研究所 中埜 良昭 教授)において、これらの被害調査結果に基づき、建築物に作用する荷重と構造物耐力の比較を行い、建築物に生じる津波被害について基礎資料を得るとともに、津波避難ビルの設計に用いる津波荷重の検討を行っている<sup>4, 5, 6, 7</sup>。本稿では現地調査において観察されたRC造建築物に生じた津波被害を分類し、津波荷重を検討するために被害が生じた建築物について静水圧作用荷重と構造物耐力を比較した結果を示す。なお、当該調査の結果は、国総研資料第674号「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告」に掲載しているが、本報告では、その概要について以下のとおり述べる。

### 2.5.2 鉄筋コンクリート造(RC造)建築物の被害形態

東北地方太平洋沖地震の現地調査結果においてRC造建築物の被害として以下のような被害形態が挙げられる。なお、津波により建築物に生じる荷重は浸水深のみならず流速や浮力などが大きく影響していたと考えられるが、RC造建築物の主架構に甚大な被害を与えた構造被害は計測浸水深が概ね7m以上の地域で確認されている。なお、計測浸水深は対象構造物の所在地域で計測された津波の痕跡深さの最大値と定義している。

#### (1) 1階の層崩壊

建築物の1階の柱が柱頭・柱脚で曲げ破壊し、層崩壊した事例が平屋および2階建ての建築物で見られた。主架構は純ラーメン構造であり、柱間にはコンクリートブロック造壁が設けられているが、面外方向に倒壊している。柱幅は350~450mm程度と小さく、鉄筋はいずれも丸鋼が使用され、旧耐震基準による建築物である。層崩壊した建築物は岩手県陸前高田市で合計6棟、宮城県名取市閑上でも1棟確認されている。なお、現地調査では津波の作用方向にRC造耐力壁を有するまたは3階建て以上の建築物では1階の層崩壊は確認されていない。



図-2.5.1 層崩壊

### (2) 部分的な崩落

柱および外壁がRC造、屋根が鉄骨造の議会ホールや体育館などの大空間建築物において、鉄骨造の屋根が脱落し、片持ち形式となったRC造の柱や壁などが面外方向に倒壊する被害が見られた。屋根が崩落した建築物は岩手県陸前高田市、岩手県南三陸町、宮城県名取市荒浜でそれぞれ1棟ずつ確認されている。



図-2.5.2 部分的な崩落

### (3) 移動・転倒

建築物が移動または転倒する事例が4階建てまでの建築物において見られた。移動または転倒した建築物において計測された浸水深は建築物高さを上回っていた。転倒した建築物は直接基礎が多いが、杭基礎で杭が引き抜かれている事例も見られた。これらの杭では径300 mmのPC杭が使用されていた。また、同規模の建築物で比較すると開口が少ないものに転倒が多く見られたことから、開口の大きさが転倒に大きく影響したと考えられる。残存した2階建て建築物においては開口上端の高さまで津波の水痕が確認されており、少なくとも開口上端から天井までの部分は空気溜りとなっていた。特に、開口が小さい建築物ほど建築物内への水が流入しづらく、浮力が働き転倒が生じやすいと考えられる。転倒した建築物は宮城県女川町で5棟見られ、岩手県陸前高田市で2棟、岩手県大槌町でも1棟確認されている。



図-2.5.3 転倒

#### (4) 内外壁の面外破壊

津波荷重が作用する面の内外壁にコンクリートにひび割れが生じて、面外方向に大きくはらむ事例、さらには壁縦筋が壁頭・壁脚で破断する事例が見られた。本被害は厚さ120mmでシングル配筋の非構造壁に多く見られたが、2階が一部吹抜けとなった建築物において、厚さ300mmの耐力壁が付帯する梁や柱とともに内側に大きく湾曲した事例が見られた。ただし、当該建築物の2階床が取り付く耐力壁では湾曲するような被害は見られなかった。内外壁の面外破壊は現地調査を実施した各地域で数例確認されている。



図-2.5.4 外壁の面外破壊

#### (5) 洗掘

襲来した津波が建築物に遮られることで、基礎隅角部等で強い下向きの水流が発生し、基礎周辺地盤に大きな穴が開けられた痕跡が見られた。直接基礎の低層建築物では、洗掘により基礎が沈下し、建築物が倒れ込み傾斜したのが見られた。杭基礎の構造物においては杭頭が露出するものの、構造物の傾斜は確認されなかった。直接基礎の建築物の傾斜は岩手県山田町、宮城県名取市で1棟ずつ確認されている。



図-2.5.5 洗掘

#### (6) 漂流物の衝突

漂流物の衝突による被害は、窓や天井材など非構造部材の脱落を引き起こしたものがほとんどだった。躯体への明確な被害は多くはなかったが、宮城県名取市荒浜および岩手県陸前高田市の集合住宅の連層耐力壁において衝突により生じたと思われる開口が確認されている。

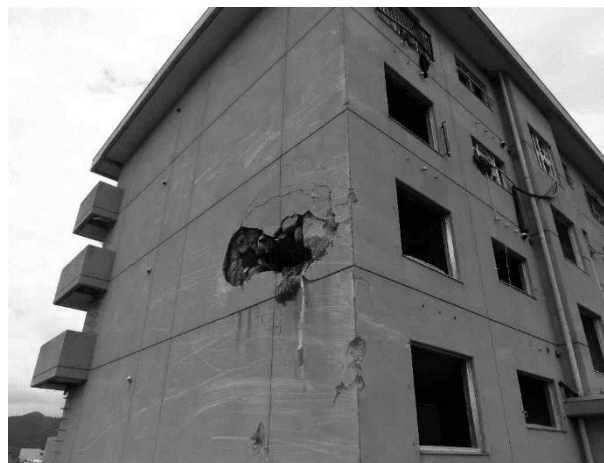


図-2.5.6 漂流物の衝突

#### 2.5.2 静水圧式による津波作用荷重評価

内閣府「津波避難ビル等に係るガイドライン」<sup>8</sup>では一般財団法人日本建築センターの自主研究に示された津波波圧算定式を参照し<sup>9、10</sup>、設計用浸水深 $h$ （自治体等がハザードマップ等で公開する想定される浸水深(建物の堰上げの影響を含まない)）の津波を建築物が受けた場合、高さ $3h$ の静水圧に相当する波圧分布を生じるとし、波圧は三角形分布形としている(図-2.5.7参照)。これは朝倉らが実施した水理実験において構造物に作用する波圧計測結果<sup>11</sup>に基づき、設計用津波荷重を動的な影響も含めて安全側に評価したものと考えられる。なお、2004年スマトラ島沖地震の被害調査において中埜らは構造物を対象として設

計用津波荷重に関する検討を実施している。本検討では、計測された浸水深に対する構造物耐力相当時の静水圧荷重を与える浸水深の比を水深係数 $a$ と定義し、倒壊した構造物と残存した構造物の境界線となる水深係数 $a$ は2.0～2.5程度であり、設計上の安全性余裕率を考慮した水深係数3の値は妥当であると報告されている<sup>12</sup>。

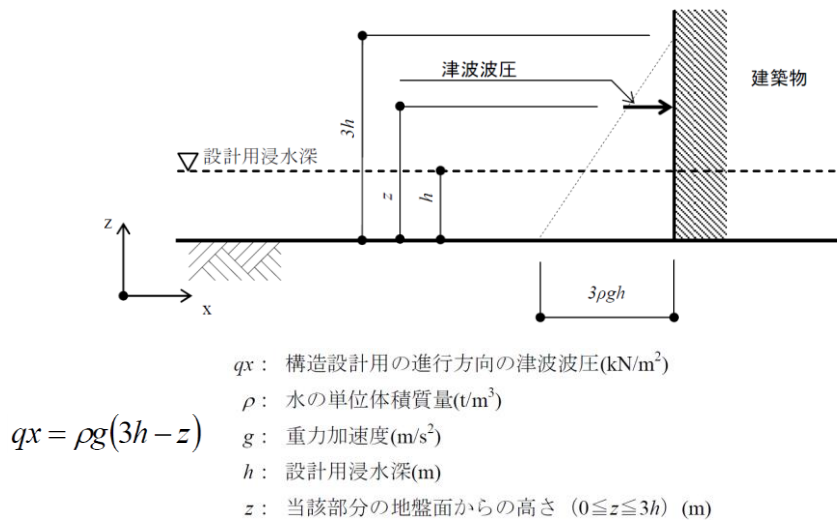


図-2.5.7 内閣府ガイドラインにおける津波波圧算定式

### 2.5.3 鉄筋コンクリート造構造物耐力と津波作用荷重の比較

本検討では静水圧荷重により建築物に作用する津波波力及び構造物耐力を比較した例について示す。静水圧荷重における検討では2004年スマトラ島沖地震の津波被害調査において中塾らが使用した構造物耐力相当時の浸水深 $h_{eq}$ の計測された浸水深に対する比である水深係数 $a$ を算定した。なお、RC造建築物の単位床面積重量は比較的低層の建築物を検討の対象としているから14 kN/m<sup>2</sup>と仮定している。丸鋼の降伏応力度は294 N/mm<sup>2</sup>、コンクリート圧縮強度は21 N/mm<sup>2</sup>としている。

図-2.5.8に国土技術政策総合研究所が現地調査を行った層崩壊および残存した建築物について、計測浸水深と水深係数 $a$ の関係を示す。配筋が不明な建築物が多数であるため、構造物耐力はすべて耐震1次診断基準<sup>13</sup>における強度評価式で評価している。また、津波が直接作用する構面における開口による荷重低減効果を考慮している。浸水深10m以下の建築物では1棟のみ倒壊が確認されており、本建築物の水深係数 $a$ は0.91であった。また、水深係数 $a$ が1より小さいにも関わらず倒壊を免れた建築物が確認された。本建築物は側面に大きな開口を有しており建物内部に水が回りこむことによって作用荷重が小さく留まったと考えられる。一方、浸水深が10mを超過した地域では水深係数 $a$ が1より小さいにも関わらず倒壊を免れた建築物が多数確認された。これは最大浸水深の静水圧分布を用いて仮定している津波波圧の作用状況とは大きく異なっているため、最大浸水深時の流速がそれほど大きくなっていないことなどに起因していると推察される。本検討結果より浸水深の大きな地域ではやや安全側の評価となるものの、東北地方太平洋沖地震において建築物に作用した最大津波荷重は概ね計測浸水深の静水圧荷重(水深係数 $a$ が1)で表されることが考えられる。

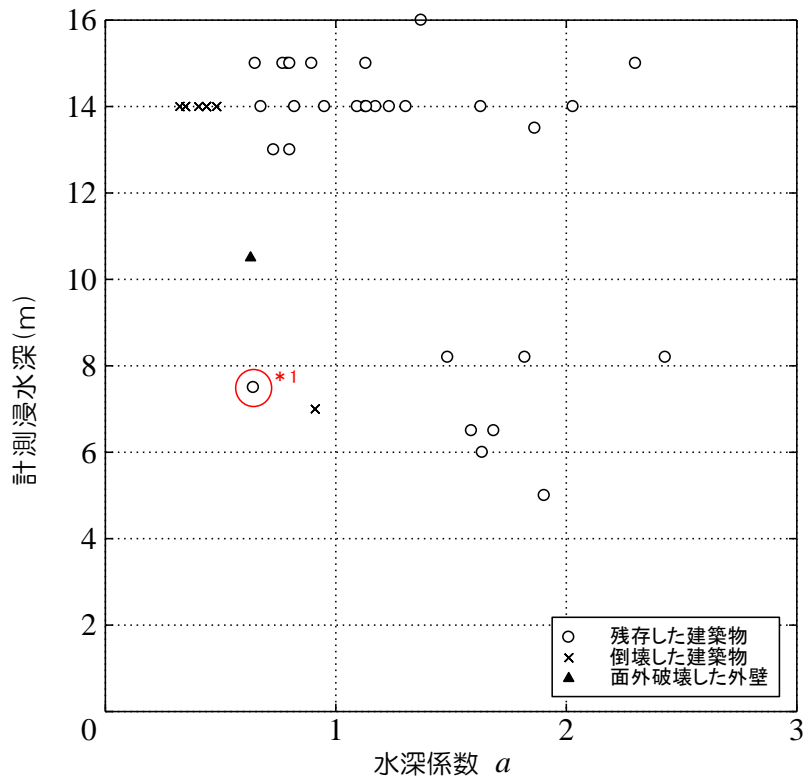


図-2.5.8 層崩壊した建築物に関する計測浸水深と水深係数 $a$ の関係

\* 1 開口が大きく建物内に水が早期に流入した可能性が高い建築物

#### 2.5.4 鉄筋コンクリート造工作物に関する検討

国土交通省 平成23年度建築基準整備促進事業では建築物と同様に鉄筋コンクリート造の壁、独立柱等からも津波作用荷重の推定を行っており、建築物のみの検討とは異なり、鉄筋コンクリート造工作物は浸水深の大小に関わらず水深係数 $a$ が1以上の範囲で転倒等の構造物基部破壊に至る被害が複数事例確認されている。

比較的単純な工作物45件および鉄筋コンクリート造建築物の自重に基づく転倒耐力以外で耐力評価した36棟の両者について、津波荷重と被害形態・程度の対応関係を検討すべく、図-2.5.9および図-2.5.10に、縦軸に計測浸水深 $\eta$  m、横軸に構造物耐力相当の浸水深 $a\eta$  mを計測浸水深 $\eta$  mで除した比として定義した水深係数 $a$ をとってまとめた。建築物は崩壊または残存した物を対象とし、転倒した物は含まない。また、津波波力が構造物の立地条件により異なることを想定し、津波高さや防波堤や防潮堤などの津波防災施設の規模等を総合的に勘案し、海側に津波の波力低減を期待し得る遮蔽物がある構造物と、ない構造物とに分類した。

図-2.5.9によると遮蔽物による波力低減効果が期待できる場合は、計測浸水深 $\eta$  mが概ね10m以下の場合では被害の有無(○と×等)の境界は水深係数 $a=1$ 程度(計測浸水深 $\eta$  m相当)であると考えられる。一方、波力低減効果が期待できない場合を図-2.5.10に示す。調査対象群には該当する建築物はなく、比較的単純な工作物のみである。×が水深係数 $a=1$ を超えて数例プロットされており、計測浸水深の概ね1.7倍以上の静水圧に相当する波力

が作用したものと考えられ、遮蔽物の有無による波力低減効果の差が見られる。

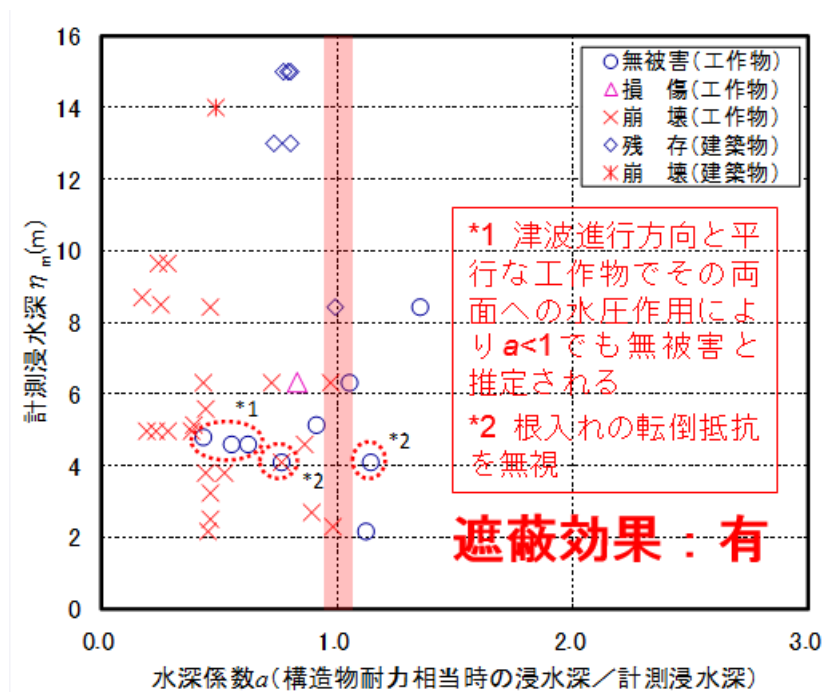


図-2.5.9 鉄筋コンクリート造工作物に関する計測浸水深と水深係数  $a$  の関係 (遮蔽物による波力低減効果が期待できる場合)

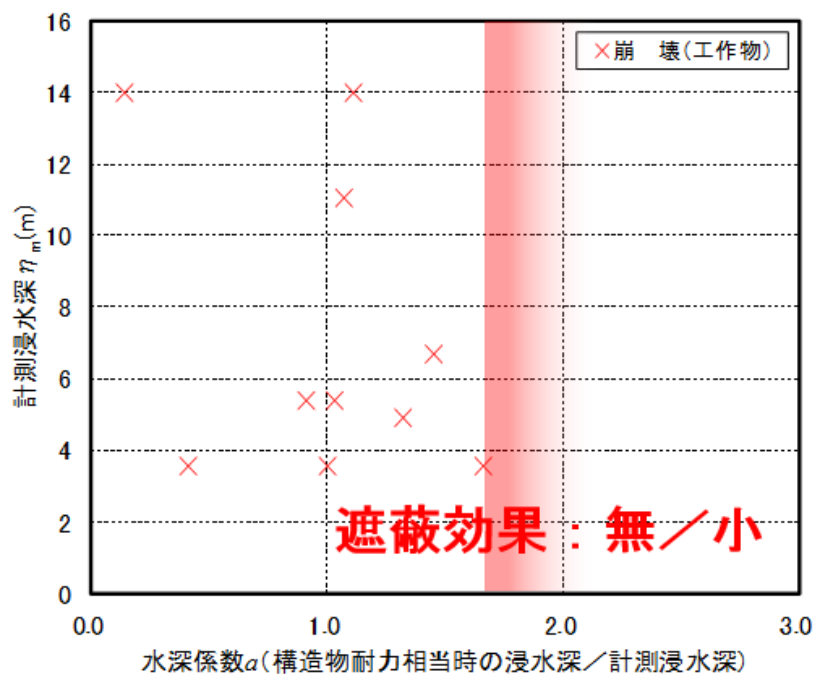


図-2.5.10 鉄筋コンクリート造工作物に関する計測浸水深と水深係数  $a$  の関係 (遮蔽物による波力低減効果が期待できない場合)



## 2.6 都市防災拠点機能の喪失・回復等の実態調査

### 2.6.1 調査の目的及び方法

東日本大震災においては、東北地方太平洋沿岸部の津波被災都市を中心に、市町村役場や消防署、病院、その他の公共施設などの多くが、津波浸水や地震動により損壊した。そのため、これらの施設において展開するはずであった、各種の防災拠点機能が、都市全体として失われたり、欠損したりするなどして、自治体の自律的な災害対応に支障を生じることとなった。

沿岸都市において津波災害時の防災拠点施設の機能を担保するには、全てを高台に移転した上で耐震化を図ることが考えられる。しかし、これらの施設の多くは平時において市街地に近接することにより住民の利便に供し、あるいは中心市街地の活性化に寄与している側面もある。特に人口減少が進む地方都市には、個々の施設の取組みがその都市の衰退を導かないよう、都市の将来像と整合させつつ、耐浪・耐水・耐震化、移転、代替施設の整備等の取組みを計画的に進めることが望ましい。

本調査では上記の視点に基づいて、東日本大震災での津波被災都市における防災拠点施設の被害、防災拠点機能確保上の支障、及び機能回復の状況等を調査し、都市・地区スケールでの防災拠点機能確保に際してみられた対応を整理した。

対象とする機能・施設については、災害対策の諸活動を統括する災害対応・復旧指令機能（災害対策本部が設置される市町村役場庁舎等）や、火災や被災者にかかわる消防・救援活動機能（消防署）、傷病者の救命・治療等の災害医療・救急活動機能（災害拠点病院等）、被災者の避難生活を受け入れる避難者収容機能（避難所）、及び外部支援の受入機能（公園等）とした。その上で、宮城・岩手両県を対象にこれら機能・施設の立地と津波浸水被害等の状況を概観し、さらにケーススタディ都市を選定しヒアリングを含む詳細調査を行った。

### 2.6.2 岩手県・宮城県における防災拠点施設の被災状況の収集・整理

2県の沿岸28市区町における防災拠点施設の被災・機能確保・移転等の状況を文献やインターネット情報等により収集・整理した。その概要を表-2.6.1にまとめる。

これによれば、中心市街地が津波により浸水した14都市の内、都市防災拠点施設が無被害であったのは、3都市に過ぎず、それ以外の都市では複数の種類の防災拠点施設が使用不能となるなどの大きな被害にあっている。実は、これらの都市における中心市街地の浸水の状況及び都市防災拠点施設の中心市街地への立地の状況、都市防災拠点施設の立地の点在・分散・集積の状況はさまざまであるが、こうした状況にかかわらず、津波被災時の都市防災拠点機能の維持が、沿岸都市にとっての大きな課題であることがわかる。

中心市街地の浸水の状況及び防災拠点施設の中心市街地への立地の状況、防災拠点施設の立地の点在・分散・集積の状況から、図-2.6.1に示す5パターンに分類した。この内、津波浸水被害と防災拠点施設の立地に関する都市計画上の課題がみられるのは、A～Dの類型であると考え、各類型から宮城県石巻市、岩手県釜石市、岩手県大船渡市、宮城県南三陸町の各1、計4市町を抽出し詳細調査を行った。

表-2.6.1 岩手・宮城両県の津波被災市区町における防災拠点機能の状況

	分類	災害対応・復旧指令	災害医療・救急活動	消防・救急活動機能	外部支援受入機能		
		役場本庁舎	災害拠点病院等	消防本部等庁舎	拠点施設の概要		
岩手県	洋野町	E	◎被害なし	—	◎被害なし	—	
	久慈市	E	◎被害なし	◎被害なし	◎被害なし	歴史民俗資料館(緊急消防援助隊)として機能	
	野田村	D	○一部浸水(玄関部分)	—	△一部浸水(1階部分)	—	
	普代村	E	◎被害なし	—	◎被害なし	—	
	田野畑村	E	◎被害なし	—	◎被害なし	—	
	岩泉町	E	◎被害なし	—	◎被害なし	—	
	宮古市	B	△一部浸水(1階部分)	◎被害なし	○一部損傷(亀裂)	—	
	山田町	A	△一部浸水(地下部分)	(×県立山田病院が浸水により機能停止、仮設診療所にて対応)	△一部浸水(1階部分)	遠野市運動公園(物資集積拠点)	
	大槌町	D	×全壊 →大槌小学校校庭に仮設庁舎	×2階まで浸水し機能停止(大槌高校救護所、上町ふれあいセンターを経て、現在は仮設診療所)	×全壊	寺野野球場(物資集積拠点)及び遠野市運動公園(物資集積拠点)	
	釜石市	B	×一部浸水(第一庁舎地階・1階) →代替施設にて業務実施	△地震動により一部が使用不可(耐震補強を実施し、業務を再開)	×一部浸水(第一庁舎地階・1階) →代替施設にて業務実施	物産センター(物資集配拠点) 交通事業者営業所(緊急車両給油拠点) 遠野運動公園を駐屯拠点として、釜石地区合同庁舎、消防本部小佐野出張所に活動部隊を展開	
大船渡市	C	○一部損傷(亀裂)	○壁面のひび割れ程度(病院機能に問題なし)	○一部損傷(亀裂)	東高校(緊急消防援助隊等)、住田町世田米小(英米支援部隊) 運動公園予定地→旧農業高校(自衛隊) 支援物資は種類別に集積場所を設定		
陸前高田市	D	×全壊	(×高田病院が全壊)	×全壊	竹駒IC・滝の里工業団地・オートキャンプ場等に分散野営(緊急消防援助隊)		
宮城県	気仙沼市	A	◎被害なし	◎被害なし ※建て替え検討中	◎被害なし	市営野球場(DMAT等)	
	南三陸町	D	×全壊(防災庁舎含む) →他施設にて業務再開	(×志津川病院が全壊) →患者は石巻赤十字病院へ救出・搬送。ベイサイドアリーナにて診療スペースを設置。	×全壊 →ベイサイドアリーナにて業務再開	ベイサイドアリーナ(物資受入拠点、外部支援受入拠点) 緊急消防援助隊は登米市総合体育館を駐屯拠点、ベイサイドアリーナを活動拠点に。	
	女川町	D	×全壊 →仮設庁舎にて業務再開	(なし)女川病院は1階部分が浸水	×全壊(仮設庁舎にて業務再開)	総合運動公園(物資集積拠点)	
	石巻市	A	△一部浸水(1階部分)・一部損壊(6・7階部分)	◎被害なし (×市立病院は津波で機能停止、港湾病院は1階部分が浸水し2階以上で業務継続)	○一部浸水(地下ピット)	総合運動公園・専修大学(外部支援・物資受入拠点) 総合運動公園は近隣自治体支援部隊の駐屯や患者の後方へり搬送の中継も	
	東松島市	A	◎被害なし	—	◎被害なし	—	
	松島町	E	◎被害なし	—	◎被害なし	—	
	利府町	E	◎被害なし	—	◎被害なし	宮城県総合運動公園(緊急消防援助隊)	
	塩釜市	A	◎被害なし	被害なし(ICUが一時使用不可)	◎被害なし	—	
	七ヶ浜町	E	◎被害なし	—	◎被害なし	町役場庁舎3階(自衛隊詰所)	
	多賀城市	A	◎被害なし	—	◎被害なし	—	
	仙台市	宮城野区	E	◎被害なし	—	◎被害なし	—
		若林区	E	◎被害なし	—	◎被害なし	—
		名取市	E	△一部損傷(亀裂、天井脱落)	—	◎被害なし	市箱塚グラウンド(緊急消防援助隊)
		岩沼市	E	◎被害なし	—	◎被害なし	市民会館(緊急消防援助隊)
亶理町		E	×損壊(亀裂・使用不可) →仮設テント →プレハブ庁舎にて業務継続	—	◎被害なし	亶理消防署(緊急消防援助隊)	
山元町	E	◎被害なし	—	◎被害なし	小中学校グラウンド(緊急消防援助隊)		

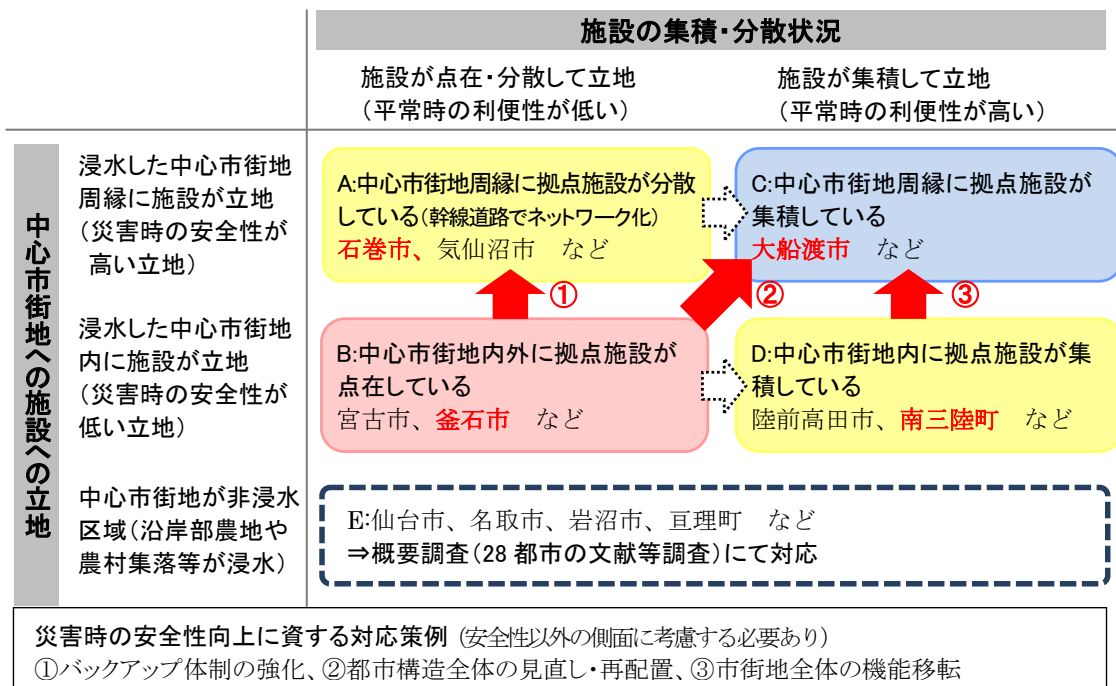


図-2.6.1 津波被災都市の浸水・防災拠点施設の立地状況によるパターン分類

### 2.6.3 宮城県石巻市での防災拠点機能の喪失・回復状況

状況の異なる石巻市・釜石市・大船渡市・南三陸町の4市町を対象に、都市防災拠点施設の被害とそれによる機能確保上の支障、機能回復と活動等の状況を文献や現地でのヒアリング等により、東日本大震災の翌年度と翌々年度の平成23年度から24年度にかけて実態調査した。対象とする都市防災拠点機能(施設)は、災害対策の諸活動を統括する災害対応・復旧指令機能(災害対策本部が設置される市町村役場庁舎等)や、火災や被災者にかかわる消防・救援活動機能(消防本部)、傷病者の救命・治療等の災害医療・救急活動機能(災害拠点病院等)、被災者の避難生活を受け入れる避難者収容機能(避難所)、及び外部支援の受入機能(運動公園等)とした。

調査の結果は、機能毎に時系列でフロー図として整理し、またそれらの位置関係等を災害対応のフェーズ毎に地図上に記入した活動展開図を作成した。図-2.6.2及び図-2.6.3は南三陸町を対象として作成したフロー図及び活動展開図である。これにより、各都市における被災後のフェーズ毎に、防災拠点機能の確保・喪失・回復といった状況や、防災拠点機能の移転・集約・閉鎖といった施設利用の状況、防災拠点施設における活動や施設間の機能代替・補完・連携等の関係などを、概観することが可能となった。

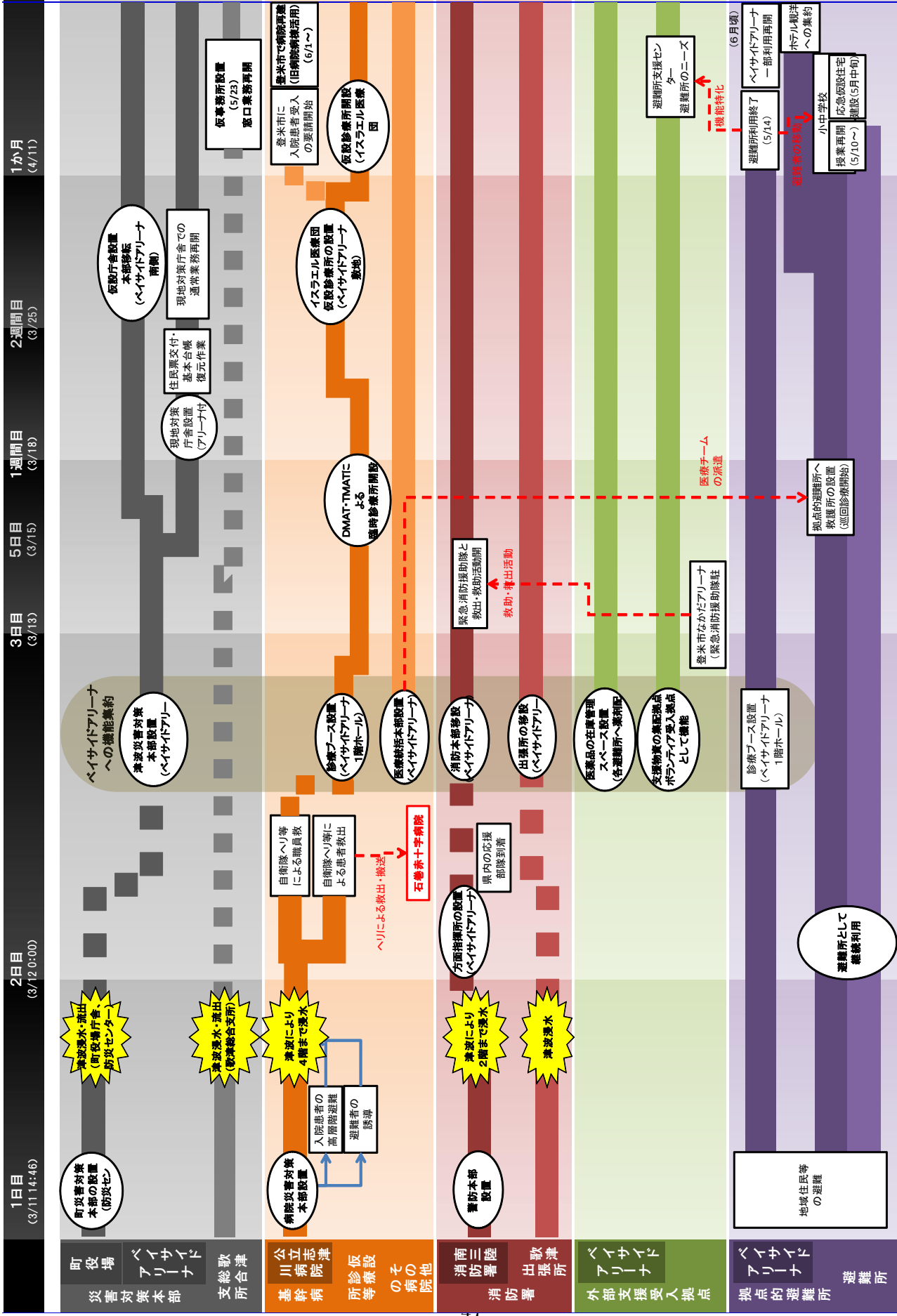


図-2.6.2 南三陸町における都市防災拠点機能・施設の対応状況の推移

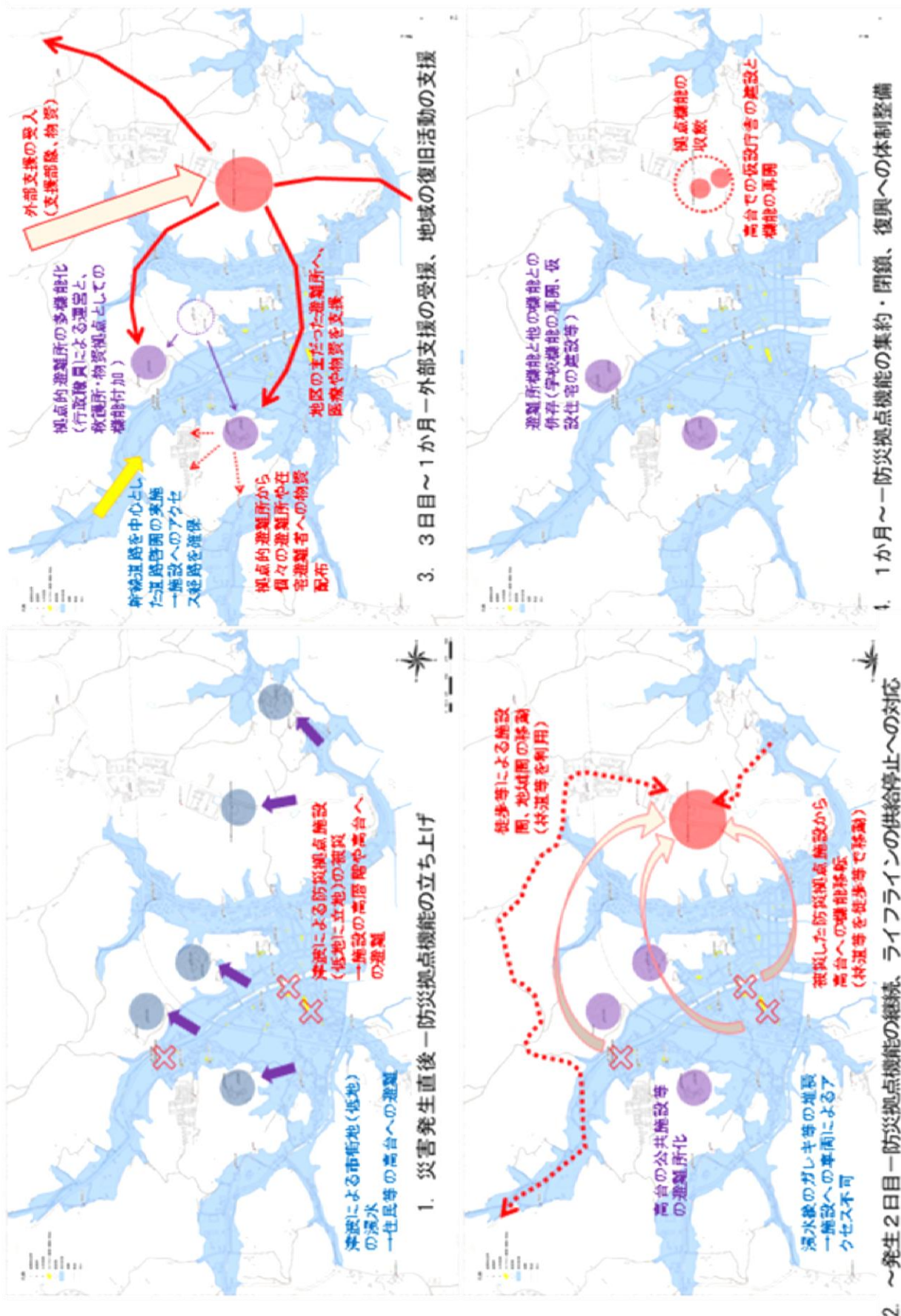


図-2.6.3 南三陸町の都市防災拠点機能の展開状況

想定を上回る津波被害であったため、従来の地域防災計画に定めた対応とは多くの都市で異なったが、結果として、都市防災拠点施設（代替施設を含む）の都市・地区レベルにおける空間的な事象（配置・施設相互や幹線道路との位置関係等）が、施設の被災状況のみならず、応急対応及び復旧・復興期におけるその機能に影響を与えていることがわかった。みられた空間的な現象を整理すると、図-2.6.4 のようになる。



図-2.6.4 津波被災都市において防災拠点機能確保に関して見られた都市・地区レベルでの現象

以上より、都市防災拠点機能の確保や相互連携も含めた活動の円滑化に向けて得られた知見を、以下にまとめる。

- ・災害時の拠点機能の確保に関しては、施設の安全な場所への移転の他に、代替施設の事前設定も考えられるが、その施設が代替の機能を発揮できるように留意しておく必要がある。また、拠点機能の被災・孤立対策として、施設からの緊急避難場所の確保や施設へのアクセス経路の強化も図る必要がある。

- ・各拠点機能の活動の円滑化に関しては、拠点機能間の相互連携が可能となるよう、拠点施設の集約化は有効であるが、それ以外の場合においては、拠点施設間の被災時の連絡経路の確保が重要である。
- ・外部支援の受け入れに関しては、施設の許容量を想定して支援部隊等が滞在する受援拠点施設を事前に設定しておくこと、特に隣接都市との協力による大規模な受援施設の確保が重要である。本部機能と受援拠点との連絡手段にも留意する必要がある。
- ・支援物資の受け入れに関しては、その受け入れ・管理・配送等を行う物流拠点施設を事前に設定することに加えて、受け入れ・管理・配送等の体制整備にも留意する必要がある。
- ・避難所機能に関しては、医療・介護・物資の提供などの避難者の生活支援を行う拠点施設と実施体制を事前に検討しておく必要がある。
- ・災害医療機能に関しては、災害拠点病院の災害時の広域アクセスの確保や、浸水想定区域に立地する医療機関の機能継続性の強化が重要であるとともに、他の拠点施設へのアクセス経路等の強化を図る必要がある。
- ・防災拠点機能の配置計画の事前検討においては、施設の立地に応じたフェーズ毎の活用や、想定を上回る災害への対応方法にも留意する必要がある。

## 2.7 2章のまとめ

本章におけるまとめを以下のとおり示す。また、現地調査の結果を示した位置を図-2.7.1に示す。

### (1) 津波痕跡調査

- ・陸上地形によって津波遡上状況が異なることが分かった。津波ハザードマップの原図となる津波浸水想定の設定にあたっては、水勢による遡上や地形・建物等による低減が考慮される津波浸水シミュレーションが必要であることを確認した。

### (2) 地形変化調査

- ・大規模地震によって陸地や海底で大規模な隆起・沈降が発生することが分かった。津波の浸水深に関わるため、津波浸水想定の設定にあたっては陸地や海底の隆起・沈降を考慮する必要があることを確認した。
- ・海岸堤防の決壊箇所では、砂浜の消失等の海岸線の後退や深掘れが見られた。地形変化を軽減する観点からも津波に対して海岸堤防の全壊可能性を減らす必要性を確認した。

### (3) 海岸堤防被災調査

- ・越流水により海岸堤防における天端保護工、裏法被覆工、堤体の侵食、裏法尻の洗掘が見られ、越流水深が大きいほど全壊の事例が多く見られた。津波に対して海岸堤防の全壊可能性を減らす研究を行う際は、これらの項目を分析する必要性を確認した。
- ・海岸堤防の被災状況を参考に海岸堤防の有無による浸水範囲の比較試算を行い、海岸堤防が被災しないほど、浸水面積や氾濫流の流速が低減することが分かった。津波に対して海岸堤防の全壊可能性を減らすことが減災効果に繋がることを確認した。

### (4) 津波による河川堤防の被害

- ・津波遡上時の河川堤防において同程度の越流条件でありながら被災の程度が異なっていた。その理由は堤内地の湛水状況であり、湛水せずに越流を受けていた時間が長い断面ほど、大きな侵食を受けたと考えられた。

### (5) 建築物被害調査

東日本大震災における建築物の津波被害では計測された浸水深相当の静水圧以上の耐力を有するもので崩壊した事例はなかった。一方、強度の低い簡易な工作物を含めると防潮堤等の遮蔽物を有する地域とそうでない地域で構造物に作用した津波波力に異なる傾向が表れた。東日本大震災の津波においては遮蔽物を有する地域では建築物と同様、概ね設計用浸水深の静水圧相当の荷重において被災および残存構造物の境界が表れるが、遮蔽物が周辺にない地域では計測浸水深の1.7倍程度の静水圧に相当する耐力を有する構造物が被災した事例が確認された。

### (6) 都市防災拠点機能の喪失・回復等の実態調査

- ・津波被災都市における都市防災拠点機能の喪失・回復等の実態を把握した。
- ・都市防災拠点機能の確保策について、拠点機能の配置計画やアクセス等を含む事前検討が有効であることを確認した。



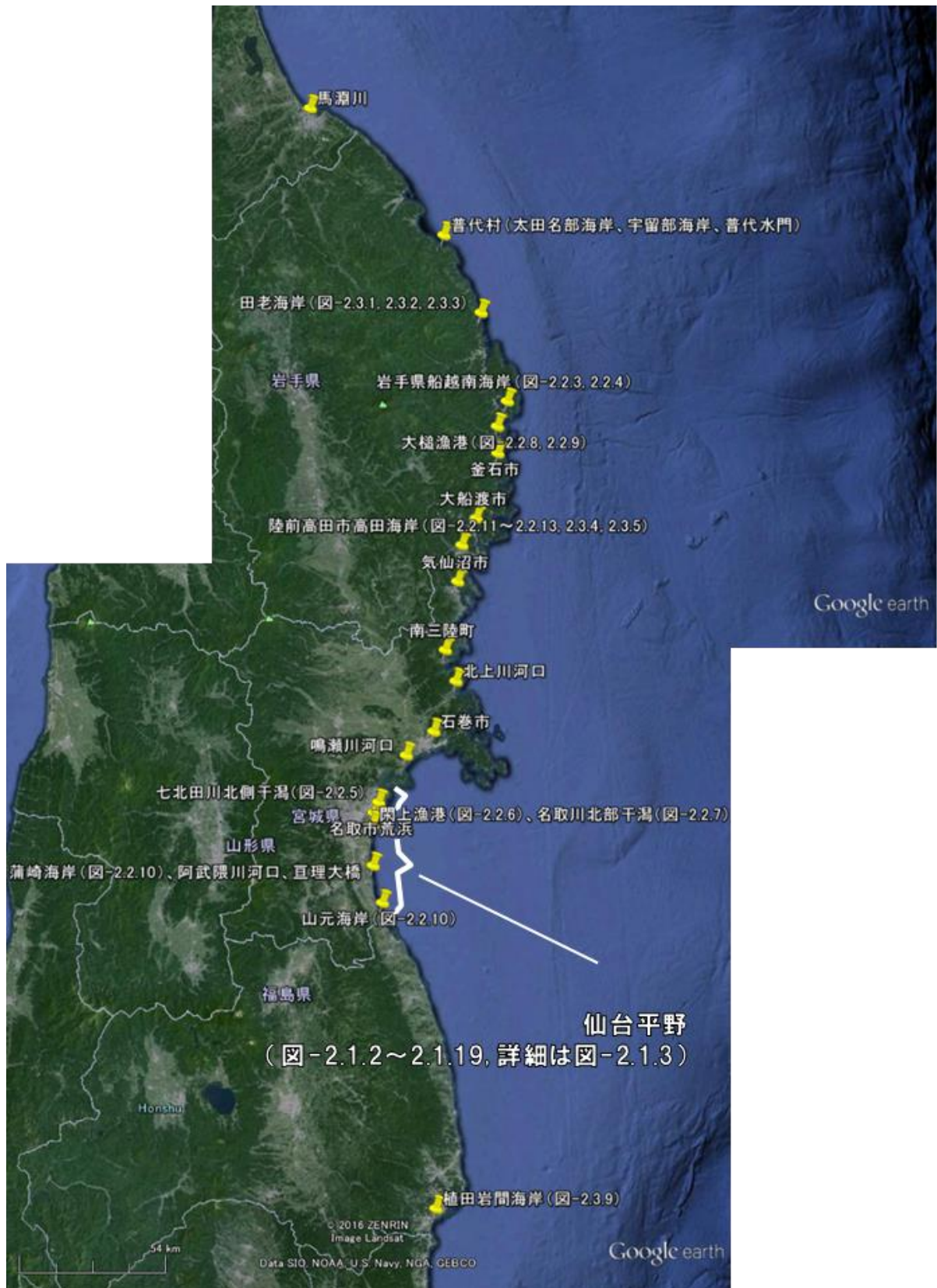


図-2.7.1 本章で示した現地調査実施地点の一覧

### 3. レベル1津波・レベル2津波の設定手法

#### 3.1 既往津波痕跡調査整理

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」<sup>14</sup>では、「今後の津波対策を構築するにあたっては、基本的に二つのレベルの津波を想定する必要がある」として、「一つは、（中略）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」（レベル2津波）、「もう一つは、最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波」（レベル1津波）が示された。

また、レベル2津波については、「住民等の避難を軸に、土地利用、避難施設、防災施設などを組み合わせて、とりうる手段を尽くした総合的な津波対策の確立が必要」とされ、レベル1津波については、「人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、引き続き、比較的発生頻度の高い一定程度の津波高に対して海岸保全施設等の整備を進めていくことが求められる」ことが示された。

このため、レベル2津波については、避難の観点から津波浸水想定の対象外力として、また、レベル1津波については、海岸保全施設の設計水位に係る対象外力として、その設定が必要となり、国総研海岸研究室ではその設定方法について検討を行った。

図-3.1.1は、日本被害津波総覧<sup>15</sup>を参考に、横軸に津波の発生前、縦軸に津波高さをプロットしたグラフを作成したものであり、当該グラフにより、レベル1津波（設計津波、図中の点線）や、レベル2津波（図中では東北地方太平洋沖地震）に相当する津波が地域海岸ごとに異なることが視覚的にも分かりやすく示すことができた。なお、津波痕跡高は東日本大震災も含め、東北大学の津波痕跡データベースに収録されており、こうしたデータを踏まえて当該グラフを作成する方法は、後述の3.2、5.1で示すとおり、現在、各都道府県が設計津波水位（レベル1津波）や津波浸水想定（レベル2津波）の設定を行う際に活用されている。

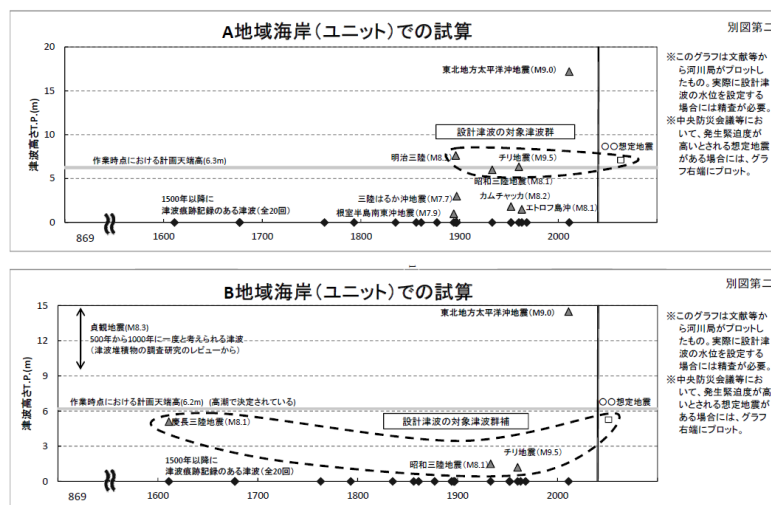


図-3.1.1 既往津波痕跡調査（海岸における津波対策検討委員会<sup>16</sup> 第2回資料3より抜粋）

## 3.2 設計津波高設定法

### 3.2.1 検討の背景

3.1で述べたとおり、中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震・津波対策に関する専門調査会報告」の中で、今後の津波対策を構築するにあたって、基本的に二つのレベルの津波を想定する必要があるとされた。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あり、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（レベル2津波）である。もう一つは、津波の内陸への浸入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あり、最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波（レベル1津波）である。

従前より整備されてきた海岸保全施設等は、比較的発生頻度の高い津波等を想定してきたものであり、一定の津波高までの被害抑止には効果を発揮してきた。最大クラスの津波に備えて、海岸保全施設等の整備の対象とする津波高を大幅に高くすることは、施設整備に必要な費用、海岸の環境や利用に及ぼす影響などの観点から現実的ではない。そこで人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、引き続き、比較的発生頻度の高い一定程度の津波高（レベル1津波）に対して海岸保全施設等の整備を進めていくこととされた。特に被災地では、海岸堤防の復旧が復興に向けた第一歩となることから、その前提となる復旧堤防高を決める方法を整理する必要がある。

### 3.2.2 設計津波の水位の設定等に関する課長通知

これを受け、海岸研究室は、国土交通省水管理・国土保全局海岸室とともに、比較的頻度の高い津波、すなわち設計津波の抽出と設計津波に対して必要とされる堤防高を設定する方法を整理し、その結果がとりまとめられ、海岸省庁の担当課室長より海岸管理部局に対して平成23年7月8日付に発出された（課長通知）<sup>18</sup>。特に、地域海岸の設定や既往津波の痕跡調査結果整理の試行においては、東北地方整備局と協力しつつ実施した。発出に先立ち、6月に開催された第2回「海岸における津波対策検討委員会」において学識経験者から意見を聴取した。

課長通知に定めた設計津波の水位と堤防天端高の設定方法の手順は以下のとおりである（図-3.2.1）。

#### (1) 設計津波の設定単位の決定（図-3.2.1 1. 設計津波の設定単位）

「湾の形状や山付け等の自然条件」、「文献や被災履歴等の過去に発生した津波の実績津波高さ及びシミュレーションの津波高さ」から、同一の津波外力を設定しようと判断される一連の海岸線に分割し、地域海岸を区分する。

#### (2) 過去に発生した津波の実績津波高さの整理とシミュレーションによる津波高さの算出（図-3.2.1 2. 設計津波の設定①、②）

(1)の成果を踏まえ、地域海岸ごとに既往の津波痕跡高や想定地震津波の水位を整理し、

原則として一定の頻度（数十年から百数十年に一度程度）で到達すると想定される津波の集合を、設計津波の水位設定のための対象津波群として選定する（図-3.2.3）。図-3.2.3の作成にあたっては、津波痕跡高は、T.P.で整理することを基本とする。痕跡調査は、土木学会海岸工学委員会における現地調査マニュアル<sup>19</sup>等に基づき行われたものを収集整理する。

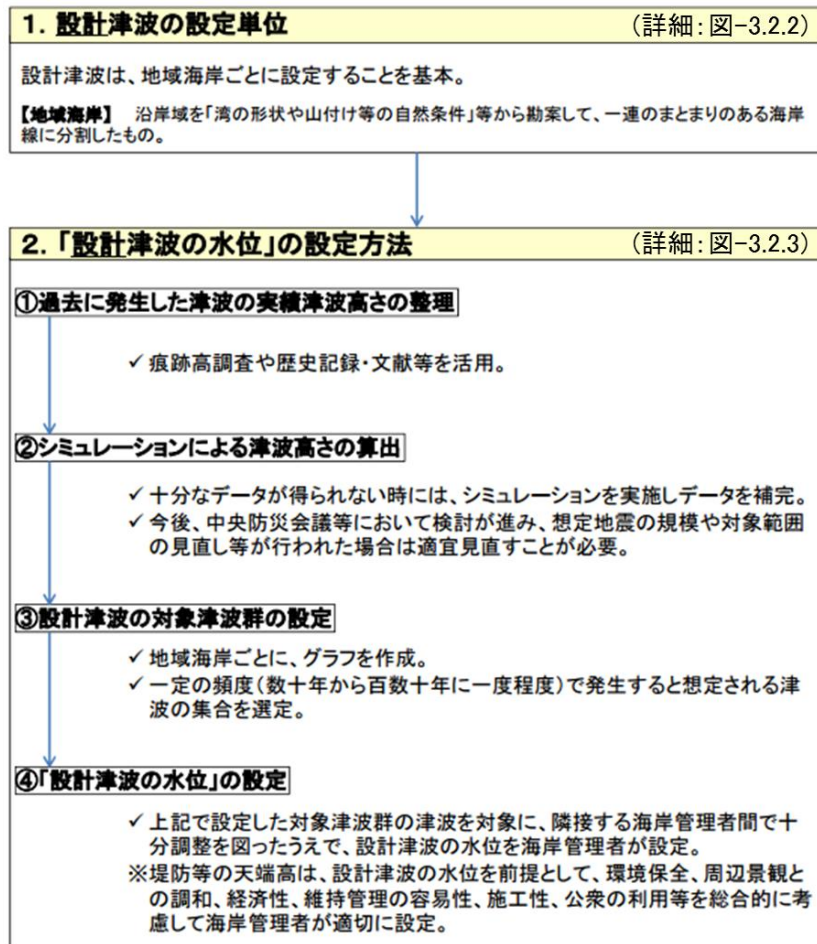


図-3.2.1 設計津波水位の設定方法（出典：設計津波の水位の設定方法等について<sup>7</sup>）

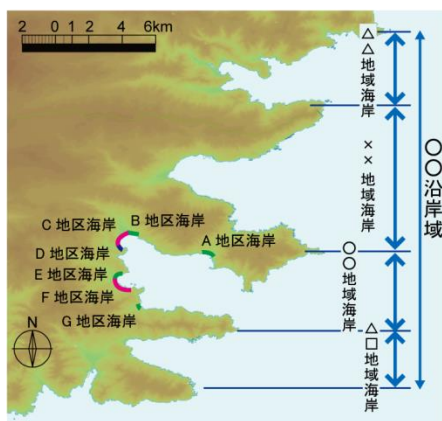


図-3.2.2 地域海岸のイメージ

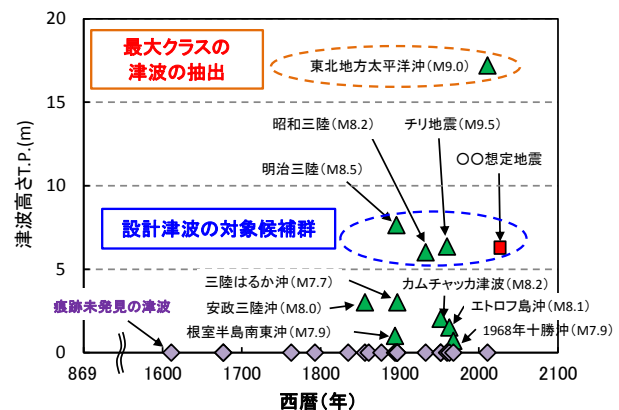


図-3.2.3 地域海岸における津波高さの整理例

他機関の調査データを用いる場合は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ<sup>20</sup>に現地調査結果として登録してあるデータ等信頼できる津波高さを用いる。なお、出来る限り海岸線近くの痕跡高を収集するものとし、津波高さのデータを補う必要がある場合は、「日本被害津波総覧」等の公表資料や地方整備局、都道府県及び気象庁等の調査結果等公的な調査資料を用いる。歴史記録及び文献等に地震発生記録はあるが、津波高さのデータが無い場合は、津波堆積物等の調査結果から浸水範囲等を明らかにしたうえで、可能な範囲でシミュレーション等により津波高さを想定するよう努める。

### (3) 設計津波の対象津波群の設定 (図-3.2.1、2. 設計津波の設定③)

地域海岸ごとに横軸に津波の発生年、縦軸に海岸線における津波高さを取りグラフを作成する。作成したグラフから一定の頻度(数十年から百数十年に一度)で到達すると想定される津波の集合を対象津波群として選定する。対象津波群の津波を対象に、地域海岸において堤防位置における津波の侵入の防止を条件とした津波シミュレーションを行う等により地域海岸内の津波水位分布を算出し、当該水位分布に基づき、隣接する海岸管理者間で十分調整を図ったうえで、設計津波の水位を設定する。

### (4) 「設計津波の水位」の設定 (図-3.2.1、2. 設計津波の設定④)

堤防等の天端高は、上記により設定された設計津波の水位を前提として、海岸の機能の多様性への配慮、環境保全、周辺景観との調和、経済性、維持管理の容易性、施工性、公衆の利用等を総合的に考慮しつつ、海岸管理者が適切に定めるものであることに留意する。

## 3.2.3 従来との違い

設計津波の水位設定におけるこれまでとの大きな違いは3つ挙げることができる。

- (1) 発生頻度の考慮を明確にした点。従来は、既往最大や近年発生した著名な津波を選定していたが、数十年から百数十年に一度程度という目安で対象津波群を選定するプロセスが明確に加わった。
- (2) シミュレーション技術の発達を反映して、堤防ありの状態における津波シミュレーション計算に基づき設定することとした点。従来は痕跡高をもって設計津波の水位とする場合もあったが、堤防の存在によるせりあがりも明確に考慮されるようになった。
- (3) 地域海岸を設定することにした点。従来所管ごとに設計外力を設定する場合もあったが、所管ではなく地形条件ごとに設定することとした。

なお、平成27年4月時点において全国で21都道県が設計津波水位の設定・公表を行っている(表-3.2.1)。

表-3.2.1 設計津波水位の設定状況

【都道府県における設計津波水位の設定・公表状況】				
設定・公表済 都道府県	対象沿岸名	【設定】年月日	【公表】年月日	備 考
北海道	根室沿岸、十勝釧路沿岸、日高胆振沿岸、渡島東沿岸、渡島南沿岸	平成25年2月20日	平成25年2月20日	
青森県	下北八戸沿岸	平成24年8月10日	平成24年8月10日	
	陸奥湾・津軽沿岸	平成25年1月29日	平成25年1月29日	
岩手県	三陸北沿岸、三陸南沿岸	平成23年 9月26日 平成23年10月20日	平成23年 9月26日 平成23年10月20日	※2回に分けて設定、公表
宮城県	三陸南沿岸、仙台湾沿岸	平成23年9月9日	平成23年9月9日	
秋田県	秋田沿岸	平成25年9月26日	平成25年9月26日	
山形県	山形沿岸	平成27年3月9日	平成27年3月9日	
福島県	福島沿岸	平成23年10月8日	平成23年10月8日	
茨城県	茨城沿岸	平成24年8月24日	平成24年8月24日	
千葉県	千葉東沿岸(九十九里浜) 千葉東沿岸・東京湾沿岸	平成24年5月22日 平成25年11月29日	平成24年5月22日 平成25年11月29日	※2回に分けて設定、公表
東京都	伊豆諸島沿岸	平成25年3月9日	平成25年5月14日	※東京湾沿岸は津波(L2津波：元禄型関東地震)が高潮を下回るため、L1津波検討の予定無し。
神奈川県	東京湾沿岸、相模灘沿岸	平成25年1月25日	平成25年1月25日	
静岡県	伊豆半島沿岸、駿河湾沿岸、遠州灘沿岸 伊豆半島沿岸(熱海市～下田市)	平成25年6月27日 平成27年1月30日	平成25年6月27日 平成27年1月30日	※2回に分けて設定、公表
愛知県	遠州灘沿岸、三河湾・伊勢湾沿岸	平成26年10月24日	平成26年10月24日	
和歌山県	紀州灘沿岸、熊野灘沿岸	平成25年10月	平成26年10月28日	
岡山県	岡山沿岸	平成26年3月31日	平成26年4月15日	
広島県	広島沿岸	平成26年9月18日	平成26年9月18日	
徳島県	讃岐阿波沿岸、紀伊水道西沿岸、海部灘沿岸	平成25年3月29日	平成25年3月29日	
香川県	讃岐阿波沿岸、燧灘沿岸	平成27年3月25日	平成27年3月25日	
愛媛県	燧灘沿岸、伊予灘沿岸、豊後水道沿岸	平成26年6月11日	平成26年6月11日	
高知県	海部灘沿岸 土佐湾沿岸 豊後水道東沿岸	平成25年2月25日 平成25年11月1日	平成25年2月25日 平成25年11月1日	※2回に分けて設定、公表
宮崎県	日向灘沿岸	平成25年12月4日	平成25年12月4日	

### 3.3 3章のまとめ

本章におけるまとめを以下のとおり示す。

- ・ 既往の津波痕跡調査結果を横軸に津波の発生年、縦軸に津波高さでグラフ化し整理する手法を示した。この手法は、設計津波水位（レベル1津波）、津波浸水想定（レベル2津波）の設定時に活用されることとなった。
- ・ 本省や地方整備局と協力し、設計津波水位（レベル1津波）の設定法を整理した。上記のグラフ整理による設計津波群の選定やシミュレーション計算による堤防のせりあがり が考慮される等の一連の設定プロセスが明確になり、海岸線を有する都道府県の約5割で設計津波水位が設定された（平成27年4月時点）。

## 4. 海岸線等における津波防護方策

### 4.1 海岸堤防の被災分析

#### 4.1.1 検討の背景

東北地方太平洋沖地震津波（以下、今次津波）で多くの海岸保全施設が被災したことを受けて、「設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していく」とする方針が中央防災会議<sup>21</sup>等から示された。「粘り強い」とは、海岸保全施設が破壊・倒壊するまでの時間を少しでも長くする、あるいは、施設が全壊に至る可能性を少しでも減らすことである。これによって、避難に使える時間を確保する、第2波以降の被害を軽減する、迅速な復旧を可能とすることで二次災害のリスクや復旧費用を低減するなどの効果が期待される<sup>22</sup>。このため、海岸研究室では、施設を粘り強い構造とするための具体的な方向性を見いだすことを目的として、青森県から千葉県にかけての海岸保全施設のうち、三面張り構造の海岸堤防（以下、堤防）を対象に被災状況、構造諸元と津波外力の関係を分析することとした。

分析に用いたデータは、「海岸における津波対策検討委員会」での検討用に関係省庁及び被災県の協力を得て、国土交通省水管理・国土保全局海岸室および国総研海岸研究室が収集したものである。

海岸の堤防は用地に制限がある場合を除けば、土砂を盛って構築した堤体の表法、天端、裏法をコンクリートで被覆した三面張り構造が主流となっている（**図-4.1.1**）。今次津波の直後に実施された現地調査（本報告書2.3参照）では、堤防を越えた水流によって、裏法尻部が洗掘された例が多数確認され（**写真-4.1.1**）、洗掘による支持基盤の喪失が裏法被覆工の流出、堤体土の流失を経て堤防の倒壊につながったと推察されている（**図-4.1.2**）。

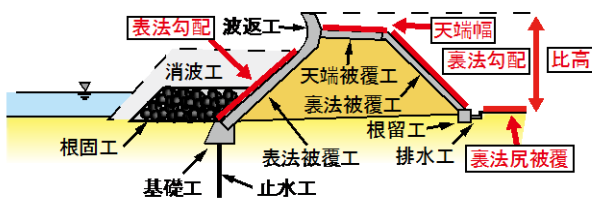


図-4.1.1 三面張り構造の海岸堤防の基本的な構造

写真-4.1.1 半壊した三面張り構造の海岸堤防と裏法尻部における洗掘の状況（宮城県岩沼市蒲崎海岸）

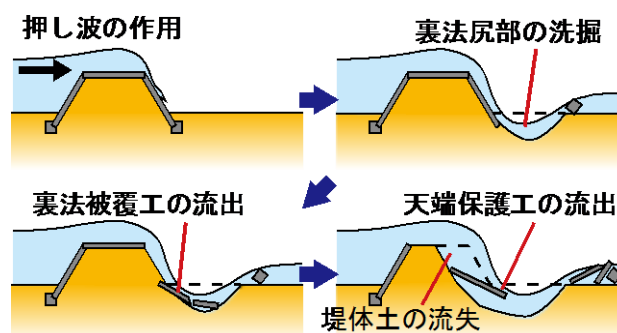


図-4.1.2 裏法尻洗掘からの破壊過程

#### 4.1.2 被災実態調査から見た被災メカニズム

東北地方太平洋沖地震の津波で被災した海岸堤防等について現地調査を実施した結果、津波による海岸堤防の被災状況は以下の8パターンに分類できることがわかった。

- ・裏法尻の洗掘からの被災
- ・裏法肩・天端からの被災
- ・表法先の洗掘からの被災
- ・押し波による波返工の破損
- ・引き波による波返工の破損
- ・押し波による重力式堤防の転倒
- ・引き波による重力式堤防の転倒
- ・主に地震動による破壊

ここでは、具体的な事例を挙げながら各被災状況のパターンを紹介するとともに、津波の越流から各被災状況に至るまでのメカニズムについて考察する。また、次章で扱う、海岸堤防を津波の越流に対して粘り強い構造とするための工夫についての検討の方向性を見いだすために実施した、海岸堤防の構造諸元と被災状況の関係についての分析結果についても報告する。

##### (1) 各被災状況のパターン

###### 1) 裏法尻の洗掘からの被災

海岸堤防の裏法尻での洗掘は、海岸堤防が全壊に至らなかった箇所において多く見られた。たとえば、**写真-4.1.2**のように、宮城県蒲崎海岸では、海岸堤防の陸側の深掘れが沿岸方向に延びていた。また、**写真-4.1.3**のように、裏法尻での洗掘に加えて、裏法や天端も削られた海岸堤防も見られた。

津波が海岸堤防を越流することで、堤防の陸側が洗掘される。このような海岸堤防の裏法尻での洗掘によって、**図-4.1.2**のように、裏法被覆工が流失し、堤体土が流出する被災機構が考えられる。





写真-4.1.2 海岸堤防陸側の深掘れ



写真-4.1.3 天端・裏法が削られた海岸堤防

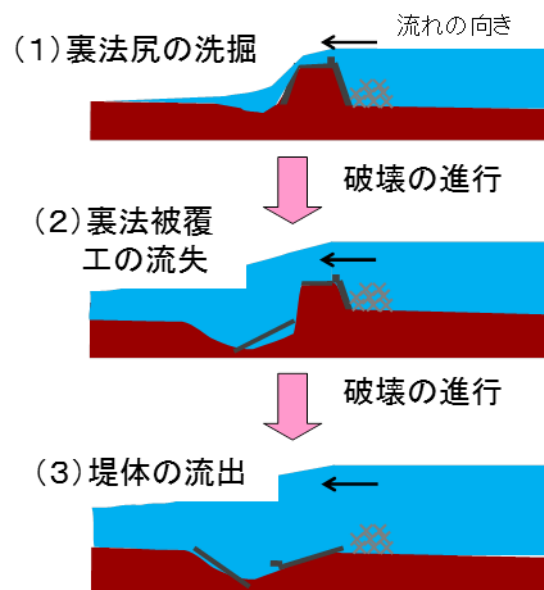


図-4.1.2 裏法戻りの洗掘からの被災の機構

## 2) 裏法肩・天端からの被災

海岸堤防の裏法尻での洗掘が明瞭ではない場所においても、裏法や天端の被覆工が流失していた箇所があった。写真-4.1.4 に示す岩手県金浜海岸では、裏法尻での洗掘が明瞭ではなく、裏法尻に近い裏法被覆工が残っているものの、その上部の被覆工が流失していた。この被災については、越流に伴う裏法肩での圧力低下によって裏法被覆工が持ち上げられた可能性が指摘されている。また、写真-4.1.5 に示す宮城県大曲海岸では、裏法被覆工は被災せず、天端被覆工のみが流失していた。

この被災機構は図-4.1.3 のように整理される。まず越流によって裏法または天端の被覆工が流失した後、堤体土が流出し、最終的に全壊に至るというものである。津波が海岸堤防を越流する際には、裏法で高流速が発生し、裏法肩で圧力が低下する。このような高流速に起因する流体力や裏法肩での圧力低下により、裏法被覆工が不安定になったものと考えられる。さらに、津波の来襲により堤体土の浸潤面が上昇することで発生する、裏法被覆工を下から押し上げる力も影響していたと考えられる。



写真-4.1.4 裏法被覆工の流失（岩手県金浜海岸）



写真-4.1.5 天端被覆工の流失（宮城県大曲海岸）

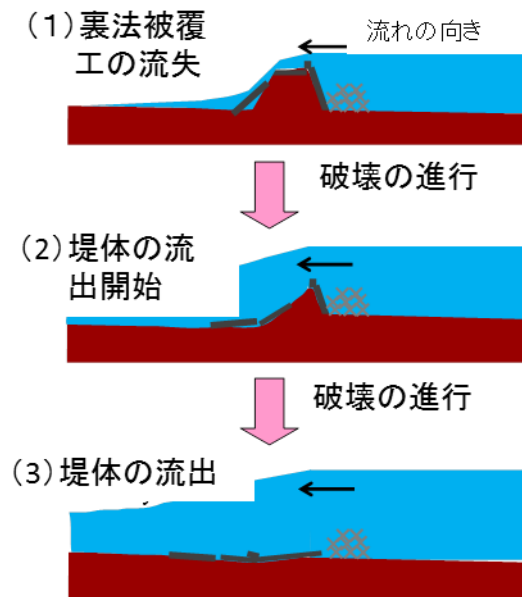


図-4.1.3 裏法肩・天端からの被災の機構

### 3) 押し波、引き波による波返工の破損

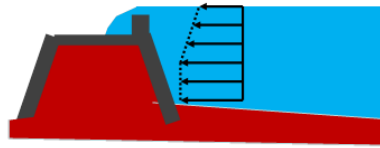
波返工は風波やうねりの越波を低減するために設置されるものであるが、それが破損する事例が見られた。たとえば、福島県の豊間海岸では、写真-4.1.6のように、波返工が陸側に転倒していた。

このような被災は、図-4.1.4のように、津波の押し波あるいは引き波による圧力が、波返工の接合部の強度を上回る場合に発生すると考えられる。



写真-4.1.6 波返工の破損（福島県豊間海岸）

(1) 波返工に波圧がかかる



(2) 波返工の破損

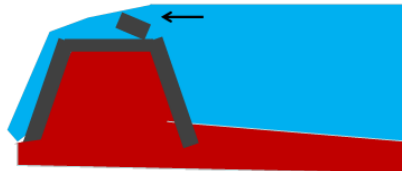


図-4.1.4 波返工の破損の機構

#### 4) 表法先の洗掘からの被災

引き波によっても表法先で洗掘が生じる可能性がある。たとえば、野口ら<sup>23</sup>は、戻り流れによる表法先での洗掘を模型実験で再現している。実際、東北地方太平洋沖地震では、岩手県水海海岸において写真-4.1.7のように表法被覆工が被災しており、図-4.1.5のような機構で表法先からの洗掘によって被災したものと考えられる。

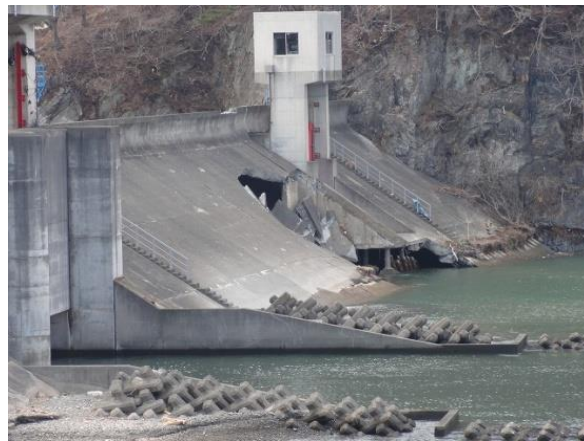


写真-4.1.7 表法先の洗掘からの被災（岩手県水海海岸）

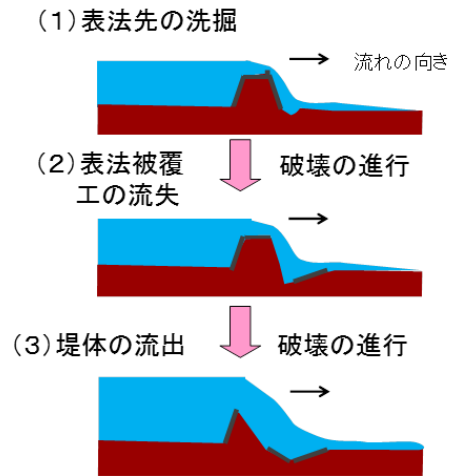


図-4.1.5 表法先の洗掘からの被災の機構

5) 押し波、引き波による重力式堤防の転倒

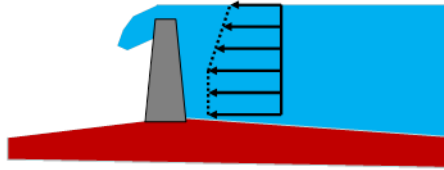
写真-4.1.8のように、重力式の海岸堤防が転倒する事例も各地で見られた。この例では堤防は陸側に倒れているが、引き波によって海側に転倒した事例もある。

この被災形態についても、図-4.1.6のように、津波の押し波または引き波によって堤防に作用した圧力が、転倒に対する抵抗力を上回ることによって生じたものと考えられる。



写真-4.1.8 岩手県両石漁港での重力式堤防の転倒

(1) 堤防に波圧がかかる



(2) 堤防の転倒

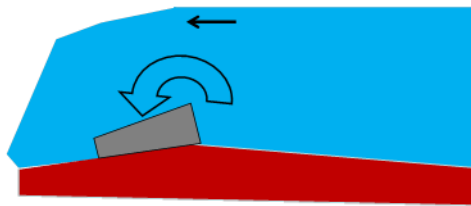


図-4.1.6 重力式堤防の転倒の機構

(2) 被災状況についての集計・分析結果

各被災パターンが被災地全体でどの程度の割合で発生しているかを把握するため、青森県から千葉県にかけての自治体および国土交通省東北地方整備局によって実施された被災調査結果を整理した。

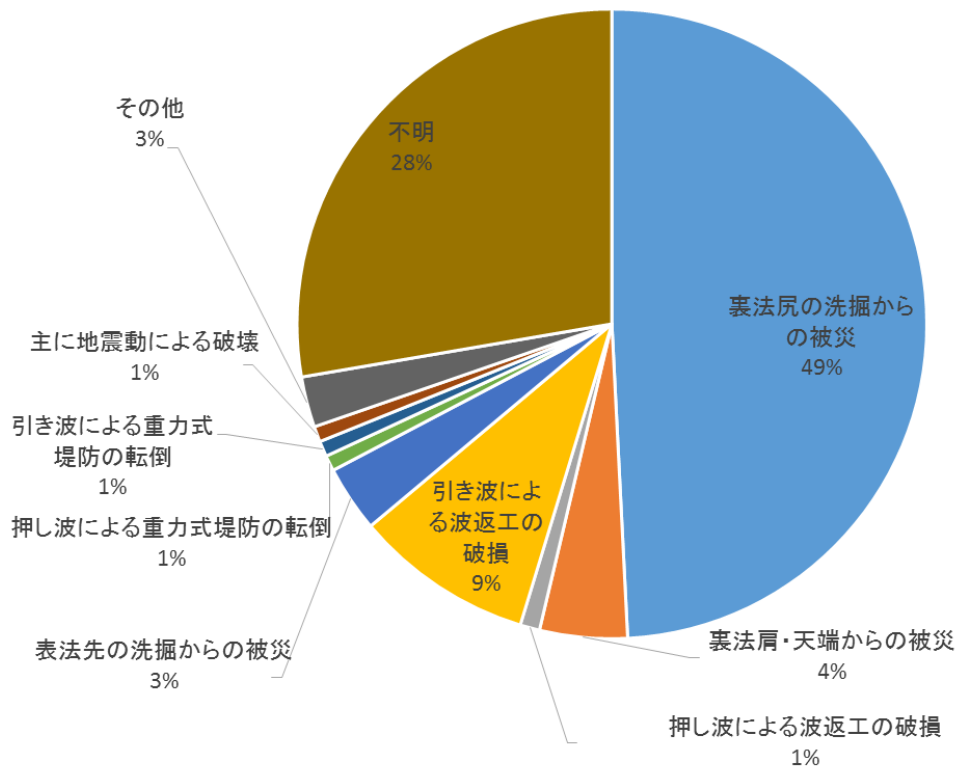


図-4.1.7 被災延長における各被災パターンの割合 (集計区間の延長99km)

被災パターンを判断する材料が残っていない箇所を除く延長99kmの被災区間について、各海岸における海岸堤防の被災パターンを集計した結果、**図-4.1.7**のように、裏法尻の洗掘からの被災は延長で49.2%を占め、主たる被災パターンとなっていた。次いで引き波による波返工の破損が9.2%と多かった。また、裏法肩・天端からの被災と表法先の洗掘からの被災がそれぞれ4.5%、3.4%を占めていた。

### 4.1.3 被災事例の分析方法

#### (1) 被災データの収集・整理

海岸保全施設は行政上の1海岸（**図-4.1.8**中の○○地区海岸）の中でも構造が一様でない場合があるので、海岸を施設構造によってさらに細分した一連区間（**図-4.1.8**中の一連区間1、2）の単位で被災データを整理した。扱ったデータは施設台帳から得た天端高や表法勾配等の施設構造と延長、全壊延長、全壊箇所数、全壊ユニット数、半壊延長、越流水深であり、ここで全壊ユニット数とは、各一連区間をさらに100m単位のユニットに細分した時に、全壊があったユニットの数である。引き波によって全壊箇所が拡大した海岸では、全壊延長を押し波による被災程度として評価するのは過大となるため、ユニットによる指標を導入した。ユニットを100m単位としたのは、予備調査として計測した156の全壊箇所の延長の中央値が44.6mで100m以下のものが73.7%を占めたことによる。

本分析で対象とした堤防については、**写真-4.1.9**のように被覆工が全て流出し、盛土も残っていない状態を全壊、**写真-4.1.1**のように被覆工が一部流出した状態や被覆工が全て流失しても堤体土が残っている状態は半壊と定義した。

越流水深は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによって調査された近傍における津波浸水高の2011年8月26日時点の速報値<sup>25</sup>から地震に伴う地盤沈下後の施設天端高を差し引いて求めた。

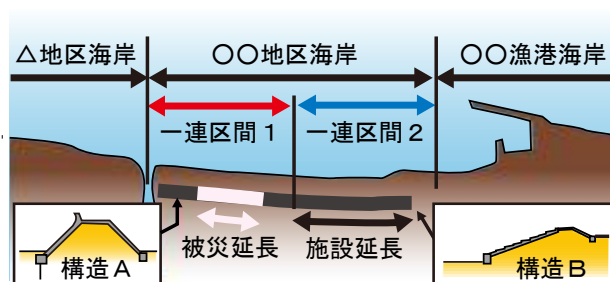


図-4.1.8 分析単位とする一連区間の模式図



写真-4.1.9 全壊した海岸堤防

（宮城県岩沼市二の倉海岸）

具体的な被災状況は、各県の海岸管理者による被災箇所や被災延長等の調査結果について、国土地理院が震災直後に撮影した空中写真並びにGoogle Earthの2011年4月撮影の衛

星画像によって確認・補足計測したうえで扱った。補足計測の内容は、海岸保全施設の背後地が道路等によって被覆されている場合の被覆幅、全壊延長・半壊延長の再計測、全壊箇所の計数、ユニットごとの全壊・非全壊の判読である。特に全壊延長については、海岸管理者によって全壊・半壊の判断基準が異なっていたので、海岸研究室による再計測によって統一化した。

## (2) 堤防構造による被災状況の違いの分析

本分析では裏法尻部の被覆、表法勾配、裏法勾配、堤防天端から背後地盤までの比高、天端幅、の5要素に着目して、これらの違いによる被災状況の違いを比較した。

### 1) 構造要素ごとの2群比較

施設延長に対する被災延長の割合を被災延長率と定義して、各構造要素についてデータ数が概ね均等になるように2群に分けて、越流水深と被災延長率の関係を比較した。対象とするデータは着目する構造以外の要素がなるべく揃うように表-4.1.1のとおり絞り込んだ。天端幅については2群に分けるほどのバリエーションが無かったため、多変量解析のみを実施した。

表-4.1.1 検討対象とした区間の条件

検討対象	検討対象以外の要素				
	裏法尻被覆	表法勾配	裏法勾配	比高	天端幅
裏法尻被覆	-	2割未満	2割未満	3m以上	全て
表法勾配	無し	-	2割未満	3m以上	全て
裏法勾配	無し	2割未満	-	3m以上	全て
比高	無し	2割未満	2割未満	-	全て

### 2) 複数の構造要素を対象とした多変量解析

構造要素ごとの2群比較は、着目要素以外の条件を揃えようとする扱えるデータが大幅に少なくなる、また要素間の重要度の違いもわからないという欠点があるため、5つの構造要素全てを用いた多変量解析も実施した。

解析にあたっては、堤防には越流外力の大きさに応じた全壊確率が存在し、構造によってこの確率が異なると仮定した。実際の被災データから全壊確率を求めるにあたっては、全壊するか否かは100m単位のユニットごとに独立に決まると仮定し、一連区間に含まれるユニット数のうち、全壊があるユニット数の割合を全壊確率とした。この場合、外力を受けた結果は全壊か非全壊の2値であるので、全壊確率 $P_B$ は2項分布を前提とした(4.1.1)式の多重ロジスティックモデルで表現されるとした。

$$P_B = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}} \quad (4.1.1)$$



ここに $n$ は、考慮する要素数であり、 $X_1 \cdots X_n$  は説明変数であり各構造要素の値が入る、 $\alpha$ は定数、 $\beta_1 \cdots \beta_n$ は係数である。多重ロジスティックモデルは医療分野で疾患の要因を分析するためによく用いられる多変量解析手法であり、川越ら<sup>26</sup>によって土砂災害発生確率モデルの構築にも採用されている。本分析では最尤推定によって(4.1.1)式の各係数を決定するとともに、全壊確率に対して各構造要素の影響が有意であるか否かを検証した。

#### 4.1.4 被災事例の分析結果

##### (1) 被災データの特徴

まず被災データ全体の特徴を理解するために、越流があった堤防の全てを対象に、越流水深を7カテゴリ（2m 未満、2-4m、4-6m、6-8m、8-12m、12-16m、16-20m）に分けてカテゴリごとに施設延長の合計と被災延長の合計を求め、これらをもとに被災延長率を算出した結果を図-4.1.9(a)に示す。対象となった225の一連区間の延長は3m～3,756mの間に分布し、総延長は94.6kmであった。

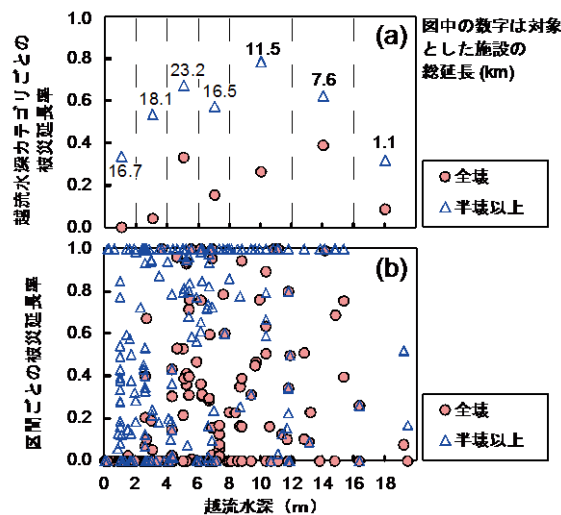


図-4.1.9 越流水深と被災延長率の関係

データが少ない越流水深16～20mを除くと、越流水深が大きいほど被災延長率が大きくなる傾向が確認できた。しかし個々の一連区間について越流水深によるカテゴリ分けをせずに全てプロットした図-4.1.9(b)によると、同じ越流水深に対しても、被災延長率は大きくばらついた。例えば、約3mの越流水深で全壊の被災延長率が100%（全ての堤防が全壊）となる区間がある一方で、10mを越える越流水深でも全く全壊がなかった一連区間も存在した。これは越流水深の継続時間や背後地の条件、施設の詳細構造等、揃えきれない条件が多数含まれるうえに、堤防の破壊現象が確率事象であることに起因する。構造による被災状況の違いについての平均的な傾向を見るには図-4.1.9(a)の整理が適するが、各一連区間におけるばらつきの大きさも防災計画上重要な情報であるので、実務上は図-4.1.9(b)のような図も確認する必要がある。

## (2) 構造要素ごとの2群比較の結果

### 1) 裏法尻被覆の有無

63区間28.2kmについて裏法尻被覆の有無の違いに着目して整理した結果、越流水深12m未満では何らかの形で被覆されていた方が全壊となる被災延長率が低いことがわかった(図-4.1.10(a))。区間ごとに見た場合もその傾向はうかがえた(図-4.1.10(b))。

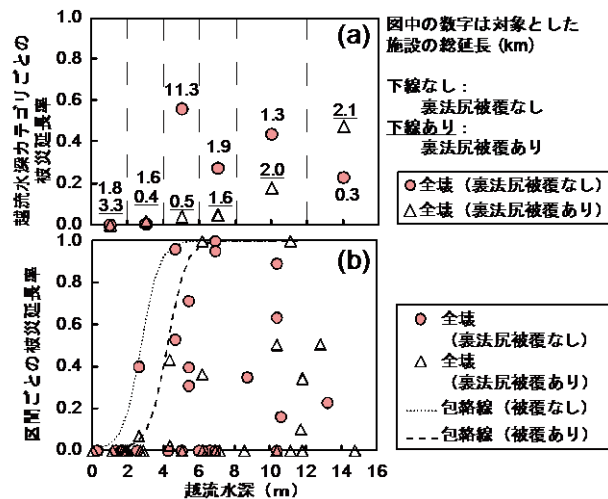


図-4.1.10 裏法尻被覆の有無による被災状況の違い

### 2) 表法勾配

51区間35.4kmについて表法勾配に着目して整理したところ、越流水深2~12mでは表法勾配が2割以上のほうが2割未満に比べて被災延長率は低かった(図-4.1.11)。しかし半壊のみ(半壊したが全壊には至らなかった)に着目すると、表法勾配が2割以上の場合にはむしろ被災延長率が高くなるという逆の結果となった(図-4.1.12)。

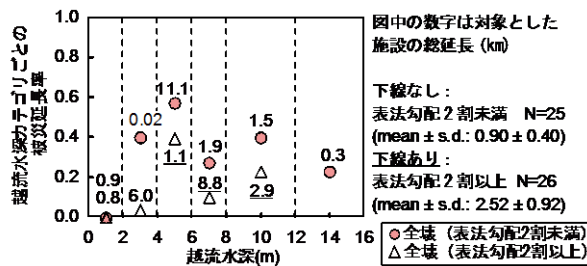


図-4.1.11 表法勾配による被災状況の違い  
(全壊)

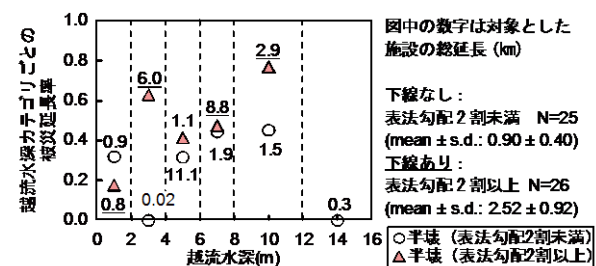


図-4.1.12 表法勾配による被災状況の違い  
(半壊)

### 3) 裏法勾配

裏法勾配については対象とした26区間16.8kmにおけるバリエーションが少ないために1.5割以上と未満で比較したところ、越流水深4~12mでは裏法勾配が1.5割以上の方が全壊の被災率は小さかった(図-4.1.13)。また、半壊のみに着目すると逆に1.5割以上のほうが被災延長率は大きくなっており、全壊と半壊で被災延長率の大小関係が逆転する点は表法勾配と同じであった(図-4.1.14)。

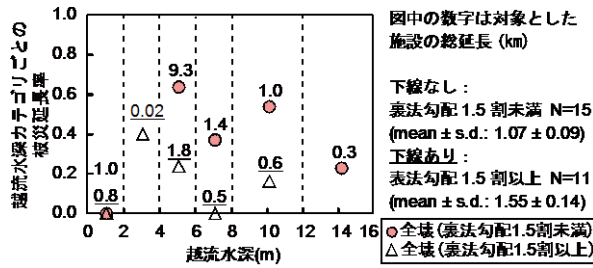


図-4.1.13 裏法勾配による被災状況の違い (全壊)

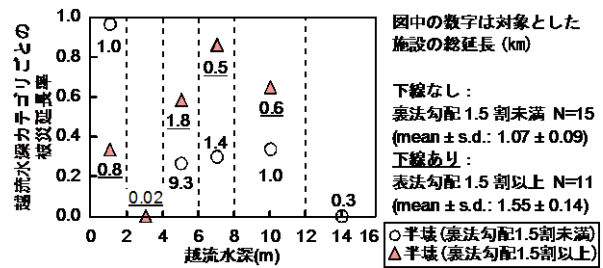


図-4.1.14 裏法勾配による被災状況の違い (半壊)

#### 4) 比高

49区間27.9kmについて、堤防天端から背後地盤までの比高の違いで比較したところ、越流水深2~12mでは比高3m以上の場合に3m未満よりも全壊の被災延長率が高かった(図-4.1.15)。

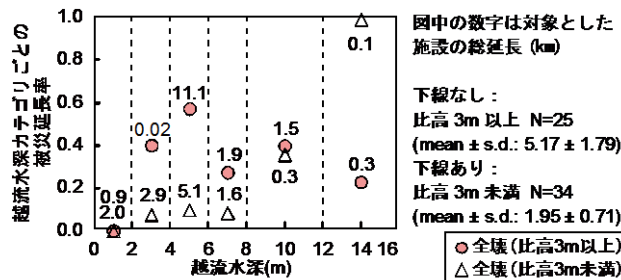


図-4.1.15 背後地盤との比高による被災状況の違い

#### (3) 多変量解析の結果

5つの構造要素のデータが全て欠損なく揃っている170区間79.3kmの被災データを用いて、多重ロジスティック回帰分析を実施した結果、越流水深と裏法尻被覆幅、表法勾配、裏法勾配が0.05以下のp値を示し、堤防の全壊確率に対して有意な影響を与えていた(表-4.1.2)。比高については統計的に有意とはならなかったが、p値は0.05に近かった。なお、係数βは-0.568であった。

表-4.1.2のオッズ比は各説明変数の値が1増加した場合に全壊確率に及ぼす影響の大きさを示すものであり、例えば越流水深のオッズ比1.30とは、越流水深が1m増加すると全壊確率が1.30倍になることを意味する。オッズ比が1未満の場合には、説明変数の値が増加すると全壊確率が下がることになる。越流水深、裏法尻被覆幅、表法勾配、裏法勾配はいずれもオッズ比の95%信頼区間(95% CI)が1.0から外れ、この点でも堤防の全壊確率に及ぼす影響が有意と認められた。

表-4.1.2 多重ロジスティック回帰分析の結果

説明変数 (mean ± s. d.)	係数 $\beta$	$p$ 値	標準化 回帰係数	オッズ比 (95% CI)
越流水深 (5.8 ± 3.9 m)	0.261	<0.001	1.013	1.30 (1.23-1.37)
裏法尻被覆幅 (1.6 ± 3.1 m)	-0.264	<0.001	-0.810	0.77 (0.68-0.85)
表法勾配 1: n (1.7 ± 1.3)	-0.328	0.004	-0.436	0.72 (0.57-0.90)
裏法勾配 1: n (1.5 ± 0.4)	-0.982	<0.001	-0.403	0.37 (0.23-0.61)
比高 (3.5 ± 1.9 m)	0.096	0.075	0.183	1.10 (0.99-1.22)
天端幅 m (3.6 ± 2.3 m)	0.019	0.830	0.044	1.02 (0.84-1.18)

係数  $\beta$  は裏法尻被覆幅と表法勾配、裏法勾配で負の値となった。これは、裏法尻被覆が長いほど、表法勾配および裏法勾配が緩いほど全壊確率が低くなることを示し、構造要素ごとにおこなった2群比較の結果と整合した。

標準化回帰係数は、説明変数間の相対的な影響度を比較するための指標として、係数  $\beta$  を各説明変数の標準偏差で補正したものである。標準化回帰係数の絶対値は越流水深、裏法尻被覆幅、表法勾配、裏法勾配の順で大きく、構造要素のなかでは裏法尻被覆幅が最も全壊確率に対して影響があることを示す結果となった。

#### 4.1.5 考察

##### (1) 裏法尻部の被覆による効果

2群比較では被覆の幅には関係なく、少しでも被覆のあるものは被覆有りとして扱ったため、被覆幅4m未満のものが延長で約7割を占める。これは津波の越流によって形成される洗掘の幅に比べれば小規模であるが、洗掘が起こる地点を堤体から遠ざけることで効果が発揮されたものと考えられた。本結果は、限られた範囲の被覆であっても、堤防が全壊しにくくなることを示すものである。

多変量解析によれば構造要素のなかでは裏法尻被覆幅の影響が最も大きいという結果となった。これは三面張り構造の海岸堤防の被災が裏法尻部の洗掘から始まるとする仮説と合致するものであり、堤防を津波の越流に対して粘り強くするには裏法尻部における洗掘への対策の優先度が高いことを意味する。

## (2) 表法面および裏法面の緩勾配化による効果

表法面と裏法面のいずれも全壊で見た場合には、勾配が緩いと被災延長率が低くなる傾向にあることが2群比較と多変量解析の双方で確認されたものの、半壊のみに着目した場合には逆に被災延長率が高くなる結果となった。このことは、緩勾配化そのものが単純に津波による外力を低減させたわけではないことを示唆する。全壊が抑制されたのは、堤体自体が大きくなることで、半壊しても堤体土が全て流失するまでの時間が長くなったことによる副次的な効果であった可能性がある。

法面勾配が2割未満の場合にはコンクリート平張りもしくはコンクリート法枠で法面が被覆されるのに対して、勾配が2割以上の場合にはブロックによって被覆される場合が多い。海岸堤防の被覆ブロックは津波越流による流体力を考慮して選定されたものでないために、重量不足もしくは不陸の発生によって容易に飛散して半壊となりやすかったとも考えられる。また、越流水の挙動は法面勾配によって全く異なることも予想される。例えば表法面がある程度以上の急勾配となればしぶきの跳ね上げが発生し、裏法勾配が直立に近くなった場合には越流が天端を越えて剥離することで裏法面にほとんど接触しなくなる。このように法面勾配の変化による影響は非常に複雑であるので、実験や数値計算によって越流の挙動を確認しながら慎重に議論していく必要がある。

## (3) 比高および天端幅による効果

比高については2群比較では効果があるように見えたものの、多変量解析では有意とならなかった。しかし、比高の違いは越流が裏法尻部に衝突する際のエネルギーの大きさに影響を与えると考えられるので、p値やオッズ比の信頼区間が有意水準に近いことも考慮すれば、無視できない要素である。

天端幅については、幅の違いによる効果を検討できるだけのバリエーションを持ったデータが得られなかった。天端幅の増大は、越流による盛土の削り代を増やすことになるので、多変量解析で有意な効果が見られなかったからといって、効果が全く否定されるものではない。

## (4) 津波越流に対する粘り強さの評価

本分析の多変量解析で得られた各係数を(4.1.1)式にあてはめれば、構造を変えたことによる効果を定量的に評価することも可能となる。一例として、堤防の構造を表法勾配2割、裏法勾配2割、比高6m、天端幅3mとした場合の裏法尻被覆幅による全壊確率の違いを算出した結果を図-4.1.16に示す。被覆幅を増やすことで、同じ越流水深に対する全壊確率をどの程度下げることができるか、すなわち粘り強くできるかを評価することができる。

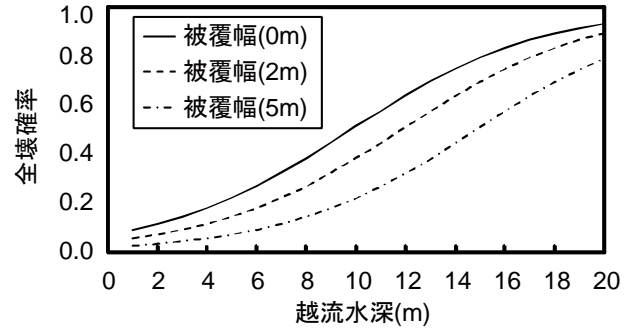


図-4.1.16 裏法尻部の被覆幅による全壊確率の違い

ただしこれは、様々な構造条件が混在した現地データに基づいたモデルにすぎないので、適用範囲は表-4.1.2の各説明変数の元データの範囲に限られる。堤防の破壊メカニズムが十分に解明されていない段階ではモデル中における各説明変数の扱い方についても十分な根拠があるものではないので、現段階で設計にすぐに使用できるものではないが、今後の模型実験や数値計算による知見の蓄積によっては有用な評価手法となることも期待できる。

## 4.2 越流に対する構造上の工夫の検討

### 4.2.1 検討の背景

2章の結果から、海岸堤防の全壊可能性を減らすことが地形変化や浸水面積の低減等の減災効果をもたらすことが分かった。また、「海岸における津波対策検討委員会」がとりまとめた「平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波で被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方<sup>22</sup>」において、海岸堤防の効果が粘り強く発揮されるような構造上の工夫の方向性として、裏法尻部への保護工の設置による洗掘防止や、裏法被覆工等の部材厚の確保等による流失防止などが挙げられた。このうち裏法部への保護工の設置が有効であることは、前述4.1の堤防の被災分析からも示された。

東北地方太平洋沖地震の津波で被災した海岸堤防の復旧は、各県において実施されることとなるが、仙台湾南部海岸においては、国直轄で施工される区間がある（東北地方整備局施工区間は約30km）。それら一連の復旧において上記の構造上の工夫を施すため、その技術的手法に関するより具体的な知見が求められていた。

このような背景のもと、海岸研究室では、国土交通省水管理・国土保全局海岸室および同東北地方整備局と連携して、構造上の工夫および施工上の留意点の検討を、模型実験や解析等により行い。その成果は、平成24年5月14日および8月10日に国総研技術速報として発出した<sup>27</sup>。なお、粘り強い堤防構造については、平成26年6月の海岸法改正で法的に位置づけられ、平成27年2月には海岸保全施設の技術上の基準に「設計津波を超える津波の作用に対して、当該堤防の損傷等を軽減する機能を有するものとする」として反映されている。

ここでは、越流に対して粘り強い構造上の留意点（4.2.2）を述べた上で、当該留意点を踏まえた具体例として、実際に仙台湾南部海岸の復旧工事等に反映されている粘り強い構造（4.2.3）を示し、今後南海トラフの巨大地震の可能性が切迫している地域の堤防の更新等に資する構造（4.2.4）を示している。海岸堤防の構造検討に当たっては様々な制約条件を踏まえて行うことから、示した事例以外の構造検討に資する数値解析技術（4.2.5）についても紹介した。

### 4.2.2 越流に対して粘り強い構造の留意点

技術速報においては、図-4.2.1のように、台形断面の堤防の裏法尻の洗掘と裏法被覆工の安定性に着目し、対洗掘抵抗性と安定性向上のための工夫および留意点について検討した結果を述べている。

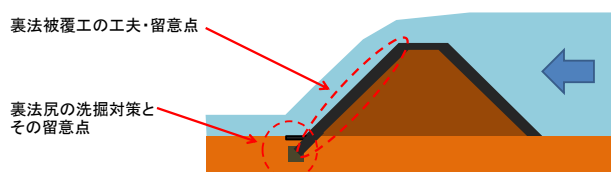


図-4.2.1 検討項目

検討は、主として、水理模型実験により行った。

模型実験は、国土技術政策総合研究所内にある以下の水路で行った。構造物実験水路（写

真-4.2.1) は、側面がガラス張りとなっているため洗掘や被覆工被災の過程を視覚的に確認できるとともに、現地で越流水深 10m に相当する高い津波を起こすことができる。一方、高落差実験水路（写真-4.2.2）は、実現象に近いスケールでの実験が可能である。前者は縮尺 1/25、流速の縮尺が 1/5、後者は縮尺 1/2、流速の縮尺が約 1/1.41 である。

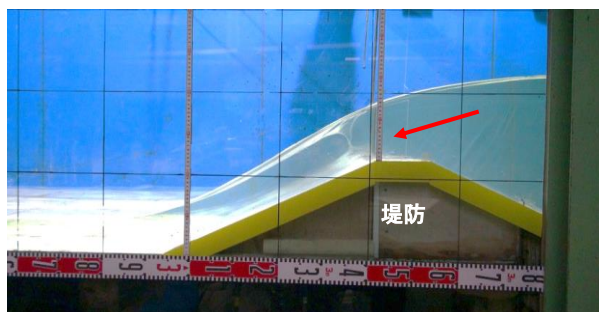


写真-4.2.1 構造物実験水路（縮尺 1/25）

写真-4.2.2 高落差実験水路（縮尺 1/2）

模型実験では、東北地方太平洋沖地震を対象とした仙台平野南部での津波浸水シミュレーションの結果（図-4.2.2）をふまえ、現地スケール換算での越流時間を 10 分とした水位波形を設定している。その上で、最大越流水深を複数種類設定して実験を行った。この水位波形の設定からもわかるように、津波の基本的性質上、堤防越水の継続時間は、洪水がもたらす河川堤防越水の継続時間と比較してかなり短いものになっている。

10 分という越流時間は、構造上の工夫を検討するための実験上の設定であり、本検討の目的に照らして必要な代表性を持つと判断しているが、実際にはこれより長い越流時間となることも考えられる。実験結果の解釈においては、越流時間が長くなれば堤防に対するダメージの度合いも変化してくる可能性を踏まえておくことが必要である。

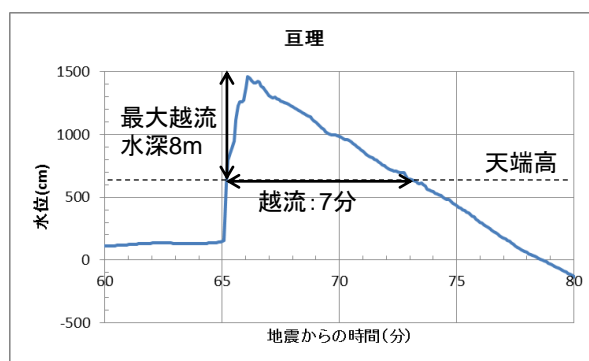


図-4.2.2 津波シミュレーションの結果（亘理における水位波形）

本検討で得られた主な留意点は以下の通りである。

#### (1) 裏法および裏法尻での高流速への対応

津波が海岸堤防を越流する際には、裏法および裏法尻では速い流れが発生する。図-4.2.3 は、固定床実験（堤防高は現地スケールで6m、裏法勾配1:2）で得られた堤防模型周辺の水位と断面平均流速の分布を示している。各越流水深（2m、6m、10m）での断面平均流速は裏法から堤防陸側の平坦部にかけて8～14m/s程度（現地換算値）となっている。結果から現地スケールで10m/s以上の流速が発生していることが分かる。このような速い流れ



による裏法尻での洗掘および被覆工の流失への対応を検討する必要がある。

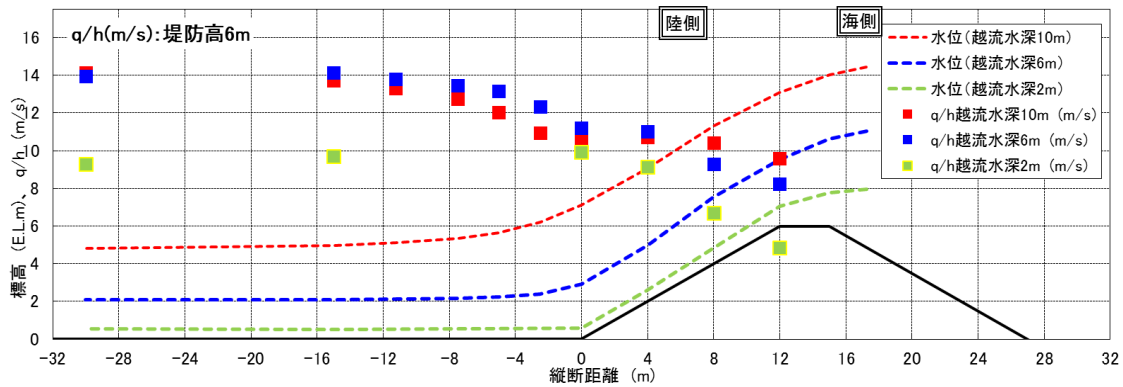


図-4.2.3 堤防模型周辺の水位と断面平均流速( $q/h$ )の分布 (数値は現地換算値)

### (2) 流れの中に置かれた構造物の不陸による構造物の不安定化とその対策

裏法被覆工に凹凸が生じると、流れによる力を大きく受け、被覆工が不安定になる。このことから、被覆工に不陸を作らないことが重要である。また、不陸ができて、流れによる作用をまともに受ける面が生じない構造とすることも有効である。

裏法被覆工の不陸が生じる原因としては、裏法被覆工の下にある土砂の吸い出し、地震動、圧密等の経年変化が考えられる。広大な裏法において不陸の存在を越流発生時に最小限に押さえ込むのは難しい可能性があることから、堤体が多少の変形を起こしても、不陸が起きにくい、あるいは少なくとも不陸が起こっても流れをまともに受ける面を露出させないように構造を工夫することが考えられる。そのような工夫の一例として、図-4.2.4のように、上端と下端に切り欠きを設けたブロックをかみ合わせることで、下のブロックが上のブロックより突出しにくくすることが考えられる。

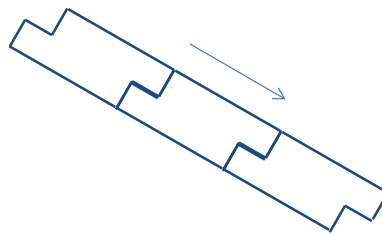


図-4.2.4 ブロック形状の工夫案

### (3) 裏法尻での洗掘と対策

東日本大震災で見られたように、津波の越流により堤防陸側では洗掘が生じる。図-4.2.5は、堤防模型とその陸側に平坦な移動床(中央粒径0.25 mm)を設置し、2分間(現地スケールで10分間)の越流の後に地形を測量した結果である。

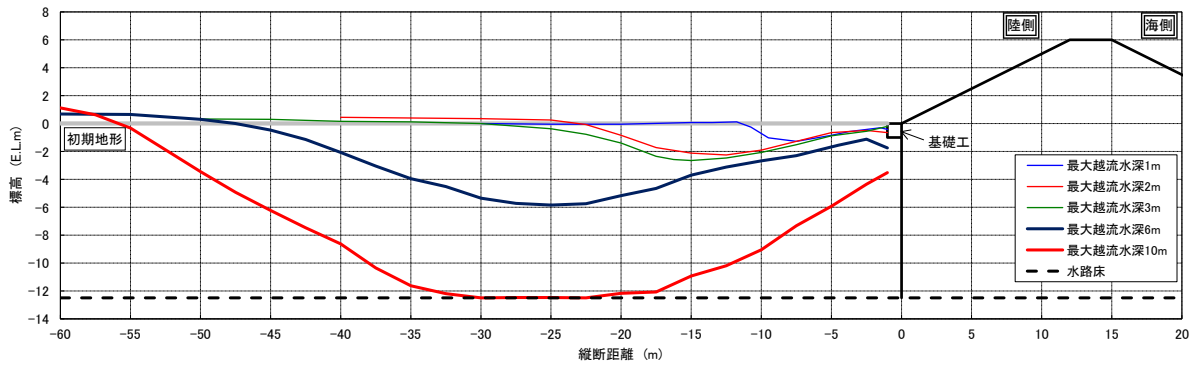


図-4.2.5 越流後における裏法尻の地形（数値は現地換算値）

裏法尻での洗掘に対処するためには、裏法尻を保護することにより、しっかり越流水を跳ねさせることが重要である。水を跳ねさせることにより裏法尻の洗掘を堤防本体からなるべく遠ざけることで、裏法尻での洗掘が堤体破壊につながるというプロセスを遮断もしくは遅らせ、堤防全体の裏法尻洗掘に対する抵抗性を増し、堤体が被災するまでの時間を延ばすことができると考えられる。

図-4.2.6は、裏法尻で越流水を跳ねさせる構造の案である。裏法を流下してきた越流水の流向を、地盤に突っ込まない向き（水平方向など）に完全に变えることが洗掘の影響を遠ざける上で重要であり、水脈厚さに対して平場の長さが相対的に短いと、流向の变え方が不完全になることが模型実験により明らかになった。また、基礎工の周辺に地盤改良を施すことにより、基礎工と地盤改良部分が一体的に保護工として機能することで流向を水平に変え、洗掘を裏法尻から遠ざけることで、裏法尻からの破壊を起こしにくくしていることも模型実験により明らかになった。

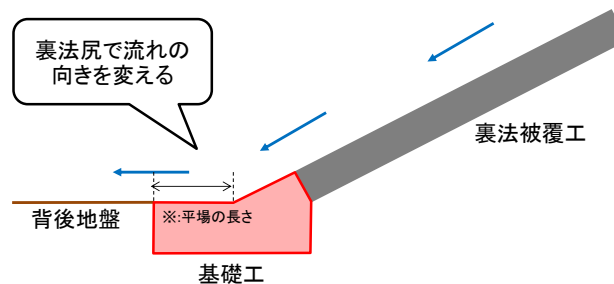


図-4.2.6 裏法尻の工夫案

#### (4) 揚圧力への対応

津波が襲来して、海側の水位が上昇すると、その水位上昇に連動して堤体下の浸潤面が上昇を始める（図-4.2.7参照）。元の浸潤面が地盤内で高かった場合などには、浸潤面が比較的早く堤体下部に達することになる。たとえば吸い出し防止などの理由から、被覆工を不透過・不透気構造にしていたとすると、その被覆工と浸潤面とに囲まれたところに空気が残留する一方、浸潤面は海側の津波水位に応じて、ある速度で上昇しようとするので、たとえ浸潤面自体は低くても、封入された空気の圧力が上昇する。空気圧は浸潤面の上昇を止めるだけの圧力となり、それは被覆工にとって危険なレベルの揚圧力が作用する状況

になり得る。このようなことが原因となる被覆工の不安定化が起これないように、空気圧を有害なレベルまで上げずに浸潤面上昇に伴う排気を許すような透過・透気性を被覆工に持たせるという検討と工夫が重要になってくる。

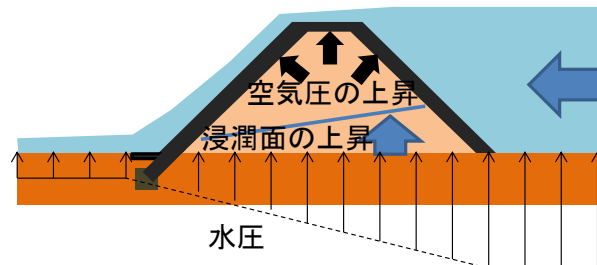


図-4.2.7 空気による揚圧力

#### (5) 浸透水に対する堤防裏法尻での対応

短期間の水位上昇とは言え、堤体や基盤の土質条件によっては、津波の越流水位が堤防天端まで降下した時点において（高水位を経験した直後）、裏法尻付近の浸潤線が高くなって、浸透水が裏法尻付近から浸出する状況が起こりえる。このような状況になると、この付近が泥状になり、裏法被覆工が被災することも考えられる。例えば、構造物実験水路での実験を示した写真-4.2.3では、図-4.2.8のように越流が終了する前に、裏法尻付近において吸い出しが発生している。こうした現象が起こる可能性を踏まえ、浸潤線の上昇を低減する構造とするなどの対策の検討を行うことが必要である。



写真-4.2.3 残留水位による裏法尻からの吸い出し

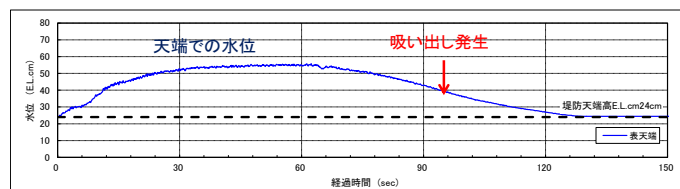


図-4.2.8 吸い出しが発生した際の天端での水位

#### (6) 負圧への対応

図-4.2.9は、比高6m（現地換算値）の海岸堤防を対象とした縮尺1/25の固定床実験において、堤防天端、裏法、裏法尻及びその下流平坦部の底面におけるピエゾ水頭と水位を、それぞれマンメーターおよびポイントゲージで測定した結果である。

ピエゾ水頭は水位に比較して法肩で局所的に低下、法尻で局所的に上昇していることが確認された。このことから、圧力が法肩で低下、法尻で上昇が生じていることが分かる。

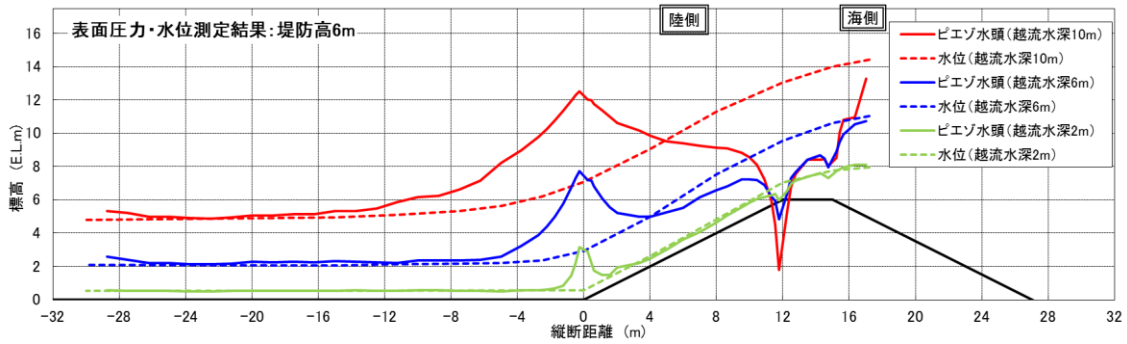


図-4.2.9 天端・裏法・裏法尻下流のピエゾ水頭及び水位（越流水深 2, 6, 10m）

また、越流水深が大きくなると、天端被覆工と裏法被覆工との接合部にあたる裏法肩付近で、負圧（大気圧を下回る圧力）が発生することが分かる。このような裏法肩での負圧は被覆工の安定性に影響することから、対策が必要である。図-4.2.10 はそのような対策の一例であり、法肩部分を天端被覆工と一体化することで安定性を高めるものである。

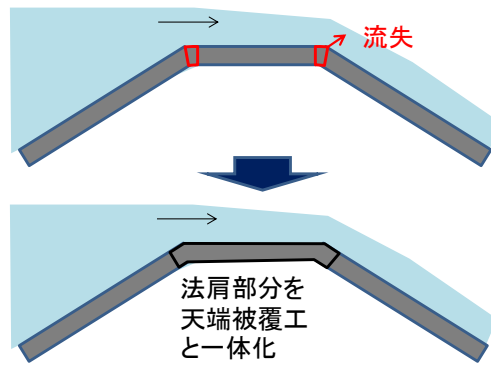


図-4.2.10 負圧に対する法肩部分の工夫案

### (7) パイピングへの対応

海岸堤防の海側と陸側との間で生じる水位差が大きくなると、図-4.2.11 のように、パイピングによって漏水や堤体の破壊が生じる恐れがある。浸透路長は法勾配が急な断面では比較的短く、裏法尻での洗掘によってさらに短くなる可能性がある。洗掘を考慮してパイピングに対する照査を行う必要がある。

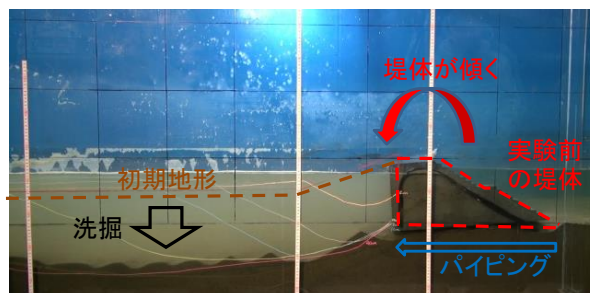


図-4.2.11 パイピングと洗掘による堤体の傾き

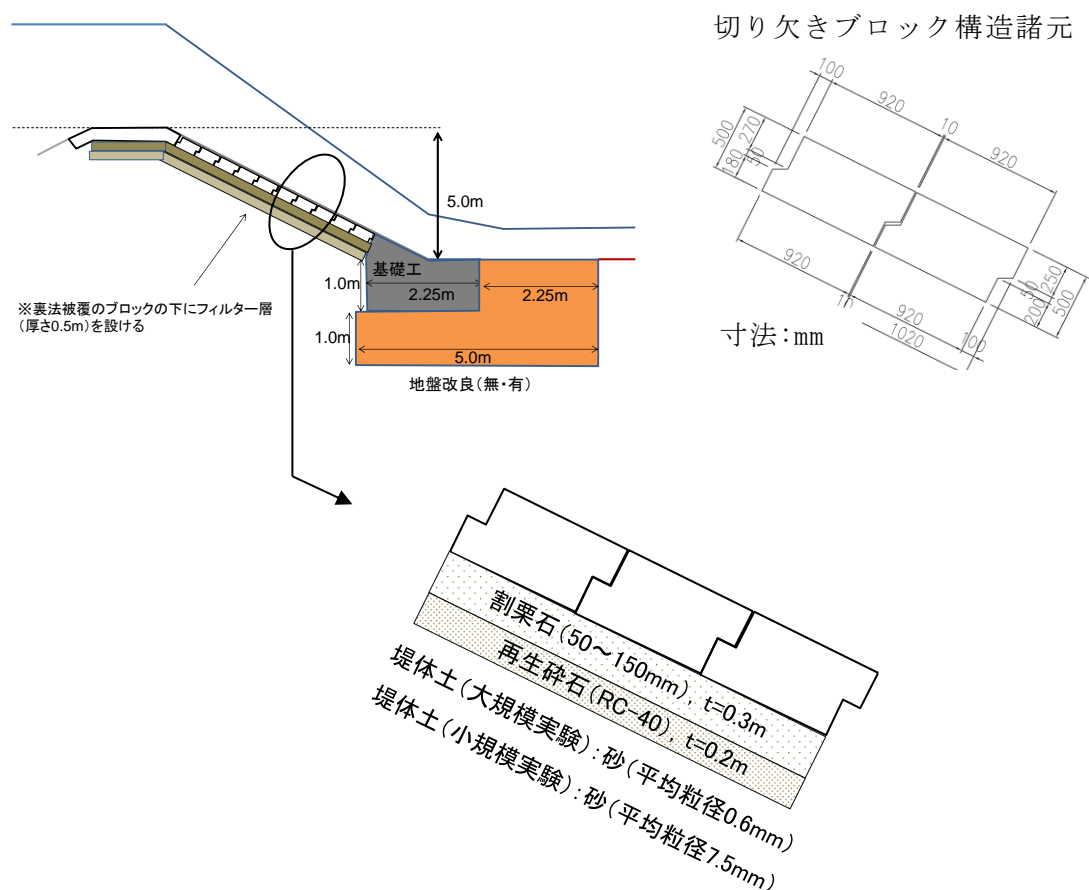
### 4.2.3 復旧海岸堤防において採用した粘り強い構造上の工夫とその確認

#### (1) 復旧海岸堤防における粘り強い構造上の工夫

前項で示した越流に対して粘り強い構造の留意点を踏まえて、仙台湾南部海岸の復旧工事に反映させるべく検討した粘り強い構造を図-4.2.12に示す。

裏法肩での負圧対策として、法肩部分を天端被覆工と一体化することで安定性を高める構造とした。また、基礎工近傍での洗掘への対策として、基礎工の陸側及び下部に地盤改良を施した。本稿で紹介する仙台湾南部海岸では、セメントを混ぜて地盤を強化する混合処理工法等がとられている。なお、裏法被覆工には、前項で示したように、不陸が生じても流れをまともに受ける面が生じにくいように、図-4.2.12のブロック諸元図に示すような流れの上流側と下流側に切り欠きを設けたブロック（現地換算値：厚さ0.5m、質量2t）をかみ合わせることで、流れの下流側のブロックが上流側のブロックよりも突出しにくくする構造を採用した。ブロックの切り欠き幅は、大きいほど下流側ブロックの突出が生じにくくなるので、ブロック製作の手間や施工性との兼ね合いも考慮の上決定することが重要である。

また、ブロックの下にフィルター層を施すことにより、吸い出しを極力起こしにくくする構造とした。



## (2) 構造上の工夫の確認

### 1) 裏法尻保護工の効果に関する小規模実験（縮尺 1/25）

粘り強い構造の効果を確認するため、比高 5m、裏法勾配 1:2 の堤防の裏法尻に基礎工を設置した構造を対象に、模型縮尺 1/25 の小規模実験を実施した。

図-4.2.13 は、地盤改良無しの場合における越流水深 2m（現地換算値）での堤防及びその陸側の移動床（粒径約 0.3mm）の変化を示している。越流時間は 2 分間である。越流が始まるとともに裏法尻では洗掘が進む。洗掘の進行に応じて跳水の位置が法尻に近づいたり離れたりする現象が見られた。跳水の位置が法尻から離れた状態でも近づいた状態でも後述する地盤改良ありのケースに比較して越流水がやや下向きに地盤に突っ込む状況が見られる。特に図-4.2.13 の右上の写真のように跳水が法尻から離れた状態から法尻に近づく時に、裏法を流下してきた越流水が裏法尻の地盤により下向きに突っ込む様子が確認された。越流終了まで基礎工および裏法被覆工は被災しなかったが、基礎工の陸側側面がほぼ全面的に露出するまで洗掘されていた。

図-4.2.14 は、地盤改良有りの場合における状況を示している。小規模実験では地盤改良の模擬が難しいため、地盤改良部分は比重が等しいモルタルで製作して水路内に設置しており、基礎工と地盤改良部分は接着していない状態になっている。地盤改良有りのこの条件でも図-4.2.13 と同様に被災は生じなかった。ただし、跳水が地盤改良下流端から離れた状態でも近づいた状態でも、図-4.2.13 に示した地盤改良無しのケースに比較して、下流に向かう越流水の方向がより水平に近づき、このため越流水が裏法尻の地盤に下向きに突っ込む状況になりにくいことが確認された。

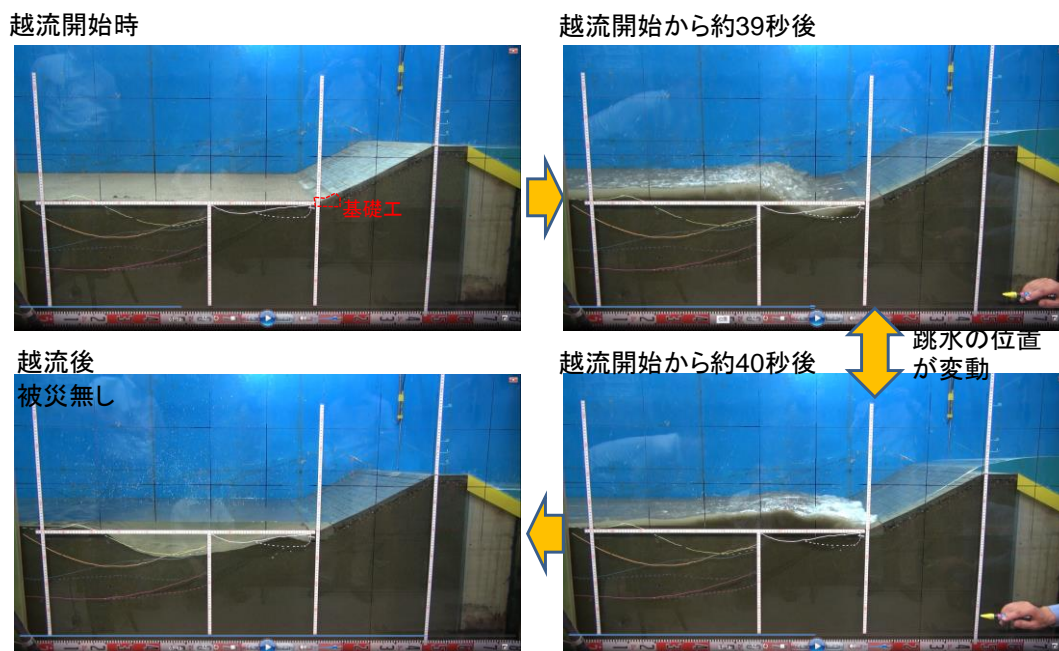


図-4.2.13 越流時の状況（越流水深 2m，地盤改良無し）

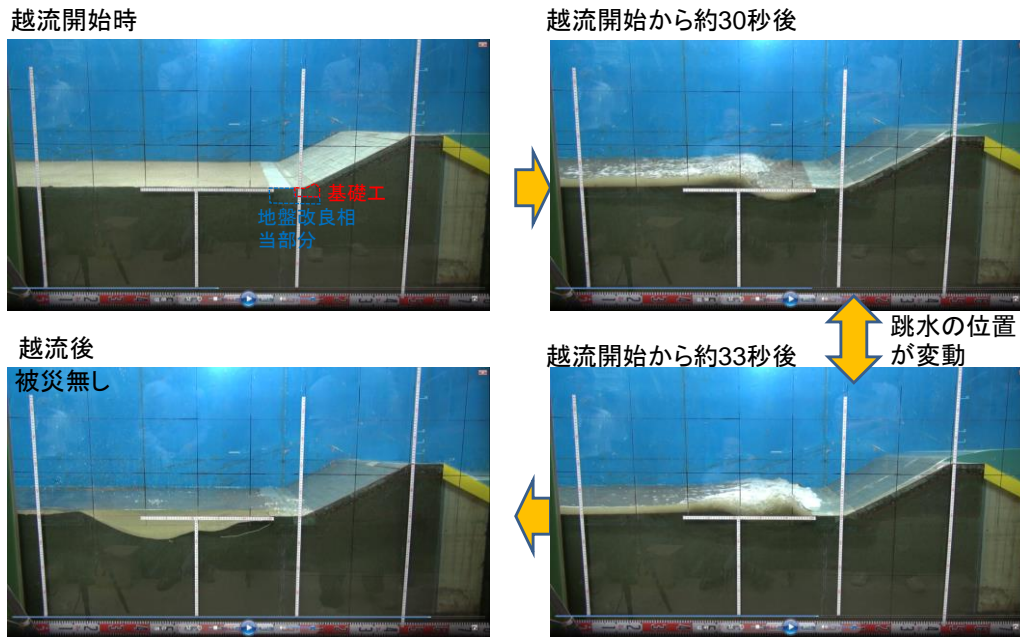


図-4.2.14 越流時の状況（越流水深 2m，地盤改良有り）

次に、同じ越流時間で、越流水深を 3m（現地換算値）とした場合の結果を示す。図-4.2.15 のように、地盤改良無しのケースでは、図-4.2.13 と同様に、洗掘の進行に応じて跳水の位置が法尻に近づいたり離れたりする現象が見られた。跳水の位置が法尻から離れた状態でも近づいた状態でも後述する図-4.2.16 の地盤改良ありのケースに比較して越流水がやや下向きに地盤に突っ込む状況が見られる。洗掘の発達は図-4.2.13 よりも大きく、裏法尻の地盤に突っ込む越流水の方向も図-4.2.13 よりも下向きとなる傾向が強くなる。洗掘が進行した越流開始から 60 秒後には、基礎工と裏法被覆工がずれ落ちるように崩壊した。

一方、地盤改良有りの場合のケース（図-4.2.16）でも、図-4.2.15 と同様に洗掘の進行に応じて跳水の位置が地盤改良下流端に近づいたり離れたりする現象が見られるが、跳水の位置が地盤改良下流端から離れた状態と近づいた状態いずれにおいても図-4.2.14 に示した地盤改良ありのケースに比較して、基礎工と地盤改良部分が形成する裏法尻の平地によって下流の地盤に向かう越流水の方向がより水平に近づくことにより、地盤改良下流端の洗掘深が地盤改良厚以上に発達せず、結果として堤防模型は被災しなかった。

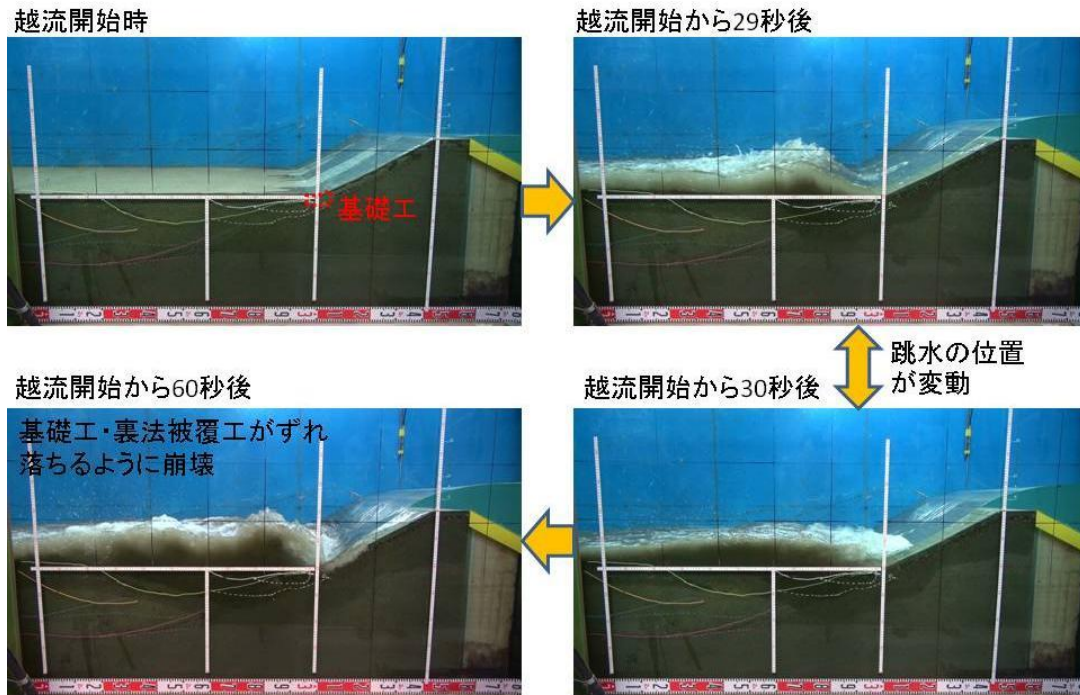


図-4.2.15 越流時の状況（越流水深 3m, 地盤改良無し）

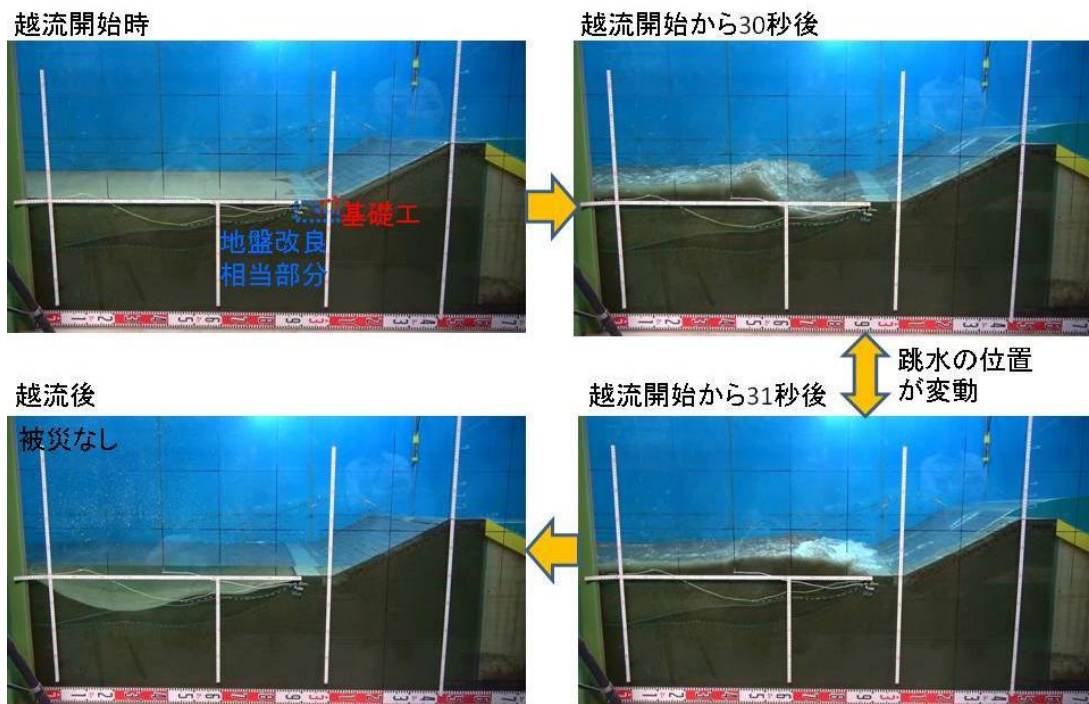


図-4.2.16 越流時の状況（越流水深 3m, 地盤改良有り）

## 2) 裏法戻保護工の効果に関する大規模実験（縮尺 1/2）

小規模実験では、粒径 0.3mm の砂を用いても陸側の移動床等の粒径が現地スケールで 7.5mm の小礫に相当し、実際に砂浜や海岸堤防の基盤を構成する砂の粒径よりも粗くなり洗掘が発達しにくい条件になっている可能性があることから、大規模実験においても地盤改良の有無の効果を確認した。越流水深は 2m（現地換算値）としている。



図-4.2.17 に地盤改良無し（図-4.2.12 の灰色の基礎工のみ）のケースにおける基礎工周辺の状況を示す。このケースでは、越流開始から 100 秒後（現地換算約 141 秒後）に、裏法被覆工のブロックが流失し、その後、基礎工と全ての裏法被覆工が流失した。基礎工の陸側下端に埋め込んでいた加速度計が越流開始から 99 秒後に流失していることから、洗掘によって基礎工が露出した時点で基礎工及び裏法被覆工がわずかにずれ、それが引き金となって裏法中部のブロックが流失した可能性が考えられる。

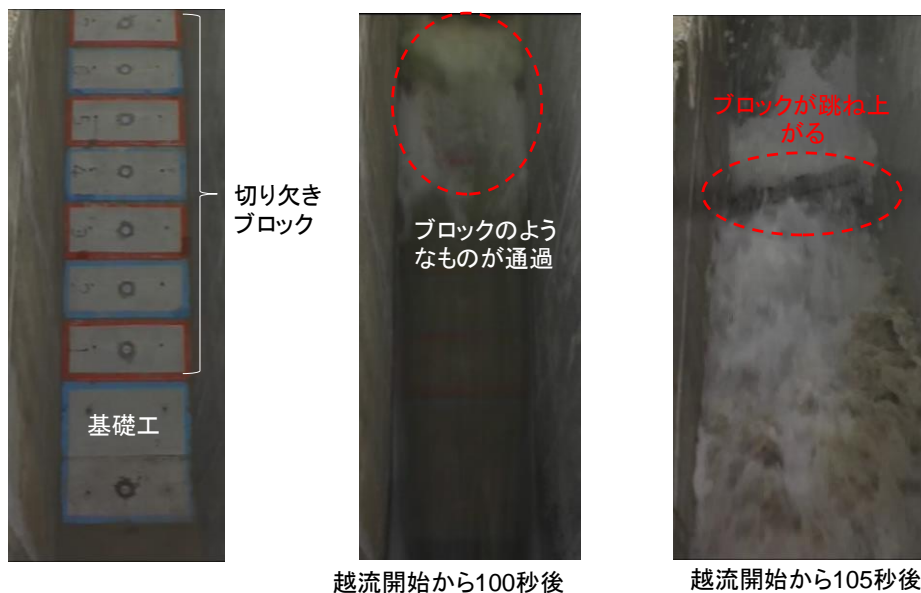


図-4.2.17 越流時の状況（越流水深 2m，地盤改良無し）

図-4.2.18 に地盤改良有り（図-4.2.12 の灰色部分の基礎工周辺に茶色部分の地盤改良を施した条件）のケースにおける基礎工周辺の状況を示す。このケースでは、越流開始からしばらくの間は基礎工と地盤改良部分で射流が見られ、その後に跳水が下流から近づいてきても基礎工や裏法被覆工は流失しなかった。越流後には、図-4.2.19 のように、地盤改良部分の表面に削られた跡はあるものの、ほぼ原形をとどめており、全体として地盤改良無しのケースと対照的な状況になった。また、越流後の断面形を示した図-4.2.20 に示すように、地盤改良部分より陸側は大きく洗掘されているが、地盤改良部分の下面までは洗掘されなかった。

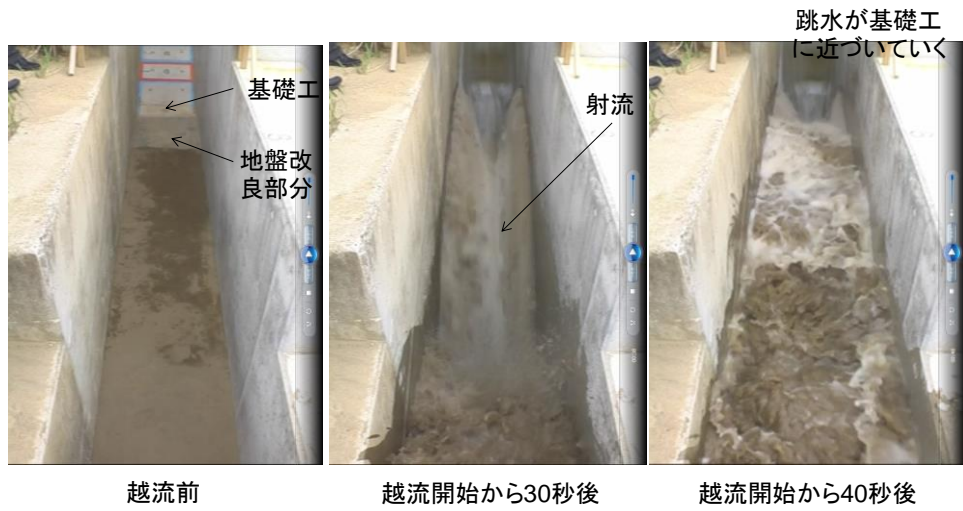


図-4.2.18 越流時の状況（越流水深 2m，地盤改良有り）



図-4.2.19 越流後の状況（越流水深 2m，左：地盤改良無し，右：地盤改良有り）

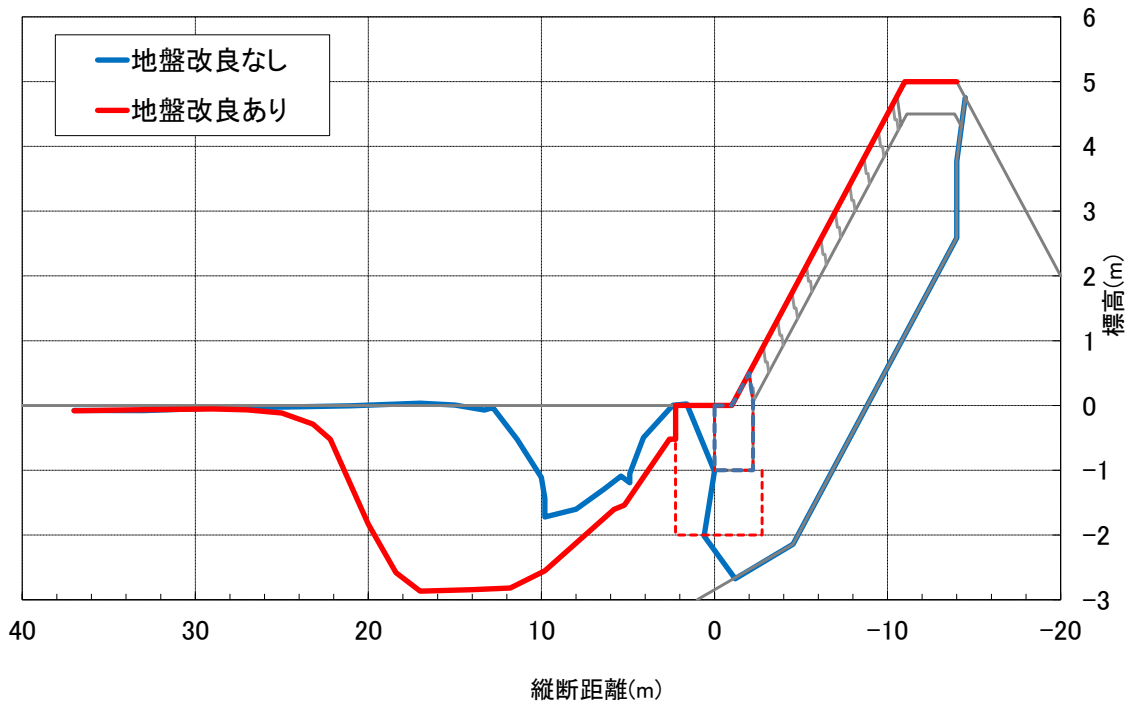


図-4.2.20 越流後の断面形（大規模実験）

現地換算で同じ越流水深（2m）および越流時間（現地換算：10分）に対し、小規模実験と大規模実験では被災の有無が異なる結果となった。その理由の一つとして、図-4.2.21のように、大規模実験では、小規模実験と比べて水位の上昇が速いことが考えられる。また、異なるスケールの実験において同じ粒径（0.3mm）の砂を移動床に用いていることも、洗掘の進行・発達及び図-4.2.22のような通水後洗掘縦断形状において違いを生じさせた理由として考えられる。

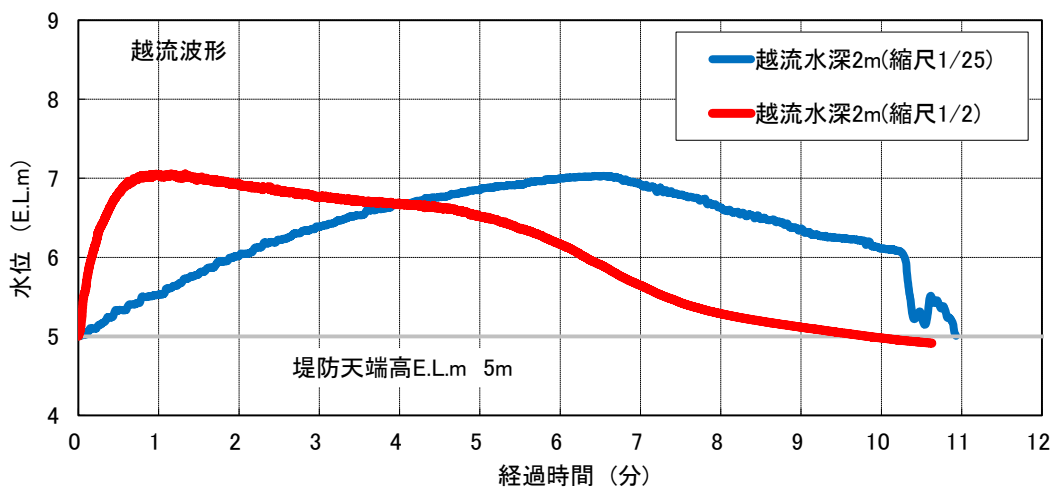


図-4.2.21 小規模実験と大規模実験の水位波形の違い

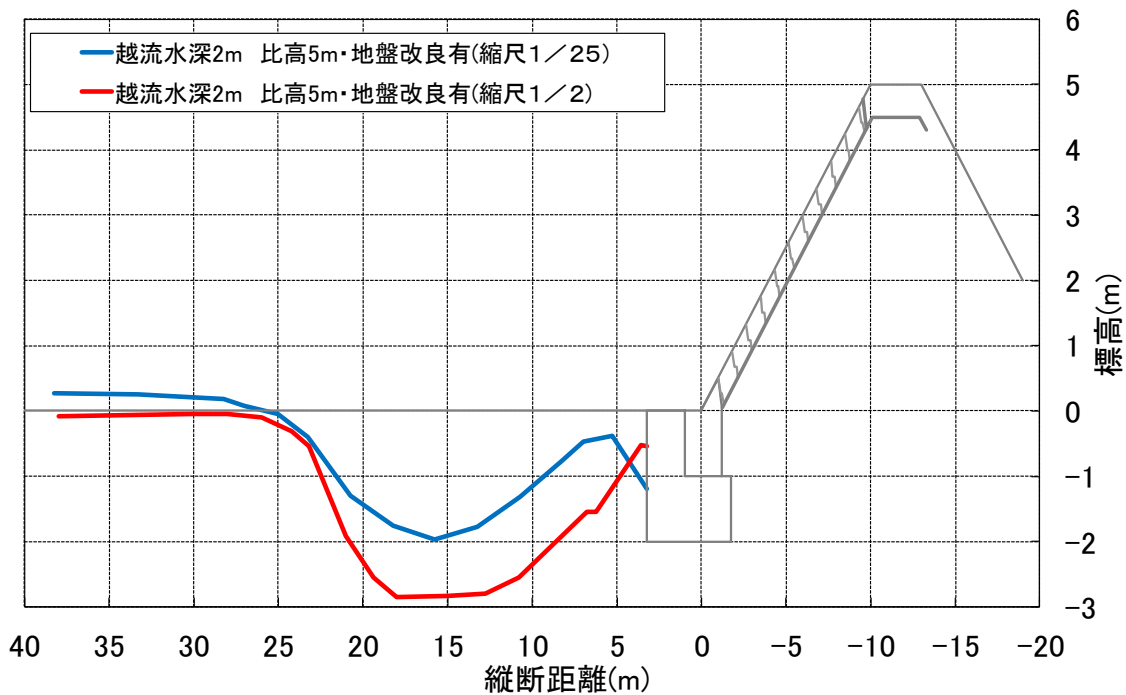


図-4.2.22 小規模実験と大規模実験の通水後の洗掘形状の違い

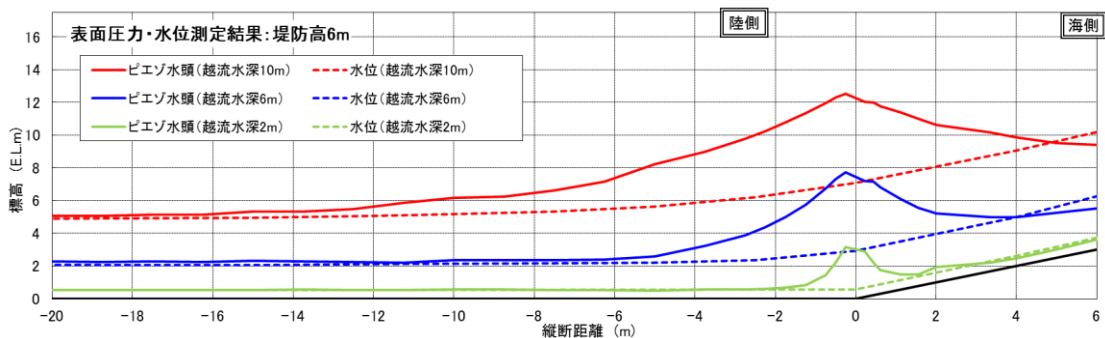


図-4.2.23 裏法尻周辺のピエゾ水頭及び水位（越流水深 2, 6, 10m）  
（図-4.2.9 の裏法部分拡大）

図-4.2.23 では、越流水深 2m の場合、裏法尻から陸側約 2m の範囲において、ピエゾ水頭が局所的に上昇していた。この局所的な上昇は越流水の流向を水平に変える際に生じる圧力であることから、その範囲に保護工の平坦面が存在することで流向を水平に変えられると考えられる。今回の実験では、地盤改良有りのケースでは地盤改良部分上面は表面が少し削られる程度で上流側基礎工上面のコンクリート面と遜色ない平坦面を維持した。これにより、基礎工上面平坦面 1m に地盤改良部分の上面 2.25m を加えた計 3.25m が流向を水平方向に変える保護工として機能したと考えられるが、これは、先に述べたピエゾ水頭の局所の上昇範囲 2m に対して十分な長さである。これに対して、地盤改良無しのケースでは基礎工上面の平坦面 1m のみが保護工として機能したと考えられ、これは、先に述べた越流水深 2m におけるピエゾ水頭の局所の上昇範囲 2m に対して半分しかなく、保護工の大きさとして十分でなかった可能性がある。また、図-4.2.20, 4.2.22 からわかるとおり、地盤改良部分下流端の厚さ 2m は、下流地盤で発生する洗掘形状に対して十分な

厚さを有していたことも保護工の機能を発揮する上で有効であったと考えられる。なお、地盤改良部分が保護工として機能するためには、越流水の流向を水平にかえるために必要なしっかりとした平坦面が維持されることが前提となることから、越流水の高流速に対する耐力を有することと地震・洗掘等で一体性が損なわれないことが重要と考えられる。

以上から、小規模実験及び大規模実験の結果を総合的に考えると、基礎工と地盤改良部分が一体的に保護工として機能することで流向を水平に変え、洗掘を裏法尻から遠ざけることで、裏法尻からの破壊を起こしにくくしていると評価できる。

### 3)天端被覆工に関する大規模実験（縮尺 1/2）

裏法肩で発生する負圧対策の効果についても、模型宿舍 1/2 の大規模実験により確認した。写真-4.2.4 と 4.2.5 は、高落差実験水路において高さ 3m（現地スケールで 6m）の堤防模型を水深 1m（現地スケールで 2m）で越流する条件で、法肩のブロックを天端被覆工と連結しないケースと、法肩のブロックを天端被覆工と一体化したケースについて、それぞれ越流後の状況を示している。天端被覆工と連結しなかったケースでは、裏法肩のブロックが流失した。一方、天端被覆工と一体化したケースでは、天端被覆工は流失しなかった。裏法肩の負圧対策の一つとして、図-4.2.10 のように裏法肩と天端を一体化した構造が有効であることが確認された。

このような方法が有効となる理由と条件は次のとおりと考えられる。図-4.2.24 からわかるように、静水圧を大きく下回り、さらに負圧となるのは、裏法肩を中心とする一定範囲である。こうした負圧の範囲にブロックの 1 単位が対応する状況であると、それ単独で負圧という不安定化条件に対抗することになり、安定化を図る上で明らかに不利になる。周辺との連続、あるいは、ブロック単位の拡大などによって、負圧でない領域も合わせたブロック単位とすれば、全体として不安定化条件が緩和される。このように、水理的に不安定になりやすい特性を持つ場所が局在する場合には、そこで構造体を完結させずに、周囲まで広げて、安定上有利となる条件を作り出すことがポイントとなる。逆に言うと、負圧の範囲が越流水の増大とともに拡大すれば、一体的構造とすべき範囲がどんどん広がり、被覆工構造の簡易修正というレベルを超えてしまう可能性が有る。ここに、この改善法の限界も存在することになると考えられる。



写真-4.2.4 法肩のブロックを天端被覆工と連結しないケース



写真-4.2.5 法肩ブロックを天端被覆工と一体化したケース

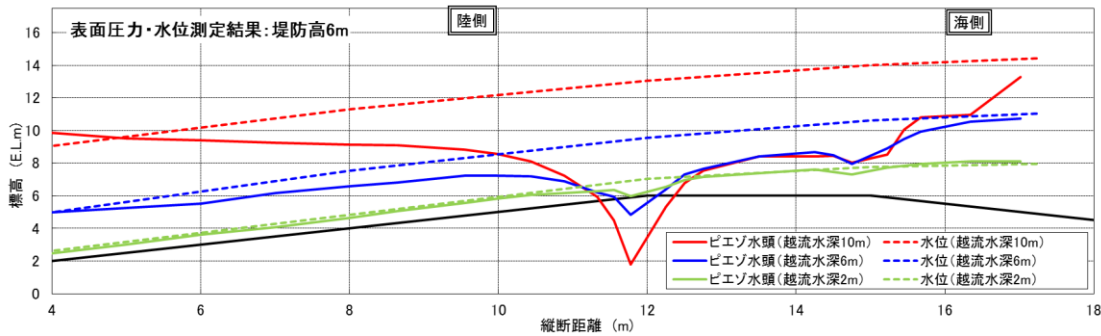


図-4.2.24 裏法肩周辺のピエゾ水頭及び水位（越流水深 2, 6, 10m）  
（図-4.2.9 の天端部分拡大）

#### 4) まとめ

海岸堤防の復旧工事にあたり、越流に対して粘り強い構造を検討した。本節ではその構造効果を検証するために、前節（2）～（4）において裏法尻保護工、および天端被覆工の効果を水理模型実験によって検証した。裏法尻の基礎工と地盤改良によって裏法尻からの破壊を軽減する効果が見受けられた。また、越流時に裏法方で発生する負圧対策として、天端被覆工を法肩のブロックと一体化することが有効であることが示された。

#### 4.2.4 更新時等における粘り強い構造上の工夫

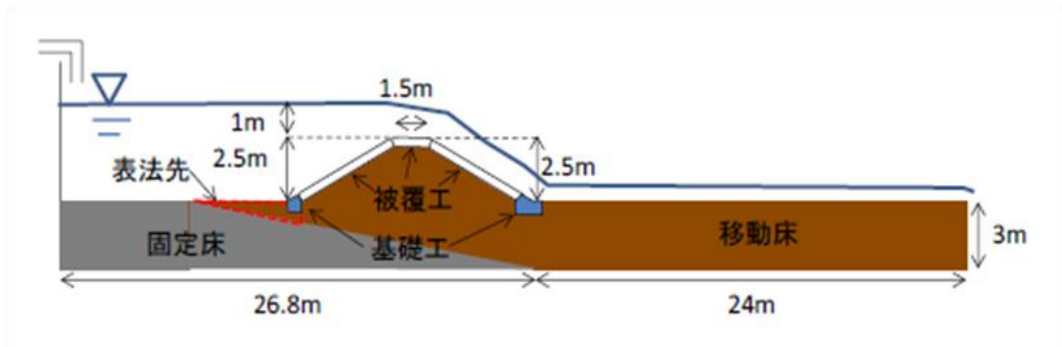
##### (1) 更新時等の海岸堤防の粘り強い構造

前項では、仙台湾南部海岸の復旧工事で採用された裏法被覆工がブロック張り、裏法基礎工部分に地盤改良工を施した構造の粘り強さの効果の確認結果を示した。一方で、既存の海岸堤防等についても、今後の更新の時期に合わせて、構造上の工夫を検討する旨が、「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<sup>11)</sup>」で示されているところである。また、南海トラフの巨大地震の発生が切迫している中で、既存堤防の補強が緊急の課題となっている。そのため、前項で示した構造と違う構造の海岸堤防の補強方法についても、検討を行った。

##### (2) コンクリート平張り構造の海岸堤防の粘り強い構造の留意点

海岸堤防の裏法被覆工については、ブロック張りの他にコンクリート平張りによるものが多く用いられている。前項で示したブロック張り構造に比べて透気性が低く、堤体内圧上昇に対する配慮が必要となると考えた。

そこで、堤体内の圧力上昇に着目し、コンクリート平張りの海岸堤防を対象に津波越流時の堤体内の圧力上昇を把握するため、大規模実験（縮尺 1/2）を行った。図-4.2.25 のとおり、被覆工・基礎工下面の材料と表法先の地盤に設置する材料を変更して、堤体内の圧力上昇の違いを確認した。与えた津波の波形は、図-4.2.21(赤線)と同様である。



ケース	被覆工・基礎工下面	表法先
1	砂(中央粒径0.25mm)	砂地盤(中央粒径0.25mm)
2	フィルター層(上層15cm:割栗石(粒径25~75mm)、下層10cm:碎石(RC-20))	砂地盤(中央粒径0.25mm)
3	フィルター層(上層15cm:割栗石(粒径25~75mm)、下層10cm:碎石(RC-20))	割栗石(粒径25~75mm)

図-4.2.25 被覆工下圧力測定実験ケース

図-4.2.26 は、図-4.2.25 のケース 1 での越流後の地形である。越流によって裏法尻では、洗掘が生じており、裏法尻の基礎工近傍は基礎工下面程度まで洗掘された。なお、ケース間での洗掘形状の違いはほとんどなかった。

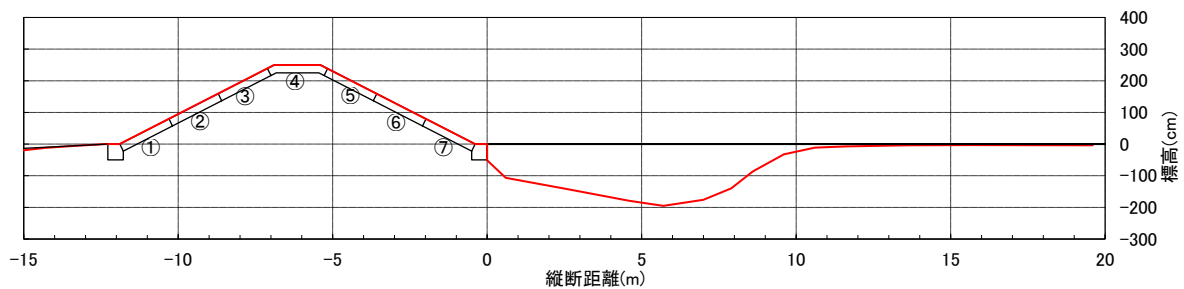


図-4.2.26 ケース 1 の越流前後の地形 (赤：越流後)

図-4.2.26 に示した 7 点 (①～⑦) で測定した被覆工下面でのある直の変動量を水頭表示した結果を図-4.2.27 に示す。堤体土の上に直接被覆工を置いたケース 1 では、越流開始時刻(経過時間 0sec)を過ぎてから圧力が上昇し始め、表法中央に設置した No.2 を除くと、表法先の水深のピークから遅れて最大となり、その最大値は 0.5m 程度以下の水頭になっている。No.2 以外ではほぼ同様に変化していることから、空気圧の上昇による変化と考えられる。また、越流開始時刻までは表法先での水位上昇によって浸潤線が上昇しても堤体内の空気は裏法尻から排出できるため圧力が上昇していないが、越流開始によって裏法尻が越流水に覆われて圧力が上昇すると裏法尻から排気ができなくなり、堤体内の圧力が上昇したものと考えられる。なお、No.2 の圧力は、越流開始直後に他の測点と比べて大きく上昇した後、表法先の水深とほぼ同じ位相で減少している。後述するフィルター層を設けたケース 2 と同程度の圧力になっていることから、表法被覆工と天端被覆工との隙間等からの浸透により局所的に圧力が高くなったものと考えられる。

一方、被覆工及び基礎工の下面にフィルター層を設けたケース 2 では、表法の 3 点で圧力が大きくなっており、その最大値の差は水圧計の設置高さとはほぼ一致している。これは、表法先の基礎工の下にフィルター層を設けたことでケース 1 より浸透しやすくなった結果、表法被覆工の下のフィルター層が水で満たされたためと考えられる。また、天端被覆工や裏法被覆工の下面での圧力は測点間の差が無く変動している。表法被覆工下面の 3 点ではフィルター層が飽和されて圧力が上昇したのに対し、天端被覆工や裏法被覆工の下面ではフィルター層が飽和しないまま圧力が一様になっていたと考えられる。

ケース 2 の表法先を割栗石で置き換えたケース 3 では、他のケースより早く圧力が増加し始めており、表法先から堤体内への浸透が速く進んでいる。このため、表法被覆工下面の 3 点ではケース 2 より最大値が増大する一方、裏法⑥および裏法⑦では越流開始から約 60 秒後に飽和して圧力が急上昇している。天端④および裏法⑤の圧力水頭は最大で 0.5m 程度であり、天端被覆工や裏法被覆工上部の下面は飽和しなかったと考えられる。

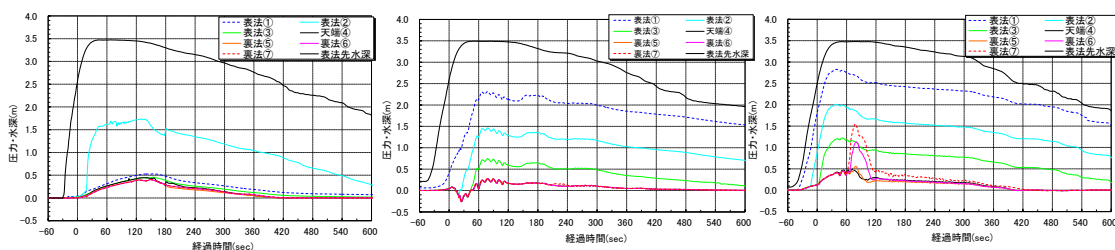


図-4.2.27 被覆工下面の圧力（左からケース 1、2、3）

以上のように、海岸堤防を津波が越流する状況において、表法先から浸透しやすいほど被覆工下面に作用する圧力が上昇することがわかった。被覆工下面の圧力は天端や裏法より表法の方が大きくなっていったが、被覆工上の水深も表法の方が大きくなる。被覆工の安定性を議論するためには、被覆工下面の圧力だけでなく、被覆工上面に作用する水圧や被覆工の自重も考慮する必要がある。

図-4.2.28 は被覆工下面の圧力水頭と被覆工上面の水深について両者の時間最大値を比較したものである。表法被覆工および天端被覆工については、被覆工下面の圧力水頭が被覆工上面の水深より小さくなっている。特に表法被覆工の上面は水深が大きく、被覆工下面の圧力水頭が大きくても被覆工を上から押さえつける力が大きいことから、被覆工が不安定になりにくいと考えられる。天端被覆工についても、被覆工上面の水深の方が大きくなっているが、流線の曲がりによる被覆工上面での圧力低下を別途考慮する必要があるため、表法被覆工より浮き上がりやすい状態にあると考えられる。これに対し、裏法被覆工については、ケース 3 において被覆工下面の圧力水頭が被覆工上面の水深より大きくなっている。裏法被覆工の自重と被覆工上面の水圧との和から被覆工下面の圧力を引いた荷重が被覆工の滑動に対する摩擦力として働くが、被覆工下面の摩擦係数を 0.6 として試算すると、ケース 1 および 2 では裏法被覆工は摩擦力によって動かないが、ケース 3 では被覆工下面の圧力が大きいため摩擦力が 0 になり、1.29tf の力で基礎工を押すことが想定される。裏法被覆工下面の一定以上の範囲が飽和して圧力が高まると、裏法被覆工が不安定になる可能性が示唆された。



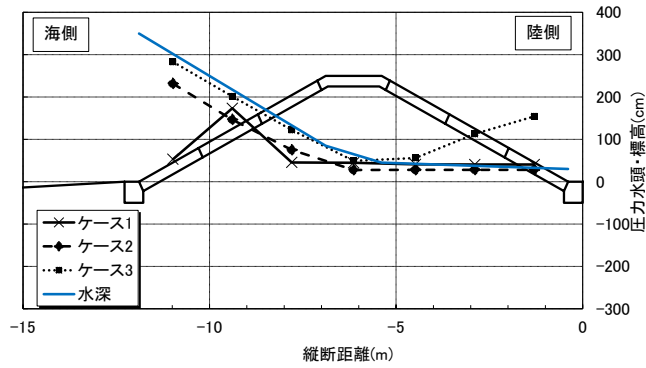


図-4.2.28 被覆工下面の圧力水頭と被覆工上面の水深

以上のことを踏まえると、津波の越流によるコンクリート平張りの海岸堤防の被災メカニズムは図-4.2.29のように整理した。津波の越流によって堤体内の浸潤面が上昇することにより、裏法被覆工を持ち上げようとする力が作用する。その結果、裏法被覆工と裏法面との間の摩擦が減少し、裏法被覆工が基礎工を押す力が大きくなる。一方、津波の越流によって基礎工の陸側が洗掘されるため、裏法被覆工の自重が作用する基礎工を支える土圧が減少する。その結果、基礎工が滑動または転倒し、その後に裏法被覆工が移動して、裏法面に上部または下部に隙間が生じ、そこから堤体土の吸い出しが生じる。

海岸堤防が粘り強く効果を発揮するためには、前項で示したように裏法尻で越流水の流向を水平に変えるだけの保護工を設けることが有効である。しかし、そのような保護工を施す用地がない箇所では、地盤改良ほどの強さはないものの、基礎工に矢板を取り付けることで基礎工の移動を抑制することも考えられる。その際、裏法被覆工が基礎工を押す力を低減するように、裏法被覆工の移動を抑制するような工夫が有効であり、堤体土の表面に捨てコンクリートを敷設してから被覆工を施工することによって堤体表面からの浸透及び吸い出しを抑制することで、津波の越流に対して有効であると考えた。

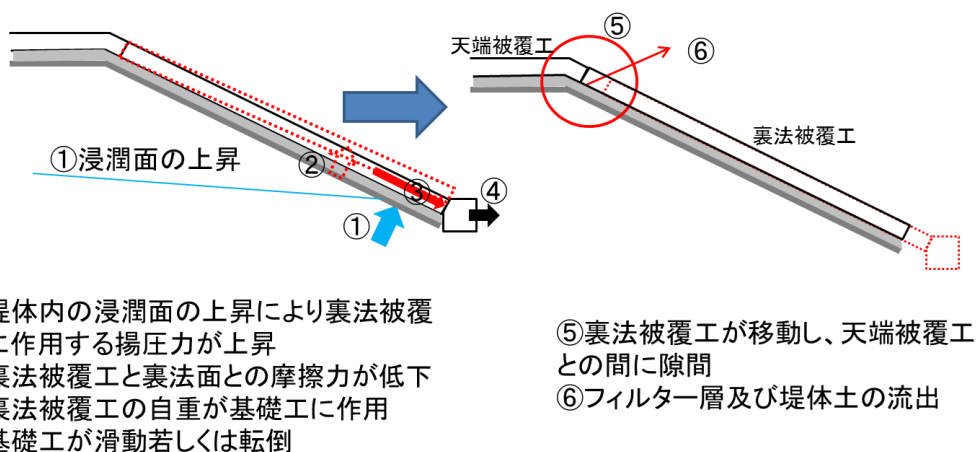


図-4.2.29 浸潤面の上昇による裏法被覆工の被災のメカニズム

### (3) コンクリート平張り構造の海岸堤防の粘り強い構造の留意点への対応

上記の被災メカニズムを踏まえた上で、堤防陸側の用地の制約を考慮した構造上の工夫として、裏法基礎工に矢板を取り付けた効果を確認するため、大規模実験を行った。

図-4.2.25の実験と同じ水路に、高さ2.5m（現地換算：5m）、天端幅1.5m（現地換算：3m）。法勾配1:2の堤防模型（縮尺1/2）を設置し、堤防の構造は、図-4.2.30のように、矢板の有無、被覆工下の条件などを変えた4ケースとした。被覆工下のフィルター層は、2層（上層：厚さ0.15m・割栗石、下層：厚さ0.10m・碎石）とし、水路の側壁と被覆工との間については、被覆工が水路に接触せずに移動できるように3cmの隙間を設け、その部分を砂で埋めた。また、与えた津波の波形は、図-4.2.21（赤線）と同様である。なお、堤体土等の侵食状況や基礎工等が移動したタイミングを把握するため、堤体土や砂地盤、被覆工、基礎工には自記式の加速度計を設置した。そのサンプリング間隔は1秒のため、基礎工等の移動タイミングは十分に把握できなかったが、侵食や洗掘の進行状況は概ね把握できた。

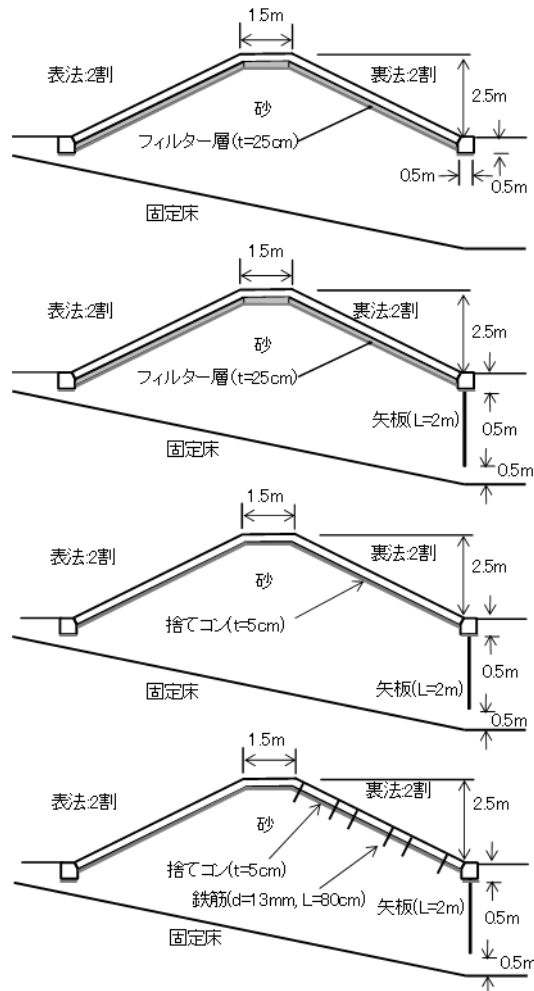


図-4.2.30 堤防構造（上からケース1、ケース2、ケース3、ケース4）

被覆工下部をフィルター層、基礎工を通常基礎としたケース1では、越流開始から約20秒後に基礎工が転倒し、その後に裏法被覆工も流失し、越流開始から約130秒後に全壊に至った。(図-4.2.31~4.2.33)

ケース2では、ケース1のように裏法尻の基礎工が流失する可能性を抑制するため、基礎工の下部に長さ2mの鋼矢板をケース1の構造に追加して、実験を行った。なお、矢板は基礎工と一体化している。矢板による基礎工の移動の抑制を期待した構造であったが、越流開始から40秒後に基礎工が移動し、その直後に裏法被覆工が流失した。その結果、基礎工および矢板は下流側に流され、ケース1と同様に堤体土が全て全壊に至った。(図-4.2.34~4.2.36)

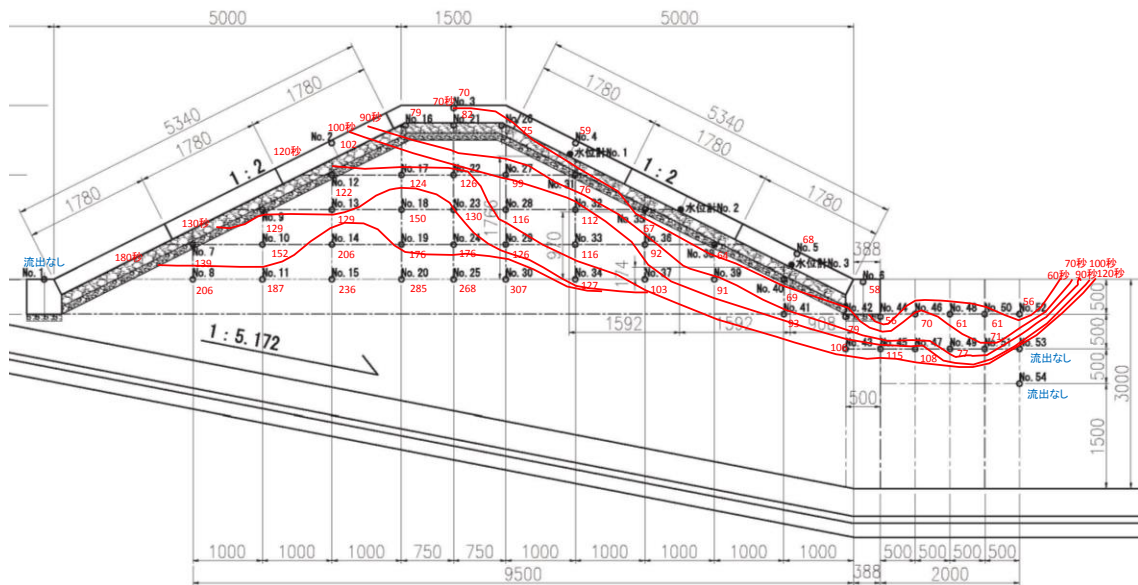


図-4.2.31 洗掘・破壊の進行状況 (ケース1)

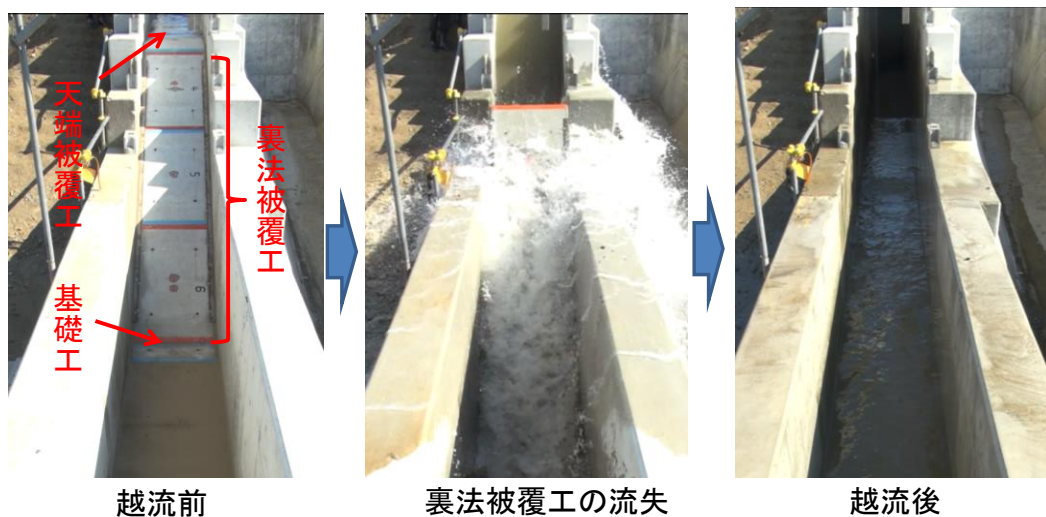


図-4.2.32 越流時の状況 (ケース1)

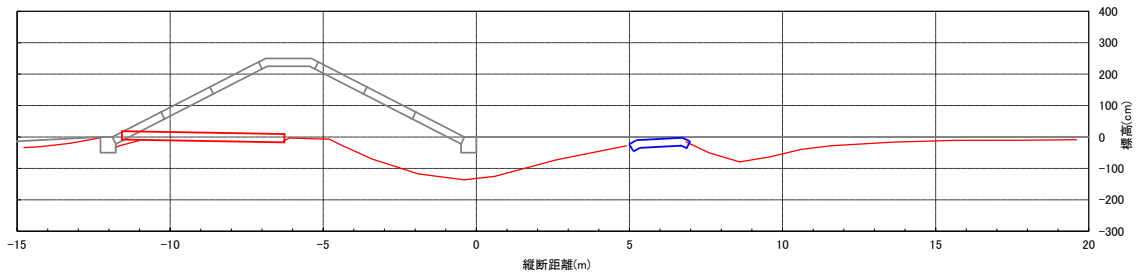


図-4.2.33 越流後の地形（ケース 1）

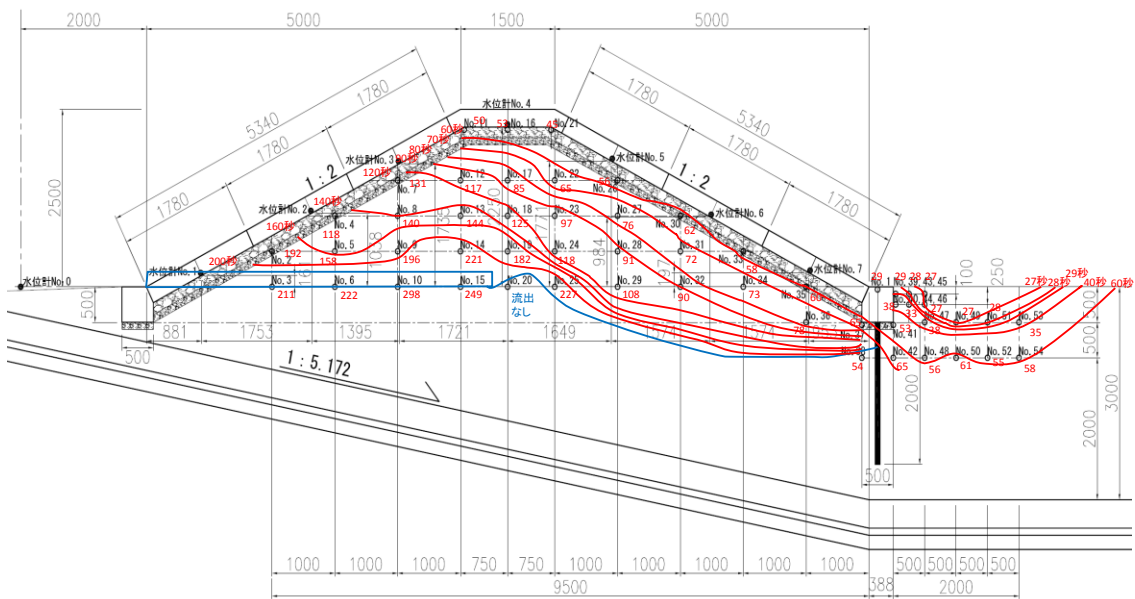


図-4.2.34 洗掘・破壊の進行状況（ケース 2）



図-4.2.35 越流前後の状況（ケース 2、左から越流前，越流開始から 40 秒後）

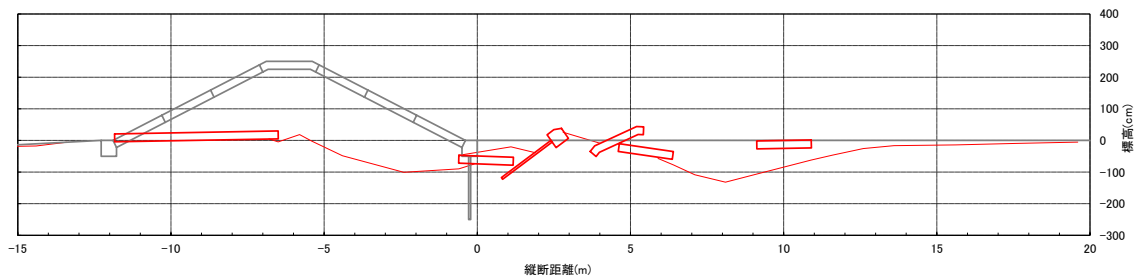


図-4.2.36 越流後の地形（ケース2）

上述したとおり、被覆工と堤体土の間をフィルター層にすると、被覆工を内側から押す力が大きくなる。そこで、ケース3（図-4.2.37）では、被覆工と堤体土との間をフィルター層に代えて厚さ5cmの捨てコンクリートを打設し、その上に被覆工を置く構造とした。水路壁との境界部分には遮水シートを入れていることを除き、他の構造や越流条件はケース2と同じである。現地では、堤体土の表面に打たれた捨てコンクリートの上に被覆工のコンクリートを打設するため、捨てコンクリートと被覆工との間に隙間は生じにくいと考えられるが、悪条件として両者が分離している状態を想定している。

図-4.2.38のように、越流開始から80秒後には裏法尻付近で水しぶきが上がり始め、越流開始から300秒後には裏法被覆工と天端被覆工の境目付近からも水しぶきが大きく上がり始めた。図-4.2.39のように、越流後には基礎工および裏法被覆工は斜め下に移動しており、裏法被覆工と天端被覆工との間は長さ約1mに渡って捨てコンクリートが露出した。しかし、捨てコンクリートにより堤体土の吸い出しが抑制されたため、天端被覆工や表法被覆工の流失には至らず、堤体土も裏法尻付近が部分的に吸い出される程度の変状であった。また、基礎工と一体化した矢板の下端は元の位置にほぼ留まった。コンクリートブロック張りの裏法被覆工と地盤改良を採用したケースに比べると変状は大きいですが、越流後も天端の高さを確保できたことから、粘り強く効果を発揮したものと判断される。

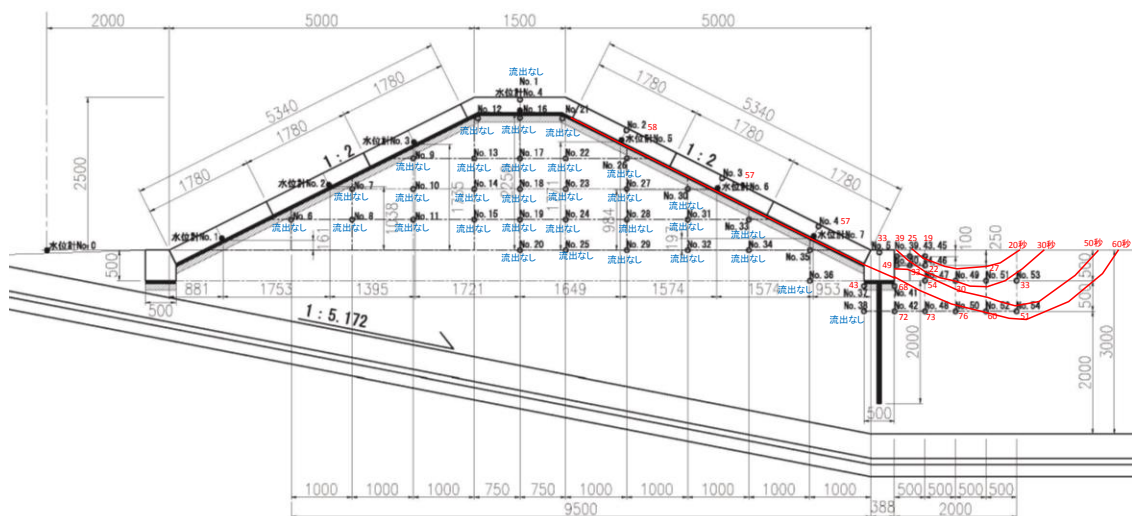


図-4.2.37 洗掘・破壊の進行状況（ケース3）



図-4.2.38 越流前後の状況（ケース3：左から越流前，越流開始から80秒後，越流開始から300秒後，越流後）

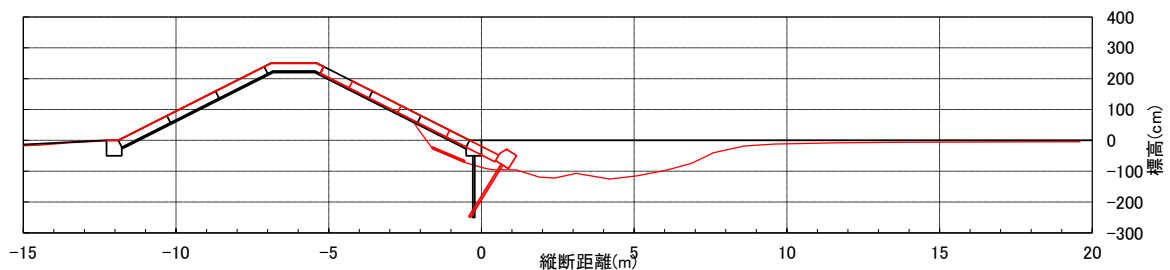


図-4.2.39 越流後の地形（ケース3）

ケース3では捨てコンクリートの上に置かれた裏法被覆工が、基礎工とともに斜め下に移動した。そこで、ケース4（図-4.2.40）では、堤体土に差し込んだ鉄筋で捨てコンクリートおよび裏法被覆工を一体化することにより、裏法被覆工の移動を抑制することを試みた。具体的には、12本の鉄筋（径13mm、長さ80cm）を堤体土の裏法に深さ50cmまで埋め込んだ上で、ケース3と同様に捨てコンクリートを打設した後、さらにケース3と同じ被覆工に鉄筋を差し込んで、隙間をモルタルで埋めた。

その結果、図-4.2.41のように裏法尻での洗掘は生じたが、図-4.2.42のように、裏法尻の基礎工はその上面で25cmの移動に留まり、裏法被覆工はその下端が27cm沈下した程度であった。ただし、裏法の捨てコンクリートが法先近くで破断するなど、裏法尻近傍の堤体土の吸い出しが確認された。

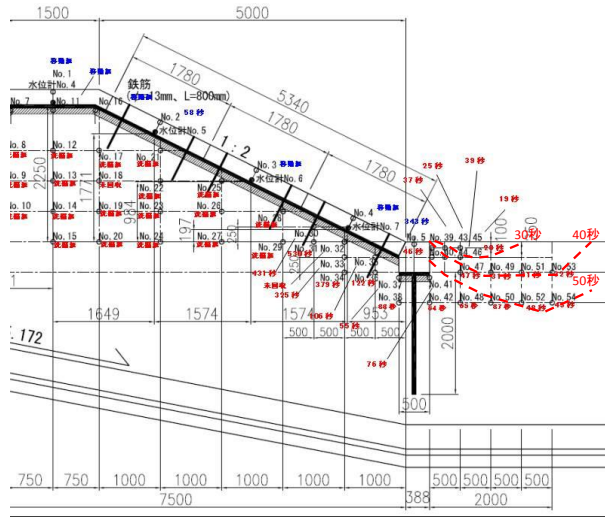


図-4.2.40 洗掘・破壊の進行状況（ケース4）

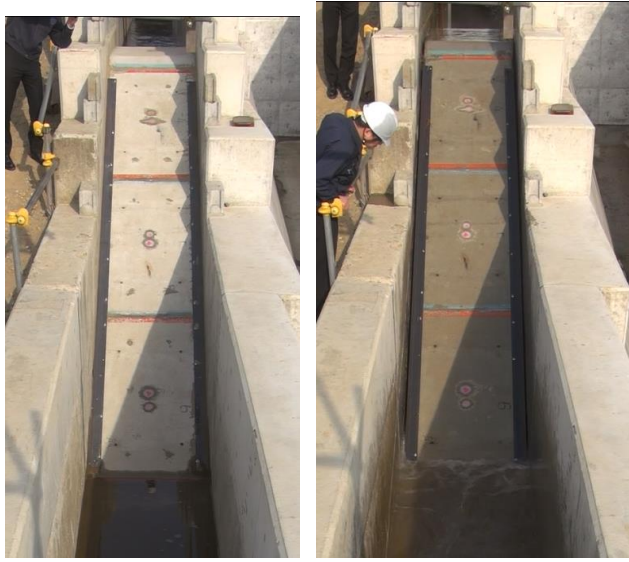


図-4.2.41 越流前後の状況（ケース4：左から越流前，越流後）

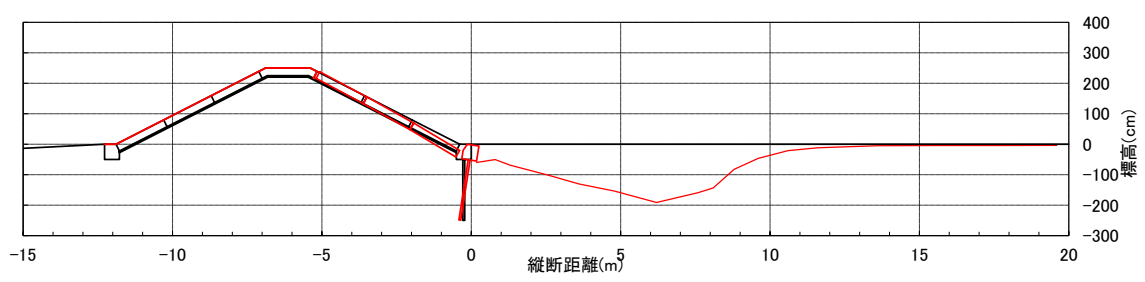


図-4.2.42 越流後の地形（ケース4）

津波の越流によって裏法尻の洗掘が進むとともに、堤体内への浸透によって裏法被覆工と堤体土との間の摩擦力が低下すると、裏法被覆工の自重によって裏法尻の基礎工が押し出される可能性があることが分かった。基礎工の移動により隙間ができると、そこから堤体土が吸い出され、堤防の被災が進行する恐れがあるため、裏法被覆工（2.86t）の自重が

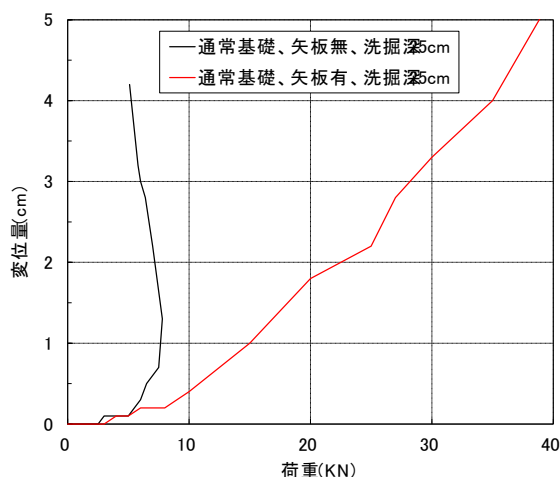
基礎工に作用する状況を想定して、**図-4.2.43** に示す形状の基礎工に油圧ジャッキで力を作用させて、基礎工が 1mm 移動するのに必要な荷重（変形時荷重）を測定した。

通常基礎の陸側の洗掘深を 0 とすると、変形時荷重は 1.6tf になった。一方、基礎工陸側の洗掘深を 25cm とした際の変形時荷重は、通常基礎では 0.3tf、通常基礎の下部に長さ 2m の矢板を付けると 0.4tf 増加した。これに対して、越流実験に用いた裏法被覆工が基礎工を押す力は、下面の摩擦係数を 0.6 とした場合には摩擦力によって 0 になるが、下面の摩擦を無視した場合には 1.29tf になる。以上のことから、越流前の時点では安定していた基礎工が、基礎工陸側の洗掘に加え、堤体内への浸透により裏法被覆工の下面の摩擦が小さくなることによって不安定化することがわかる。

	通常基礎	通常基礎、陸側洗掘	通常基礎+矢板(L=2m)、陸側洗掘
タイプ			
変形時荷重	1.6tf	0.3tf	0.4tf

**図-4.2.43** 基礎工が 1mm 移動するのに必要な荷重

矢板があっても変形時荷重はあまり増大しない結果であったが、さらに荷重を大きくしていった場合の基礎工の変位は矢板の有無によって異なった。**図-4.2.44** は、**図-4.2.43** の中段および右段の条件における荷重と変位との関係を示している。荷重が小さいうちは両者の違いはほとんど見られないが、5kN 程度を超えると、矢板がない条件では荷重がほとんど変わらずに変位が著しく増大するのに対し、矢板がある条件では荷重とともに変位が大きくなっていき、矢板によって基礎工の変位が抑制されていることを示している。



**図-4.2.44** 基礎工に作用する荷重と基礎工の変位量との関係

#### (4) まとめ

用地が限られている箇所でのコンクリート平張りの海岸堤防における構造上の工夫を検証するために水理模型実験を行った。堤体土との間に浸透を容易にするフィルター層設置



を避けて捨てコンクリートとすることや、堤体内の圧力上昇によって増大する裏法被覆工の移動を矢板等で抑制することが有効であることが分かった。

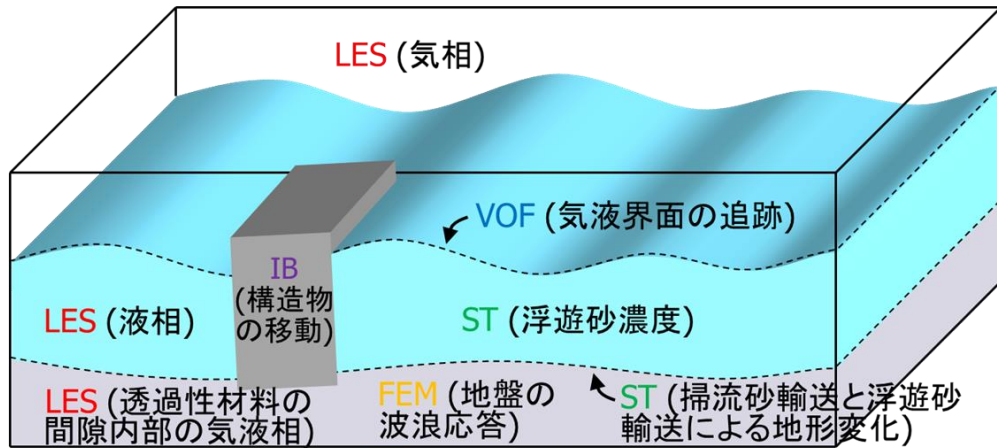
#### 4.2.5 海岸堤防の被災メカニズム数値解析技術の開発

堤防形状や基礎地盤、背後地の状況等、様々な現場条件に応じた粘り強い構造の工夫を行うためには、海岸堤防の被災メカニズムを数値解析する技術が有用である。

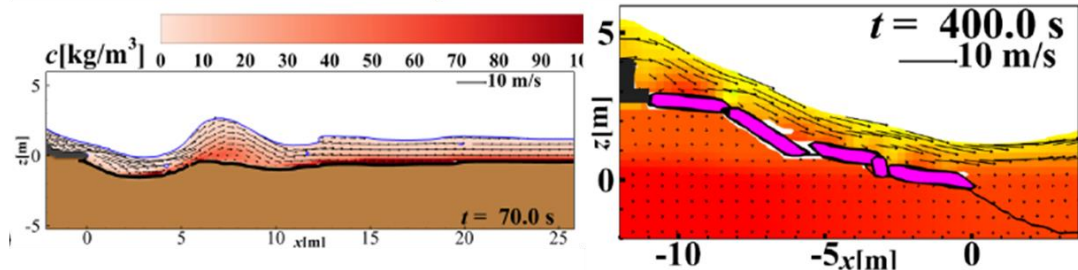
このため、国土交通省の河川砂防技術研究開発公募制度を活用して平成25～26年度の2か年に実施された名古屋大学 水谷法美らのグループによる「津波来襲時の海岸堤防の被災メカニズム解明のための数値解析技術の研究開発」に対し、海岸研究室が今まで実施した越流実験データの提供を行い、当該研究を側面支援した。

開発されたモデルは、津波・被覆工の挙動・洗掘等の地形変化・基礎地盤の応答の4者間の相互作用の解析を行う。4者のモデルは、流体はLES (Large-Eddy Simulation Based Navier-Stokes Solver) に基づく流体解析・VOF (Volume-of-Fluid Module) 法に基づく気液界面の追跡、構造は埋め込み境界 (Immersed-Boundary Module ; IB) 法に基づく流体・構造連成解析地形変化:底質輸送に伴う地形変化と浮遊砂濃度の解析 (Sediment Transport Module ; ST)、地盤は水・土連成解析を行う有限要素法 (Finite Element Module ; FEM) から成る。このモデルを用いて、国総研で実施した大規模実験の再現計算が実施され、海岸堤防の破壊メカニズムの把握および粘り強い海岸堤防の構造を検討する際に有効なツールになりうることが確認された (図-4.2.45)。

数値計算モデルの概要

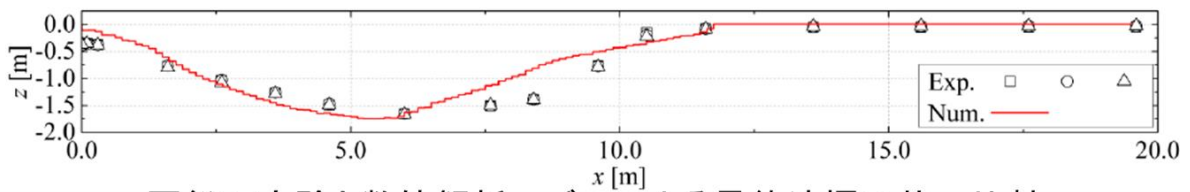


出力結果例



数値解析モデルによる津波越流時の流れ場及び洗掘の状況

数値解析モデルによる裏法被覆工の移動状況



国総研実験と数値解析モデルによる最終洗掘形状の比較

図-4.2.45 名古屋大学 堤防被災メカニズム数値解析技術

## 4.3 河川への津波遡上対策

### 4.3.1 研究の目的

河川津波を考慮した河川改修・河道管理の検討に資する情報を得ることを目的として、東日本大震災において河川津波遡上の生じた北上川のモデルを作成し、堤防状況（破堤の有無、堤高など）、河道内地形（砂州の有無、高水敷・中州の掘削）及び河川流量が津波の最高水位（以下、最高水位と呼ぶ）へ与える影響を実験及び再現解析によって把握した。これらの検討結果について他河川に応用できるように、津波の河川遡上解析の改善に関する知見としてとりまとめる予定である。

### 4.3.2 研究の方法

#### (1) 実験

北上川を対象に図-4.3.1に示す範囲にて湾口から10kpまでの河道内と周辺地形の縮尺1/330（長さ33m、幅30m、深さ0.5m）モデルを製作した。河道内地形は河口砂洲を-1.0～0.7kp、中州を0.5～2.7kp、高水敷を3.1～9.1kpに設置し、堤防は津波発生年の直近（平成21年度）に測量された形状（以下、再現堤防と呼ぶ）、初期水位は朔望平均満潮位のT.P.+0.703mとした。模型全景の写真を写真-4.3.1に示す。

東日本大震災時に北上川へ襲来した津波を震源断層モデルより求め（以下、再現解析波形）、第一波目の最大水位及び周期を模型下流端に設置されている造波装置にて再現し（以下、実験波形と呼ぶ）、模型へ与えた。図-4.3.1のO1に示す湾口部3箇所における時系列水位平均値を実験波形として、再現解析波形と実験波形の時系列水位図を図-4.3.2へ示す。横軸は時間(min)、縦軸は水位（T.P.m）を表しており、以降の値はすべて現地換算値により整理した。

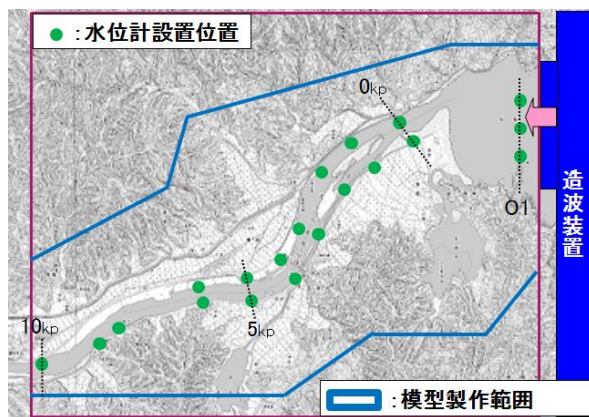


図-4.3.1 模型概略図



写真-4.3.1 模型写真

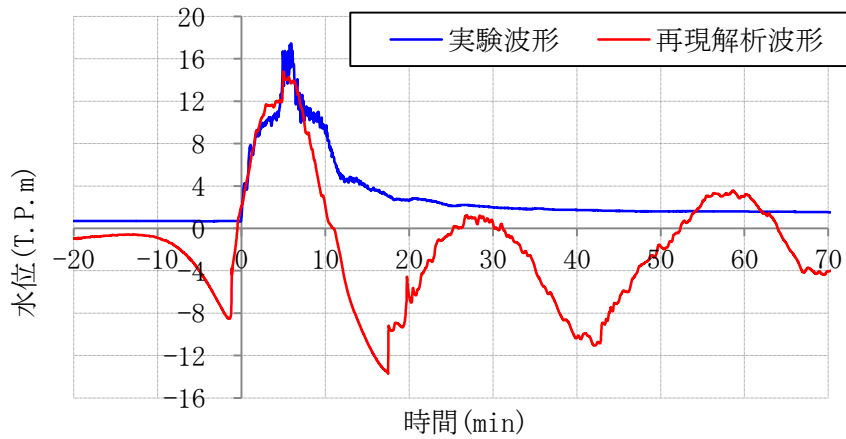


図-4.3.2 実験及び再現解析波形時系列水位図

実験ケースは表-4.3.1に示す通り、堤防、河道内地形、河川流量の3条件に応じて、計9ケースを設定した。各ケースの海岸堤防も含めた堤防状況、河道内地形設置位置、河川流量供給位置及び水位観測地点（発生した津波による水位変化を、0～10kpの河道部24箇所、-3～0kpの湾口部3箇所において水位計により計測）の概略図を図-4.3.3～図-4.3.7に示す。

表-4.3.1 ケース一覧

CASE	堤防	河道内地形	河川流量	入力波形
I	壁立堤防	全て設置 (河口砂州・中州・高水敷 全て設置)	なし	実験 波形
II	再現堤防区間 右岸：3.8～4.6kp (他は壁立堤防)			
III	再現堤防区間 右岸：海岸堤防～4.6kp、 左岸：海岸堤防～2.4kp (他は壁立堤防)			
IV	再現堤防区間 右岸：海岸堤防～3.8kp、左岸：海岸堤防～2.4kp 堤防破堤区間 右岸：3.8～4.6kp (他は壁立堤防)			
V	再現堤防区間 右岸：海岸堤防～3.8kp、左岸：海岸堤防～2.4kp 堤防破堤区間 右岸：海岸堤防、3.8～4.6kp (他は壁立堤防)			
VI	壁立堤防	河口砂州のみ設置		
VII		全てなし (河口砂州・中州・高水敷 全て設置なし)		
VIII			5,400 m <sup>3</sup> /s	
IX			8,700 m <sup>3</sup> /s	

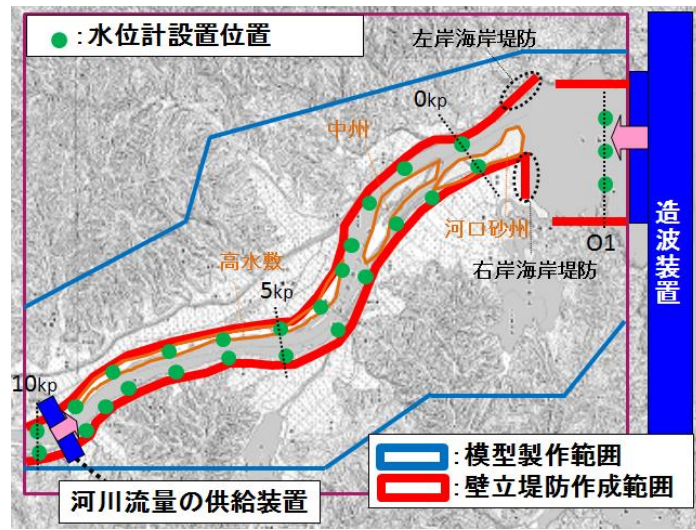


図-4.3.3 CASE I、VI~IX 模型概略図

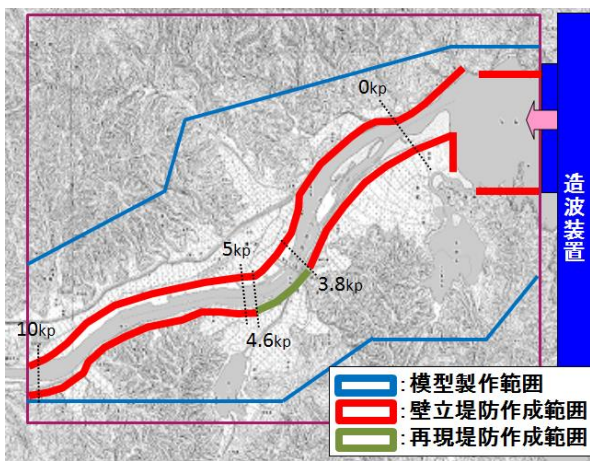


図-4.3.4 CASE II 堤防状況概略図

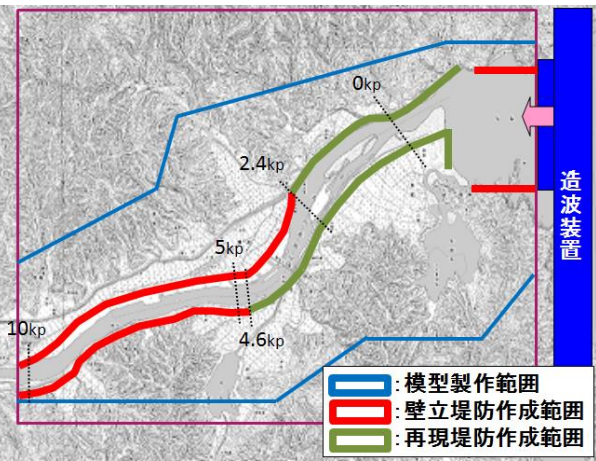


図-4.3.5 CASE III 堤防状況概略図

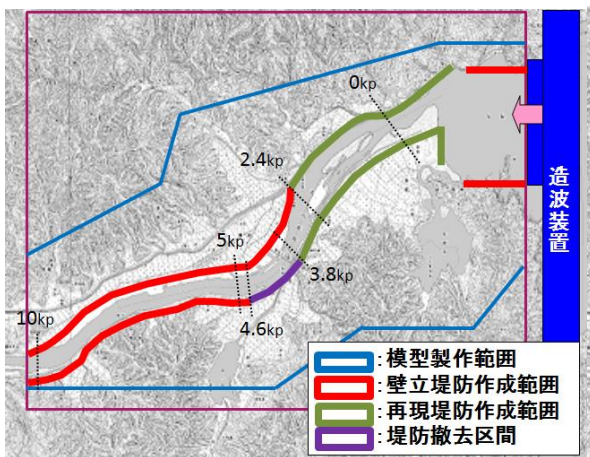


図-4.3.6 CASE IV 堤防状況概略図

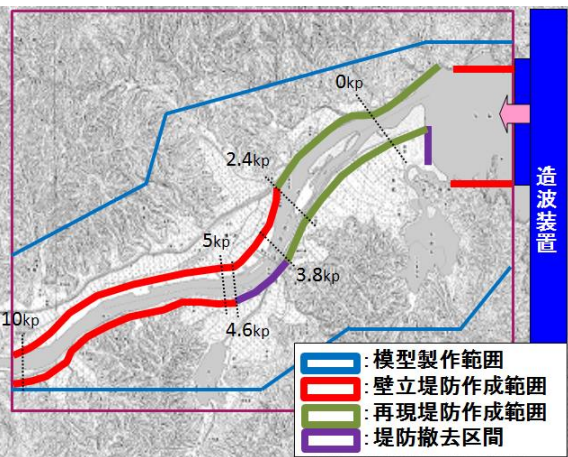


図-4.3.7 CASE V 堤防状況概略図

ここで、CASEⅡ～Ⅴは、ある区間の堤防状況を変化させたとき、その区間より上流側の最高水位へ与える影響を把握することを目的に実施した。東日本大震災時の津波による被害が特に大きかった左岸の海岸堤防～2.4kp、右岸3.8～4.6kp及び右岸海岸堤防に着目し、その区間及びその下流区間における堤防状況を①再現堤防表法肩の位置に壁を設置(以下、壁立堤防と呼ぶ、写真-4.3.2)、②再現堤防、③堤防を撤去した破堤の3条件に変化させた。具体的な堤防の条件は、CASEⅡで右岸の3.8～4.6kpのみ再現堤防を設置し、他は壁立堤防とした。CASEⅢでは再現堤防を右岸の海岸堤防～4.6kp、左岸の海岸堤防～2.4kpへ設置し、他は壁立堤防とした。CASEⅣではCASEⅢの堤防形状より再現堤防を設置していた右岸3.8～4.6kpのみ堤防をあらかじめ破堤させた。CASEⅤではCASEⅣから右岸海岸堤防をあらかじめ破堤させたものとし、あわせて5条件を設定した。



写真-4.3.2 壁立堤防写真

また、CASEⅥ～Ⅸは河道内地形や河川流量が津波遡上に与える影響を把握し、今後の河道計画の参考とすることを目的に実施した。実験では、壁立堤防を設置し、津波が堤内地側へ越流しない条件にて計測した。河道内地形は、津波発生年の直近(平成21年度)に測量された河口砂州・中州・高水敷に着目し、それらの設置の有無を変化させた条件にて実験を実施した。CASEⅠでは河口砂州・中州・高水敷全て設置(以降、全て設置と呼ぶ)、CASEⅥでは河口砂州のみ設置、CASEⅦでは河口砂州・中州・高水敷全て設置なし(以降、全てなしと呼ぶ)の3条件を設定した。なお、各地形の代表断面の横断図を図-4.3.8～図-4.3.10へ示す。あわせて河川流量は、今後の予測計算の参考として河川流量が最高水位へ与える影響を把握することを目的とし、上流(9.4kp)に設置された装置より供給し、供給量は変動可能な構造とし、なし、10年に1度の確率で発生する河川流量 $5,400\text{m}^3/\text{s}$ (以降、河川流量小と呼ぶ)及び150年に1度の計画高水流量 $8,700\text{m}^3/\text{s}$ (以降、河川流量大と呼ぶ)の3水準とした。河川流量供給前の水位は朔望平均満潮位のT.P.+0.703mと設定した。なお、これらの河川流量は実際の出水を想定したものではなく、再現解析にて最高水位を再現可能か検証するために用いる水理実験として有意なデータを得ることを優先して、模型縮尺にとられずに設定した。

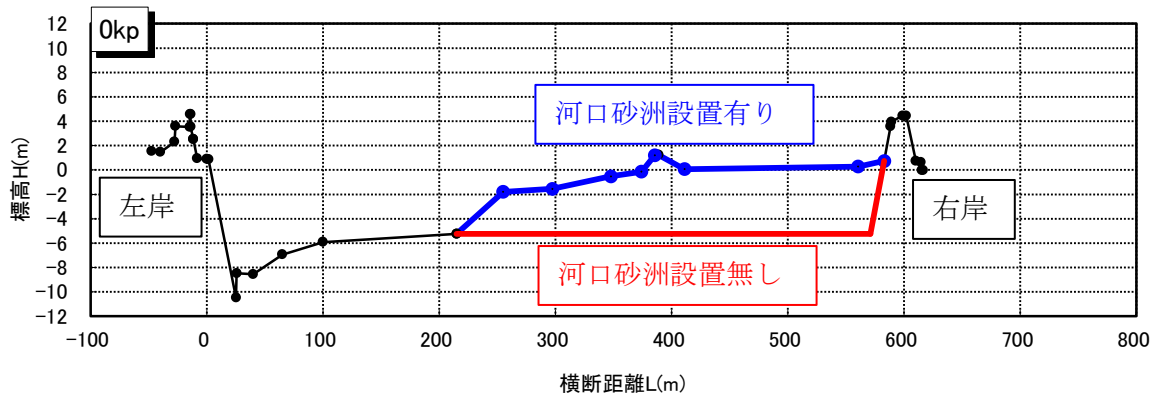


図-4.3.8 河口砂洲設置代表横断図 (0kp)

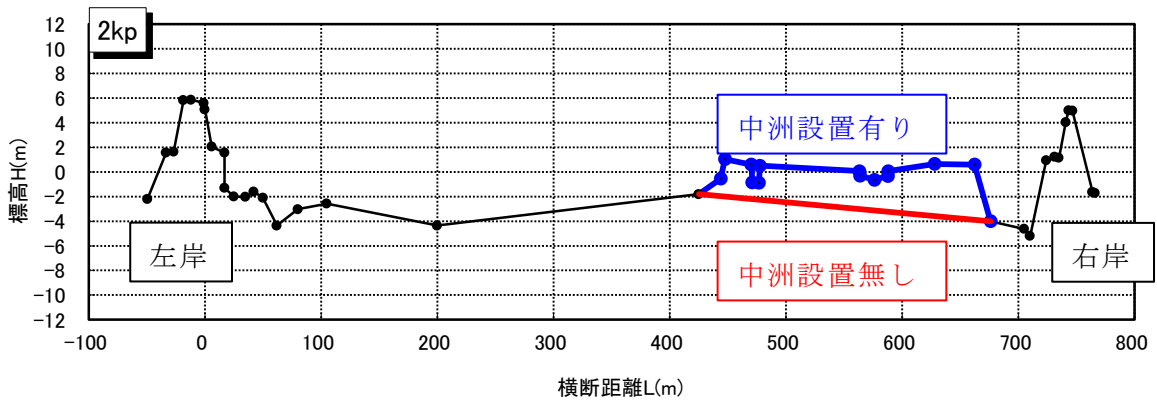


図-4.3.9 中洲設置代表横断図 (2kp)

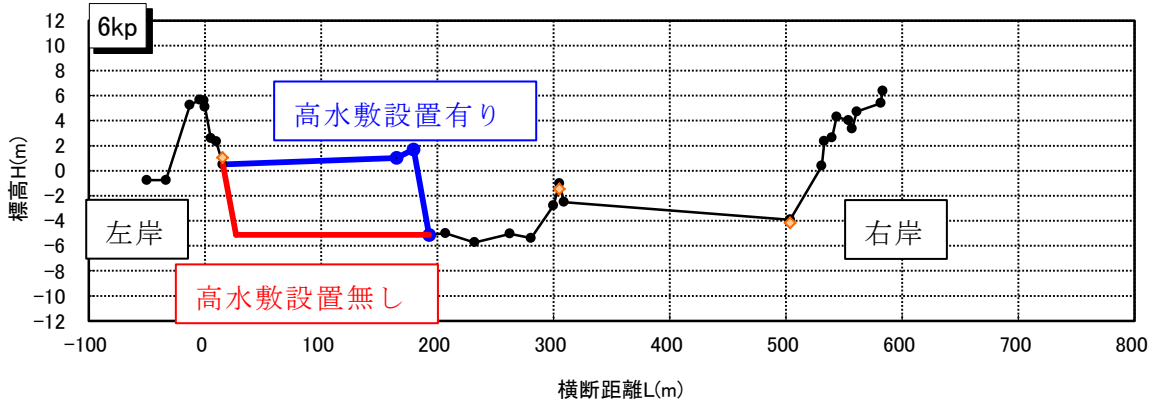


図-4.3.10 高水敷設置代表横断図 (6kp)

## (2) 解析

解析は、河道内地形及び河川流量が最高水位に与える影響を対象として、実験と同様の傾向を再現できるか検証した。

具体的には、河道内地形の影響は、河道内地形を全て設置した CASE I を基本とし、CASE I の河道内地形から中洲・高水敷を撤去し、その傾向を再現できるか検証する CASEVI と、CASEVI の河道内地形から河口砂洲を撤去し、その傾向を再現できるか検証する CASEVII を選定した。また、河川流量の影響は、河川流量を与えなかった CASEVII を基本とし、河川流量

小を与え、その傾向を再現できるか検証する CASEⅧと、河川流量大を与え、その傾向を再現できるか検証する CASEⅨを選定した。

解析では、基礎方程式として非線形長波理論、数値解析法は Leap-frog 法による有限差分法の平面 2 次元モデル、入力波形は実験で湾口部水位計 01 (図-4.3.3) において 3 点の水位計の平均計測値、再現性の比較は実験にて設置した水位計と同位置とした。計算ステップはクーラン数 0.2 を満たすように設定した。なお、堤防越流のモデルは、実験で用いるモデルを固定床にて作成しているため、解析においても越流と同時に地盤高まで破堤とはせず、非線形長波理論により計算することとした。

解析格子は CASE I を対象に解像度の高いデカルト 2m メッシュ、従来手法のデカルト 10m メッシュ、堤防の地形を反映可能な一般曲線座標の 3 つの格子条件による再現解析を実施し、その再現性を比較することで選定した。解析結果及び実験結果を図-4.3.11 に示す。横軸は縦断距離(kp)、縦軸は水位(T.P.m)を表している。実験とデカルト 2m メッシュを比較したとき、デカルト 2m メッシュは 2.6kp 及び 7kp では 1m 程高い値であったが、その他の地点においては差が 0.5m 未満であり概ね良く再現できていた。一方、実験と一般曲線座標を比較したとき、9kp を除き全体的に高い値となり、デカルト 2m メッシュよりも再現性が低い結果となった。デカルト 2m と 10m に大きな差は認められないものの、本研究では堤防の越流も非線形長波理論によって計算するため、堤防の形状が比較的良好に再現されるデカルト 2m を選定した。

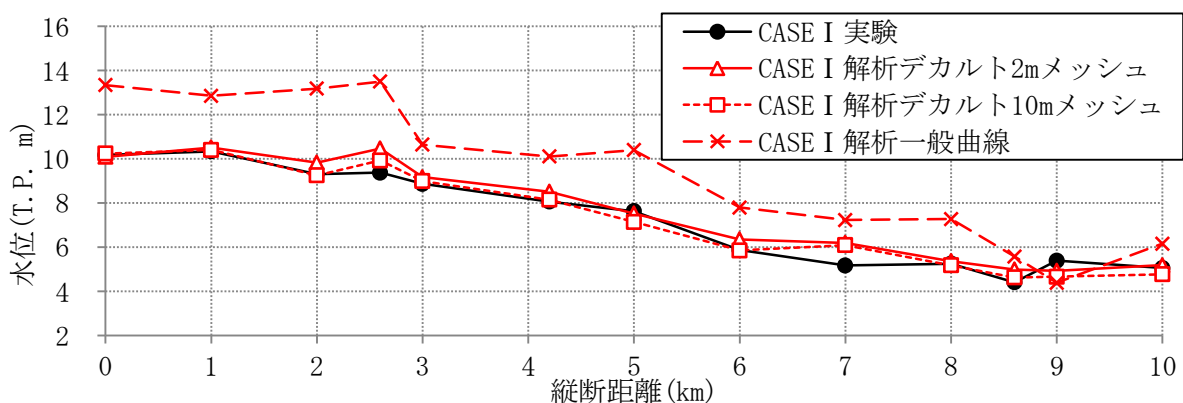


図-4.3.11 CASE I 実験及び再現解析左右岸平均最高水位縦断図 (現地換算値)

### 4.3.3 堤防状況の影響

#### 4.3.3.1 越流区間

##### (1) 実験

越流区間が最高水位に与える影響を比較するため、CASE I ～ III における各地点の左右岸平均最高水位をプロットした縦断図を図-4.3.12 に示す。なお、横軸は縦断距離(kp)、縦軸は水位(T.P.m)を表しており、以降の縦断図においても同様に表す。



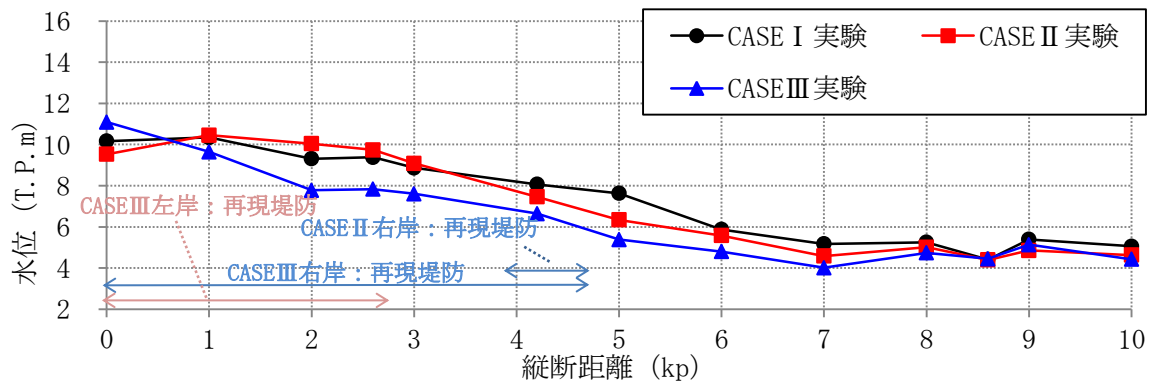


図-4.3.12 CASE I～III 実験左右岸平均最高水位縦断図（現地換算値）

堤防を全て壁立とした CASE I と、右岸の 3.8～4.6kp のみ再現堤防、他は壁立堤防を設置した CASE II を比較したとき、CASE II は再現堤防を設置した区間を含め、その上流の最高水位は低くなる傾向があった。具体的には、4.2kp では 1m 程低い値、5kp では 2m 程低い値となるが、その地点以降においては概ね 0.5m 以内の差に止まった。

次に、CASE I と、右岸の海岸堤防～4.6kp 及び左岸の海岸堤防～2.4kp まで再現堤防、他は壁立堤防を設置した CASE III を比較したとき、全体的に低い傾向がみられた。具体には 1kp 地点以降はその後全ての地点において低い値となり、1kp では 1m 程、2～2.6kp では 2m 程、3kp では 1.5m 程、4.2～7kp では 1m 程、その地点以降は 0.5m 以下の差に止まった。なお、0kp で CASE III が 2m 程高い値となったのは、堤内地を遡上した津波が河道側へ越流した影響によるものと考えられる。

## (2) 考察

以上の結果より、再現堤防を設置した区間から上流は、最高水位が低くなる傾向であり、堤内地へ津波が浸水することにより最高水位が変化することが確認された。堤防の越水条件により、最高水位が変化することが示唆された。

### 4.3.3.2 破堤区間

#### (1) 実験

破堤区間が最高水位に与える影響を比較するため、CASE III～V における各地点の左右岸平均最高水位をプロットした縦断図を図-4.3.13 に示す。

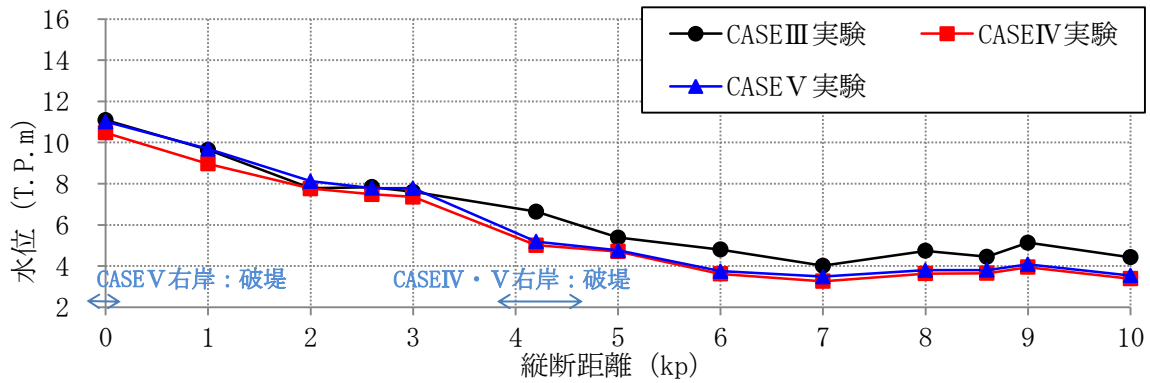


図-4.3.13 CASE III～V 実験左右岸平均最高水位縦断図（現地換算値）

右岸の海岸堤防～4.6kp 及び左岸の海岸堤防～2.4kp まで再現堤防、他は壁立堤防を設置した CASE III と、CASE III の堤防状況から右岸 3.8～4.6kp のみ堤防をあらかじめ破堤させた CASE IV を比較したとき、CASE IV は破堤した区間を含め、その上流の最高水位は低くなる傾向があった。具体には、4.2kp では 2m 程低い値、その地点以降では 1m 程低い値となった。

次に、CASE III と、CASE III の堤防状況から右岸海岸堤防及び右岸 3.8～4.6kp の堤防をあらかじめ破堤させた CASE V を比較したとき、CASE V は破堤させた右岸 3.8～4.6kp の区間を含め、その上流の最高水位は低くなる傾向があった。具体には、4.2kp では 2m 程低い値、その地点以降では 1m 程低い値となり、CASE IV と比較した際と同様の傾向となった。

また、CASE IV と CASE V を比較したとき、全体的に同程度の値となった。しかし、CASE V が 0～1kp のみにおいては 1m 程高い値となった。この原因を考察するため、CASE IV 及び CASE V においては図-4.3.14 に示す 0kp 右岸河道内と堤内地に設置した水位計より計測された時系列水位の比較を実施した。その時系列水位を図-4.3.15 及び図-4.3.16 に示す。CASE IV の 0kp 右岸においては河道内水位が堤内地水位より早く再現堤防高より高い値になることに対し、CASE V の 0kp 右岸においては堤内地水位が河道内水位より早く再現堤防高より高い値となった。

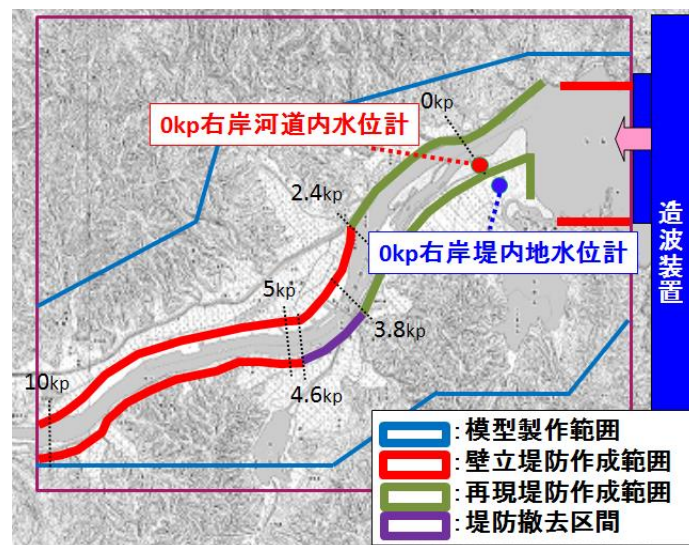


図-4.3.14 CASE IV 0kp 右岸時系列水位（現地換算値）

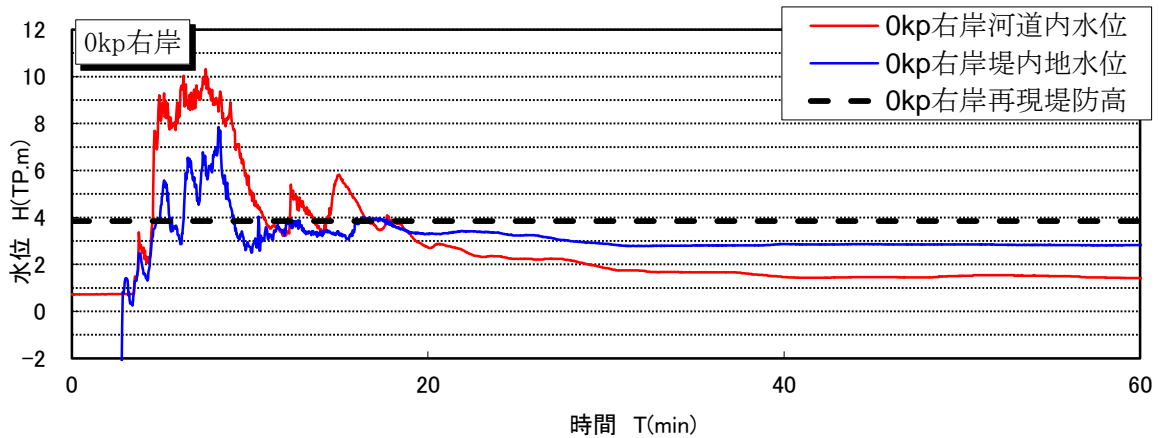


図-4.3.15 CASEIV 0kp 右岸時系列水位（現地換算値）

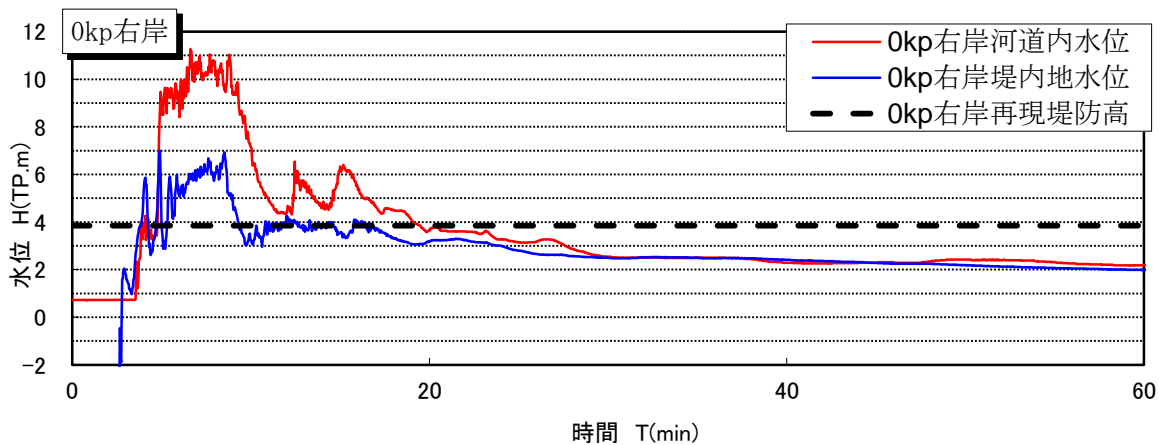


図-4.3.16 CASEV 0kp 右岸時系列水位（現地換算値）

## (2) 考察

以上の結果より、破堤条件の区間から上流は、再現堤防の場合と比較して最高水位が低くなる傾向であり、堤内地へ津波の浸水量が増加することによりその区間も含めた最高水位が変化することが確認された。一方、海岸堤防の破堤による河口付近の河道内と堤内地の時系列水位比較より、海岸堤防の破堤によって津波が堤内地へ流入し易くなり、堤内地から河道内への津波の越流が起こった影響で、河道内の最高水位が破堤しない場合よりも破堤した場合の方が高くなることもあると考えられ、破堤した場合の最高水位が必ず低くなるのではなく、堤内地から河道への越流が発生することにより、破堤により最高水位が高くなることも示唆された。

### 4.3.4 河道内地形による影響

#### (1) 実験

河道内地形が最高水位に与える影響を比較するため、CASE I、VI、VIIにおける各地点の左右岸平均最高水位をプロットした縦断図を図-4.3.17に示す。

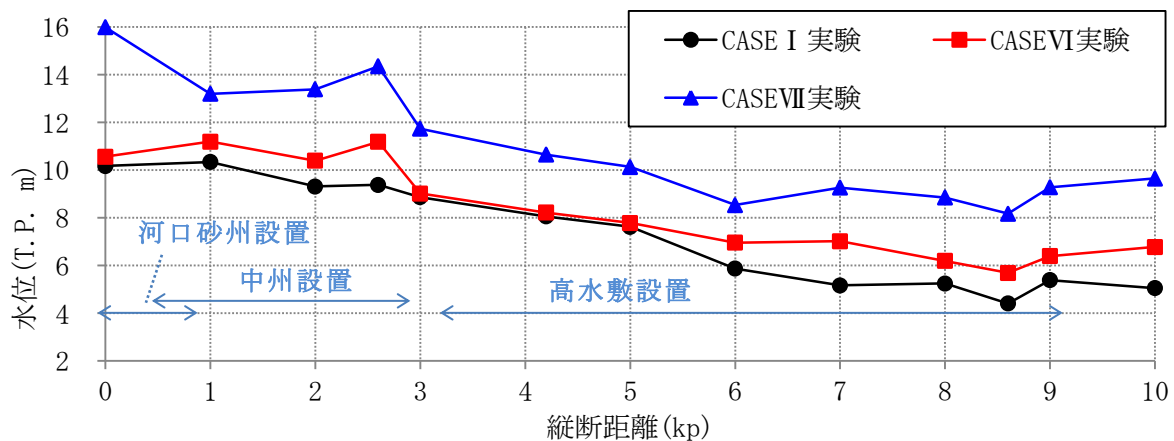


図-4.3.17 CASE I、VI、VII 実験左右岸平均最高水位縦断図（現地換算値）

河道内地形を全て（河口砂洲・中州・高水敷）設置した CASE I と、河口砂洲のみを設置した CASE VI を比較したとき、CASE VI は全体的に高い傾向であった。具体的には、中州を設置してある区間 1～2.6kp にて 1～2m 程高い値、高水敷が設置してある区間 4.2～9kp にて 4.2kp と 5kp を除き 1～2m 程高い値となった。

次に、CASE I と、河道内地形を全て撤去した CASE VII を比較したとき、CASE VII は全体的に高い傾向であった。具体的には河口砂洲を設置してある区間 0kp にて 6m 程高い値、中州を設置してある区間 1～2.6kp にて 2～5m 程高い値、高水敷が設置してある区間 4.2～9kp にて 2～4m 程高い値となった。

また、CASE VI と CASE VII を比較したとき、CASE VII は全体的に最高水位が高い傾向であった。具体的には河口砂洲を設置してある 0kp において 6m 程高い値となり、その地点以降においても 2～3m 程高い値となった。

## (2) 解析

次に河道内地形による最高水位への影響について実験と同様の傾向が再現できるか解析を行った。CASE VI の再現解析結果を図-4.3.18 に示す。

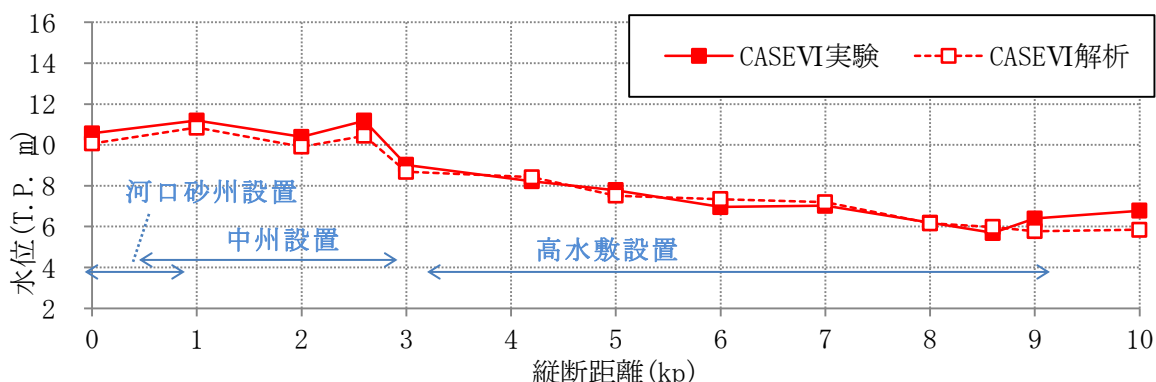


図-4.3.18 CASE VI 実験及び再現解析左右岸平均最高水位縦断図（現地換算値）

CASE VI の再現解析と実験を比較したとき、再現解析は 10kp において 1m 程低い値となったが、その他全ての地点において差が 0.5m 以下となり、よく傾向を再現できていると言

える。

次に、CASEVIIの再現解析結果を図-4.3.19に示す。

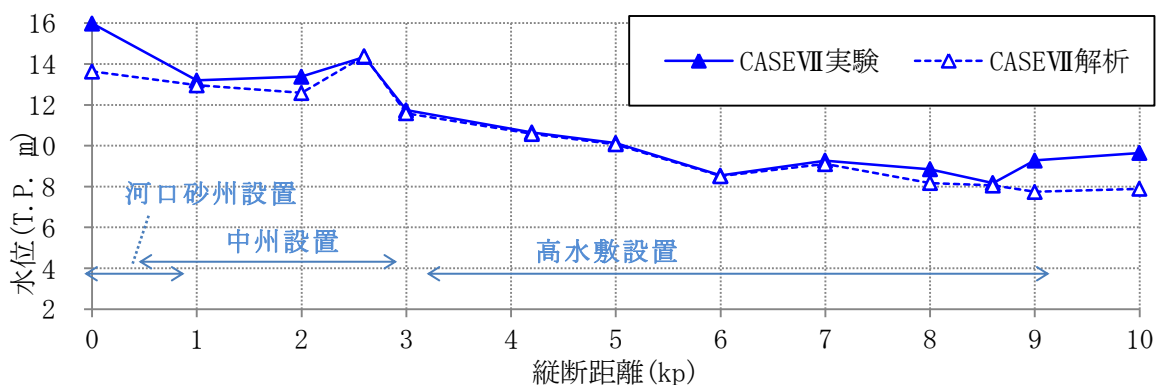


図-4.3.19 CASEVII 実験及び再現解析左右岸平均最高水位縦断図（現地換算値）

CASEVIIの再現解析と実験を比較したとき、再現解析は0kp及び9～10kpにおいて2m程低い値、その他全ての地点において差が0.5m以下であり、全体としては比較的良好な傾向を再現していると言える。一方、CASEVIよりも特に0kp及び9kpにおいて再現精度が低くなった。この原因については今後の課題となった。

### (3) 考察

以上の結果より、河道内地形の設置状況を変化させた実験においては特に河口砂州等の河口付近河道内地形が最高水位津波遡上高を減勢させる効果があることが確認された。また、再現解析においては現状の解析手法でこの河道内地形の有無による変化の傾向を再現可能であった。なお、河口砂洲については「津波浸水想定の設定の手引き」にて河口砂洲は津波の挙動を大きく左右する要因の一つのため、フラッシュされ易い場合には河口砂洲を除去した地形データにて計算を実施する旨が記述されており、今回の結果はこの懸念を裏付けるものと言える。

## 4.3.5 河川流量による影響

### (1) 実験

河川流量が最高水位に与える影響を比較するため、CASEVII～IXにおける各地点の左右岸平均最高水位をプロットした縦断図を図-4.3.20に示す。なお、河川流量の供給を9.4kpにて行っているため、9kpまでの水位を分析対象とする。

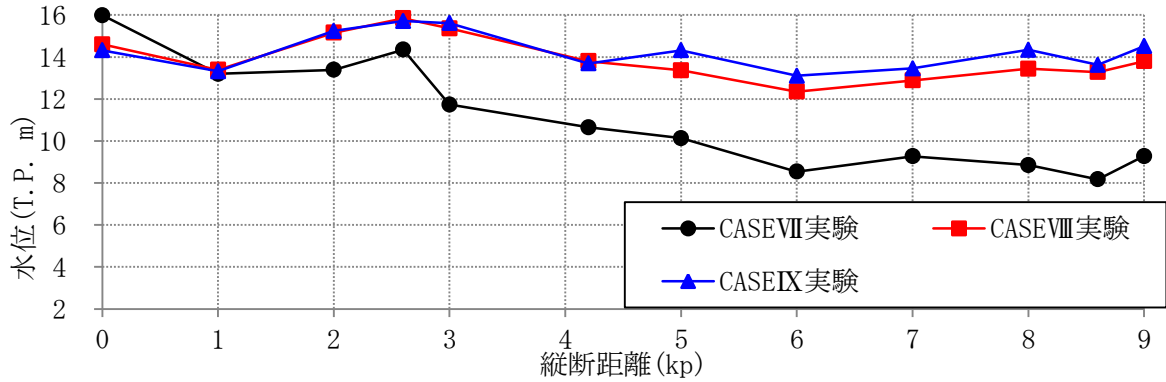


図-4.3.20 CASEVII～IX 実験左右岸平均最高水位縦断図（現地換算値）

河川流量なしの CASEVII と、河川流量小を供給した CASEVIII を比較したとき、CASEVIII は全体的に高くなる傾向であった。具体的には 2kp 以降において 2～5m 程高い値となる。

次に、CASEVII と、河川流量大を供給した CASEIX を比較したとき、CASEIX も同様に全体的に高くなる傾向であった。具体的には 2kp 以降において 2～6m 程高い値となる。

また、CASEVIII と CASEIX を比較したとき、全体的に同程度の値となったが、CASEIX の方が 4kp より上流が 1m 程度高くなる傾向がみられた。

なお、CASEVII～IX は河川流量供給前の水位を朔望平均満潮位に設定しているが、供給後の初期水位が異なるため、その傾向を図-4.3.21 に示す。CASEVII と CASEVIII を比較したとき、CASEVIII は上流へ進むにつれて高い値となる傾向であり、9kp では 3～4m 程の差が生じた。次に、CASEVII と CASEIX を比較したも同様に、CASEIX は上流へ進むにつれて高い値となる傾向であり、9kp では 3～4m 程の差が生じた。一方、CASEVIII と CASEIX を比較したとき、CASEIX は河川流量が 6 割程度大きいですが、CASEVIII との差は 4kp より上流でわずか 0.3m 程度みられたのみであった。

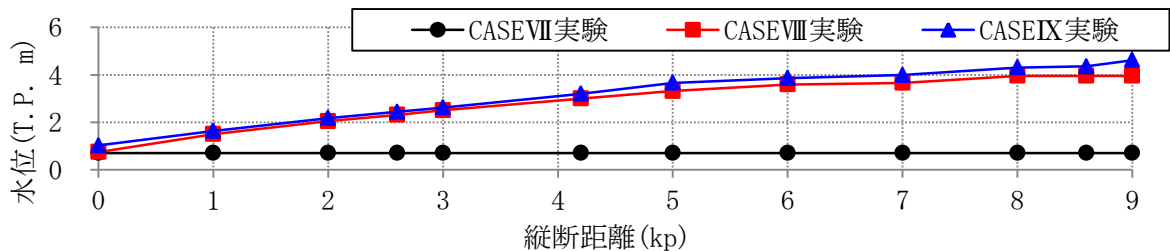


図-4.3.21 CASEVII～IX 河川流量供給後初期水位縦断図（現地換算値）

## (2) 解析

次に河川流量による最高水位への影響について実験と同様の傾向が再現できるか解析を行った。CASEVIII の再現解析結果を図-4.3.22 に示す。

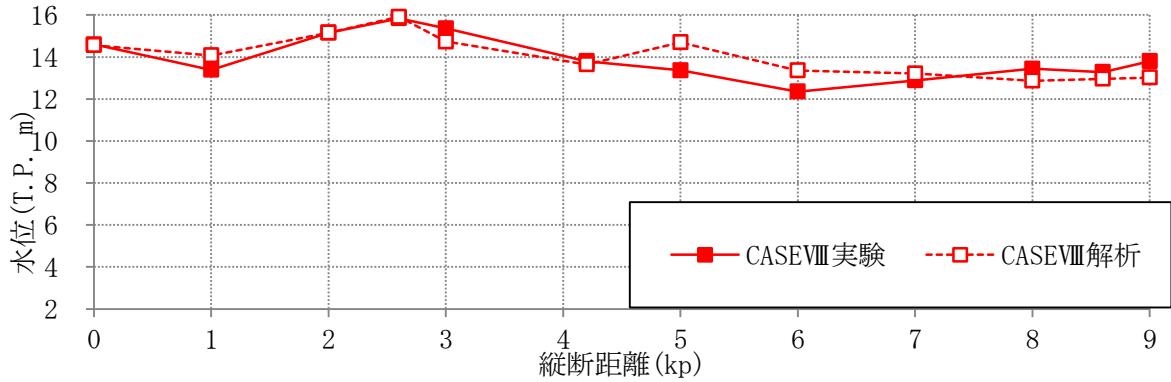


図-4.3.22 CASE VIII 実験・再現解析左右岸平均最高水位縦断図（現地換算値）

CASE VIIIの再現解析と実験を比較したとき、再現解析は5kp及び6kpにおいて1～2m程高い値であるが、他のほとんどの地点において差が0.5m以下となり、よく傾向を再現できていると言える。

次に、CASE IXの再現解析結果を図-4.3.23に示す。

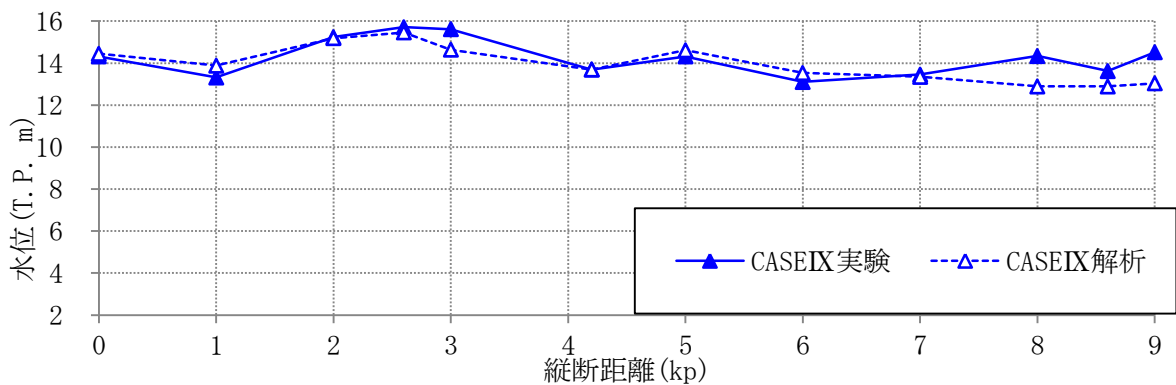


図-4.3.23 CASE IX 実験・再現解析左右岸平均最高水位縦断図（現地換算値）

CASE IXの再現解析と実験を比較したとき、再現解析は3kp及び8～9kpにおいて1～2m程高い値であるが、他のほとんどの地点において差が0.5m以下となり、よく傾向を再現できていると言える。一方、CASE VIIIよりも5kp及び6kpにおいて再現精度が高くなったが、3kp及び8～9kpにおいて再現精度が低くなった。これらの原因は今後の課題となった。

### (3) 考察

以上の結果より、河川流量を変化させた実験においては、河川流量を与えることにより最高水位が高くなる効果があることが確認された。また、再現解析の面において現状の解析手法でこの河川流量の変化の傾向を再現可能であった。融雪出水など、津波と比較的に同時発生しやすい河川流量増加事象は、最高水位を大きくする効果もあると考えられることから、予測解析を実施する上での留意すべき事項と考えられる。

#### 4.3.6 結論

河川津波を考慮した河川改修・河道管理の検討に資する情報を得ることを目的として、東日本大震災において河川津波遡上の生じた北上川のモデルを作成し、堤防状況（破堤の有無、堤高など）、河道内地形（砂州の有無、高水敷・中州の掘削）及び河川流量が津波の最高水位（以下、最高水位と呼ぶ）へ与える影響を実験及び再現解析によって把握した。

堤防状況を変化させた実験においては堤防形状が最高水位へ影響を与えることが分かった。

河道内地形の設置状況を変化させた実験においては特に河口砂州等の河口付近河道内地形が最高水位津波遡上高を減勢させる効果があることが確認された。また、再現解析においては現状の解析手法でこの河道内地形の有無による変化の傾向を再現可能であった。なお、河口砂洲については「津波浸水想定の設定の手引き」にて河口砂洲は津波の挙動を大きく左右する要因の一つのため、フラッシュされ易い場合には河口砂洲を除去した地形データにて計算を実施する旨が記述されており、今回の結果はこの懸念を裏付けるものと言える。

河川流量を変化させた実験においては、河川流量を与えることにより最高水位が高くなる効果があることが確認された。また、再現解析の面において現状の解析手法でこの河川流量の変化の傾向を再現可能であった。融雪出水など、津波と比較的に同時発生しやすい河川流量増加事象は、最高水位を大きくする効果もあると考えられることから、予測解析を実施する上での留意すべき事項と考えられる。



#### 4.4 4章のまとめ

4章のまとめについて、以下のとおり示す。

##### (1) 海岸堤防の被災分析

- ・越流水深が大きいほど被災延長率が大きくなる傾向を確認した一方で、同じ越流水深に対しても被災延長率が大きくばらついた。
- ・海岸堤防の構造要素の中で、裏法尻被覆幅が最も全壊確率に影響することが分かった。

##### (2) 越流に対する構造上の工夫

- ・模型実験により、越流に対して粘り強い海岸堤防の構造上の工夫について検討した結果、「高流速流による裏法尻の洗掘や裏法被覆工の流失への対応」、「裏法被覆工の不陸の防止」、「揚圧力、浸透水、負圧、パイピングへの対応」といった留意点が抽出された。
- ・上記留意点を踏まえ、裏法被覆工の不陸防止のための切り欠きブロックや、越流水の流向や裏法尻の流失防止を考慮した裏法尻基礎工（+地盤改良）の工夫、負圧に対応した裏法被覆工と天端保護工の一体化等の工夫を考案した。
- ・上記の越流に対する構造上の工夫について、仙台湾南部海岸復旧工事に反映するとともに、模型実験を通じて越流に対する全壊可能性が低減していることを確認した。
- ・既設堤防の更新時において粘り強い構造の工夫を行う際、用地の関係で上記のような裏法尻基礎工や地盤改良の工夫ができない場合、裏法尻基礎工と一体化した矢板工による手法を考案し、模型実験により効果を確認した。
- ・堤体表面からの浸透や吸い出しを抑制し被覆工の安定化を図る方法として、被覆工の施工時に捨てコンクリートを敷設することや、差し筋により被覆工の移動を抑制することの効果を模型実験により確認した。

##### (3) 河川への津波遡上対策

- ・河川津波を考慮した河川改修・河道管理の検討に資する情報を得ることを目的として、東日本大震災において河川津波遡上の生じた北上川の模型を作成し、堤防状況（破堤の有無、堤高など）、河道内地形（砂州の有無、高水敷・中州の掘削）及び河川流量が津波の最高水位（以下、最高水位と呼ぶ）へ与える影響を実験及び再現解析によって把握した。
- ・堤防状況を変化させた実験においては堤防形状が最高水位へ影響を与えることが分かった。
- ・河道内地形の設置状況を変化させた実験においては特に河口砂州等の河口付近河道内地形が最高水位津波遡上高を減勢させる効果があることが確認された。また、再現解析においては現状の解析手法でこの河道内地形の有無による変化の傾向を再現可能であった。なお、河口砂洲については「津波浸水想定の設定の手引き」にて河口砂洲は津波の挙動を大きく左右する要因の一つのため、フラッシュされ易い場合には河口砂洲を除去した地形データにて計算を実施する旨が記述されており、今回の結果はこの懸念を裏付けるものと言える。
- ・河川流量を変化させた実験においては、河川流量を与えることにより最高水位が高くなる効果があることが確認された。また、再現解析の面において現状の解析手法でこの河川流量の変化の傾向を再現可能であった。融雪出水など、津波と比較的に同時発生しや

すい河川流量増加事象は、最高水位を大きくする効果もあると考えられることから、予測解析を実施する上での留意すべき事項と考えられる。

## 5. 陸地における氾濫流制御等による減災方策


### 5.1 津波ハザードの評価手法

陸地における氾濫流制御による減災とはL1を超える津波に対して、海岸堤防及びその内側の施設等で津波を減勢し、被害の軽減を図ることである。このような減災方策を進めるためには、

- 1) 陸地全体の津波の津波ハザードを評価（5.1 津波ハザードの評価手法）
- 2) 人工物（粘り強い堤防・二線堤等）による氾濫流制御の効果の把握（5.2 氾濫流制御による被害軽減の試算）
- 3) 現存する自然・地物（自然・地域インフラ）の減災効果の把握（5.3 自然・地域インフラの活用可能性）

が必要となる。

津波ハザードとは、浸水深や浸水面積といった津波の被害をもたらす外力の程度等のことである。海岸研究室は、津波ハザードを評価するために、設計津波水位だけでなく、レベル2の津波浸水想定の設定法についても前述の2.1、2.2の調査結果を参考に本省と協力して整理を行い、平成24年2月に「津波浸水想定の設定の手引き<sup>28</sup>」として公表した。手引きの中では、津波ハザードとして「浸水面積」、「最大浸水深」、「基準水位」、「地震発生から津波が沿岸に到達するまでの時間」を評価している。

基準水位は、建物による津波のせき上げを考慮した高さを考慮するために、津波防災地域づくりに係る技術検討会<sup>29</sup>において検討された指標である。シミュレーションによって計算される水位とフルード数から、-5.1.1であらわされる式で計算される。

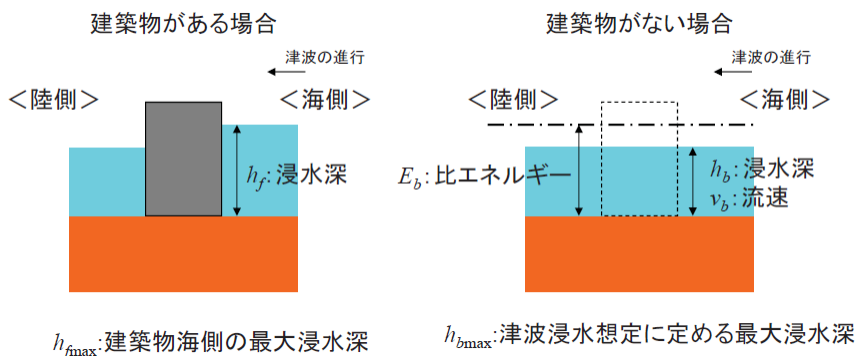
なお、本手引きの主な記載内容は以下の通りである。

- (1) 津波浸水想定の設定は、最大クラスの津波の設定、計算条件の設定、津波浸水シミュレーション、浸水の区域及び水深の出力、の手順で実施する。
- (2) 最大クラスの津波は、設計津波水位と同様に地域海岸ごとに、過去に発生した津波の実績津波高及びシミュレーションにより想定した津波高、発生が想定される津波の津波高などから津波高が最も大きい津波を設定する。
- (3) 津波の初期水位を与える断層モデルは、中央防災会議や地震調査研究推進本部等の公的な機関が妥当性を検証したものとして発表している断層モデルがあればこれも参考に設定することができる。
- (4) 津波浸水想定を設定するための津波浸水シミュレーションを実施する際には、「災害には上限がない」ことを教訓に、「なんとしても人命を守る」という観点から、最大クラスの津波が悪条件下において発生し浸水が生じることを前提に、地震や津波による各種施設の被災を考慮することを基本とする。具体的には、2.2の調査結果を踏まえ、地震

による陸域・海域の沈降を計算上考慮し、隆起については悪条件として海域のみを考慮することとした。また、堤防については地震・津波による被災を考慮することとした。

(5)2.1の調査結果を踏まえ、陸域への津波遡上による浸水状況がわかるように、津波浸水シミュレーションを実施することとする。また、津波浸水想定に定めるべき最大の浸水の区域や水深などを出力するものとする。また津波ハザードとして、図-5.2.1で計算される基準水位を設定し、建物による水位の上昇（せき上げ）の影響を評価する。

なお、津波防災地域づくり法に基づくレベル2津波による津波浸水想定について、平成27年4月時点において22府県で公表されている（図-5.1.2）。平成26年8月には国土交通省・内閣府・文部科学省により「日本海における大規模地震に関する検討会報告」が公表されたことから、今後、日本海側についても津波浸水想定の設定が進む予定である。



$$h_{f\max} = \max[E_b] = \max\left[h_b + \frac{v_b^2}{2g}\right] = \max\left[h_b\left(1 + \frac{Fr^2}{2}\right)\right]$$

ここで、

$h_{f\max}$  : 基準水位

$E_b$  : 比エネルギー

$h_b, v_b$  : 津波浸水シミュレーションによる任意地点の浸水深、流速

(p14の支配方程式に記述している記号との関係:  $h_b = h + \eta = D$ )

(p14の支配方程式に記述している記号との関係:  $v_b = \sqrt{u^2 + v^2}$ )

$Fr$  : 津波浸水シミュレーションによる任意地点のフルード数

図-5.1.1 基準水位の算出方法

## 津波浸水想定の設定、津波災害区域の指定及び推進計画の作成状況

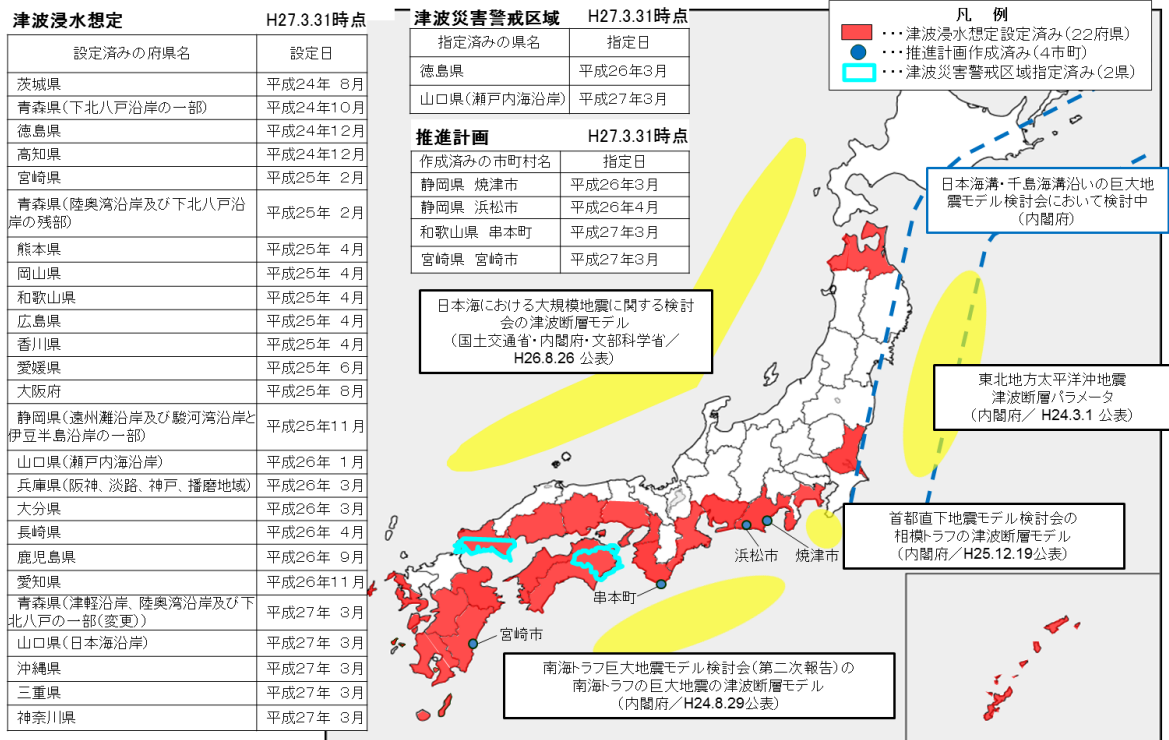


図-5.1.2 津波浸水想定（レベル2津波）の設定状況

## 5.2 氾濫流制御による被害軽減の試算

### 5.2.1 粘り強い海岸堤防構造による陸地における減災効果の試算

2章において、海岸堤防が残ることで被害の軽減されることが分かった。このことから氾濫流制御において海岸堤防が大きな役割を果たしていると考えられる。しかし海岸堤防の被災状況を考慮した減災効果の評価はいままでされてこなかった。

4章において検討した海岸堤防における粘り強い堤防構造の工夫は、模型実験等によって検討したものであるが、例えば縮尺 1/25 の移動床実験であれば、実験に用いた砂は粒径 0.3mm であり、実寸では 7.5mm と小礫並のものとなる。また、それ以上小さな粒径を使用すると表面張力が働いたため、実現象を忠実に縮小して再現するには限界がある。

また、縮尺 1/2 の移動床実験については縮尺 1/25 に比べ相似則的には実現象に近い条件ではあるものの、幅 1m(実寸 2m)の水路に越流水深 1m(実寸 2m)までの断面二次元的な実験となっており、実寸 2m 以上の越流水深の場合の効果や越流水の局所集中といった三次元的な越流水の挙動などは再現できない。したがって、4章で示した粘り強い堤防構造の工夫については、全壊可能性を低減する定性的な効果は認められるものの、壊れないことを保証したものではない。

しかしながら、構造上の工夫として費用をかけて施設に反映する以上、可能な限り効果を評価することは求められるところである。このため、海岸研究室では、仙台南部海岸をモデル海岸として最大クラスの津波が襲来した場合の粘り強い堤防構造による陸地における減災効果を試算した。計算条件などの詳細は、渡辺ら<sup>30</sup>を参照されたい。なお本検討では、津波ハザードとして、全浸水面積、最大浸水深 2 m、1 m 以上の浸水面積を評価した。

図-5.2.1 は、越流開始から破堤時間遅れを複数あたえることにより、減災効果を試算したものである。試算結果では、越流後、破堤時間遅れが長くなるほど、浸水面積、最大浸水深 2 m、1 m 以上となる浸水面積は低減した。3分破堤が遅れた場合では、越流直後に破堤する場合と比べて、全浸水面積、最大浸水深 2 m、1 m 以上の浸水面積はそれぞれ、4%、6%、9%低減した。なお、この一連の検討内容については、仙台南部海岸における事業再評価において、粘り強い堤防構造の減災効果の試算に活用された(図-5.2.2)。

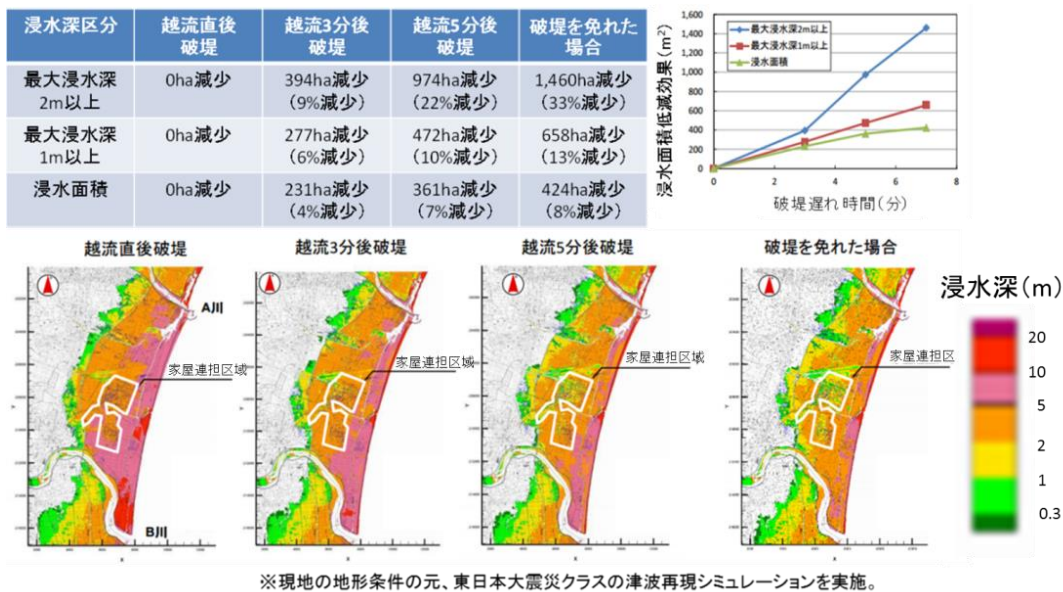


図-5.2.1 破堤時間遅れの違いによる陸上における減災効果

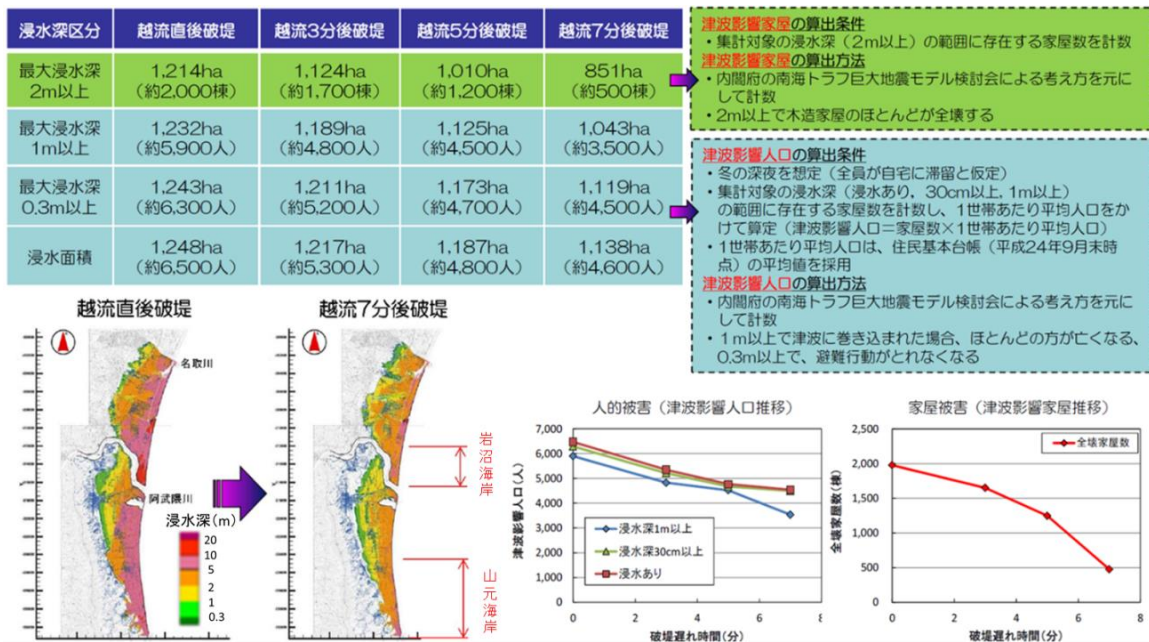
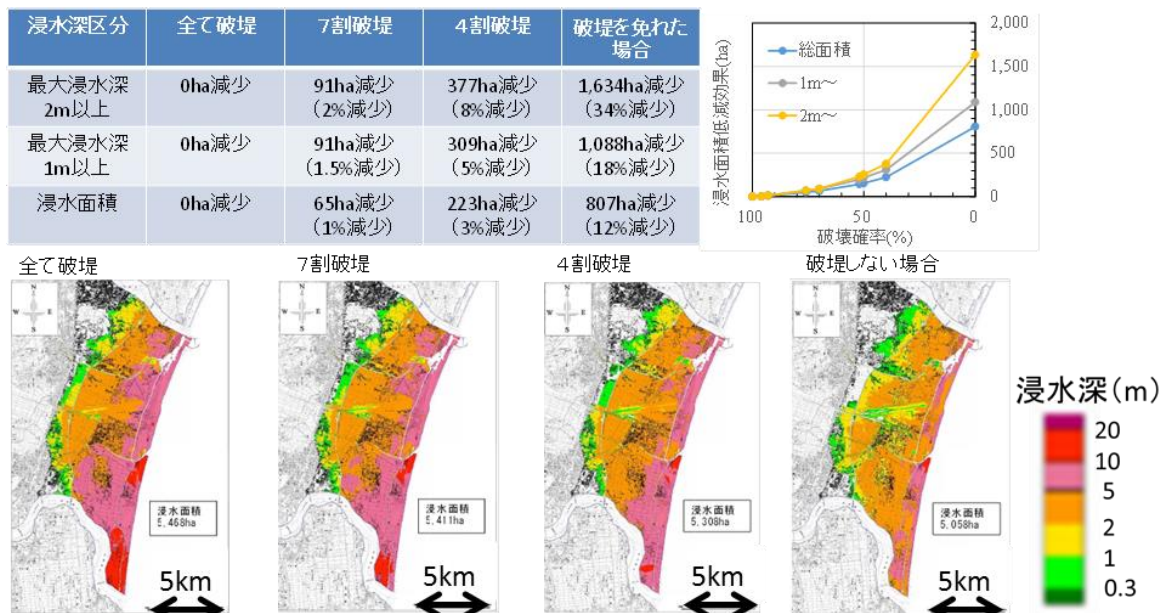


図-5.2.2 仙台湾南部海岸事業再評価における粘り強い堤防構造の減災効果試算

図-5.2.3は、破堤時間遅れではなく、破堤延長の違いによる試算を行ったものである。この試算にあたっては、全体的な破堤延長は複数ケースで設定しているが、破堤箇所についてはランダムに設定している。これは、上記で記載したとおり、粘り強い堤防構造の工夫が破堤しないことを保証しているものでないことや、4章の堤防被災分析にあるとおり、同じ越流水深でも堤防被災率にばらつきがあることを踏まえたものである。

試算の結果を見ると、破堤延長が短くなるほど、浸水深や浸水面積は小さくなるのが分かる。実際は図-5.2.1のように破堤時間遅れの効果と相まって減災効果が発揮されることから、粘り強い堤防構造の工夫が促進されることにより、陸上における減災効果が期待される。



※現地地形条件の元、東日本大震災クラスの津波再現シミュレーションを実施。破堤箇所はランダムに設定

図-5.2.3 破堤延長の違いによる陸上における減災効果

## 5.2.2 二線堤による陸上における減災効果の試算

図-5.2.4は、岩手県田老海岸における浸水深の観測結果である。堤防が二線堤状に配置された西側と、一線堤状に配置された東側とでは、背後地の状況が大きく異なっており、東側では浸水深が14.9m～16.9mであったのに対し、二線堤のある西側では浸水深が7.1m～8.7であり、二線堤のある西側の方が浸水痕跡は低かった。また、東側は家屋が流失し確認できないのに対し、二線堤のある西側の家屋は移動しているものの留まっている状態であった。

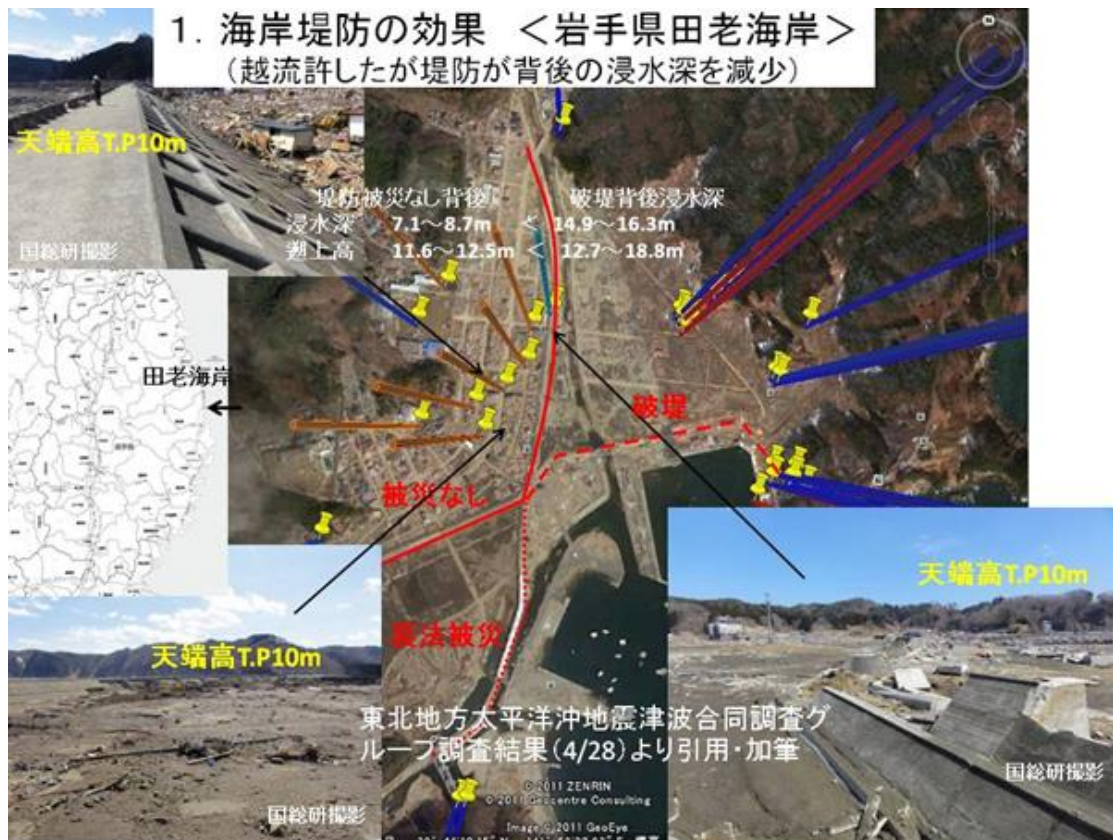


図-5.2.4 岩手県田老海岸の二線堤背後地の状況  
[画像データ(中央):Google, GeoEye, ZENRIN, Geocentre Consulting]

このような二線堤による減災効果を確認するために、復興計画に示されている道路盛土等による二線堤等による陸上における減災効果を試算した。計算の条件は、5.2.1と同様に渡邊<sup>30</sup>を参照されたい。二線堤等は、嵩上げ後の閑上地区の地盤の高さをT.P.+5m、貞山堀の土堤の高さをT.P.+3.7m、県道相野釜蒲崎線の高さをT.P.+5mとした。これらの設定は計算実施時点で得られた復興計画をもとにしており、不明点については周辺状況を考慮して設定しているため、必ずしも実際に進められているものとは一致しない。

図-5.2.5、5.2.6のとおり、海岸堤防の破堤時間遅れの計算に、二線堤効果も考慮したケースを加えて比較したところ、家屋被害の指標として大部分の木造家屋が全壊する浸水深2m以上の面積に着目すると、どの規模の津波に対しても破堤遅延時間が長くなるに従い、面積が減少する傾向が見られた。越流水深6.9mの規模の津波に対しては破堤が5分遅れた



場合は 3,727ha となり、越流直後に破堤する場合の 4,503ha と比べて面積が 17.2%減少した。

効果は津波の規模が小さいほど顕著であり、越流水深 2.0m の場合には破堤が 3分遅れるだけでも最大浸水深が 2m 以上となる面積が 2,402ha から 1,278ha へと 46.8%減少した。背後地の二線堤を考慮した計算では、越流水深 6.9m の津波に対して破堤遅延が無い場合には、二線堤が加わることで低減される浸水範囲の面積は 134ha であった。これに対して破堤遅延が 4.5 分間の場合には、二線堤が加わることで浸水範囲の面積が 1279ha 減少した。

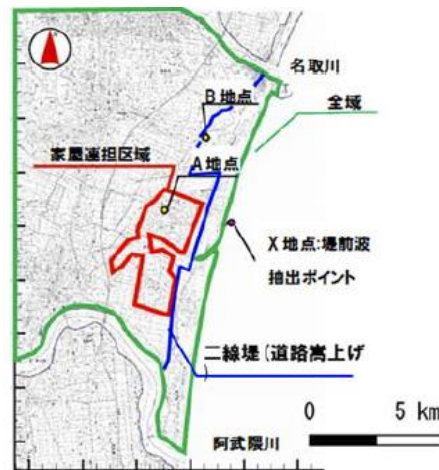


図-5.2.5 津波浸水計算の対象範囲

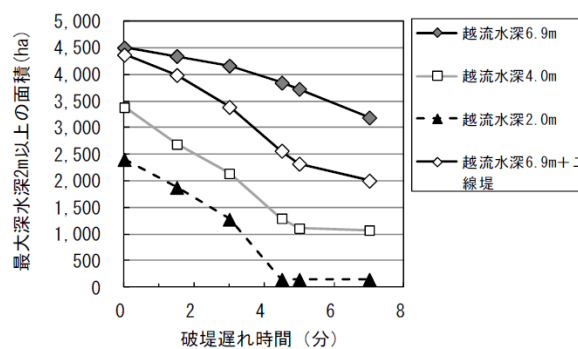


図-5.2.6 破堤遅れ時間と最大浸水深 2m 以上の面積の関係

### 5.2.3 二線堤による陸上における減災効果の考察

なお、破堤遅延時間についての感度分析を行った(図-5.2.7, 5.2.8)ところ、海岸線から約 2km 内陸に位置する A 地点(図-5.2.5)への越流水深 4.0m の津波の到達時間は、破堤が 4.5 分遅れることで、破堤が遅延しない場合に比べて 32.25 分と大幅に遅れる結果となった。一方で、越流水深 6.9m の津波については、破堤が 4.5 分遅れた場合の津波到達の遅延は 4.5 分に留まり、破堤遅延時間とほとんど変わらず、その他の遅延時間についても同様であった(図-5.2.7(a))。また、海岸からの距離が同程度である B 地点(図-5.2.5)では、破堤の遅延による津波到達の遅延は A 地点に比べて少なく、特に越流水深 6.9m の津波に対

しては破堤遅延時間が長くなっても津波到達時間はほとんど変わらない結果となった（図-5.2.8 (b)）。

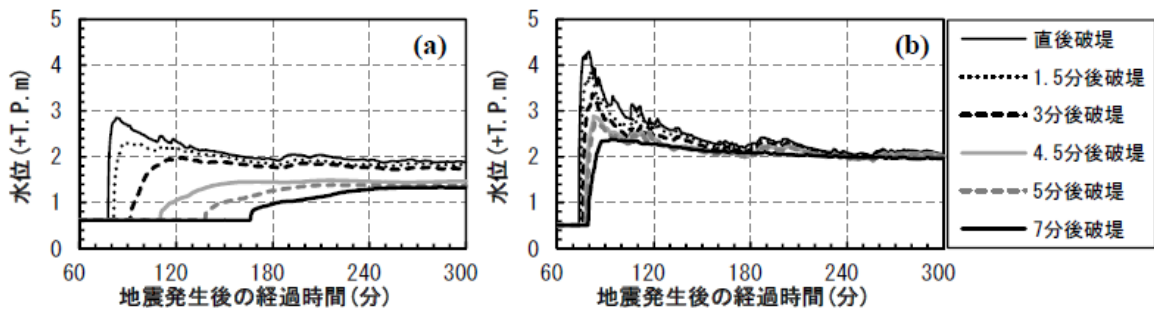


図-5.2.7 A地点における津波水位の時系列変化 (a) 越流水深 4.0m, (b) 越流水深 6.9m

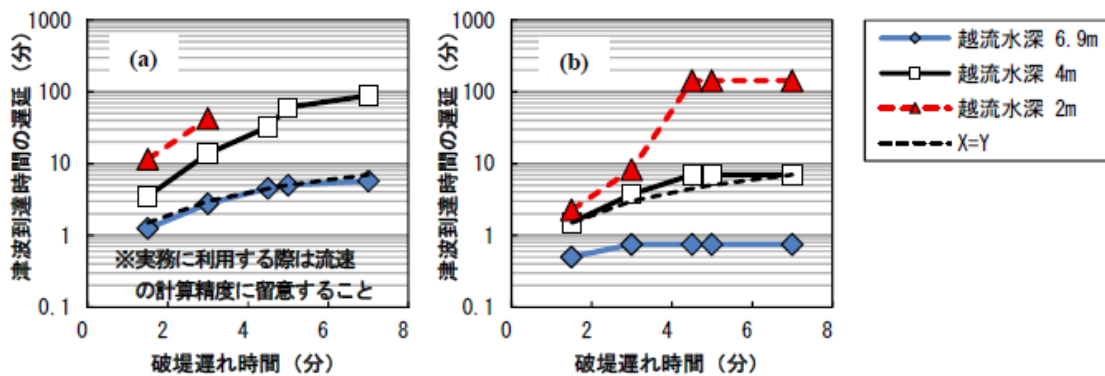


図-5.2.8 破堤遅れによる津波到達の遅延効果 (a) A地点, (b) B地点

二線堤の有無による違いに着目すると、越流水深 6.9m の津波に対して A 地点では直後破堤の場合には二線堤の存在によって遅延がさらに 0.5 分遅れるだけであった。これに対して破堤が 4.5 分遅延した場合には、二線堤があることでさらに 3.75 分、到達が遅延した（図-5.2.9）。また B 地点については、二線堤の有無による到達時間の違いは見られなかったが、津波水位は二線堤が存在する場合の方が、二線堤が無い場合と比べて高くなった（図-5.2.10）。

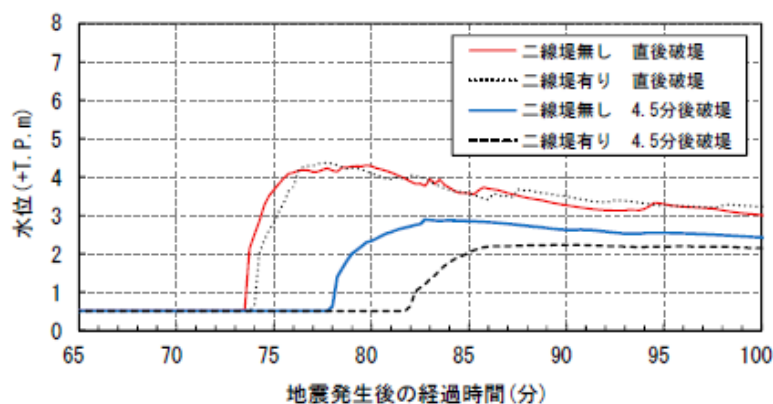


図-5.2.9 二線堤の有無による津波水位の時系列変化の違い (A 地点：越流水深 6.9m)

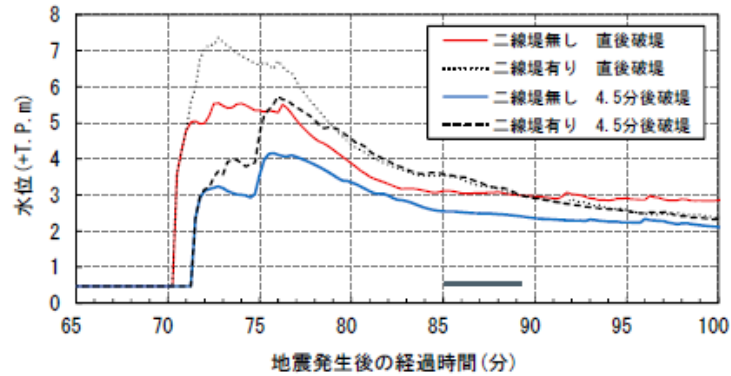


図-5.2.10 二線堤の有無による津波水位の時系列変化の違い (B地点:越流水深 6.9m)

海岸堤防の破堤遅延が無い場合には二線堤が加わっても越流水深が6.9mの津波による浸水面積はほとんど変わらないが、破堤遅延がある場合には二線堤が加わることで浸水面積が大きく低減する結果となった(図-5.2.6)。二線堤よりも海側に位置するB地点では、二線堤が存在したほうが、津波水位が高かったことを考慮すれば(図-5.2.10)、海岸堤防と二線堤の間に越流水が留まることで本間の公式によって算定される海岸堤防からの越流量が抑制された結果と考えられた。

この結果は、海岸堤防を粘り強い構造とすることで、背後地に構築される二線堤がより効果を発揮しやすくなることを示すものである。二線堤によって堤防背後に一時的に貯留される水はウォータークッションとして、海岸堤防の破壊の主要因である裏法尻における洗掘の低減に寄与し、より堤防が壊れにくくなることも期待される。

## 5.3 自然・地域インフラの活用可能性

### 5.3.1 自然・地域インフラの事例整理

#### (1) 自然インフラとして活用が見込まれる事例

自然インフラとは、津波減災効果を有すると考えられる自然の地形や地物のことを指す。たとえば、ハリケーンサンディの高潮災害を受けた米国ニューヨーク州が作成したアフター・アクション・レビューNYS2100<sup>32</sup>では、5つの主要な自然インフラ（Natural infrastructure）について港のレジリエンス戦略の役割の一部としてどのように使うことができるか詳細なフィージビリティ調査を実施するよう委員会が提言している。提言で上げられているニューヨーク港の5つの主要な自然システムとその機能について以下に引用する。

#### 1) 沿岸洲・砂丘システム（Barrier beach and dune systems）：

バリアアイランド、砂丘と砂浜は高潮に対する最初の防御物である。広い砂浜と砂丘の複合体は高潮・高波からの重要な防御機能を持っている。高潮・高波が来襲すると砂浜と砂丘は波のエネルギーを消したりやわらげたりすることにより高潮・高波のインパクトを減らすことができる。さらに、高潮・高波は砂浜から海域へ砂を動かし、砂丘を削り砂丘の背後に砂を押しこむ。これらの変化は、潮位上昇と高波に対する自然の応答であり、家屋やビジネス、インフラに対するダメージよりも安い費用で修繕できる場合が多い。

#### 2) 干潟（Tidal wetlands）：

干潟は、流速を遅くし、漂砂の堆積を促して海岸線を安定化し、波高と波のエネルギーを減らすことによって、沿岸のコミュニティを守ることができる。

#### 3) カキ礁（Oyster reefs）：

カキ礁は、沿岸や河口のシステム、特に海岸線の安定化に多くの便益をもたらすので「生態系のエンジニア」と呼ばれる。波の作用を減らし、湿地・河口の海岸線に粗粒の底質を供給することにより海岸線の安定化に貢献している。

#### 4) 近自然海岸（仮訳）（Living Shorelines）：

塩分に強い植生や捨石、その他波浪のエネルギーを吸収し侵食を軽減・防止する工法で設計された海岸域

#### 5) 自然の浜堤と土堤（Natural Berms and Levees）：

大きな土製の壁あるいは浜堤は、適切にデザインされていれば陸側にあるインフラや脆弱な地域に浸水をもたらす水を遠ざけることができる。

1) 沿岸洲・砂丘システムや、5) 自然の浜堤と土堤は、東日本大震災時に、津波高が高い岩手、宮城、福島の被災3県では明瞭ではなかったものの、津波の高さが比較的低かった青森や茨城、千葉では砂丘が津波の遡上を食い止めたと考えられる事例が見られた。

図-5.3.1 は、福本（1989）<sup>33</sup>がまとめた長さ20 km以上の砂丘・浜堤・砂堤の分布である。図から、日本の沿岸、特に外洋沿岸では砂堤・浜堤・砂丘が発達していることがわかる。

図-5.3.2 に示したとおり、砂堤・浜堤（バームBerm）は波浪の作用により形成された微高地で、高さ10 m 以下が一般的である。砂丘（デューンDune）は砂浜や浜堤・砂堤から

の風による飛砂の堆積作用で高地が発達したもので高さは数十m になるものもある。

図-5.3.3 は、国土地理院の電子国土WEB、色別標高図で庄内平野の砂丘を見たものであり、図-5.3.4, 5.3.5 は角田 (1975)<sup>34</sup>に掲載されている庄内平野の砂丘の平面図と断面図を示したものである。幅広い砂丘が沿岸に発達し、内陸側の砂丘は60 m 近い標高であることから、これらの砂丘が津波や高波に対して背後地を守る自然のインフラであることがわかる。

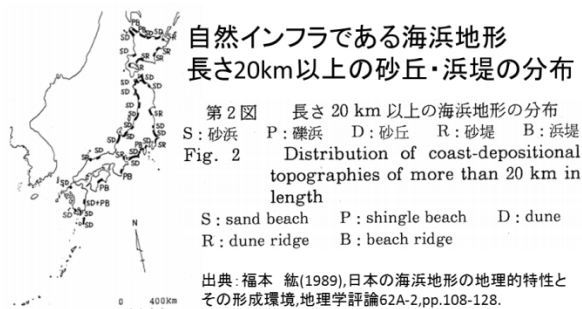


図-5.3.1 日本沿岸の砂丘、砂堤・浜堤



図-5.3.2 砂丘と砂堤・浜堤

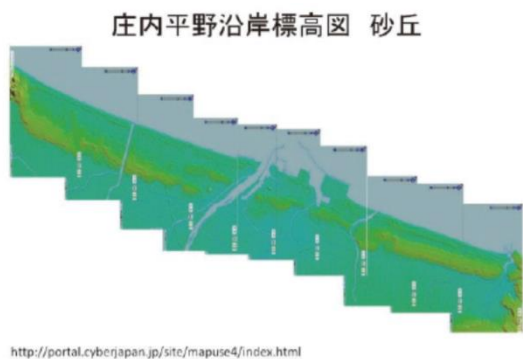


図-5.3.3 色別標高図で見る庄内平野

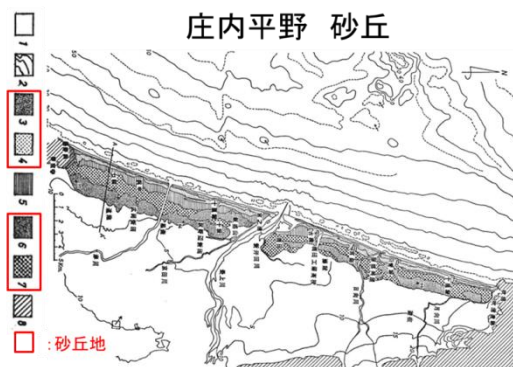


図-5.3.4 庄内平野砂丘平面図<sup>34</sup> (加筆)

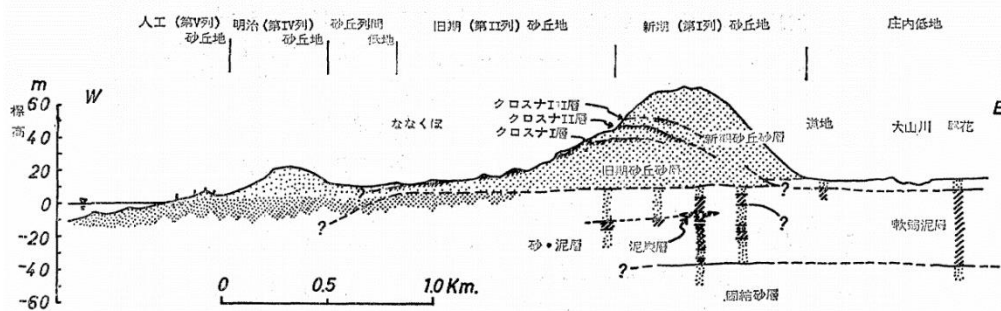


図3 庄内砂丘地帯南部の地形・地質断面図 (多少, 模式化してある)

図-5.3.5 庄内平野砂丘断面図<sup>34</sup>

また、標高が数十mと高くなくとも、微地形により背後地地盤が高ければ、それだけ浸水深は小さくなる。図-5.3.6は茨城県の高戸小浜海岸の例だが、背後地地盤が高い分、浸水深は浅くなる。

日本各地にみられる砂丘や浜堤・砂堤等の沿岸の海岸地形は国土地理院のHP (電子国土Web、色別標高図) で閲覧可能となる。



図-5.3.6 背後地地盤高による被害の違い (写真提供：(財)土木研究センターなぎさ総合研究室)

(2) 地域インフラとして活用が見込まれる事例

地域インフラとは、人工的な地物で減災効果を有すると考えられる地物のことである。東日本大震災では、5.2で示した二線堤の効果以外にも、保安林が漂流物を補足した例<sup>35</sup>、公園の盛土が避難場所となった例<sup>36</sup>が報告され、仙台市の復興計画<sup>37</sup>では貞山運河の津波エネルギー減衰効果を期待している。これら人工的な樹林、盛土、水路も被害を小さくする効果を有していると考えられる。貞山運河はラグーン地形を利用した運河・排水路であり、保安林も浜堤地形上に植樹しているので半自然半人工である。これらについて、5.3.1(1)の自然インフラと区別する意味で、ここでは「地域インフラ」として表現する。

例えば、図-5.3.7は、葛西海岸周辺図であるが、区画整理事業とともに海岸・公園事業が一体的に整備される際、旧海岸堤防は撤去されず道路の一部として有効活用され、現海岸堤防の前面には海浜公園（砂浜）が整備された。このため、

- ①海浜公園（砂浜による消波効果）
- ②現海岸堤防
- ③旧海岸堤防（二線堤的役割：図-5.3.8）

と三重の防護ラインが形成されている。

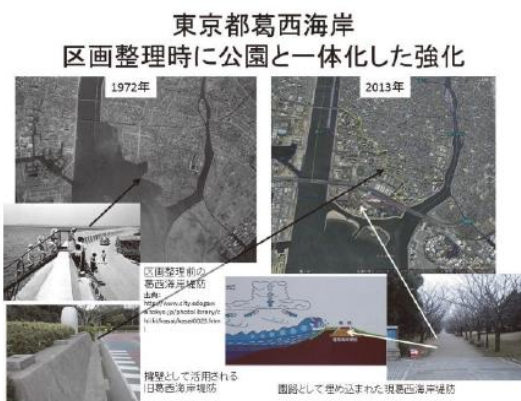


図-5.3.7 葛西海岸等の地域インフラ



図-5.3.8 旧海岸堤防の活用例

このほか、津波災害は低頻度の災害であり、地域の中で教訓を伝承し風化させないことが減災のために重要なことは以前から指摘されているところであり、津波の事実や教訓を伝承する施設や地形、史跡も地域インフラと考えられる。

### (3) 自然・地域インフラの事例集作成

国総研では、自然インフラと地域インフラを合わせて「自然・地域インフラ」としてこれらの活用に向けて研究を行っている。その一環として「自然・地域インフラ」として減災効果が発揮できるものがどの程度あるかを把握するために事例整理を行った。津波に対する減災効果として「津波減勢」、「避難場所の提供」、「居住制限」、「浸水範囲の明示」、「リスク・教訓の伝承」、「避難行動支援」に着目し、これらに該当する効果を有すると判断されたものを学術論文、書籍や雑誌記事等の文献、WEB等の公開資料等から収集・整理した。多くの地域に存在する石碑などは代表例のみとし、なるべく多くの種類を集める方針で、これまでに143例を収集した。

文献・資料の収集には、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の資料、災害教訓の継承に関する専門調査会の資料、東北大学の津波デジタルライブラリの資料、災害情報学会 Website、東京大学社会情報研究所の災害情報資料室、その他東京大学の図書館にある文献・記事、国会図書館にある文献、有識者の方からのヒアリングおよび提供資料、インターネットによるキーワード検索等のHPを用いた。論文・文献（表-5.3.1）と図書（表-5.3.2）をあわせて93件を収集した。

収集した事例は、自然インフラ、地域インフラに分類した。地域インフラは、地物等の有形のものと、伝承等の無形のものに分けて整理した。有形のものは、「減災効果」が見込めるもの、「避難場所、避難路」を示すもの等、6つに分類し、無形のものは津波回避・軽減のための取り組み、津波に関する伝承地域のイベント、地域独自の取り組みの3つに分類している（表-5.3.3）。

自然インフラには、砂丘や湿地等の自然の地形によって津波の被害を軽減させるが見込めるものである。東日本大震災時には、九十九里浜の砂丘や相馬市の松川浦の背後地では背後地に流れ込む水を減少させた<sup>38, 39</sup>推測されている。

地域インフラ（有形）のうち減災効果が見込めるものには、5.4.2節で取り上げたように、人工砂丘や防潮林、屋敷林といった半自然半人工の構造物や、貞山運河のような運河が含まれる。人工砂丘は、天然の砂丘と同様の効果があるとされ、防潮林や屋敷林といった樹木は、流れてくる漂流物を捕捉する効果が期待される。

収集した事例について、見込まれる減災効果、写真や図等をまとめた事例集を作成した。なお、海岸研究室のホームページ内（<http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/>）において、表-5.3.3のうち主なものに関する情報を公開する予定である。

表-5.3.1 収集した論文・文献

論文名・文献名	著者	出典	出版年月
津波常襲地域総合防災対策調査報告書	建設省河川局	-	1983.3
防潮林の津波に対する効果と限界	首藤伸夫	海岸工学論文集,	1985
災害多発地域における災害文化の研究	五十嵐之雄	-	1990.3
稲むらの火伝説, 日本に残る津波の碑の話	村井禎美	海岸, p. 44-48	2000
安政東海地震・安政南海地震(1854)の直後に残された津波災害の教訓について	都司嘉宣	河川, p. 43-46	2005.7
『津波いろは歌留多』について	山下文男, 小松原琢	歴史地震, 第22号, p. 169-174	2007
事故・災害 津波高さメモリアルポールの建設と防災教育	家村浩和	土木学会誌, p31-33	2008.1
殉難の碑「頌徳碑」～阪神大水害 大山津波が女学校を襲った!!～	岩坂久吉, 井上尊詩	砂防と治水, p. 85-86	2008.2
津波防災施設としてのわが国海岸林の機能評価に関する研究	浅野ら	土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol. 65, No. 1, 1311-1315,	2009
堺市・『擁護霊』, 神から賜った霊	長尾武	歴史地震, 第24号, p. 91-100	2009
釜石市津波防災教育のための手引き	釜石市教育委員会, 釜石市市民部防災課, 群馬大学災害社会工学研究室	-	2010.3
徳島県における地震・津波碑の価値と活用について	井若ら	土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol. 67, No. 2, I_1261-I_1265,	2011
平成23年東北地方太平洋沖地震津波による海岸防波林の被害(速報)	坂本知己	砂防学会誌, Vol. 64, No. 2, p. 49-53,	2011
震災復興と無形文化-現地からの報告と提言-	独立行政法人国立文化財機構	東京文化財研究所第6回無形民俗文化財研究協議会報告書	2011
2011年大津波の災害と被災を免れた神社	宇多ら	土木学会論文集 B3(海洋開発)Vol. 68, No. 2, I_43-I_48,	2012
東北地方太平洋沖地震津波における海岸保安林の効果および被災に関する現地調査	後藤ら	土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol. 68, No. 2, I_1366-I_1370, 2012	2012
東北地方太平洋沖地震津波による福島県いわき市の海岸林の被災実態	原田ら	土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol. 68, No. 2, I_1301-I_1305, 2012	2012
記憶・記録を伝承する-災害と無形の民俗文化-	独立行政法人国立文化財機構	東京文化財研究所第7回無形民俗文化財研究協議会報告書	2012
今後における海岸防災林の再生について	林野庁	東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会	2012.2
津波災害に強いまちづくりにおける公園緑地の整備に関する技術資料	国土交通省都市局公園緑地・景観課	-	2012.3
津波伝承まちづくりガイドライン	岩手県復興局	-	2012.9
海岸砂丘・盛土による津波減災効果の検討	前川ら	土木学会論文集 B1(水工学)Vol. 69, No. 4, I_1453-I_1458	2013
貞山運河による津波減災効果に関する数値的検討	新美ら	土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol. 69, No. 2, I_211-I_215	2013
災害を知り、防災を考える	鶴川ら	静岡大学公開講座ブックレット8	2014.3



表-5.3.2 収集した図書

タイトル	著者	出版者	出版年月
語り継ぐ震災の記憶	佐佐木邦子 聞き書き ; 仙台市若林区中央市民センター 編.	仙台市若林区中央市民センター	2014.3.
慶長奥州地震津波と復興:四〇〇年前にも大地震と大津波があった	蝦名裕一	蕃山房	2014.4.
津波災害と近代日本	北原系子	吉川弘文館	2014.6.
津波てんでんこ:句集	鈴木正治	現代俳句協会	2014.6.
防災・減災のための社会安全学:安全・安心な社会の構築への提言	関西大学社会安全学部 編.	ミネルヴァ書房	2014.3.
歴史文化を大災害から守る:地域歴史資料学の構築	奥村弘 編.	東京大学出版会	2014.1.
安政東海地震と大津波:古文書から学ぶ	志摩市教育委員会, 志摩市歴史民俗資料館 編.	志摩市教育委員会	2013.3.
巨大津波災害から学ぶ	赤塚雄三	鹿島出版会	2013.4.
考古学からみた静岡の自然災害と復興:静岡県考古学会2012年度シンポジウム	静岡県考古学会2012年度シンポジウム実行委員会 編.	静岡県考古学会	2013.3.
古事記と津波:神話編ノート	うつみたかし	ココデ出版	2013.2.
自然災害と民俗	野本寛一	森話社	2013.3.
震災と民話:未来へ語り継ぐために地名に隠された「南海津波」	石井正己 編. 谷川彰英	三弥井書店 講談社	2013.12. 2013.3.
地名は警告する:日本の災害と地名	谷川健一 編.	富士房インターナショナル	2013.3.
津波救国:〈稲むらの火〉浜口梧陵伝	大下英治	講談社	2013.3.
津波と観音:十一の顔を持つ水辺の記念碑	畑中章宏	亜紀書房	2013.10.
津波の墓標	石井光太	徳間書店	2013.1.
津波来;撓屈;偏微:歌仙両吟	井上雨文, 大坂麦風	井上功	2013.6.
解き明かされる日本最古の歴史津波被災地への誘い:石巻地方の調査、証言、実験を元にして:1000年に1度の津波をつかまえる	飯沼勇義	鳥影社	2013.3.
歴史の読み解き方:江戸期日本の危機管理に学ぶ	磯田道史	朝日新聞出版	2013.11.
3・11に問われて:ひとひとの経験をめぐる考察	栗原彬, テッサ・モーリス・スズキ, 荻谷剛彦, 吉見俊哉, 杉田敦, 葉上太郎	岩波書店	2012.2.
命を守る教育:3.11釜石からの教訓	片田敏孝	PHP研究所	2012.3.
家族とことわざ	日本ことわざ文化学会 編.	人間の科学新社	2012.11.
記憶をつなぐ:津波災害と文化遺産	日高真吾 編.	千里文化財団	2012.9.
震災と語り	石井正己	三弥井書店	2012.10.
地名に隠された「東京津波」	谷川彰英	講談社	2012.1.
地名は知っていた:津波被災地を歩く.下(七ヶ浜-山元)	太宰幸子	河北新報出版センター	2012.12.
地名は知っていた:津波被災地を歩く.上(気仙沼-塩竈)	太宰幸子	河北新報出版センター	2012.12.
大震災・巨大津波を詠む	千田實	[千田實]	2011.8.
大震災の記録と文学	志村有弘 編.	勉誠出版	2011.7.
津浪と村	山口弥一郎; 石井正己, 川島秀一 編.	三弥井書店	2011.6.
津波災害:減災社会を築く	河田恵昭	岩波書店	2010.12.
安政東海地震と津波の遺訓	志摩市教育委員会, 志摩市立磯部図書館・郷土資料館 編.	志摩市教育委員会	2007.3.
津波てんでんこ考	上飯坂哲 編.	上飯坂哲	2005.11.

表-5.3.2 収集した図書

タイトル	著者	出版者	出版年月
津波防災を考える:「稲むらの火」が語るもの	伊藤和明	岩波書店	2005.7.
津波:語りつぐツナミ.	酒井久男	種市[町立]歴史民俗資料館	1988.3.
歴史としての東日本大震災:口碑伝承をおろそかにするなかれ	岩本由輝編 ; 岩本由輝 [ほか] 執筆	刀水書房	2013.1.
未曾有と想定外:東日本大震災に学ぶ	畑村洋太郎	講談社	2011.7.
千年震災:繰り返す地震と津波の歴史に学ぶ	都司嘉宣	ダイヤモンド社	2011.5.
津波と防災:三陸津波始末	山下文男	古今書院	2008.9.
津波てんでんこ:近代日本の津波史	山下文男	新日本出版社	2008.1.
青森県大震災の記録:-昭和43年の十勝沖地震-	青森県企画部県民課編	青森県企画部県民課	1969.3.
いのちの碑 : 地震碑・津波碑・遺戒碑・供養碑・墓碑等 : 三重県(100基)	新田康二	新田康二	2014.3.
千年に一度の大地震・大津波に備える : 古文書・伝承に読む先人の教え	静岡県文化財団	静岡県文化財団	2012.7.
津波と防災 : 三陸津波始末	山下文男	古今書院	2008.9.
安政南海地震津波の教訓 : 大地震両川口津浪記	長尾武	長尾武	2008.9.
水都大坂を襲った津波 : 石碑は次の南海地震津波を警告している。	長尾武	長尾武	2007.2.
熊野の大津波 : 敗戦直前の東南海地震	関口精一	津の空襲を記録する会	1990.12.
哀史三陸大津波	山下文男	青磁社	1990.11.
房総沖巨大地震 : 元禄地震と大津波	伊藤一男	崙書房	1983.9.
歴史津波とその研究	羽鳥徳太郎	東京大学地震研究所	1981
歴史地震の話一語り継がれた南海地震	都司 嘉宣	高知新聞社	2012.4.
巨大地震巨大津波-東日本大震災の検証-	平田直・佐竹健治・目黒公郎・畑村洋太郎	朝倉書店	2011.11.
東日本大震災と知の役割	桜美林大学国際学研究所 編	勁草書房	2012.3.
東日本大震災を分析する-2震災と人間・まち・記録-	平川新・今村文彦・東北大学災害科学国際研究所	明石書店	2013.6.
歴史災害を防災教育に生かす-1945三河地震-	木村玲欧	古今書院	2013.3.
歴史地震事始	宇佐美龍夫	宇佐美龍夫	1986.3.
神社は警告する	高世仁・吉田和史・熊谷航	講談社	2012.11.
南海トラフ 巨大地震に備える	愛媛大学防災情報研究センター	愛媛大学防災情報研究センター	2012.9.
東日本大震災の教訓	村井俊治	古今書院	2011.8.
津波の事典	首藤伸夫・今村文彦・越村俊一・佐竹健治・松富英夫	朝倉書店	2011.10.
三陸海岸大津波	吉村昭	文藝春秋	2004.3.
震潮記	田井晴代	原田印刷出版	2006
民話が語る自然科学	宮橋裕司	慶應義塾大学出版会	2009.4.
写真・絵画集成 日本災害史 2地震・津波	下鶴大輔・津村建四朗・宮沢清治・岩切信	日本図書センター	2001.9.
災害・崩壊・津波 地名解	太宰幸子	彩流社	2013.2.
津波の恐怖	山下文男	東北大学出版会	2005.4.
天災から日本史を読みなおす	磯田道史	中公新書	2014.11

表-5.3.3 自然地域インフラ一覧 (○：主たる効果、△：副次的な効果)

カテゴリ	種類	インフラ名	地域	津波に対する効果						
				津波減勢	避難場所	移住抑	浸水範囲の	リスク・教訓の	避難の援用	その他
自然ライン	砂丘	九十九里浜の砂丘	千葉県県旭市、一宮町	○						
		鹿島砂丘	茨城県鹿嶋市から神栖市	○						
自然ライン	湿地	宮城県名取市の砂丘	宮城県名取市	○						
		内之浦干潟親水公園	和歌山県田辺市			○		△		
自然ライン	湿地	松川浦	福島県相馬市	△		○				
		スカ（帯状の人工斜砂丘）	静岡県掛川市	○						
地域インフラ（有形）	減災効果	鉄道・道路の盛土	仙台東部道路	○	△					
		国道6号相馬バイパス	福島県	○						
地域インフラ（有形）	減災効果	古堤防	佐伯の防潮堤（馬場の堤防、馬場の土手）	大分県佐伯市中江町	○					
			広村堤防	和歌山県広川町	○					
旧葛西海岸堤防	東京都		○							
旧浦安堤防	千葉県		○							
海岸堤防背後にある古堤防	静岡県牧之原市		○							
ぼた堤防	愛知県田原市		○							
地域インフラ（有形）	減災効果	防潮林・防風林	保安林による漂流物の捕捉	福島県いわき市（他多数）	○					
			防潮林背後の被害軽減	宮城県石巻市（他多数）	○					
地域インフラ（有形）	減災効果	屋敷林（居久根）、神社林・鎮守の森	一般家屋の屋敷林（居久根）	宮城県仙台市	○					
			大塚稲荷神社	福島県相馬市梅川地区	○					
地域インフラ（有形）	減災効果	防浪ビル	沿岸のビル群	宮城県気仙沼市（他多数）	○					
			水路	貞山堀（貞山運河）	宮城県仙台市	○				
地域インフラ（有形）	避難効果	高台	末の松山	宮城県多賀城市		○				
			海岸公園冒険広場	宮城県仙台市		○				
日枝（ひえ）神社の津波避難丘	千葉県鴨川市			○						
命山と呼ばれる人工山	静岡県袋井市			○						
千年希望の丘	宮城県岩沼市			○						
杉ノ下高台（失敗事例）	宮城県気仙沼市			○						
地域インフラ（有形）	避難効果	城郭跡	日和山公園	宮城県石巻市		○				
			旧街道・宿場	仙台平野にある旧街道・宿場	宮城県仙台市		○			
地域インフラ（有形）	避難効果	高台にある神社	古くから建立された神社	福島県南相馬市		○				
			津（つのみつ）神社	福島県相馬市		○				
地域インフラ（有形）	避難効果	緊急避難路	戸倉神社	宮城県本吉郡南三陸町波伝谷地区		○				
			津波発生時の避難階段道	三重県大紀町錦地区		○				
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	津波到達位置の境界を表す地蔵・神社	浪切地蔵	千葉県一宮町東浪見		△	○			
			波せき地蔵	京都府宮津市の真名井神社		△	○			
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	石碑・津波碑・塚	浪分神社	宮城県仙台市若林区		△	○			
			蛸薬師（たこやくし）	宮城県仙台市		△	○			
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	石碑・津波碑・塚	波切不動明王	静岡県牧之原市		△	○			
			外所地震供養碑	宮崎県宮崎市				○		
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	石碑・津波碑・塚	蛸子神社の百度石	徳島県南沖洲				○		
			津波来襲地点石標	徳島県海陽町観音庵				○		
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	石碑・津波碑・塚	康暦碑	徳島県海部郡美波町東由岐				○		
			大地震両川口津浪記	大阪府大阪市大正区				○		
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	石碑・津波碑・塚	津波警告の碑（波除碑）	東京都江東区木場				○		
			津波留（つなみどめ）	三重県熊野市新鹿				○		
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	石碑・津波碑・塚	大津浪記念碑	岩手県宮古市重茂姉吉地区				○		
			晴明塚	静岡県掛川市					○	
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	観音像・大仏	長浜観音	神奈川県横浜				○		
			大仏	神奈川県鎌倉市				○		
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	書物	震潮記	-				○		
			平家物語	-				○		
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	書物	古文書（多数）	-				○		
			安政東海地震を伝える絵馬	愛知県豊橋市西七根町の御厨神社				○		
地域インフラ（有形）	歴史的な建立物・資料	絵画・絵馬	南海地震に関する絵馬	徳島県海部郡海陽町の千光寺				○		
			風俗画報（多数）	-				○		
期待できる効果	複合的な効果	体験学習施設・博物館・防災ステーション	福良港津波防災ステーション	兵庫県南あわじ市		○		△		
		錦タワー	三重県度会郡大紀町錦		○			△		
期待できる効果	複合的な効果	高齢者施設と高校の連携	高齢者施設と高校をセットで整備	宮城県南三陸町					○	
		地域の災害リスクを示す施設	地盤沈下を表す標識	東京都江東区					○	
施設・自然物	津波により被災した	被災した海岸保全施設	被災した防潮堤の保存	福島県いわき市勿来地区				○		
		津波石	津波大石	沖縄県石垣市				○		
施設・自然物	津波により被災した	津波石	橋杭岩	和歌山県東牟婁郡串本町				○		
		遊具としての防災教育資料	津波いろは歌留多	岩手県				○		
その他	その他	過去の地形図	地形図	-				○		

表-5.3.3 自然地域インフラ一覧（○：主たる効果、△：副次的な効果）

カテゴリ	種類	インフラ名	地域	津波に対する効果										
				津波減勢	避難場所	移住抑制	浸水範囲の伝承	リスク・教訓の継承	避難の援用	その他				
地域インフラ（無形）	津波回避の取り組みの軽減	移住	高地移転	三重県鳥羽市国崎町			○							
		標語	津波てんでんこ	-					○					
		口承	語り部	-					○					
	津波に関する伝承	民話・神話・伝説	地震・津波と動物に関する言い伝え	-					○					
			稲村の火	和歌山県有田郡広川町					○					
			人魚伝説	沖縄県八重山					○					
			樺の乙女	秋田県					○					
			遠き地蔵	宮城県気仙沼市					○					
		津波避難場所を表す地名	亀の松	静岡県袋井市						○				
			助命山と呼ばれる愛宕山	徳島県海部郡海陽町		○				△				
			急（いそぎの）の坂	福島県相馬市の八沢浦干拓付近		○				△				
			招又（まねきまた）	宮城県七ヶ浜町		○				△				
			経塚（きょうづか）	南三陸町水戸辺		○				△				
	津波に対してリスクの高い地域を表す地名	念仏田（ねんぶつだ）	仙台市宮城野区岡田		○				△					
大船沢（おおぶねざわ）		南三陸町入谷						○						
スリヤマ		沖縄県石垣島						○						
津・浦・川・浜		-						○						
音楽	シオのつく地名	-						○						
	三陸地方に伝わる津波の歌（復興の歌）	岩手県						○						
	地震の歌（復興歌）	秋田県男鹿市						○						
記録	俳句・短歌	-						○						
	アーカイブ	-						○						
地域インフラ（有形）	地域のイベント	祭事	津浪祭	和歌山県広川町					○					
			稲村の火祭り	和歌山県広川町					○					
			明和の津波慰霊祭	沖縄県石垣市					○					
		神事	女川町復興祭	宮城県女川町					○					
			津波伝承 女川復興祭	-						○				
	地域独自の取り組み	神事	二見興玉神社の郷中施（ごうちゅうせ）	三重県伊勢市					○					
			日神社の祭礼	和歌山県白浜町					○					
			鐘を利用した避難誘導	兵庫県あわじ市 阿万中西地区							○			
		地域における昔の資産の活用	いのちの鐘（鐘を利用した避難誘導）	三重県鈴鹿市								○		
			タンカーの汽笛を利用した避難誘導	兵庫県姫路市								○		
			伊良湖岬の灯台を利用した避難誘導	愛知県田原市								○		
		観光と関連させた取り組み	福良港	兵庫県南あわじ市						○				
			震災学習列車	岩手県（久慈～宮古、釜石～盛）						○				
			津波常襲地域における独自の防災教育	宮城県釜石市						○				
人材	東北1000プロジェクト	東北地方										○		
	外部からの移住による人材確保	徳島県海部郡の伊座利漁港										○		
	地域同士の連携	徳島県海部郡の伊座利漁港										○		
共助	安否札を活用した避難および助け合い	宮城県釜石市							○					
	ボランティア活動	全国										○		

### 5.3.2 砂丘等による津波減災効果の分析

#### (1) 津波による砂丘等の侵食事例の分析

自然・地域インフラの中でも砂丘・浜堤は自然の海岸堤防として減災効果が見込まれる。

東日本大震災では、大きな津波が来襲した地域において砂浜が流出した地域が存在した。また、津波の高さが大きくない地域では、海岸砂丘による減災効果が見受けられた一方、そのような地域においても、浜堤が局所的に被災している箇所が存在した。津波による砂丘等の地形変化を把握するために、被災前後の空中写真の判読及びLP測量データ（航空レーザー測量）の分析を進めており、千葉県旭市の海岸周辺における例を紹介する（図-5.3.9）。この地域では海岸近くに護岸と人工的に構築された浜堤が存在し、その背後には複数の砂丘列が残されていたが、震災前後のLP測量結果の比較から、浜堤と第1砂丘、第2砂丘が津波によってほとんど侵食されて岸沖方向の起伏が消失したことがわかる。一方、第3砂丘については海側の斜面の一部を除いてほとんど地形変化が見られない。

津波に対する砂丘の応答は、津波外力の大きさ以外にも、被災前の砂丘地形、植生の生育状況、砂丘の土質、海岸保全施設の存在状況などの現在の状態、さらには旧河跡などの過去の状態にも影響を受ける。津波に対する砂丘等の応答は、被災分析に取り組んできた海岸堤防よりも、環境条件が多様と考えられるため、様々な砂丘等について津波による地形変化事例を収集し、分析を進めている。

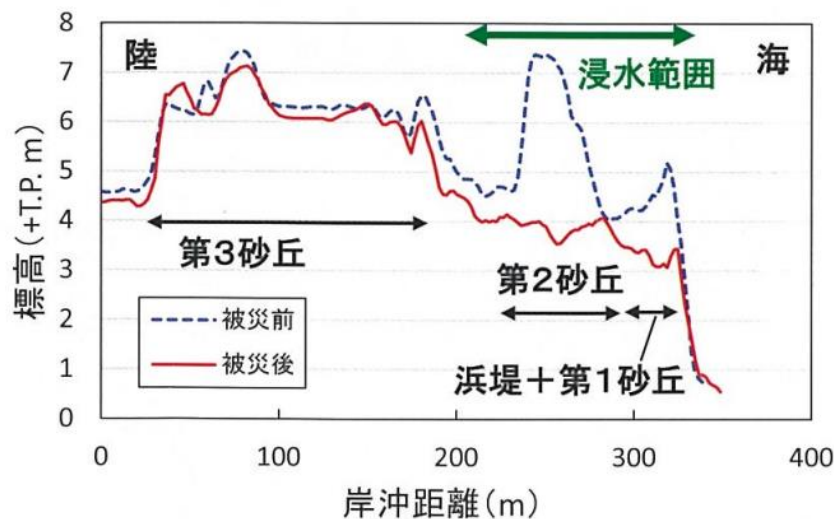


図-5.3.9 津波による海岸砂丘の断面地形変化（千葉県旭市）。測量結果は岸沖方向で移動平均とり、誤差を軽減している。

#### (2) 津波を想定した砂丘などの侵食実験

東日本大震災における地形変化の事例から、砂丘等についても斜面を流下する際の高流速による侵食が重要と考えられることから、この現象を詳しく把握するために水理実験を実施した。特に実際の砂丘等の表面には植生が生育し、津波への応答に無視できない影響を与えている可能性があるが、その影響を水理的に算定できるだけの知見が不足していることから、植生が生育した状態での破壊過程を把握することを目的とした。既に樹木上部の幹や葉が津波越流に与える影響については、林野庁など<sup>42</sup>による調査で示されているが、津波によって土壌が侵食され、根ごと流される現象については十分に調べられていない。

そのため本研究では河川堤防の植生が、堤外側の法面の侵食に与える影響を調べる水理実験（国総研資料3489号<sup>43</sup>）と同様の方法を用いて樹木の根系が砂丘表面の侵食過程に与える影響に着目して実験を進めている。

水理実験では、砂丘の土壌中の根系を模型で再現することが難しいことから、実物を使用した。1.5m×1.5m×0.7mの鋼製型枠を砂丘の表層に打ち込み、樹木の根系を含んだままの現地土壌を乱さずに採取して水理実験に供している（図-5.3.10～5.3.13）。採取された土壌の供試体は国土技術政策総合研究所の高流速実験水路内に運び込んで設置し、津波越流を想定した最大約7m/sの高流速を作用させた時の根系の応答の観察と土壌表面の侵食深さの時系列計測を行っている。



図-5.3.10 樹木根を含む土壌供試体の採取



図-5.3.11 実験水路における通水中の様子



図-5.3.12 侵食実験前の供試体の土壌表面



図-5.3.13 高流速を作用させた後の供試体の表面

平成26年度までに水理実験は全部で4供試体（国土技術政策総合研究所内の供試体が1つ、出雲の沿岸域に供試体が3つ）実施した。出雲の斐伊川放水路の河口からやや上流に位置する斐伊川放水路ふれあいセンター付近（図-5.3.14、5.3.15）で3供試体を採取した。樹木を採取した出雲の樹林が、現在東北地方で進められている宮脇方式で植林された樹林であることから、出雲を供試体の採取地として選定した。

供試体の採取時には、供試体採取場所の近くで、地下の層（地表面から地下50cmまで10cm刻みで全5層）に根がどれほど含まれているかを調べる根系調査を行った。平成27年度以降に、この調査の結果を基に、地下の根毛量と侵食速度（単位時間あたりの侵食深）

に与える影響を定量的に評価することを試みる。なお、他に侵食に対する抵抗性を評価するために、現地で土の引張試験や地表面の植生調査を実施した。

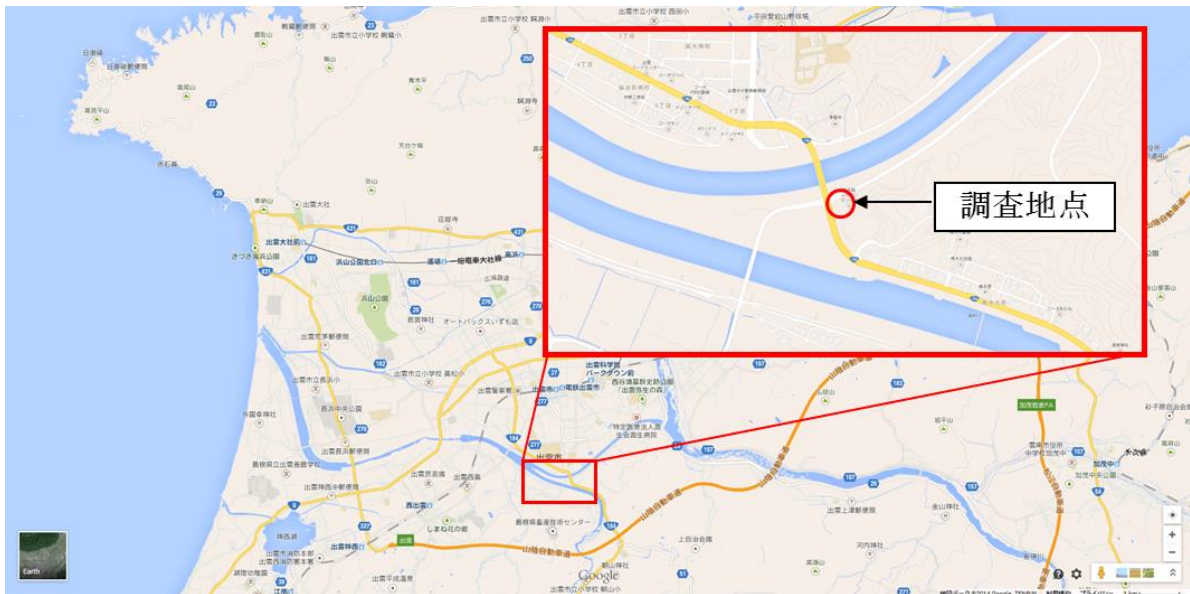


図-5.3.14 出雲の供試体を採取した場所



図-5.3.15 供試体を採取した周辺の風景

実験方法の確立の為に、国土技術政策総合研究所内で採取した供試体を用いた。流速を断続的に、徐々に最大流速を大きくして与えることで、各流速における供試体の侵食深を計測している。侵食深は、供試体表面を10cm間隔の格子状に区切り、侵食深を計測する際に表面が根っこで覆われている場合、可能な限り根の下部の地面までの距離を計測した。また、地表面が削られていくと水路の固定床と供試体の表面に段差が生じる恐れがある。段差によって侵食が促進される恐れがあることから、供試体の底の高さ（敷高）を、適宜上昇させ、段差の影響を低減できるように試みた。

しかし、出雲の供試体は土壌の粘着力が弱く、小さな流速であっても大きく削られてしまう恐れがあった。そこで、津波による速い流れが作用したときの流速に近い状況を再現させることを優先し、1回目の通水から最大流速の水流を流した。最初の供試体は、最大流速の継続時間を1分15秒としたが、地表面の侵食が激しく進行してしまったため。そのため、2供試体目以降では最大流速の継続時間をおおむね10秒～30秒とした(図-5.3.16)。

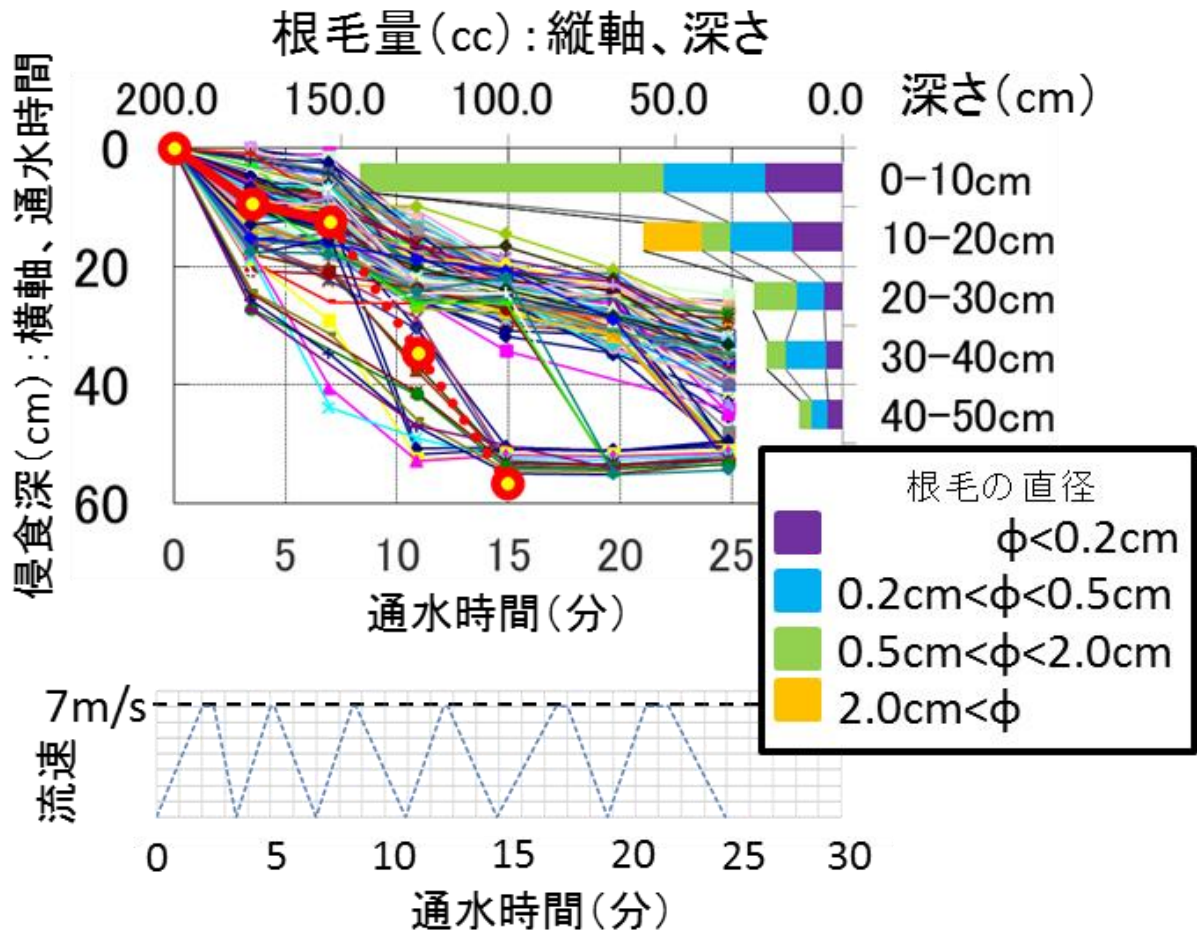


図-5.3.16 実験時の流速（下段）と、侵食深と根毛量（上段）



図-5.3.17 供試体通水前（左）と4回通水後（右）の写真。



図-5.3.17に通水前後の供試体を示す。供試体表面を格子状に分け、各格子の侵食深の経時変化を測定し、侵食深と根毛量の鉛直分布を比較した。侵食の速度（折線グラフの傾き）は地表面に近い層では小さく、その後急激に侵食が進む傾向が見られた。根毛量（棒グラフ）が急激に減少する深さ（侵食限界）で侵食が進む状況が読み取れ、河川堤防のり面を対象とした既往の侵食実験の結果と同じ傾向を示した。なお、図-5.3.16の折れ線は格子毎の侵食深を示し、赤線は全格子の平均的な侵食深である。侵食限界後の傾き（点線）は、他の格子の侵食限界後の傾きの平均である。本研究で開発した手法によって、今後もさらに研究をすすめる。

平成26年度までに樹木の根の有する侵食に対する抵抗性を水理実験によって評価する手法を確立した。今後、植林手法や植生を考慮し水理実験の数を増やしていくとともに、この研究成果を津波リスク評価に反映するため、樹木の根が有する侵食に対する抵抗性を簡易的にかつ、定量的に評価できるような手法の検討を行う予定である。

### 5.3.3 分野を超えた勉強会の開催

自然・地域インフラには、様々なスケール・質のものが含まれるため、研究者が所属する学術集団も多様である。

津波防災地域づくりにあたっては、各分野で進められている研究成果を地域の計画の中に総合化していく必要があり、「津波防災」に関係する多様な学術分野間、民産学官間の情報交換が重要となっている。

このため、平成26年度は、分野間連携の取り組みのスタートとして、津波災害の伝承に取り組む民学官を集めた「津波災害伝承に関する勉強会」を開催した。香川大学、東北大学、宮城県土木部、陸前高田市のNPO法人から講演者を招き、話題提供いただいた(表-5.3.4)。今後も様々なテーマを対象に実施し、資料等はWEB上<sup>44</sup>で公開していく予定である。

表-5.3.4 津波災害の伝承に関する勉強会の講演題目

題目	氏名	所属
自然・地域インフラとは	渡邊国広	国土技術政策総合研究所 研究官
地域に眠る津波災害伝承を掘り起こす	松尾裕治	香川大学 教授
最新技術で伝える被災地の記憶	高嶋礼詩	東北大学総合学術博物館 准教授
3.11伝承・減災プロジェクトについて	小幡紘平	宮城県土木部防災砂防課
桜並木で震災を伝える	岡本翔馬	認定特定非営利活動法人 桜ライン311代表理事
専門家と住民の協働	佐藤慎司	東京大学 教授

## 5.4 5章のまとめ

5章のまとめについて、以下のとおり示す。

### (1) 津波ハザードの評価

- ・本省と協力して津波浸水想定（レベル2津波）の設定法を整理した。3章での最大クラスの津波の設定や、2章での調査結果を踏まえ、陸域への遡上、隆起・沈降、堤防の被災状況の考慮した津波浸水シミュレーションによる設定法とした。海岸線を有する都道府県の約5割において津波浸水想定が設定された（平成27年4月時点）。

### (2) 氾濫流制御による被害軽減

- ・試算の結果、粘り強い海岸堤防の破堤時間遅れが長くなるほど、もしくは破堤延長が短くなるほど、浸水深や浸水面積が低減することが分かり、津波越流に対する粘り強さが発揮された場合の減災効果があることが分かった。
- ・試算により、海岸堤防（第一堤）が粘り強さ（破堤遅延効果）を発揮するほど、二線堤との相乗効果で、浸水深が小さくなったり、浸水遅延効果が発揮されたりする等の減災効果が分かった。

### (3) 自然・地域インフラの活用可能性

- ・砂丘・干潟等の自然インフラや、盛土・樹林等の半自然半人工的な地域インフラは、津波に対する減災効果が期待され、その情報収集と効果研究の必要性、多様な学術分野間の連携の必要性を確認した。

## 6. 避難、危機管理支援、土地利用等による安全性向上・

### 減災方策

#### 6.1 避難ビルの構造上の要件等に係る基準の見直し

##### 6.1.1 検討概要

国土技術政策総合研究所は国土交通省住宅局とともに津波避難ビル等（工作物を含む。以下同じ）の指定を検討する際の、建築物の選定基準（構造的要件）の基本的な考え方として、「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について」（平成23年11月17日付国住指第2570号）における「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」をとりまとめた。

同内容の技術的背景については、国総研資料第674号「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告」に掲載しているが、本報告では、2.5節に示した現地調査結果から導かれた津波波圧算定式の概要部分について述べる。また、同基準に基づいて非ピロティ型の鉄筋コンクリート造建築物を対象として要求されるせん断力係数に係るケーススタディを行い、新耐震基準で要求される値と比較した。

##### 6.1.2 水深係数 $a$ の考察過程

今回の検討においては、現地調査の結果から内閣府津波避難ビルのガイドラインの波圧算定法における「3」が津波の勢いなどによって変化するものと考え、この「3」を「 $a$ （水深係数）」とおき、被害の実態に基づき  $a$  を検証することとした。検証においては、被害を受けた構造物（比較的単純な工作物と建築物）の破壊形式等に応じてその耐力を推定し、静水圧分布を仮定した場合に構造物の耐力と等しくなる水深係数  $a$  を、その場所の計測浸水深を用いて逆算した。

実用的な設計用荷重式の提案の観点から東日本大震災の被災地以外の地域を含めた適用についても勘案し、設計用浸水深を基に津波荷重を算定する手法としては、遮蔽物の有無を主たる条件とすることにした。遮蔽物の有無を条件とした水深係数  $a$  としては現地調査結果から明確な差異が得られている。これを基に、水深係数  $a$  には最大の数値を用いることとした。その結果、遮蔽物がある場合の水深係数  $a$  は1程度、遮蔽物がない場合の水深係数  $a$  は1.7以上であった。現時点までに得られた結果をもとに設計用の水深係数  $a$  を設定するためには、今後、津波避難ビルに広く利用されることを念頭に置くと、下記のような要因を考慮する必要があると考えられる。

- 1) 本検討は特定の津波災害地域における検討であること
- 2) 遮蔽物なし地域の無被害構造物のデータが少ないこと
- 3) RC造建築物の耐力は耐震1次診断による略算の結果であること
- 4) 津波浸水シミュレーションの精度
- 5) 過去の実験結果、被害調査結果
- 6) 津波避難ビルとしての重要性
- 7) 今後発生するさまざまな津波への適用可能性

これらを考慮するにあたって、それぞれの要因ごとに割増率を特定することは現段階では容易ではない。しかし、例えば本調査において、計測浸水深とシミュレーションによる浸水深を比較した結果によると、その比は大きい所では 1.5 倍程度であった(図-6.1.1)。よって、現時点で今回の調査結果を今後の津波避難ビルに広く利用するためには、上記の要因をはじめとした不確定要因を考慮し、この程度以上の割増率を考慮して水深係数  $a$  を設定する必要があるであろう。

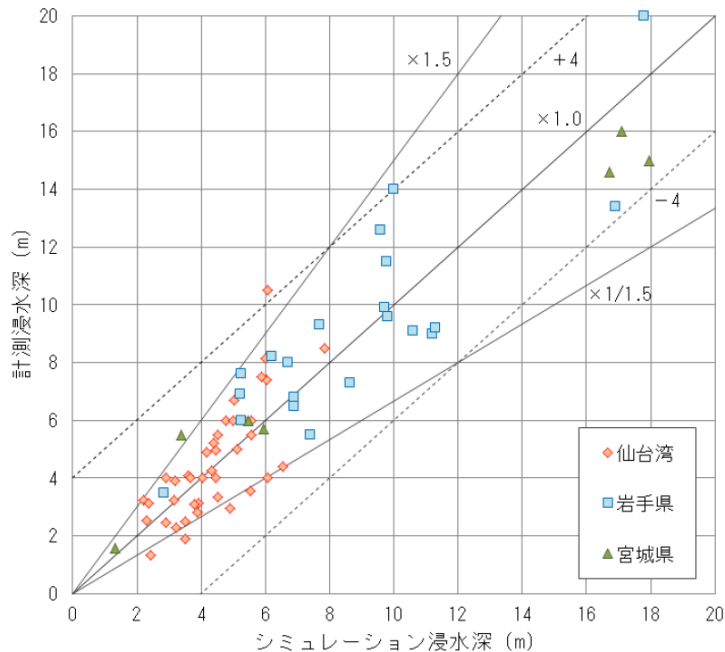


図-6.1.1 計測された浸水深とシミュレーションによる浸水深の比較

そこで、設計用津波荷重算定用の水深係数  $a$  の設定として以下のように考えることとした。遮蔽物無しの場合の設計用水深係数  $a$  を既往の研究結果やスマトラ島沖地震津波による調査結果を参考に 3 とする。遮蔽物の有無による水深係数の比は 1.5 程度であることから、遮蔽物有りの場合の設計用水深係数  $a$  を 2 ( $=3/1.5$ ) とする。海岸や河川等からの距離が 500m 以遠では  $a=1$  程度以下とみなせそうであり、地形特性（例えば下り勾配や谷筋など）や構造物の配置などの影響による流速増加が生じない地域で距離に応じて津波の減衰が期待できる場合においては、これに割増率を考慮して 500m 以遠で水深係数  $a$  を 1.5 とすることとした。上記の考察から得られた津波波圧算定式を(6.1.1)式および表-6.1.1 に示し、水深係数  $a$  の模式図を図-6.1.2 に示す。

なお、開口による波力の低減については、数値シミュレーションにより検討された例によれば<sup>45</sup>、開口の割合が大きくなるにつれて波力は低減することが分かるが、概ね 3 割以上になると内壁等が存在するために波力の低減は小さくなるとされている。すなわち開口による波力低減には一定の限度があり、内壁がない場合等を除いた通常の建築計画を前提にすると、7 割程度を下限とすることが現時点では望ましいと考えられる。

$$qz = \rho g (ah - z)$$

(6.1.1)

ここに、

$qz$  : 構造設計用の進行方向の津波波圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$\rho$  : 水の単位体積質量 (t/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$h$  : 設計用浸水深 (m)

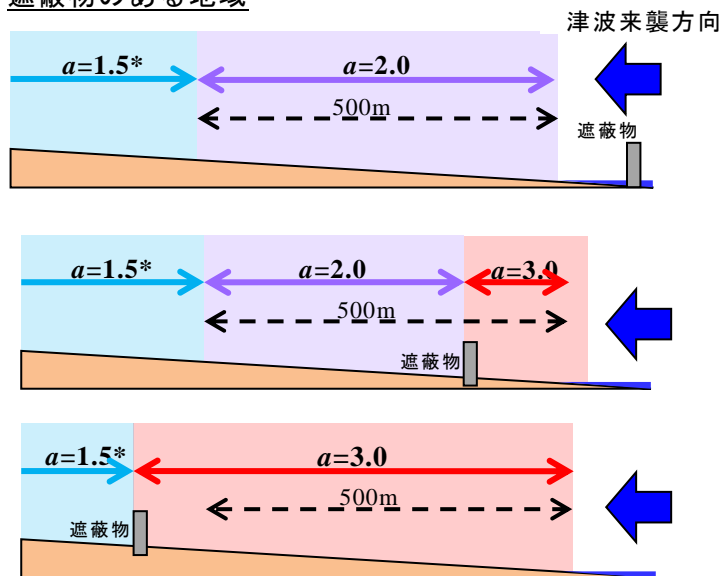
$z$  : 当該部分の地盤面からの高さ ( $0 \leq z \leq ah$ ) (m)

$a$  : 水深係数で表1による。

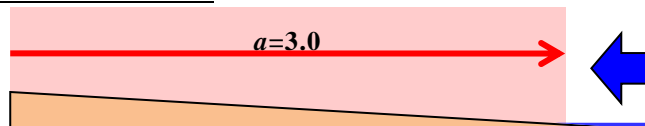
表-6.1.1 水深係数  $a$  の設定

	遮蔽物あり		遮蔽物なし
海岸や河川等からの距離	500m 以遠	500m 未満	距離によらず
水深係数 $a$ の設定	1.5	2	3

遮蔽物のある地域



遮蔽物のない地域



\* $a=1.5$  への低減は津波の流速増加がない地域を対象とする

図-6.1.2 遮蔽物の有無、海岸等からの距離と水深係数  $a$  の関係

### 6.1.3 浸水深と要求される設計要件に関するケーススタディ

静水圧荷重算定式を用いた場合に浸水深に対して要求される設計要件を整理した。下記の仮定下で建築物に要求される標準せん断力係数を算定した。表 6.1.2～6.1.10 に検討結果を示す。有色部分は新耐震基準 ( $D_s=0.3$ ) により純ラーメンの鉄筋コンクリート造建築物の (1 階) 標準せん断力係数が決まる範囲を示している。

なお本表の値は階高や単位面積重量は標準的な値に固定しているため、これらの値により要求値が変動することも考えられる。また、下記の検討では水平力による検討のみであり、転倒および滑動に対する検討を含んでいないことに留意する必要がある。これらのケーススタディから、避難ビルの構造上の要件等に係る基準において、浸水深が高く、建築物規模が小さい場合には建築物に要求される強度は耐震基準に比して非常に高いことが推察される。

#### 【解析仮定】

- (1) 対象建築物は非ピロティ型の鉄筋コンクリート造建築物とする。
- (2) 建築物の階数 (3～12 階) および奥行 (3～36 m) をパラメータとしている。
- (3) 津波設計用浸水深は 5m、10m、15m の 3 種類とする。
- (4) 単位面積重量は  $13 \text{ kN/m}^2$  とする。
- (5) 津波作用荷重は水深係数 1.5、2.0、3.0 倍の 1 階柱中間までの静水圧荷重とする。
- (6) 建築物は階高 3.5m とし、越流部分の波圧は考慮しない。
- (7) 開口率は 0.3 とし、基準に基づき  $(1 - \text{開口率})$  を乗じて波力を低減させる。
- (8) 津波避難ビルの建物高さは (設計用浸水深+4(m)) 以上とする。
- (9) 耐震基準の 1 階部分における設計用層せん断力係数は純ラーメンを想定して  $0.3R_t$  とし、 $R_t$  は二種地盤 ( $T_c=0.6(\text{s})$ ) を想定する。

表 6.1.2 要求される標準せん断力係数 ( $a = 1.5$ 、浸水深 5m、開口率 0.3)

奥行階数	3 F	4 F	5 F	6 F	7 F	8 F	9 F	10 F	11 F	12 F
3 (m)	0.97	0.73	0.59	0.49	0.42	0.37	0.33	0.30	0.27	0.25
6 (m)	0.49	0.37	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
9 (m)	0.33	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
12 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
15 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
18 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
21 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
24 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
27 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
30 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
33 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
36 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21

表 6.1.3 要求される標準せん断力係数 ( $a = 2.0$ 、浸水深 5m、開口率 0.3)

奥行階数	3 F	4 F	5 F	6 F	7 F	8 F	9 F	10 F	11 F	12 F
3 (m)	2.00	1.50	1.20	1.00	0.86	0.75	0.67	0.60	0.55	0.50
6 (m)	1.00	0.75	0.60	0.50	0.43	0.38	0.34	0.30	0.28	0.25
9 (m)	0.67	0.50	0.40	0.34	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
12 (m)	0.50	0.38	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
15 (m)	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
18 (m)	0.34	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
21 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
24 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
27 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
30 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
33 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
36 (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21

表 6.1.4 要求される標準せん断力係数 ( $a = 3.0$ 、浸水深 5m、開口率 0.3)

奥行階数	3 F	4 F	5 F	6 F	7 F	8 F	9 F	10 F	11 F	12 F
3 (m)	4.56	3.85	3.09	2.58	2.21	1.94	1.72	1.55	1.41	1.29
6 (m)	2.28	1.93	1.55	1.29	1.11	0.97	0.86	0.78	0.71	0.65
9 (m)	1.52	1.29	1.03	0.86	0.74	0.65	0.58	0.52	0.47	0.43
12 (m)	1.14	0.97	0.78	0.65	0.56	0.49	0.43	0.39	0.36	0.33
15 (m)	0.92	0.77	0.62	0.52	0.45	0.39	0.35	0.31	0.29	0.26
18 (m)	0.76	0.65	0.52	0.43	0.37	0.33	0.29	0.26	0.24	0.22
21 (m)	0.66	0.55	0.45	0.37	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
24 (m)	0.57	0.49	0.39	0.33	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
27 (m)	0.51	0.43	0.35	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
30 (m)	0.46	0.39	0.31	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
33 (m)	0.42	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
36 (m)	0.38	0.33	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21

表 6.1.5 要求される標準せん断力係数 ( $a = 1.5$ 、浸水深 10m、開口率 0.3)

階数	3 F	4 F	5 F	6 F	7 F	8 F	9 F	10 F	11 F	12 F
3 (m)	--	3.85	3.09	2.58	2.21	1.94	1.72	1.55	1.41	1.29
6 (m)	--	1.93	1.55	1.29	1.11	0.97	0.86	0.78	0.71	0.65
9 (m)	--	1.29	1.03	0.86	0.74	0.65	0.58	0.52	0.47	0.43
12 (m)	--	0.97	0.78	0.65	0.56	0.49	0.43	0.39	0.36	0.33
15 (m)	--	0.77	0.62	0.52	0.45	0.39	0.35	0.31	0.29	0.26
18 (m)	--	0.65	0.52	0.43	0.37	0.33	0.29	0.26	0.24	0.22
21 (m)	--	0.55	0.45	0.37	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
24 (m)	--	0.49	0.39	0.33	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
27 (m)	--	0.43	0.35	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
30 (m)	--	0.39	0.31	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
33 (m)	--	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21
36 (m)	--	0.33	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21

表 6.1.6 要求される標準せん断力係数 ( $a = 2.0$ 、浸水深 10m、開口率 0.3)

階数	3 F	4 F	5 F	6 F	7 F	8 F	9 F	10 F	11 F	12 F
3 (m)	--	6.54	5.76	4.89	4.19	3.67	3.26	2.94	2.67	2.45
6 (m)	--	3.27	2.88	2.45	2.10	1.84	1.63	1.47	1.34	1.23
9 (m)	--	2.18	1.92	1.63	1.40	1.23	1.09	0.98	0.89	0.82
12 (m)	--	1.64	1.44	1.23	1.05	0.92	0.82	0.74	0.67	0.62
15 (m)	--	1.31	1.16	0.98	0.84	0.74	0.66	0.59	0.54	0.49
18 (m)	--	1.09	0.96	0.82	0.70	0.62	0.55	0.49	0.45	0.41
21 (m)	--	0.94	0.83	0.70	0.60	0.53	0.47	0.42	0.39	0.35
24 (m)	--	0.82	0.72	0.62	0.53	0.46	0.41	0.37	0.34	0.31
27 (m)	--	0.73	0.64	0.55	0.47	0.41	0.37	0.33	0.30	0.28
30 (m)	--	0.66	0.58	0.49	0.42	0.37	0.33	0.30	0.27	0.25
33 (m)	--	0.60	0.53	0.45	0.39	0.34	0.30	0.27	0.25	0.23
36 (m)	--	0.55	0.48	0.41	0.35	0.31	0.28	0.25	0.23	0.21

表 6.1.7 要求される標準せん断力係数 ( $a = 3.0$ 、浸水深 10m、開口率 0.3)

階数	3 F	4 F	5 F	6 F	7 F	8 F	9 F	10 F	11 F	12 F
3 (m)	--	11.9	11.3	10.5	9.66	8.74	7.81	7.03	6.39	5.86
6 (m)	--	5.97	5.65	5.26	4.83	4.37	3.91	3.52	3.20	2.93
9 (m)	--	3.98	3.77	3.51	3.22	2.92	2.61	2.35	2.13	1.96
12 (m)	--	2.99	2.83	2.63	2.42	2.19	1.96	1.76	1.60	1.47
15 (m)	--	2.39	2.26	2.11	1.94	1.75	1.57	1.41	1.28	1.18
18 (m)	--	1.99	1.89	1.76	1.61	1.46	1.31	1.18	1.07	0.98
21 (m)	--	1.71	1.62	1.51	1.38	1.25	1.12	1.01	0.92	0.84
24 (m)	--	1.50	1.42	1.32	1.21	1.10	0.98	0.88	0.80	0.74
27 (m)	--	1.33	1.26	1.17	1.08	0.98	0.87	0.79	0.71	0.66
30 (m)	--	1.20	1.13	1.06	0.97	0.88	0.79	0.71	0.64	0.59
33 (m)	--	1.09	1.03	0.96	0.88	0.80	0.71	0.64	0.59	0.54
36 (m)	--	1.00	0.95	0.88	0.81	0.73	0.66	0.59	0.54	0.49



表 6.1.8 要求される標準せん断力係数 ( $a = 1.5$ 、浸水深 15m、開口率 0.3)

奥行階数	3F	4F	5F	6F	7F	8F	9F	10F	11F	12F
3 (m)	--	--	--	6.29	5.42	4.74	4.21	3.79	3.45	3.16
6 (m)	--	--	--	3.15	2.71	2.37	2.11	1.90	1.73	1.58
9 (m)	--	--	--	2.10	1.81	1.58	1.41	1.27	1.15	1.06
12 (m)	--	--	--	1.58	1.36	1.19	1.06	0.95	0.87	0.79
15 (m)	--	--	--	1.26	1.09	0.95	0.85	0.76	0.69	0.64
18 (m)	--	--	--	1.05	0.91	0.79	0.71	0.64	0.58	0.53
21 (m)	--	--	--	0.90	0.78	0.68	0.61	0.55	0.50	0.46
24 (m)	--	--	--	0.79	0.68	0.60	0.53	0.48	0.44	0.40
27 (m)	--	--	--	0.70	0.61	0.53	0.47	0.43	0.39	0.36
30 (m)	--	--	--	0.63	0.55	0.48	0.43	0.38	0.35	0.32
33 (m)	--	--	--	0.58	0.50	0.44	0.39	0.35	0.32	0.29
36 (m)	--	--	--	0.53	0.46	0.40	0.36	0.32	0.29	0.27

表 6.1.9 要求される標準せん断力係数 ( $a = 2.0$ 、浸水深 15m、開口率 0.3)

奥行階数	3F	4F	5F	6F	7F	8F	9F	10F	11F	12F
3 (m)	--	--	--	10.5	9.66	8.74	7.81	7.03	6.39	5.86
6 (m)	--	--	--	5.26	4.83	4.37	3.91	3.52	3.20	2.93
9 (m)	--	--	--	3.51	3.22	2.92	2.61	2.35	2.13	1.96
12 (m)	--	--	--	2.63	2.42	2.19	1.96	1.76	1.60	1.47
15 (m)	--	--	--	2.11	1.94	1.75	1.57	1.41	1.28	1.18
18 (m)	--	--	--	1.76	1.61	1.46	1.31	1.18	1.07	0.98
21 (m)	--	--	--	1.51	1.38	1.25	1.12	1.01	0.92	0.84
24 (m)	--	--	--	1.32	1.21	1.10	0.98	0.88	0.80	0.74
27 (m)	--	--	--	1.17	1.08	0.98	0.87	0.79	0.71	0.66
30 (m)	--	--	--	1.06	0.97	0.88	0.79	0.71	0.64	0.59
33 (m)	--	--	--	0.96	0.88	0.80	0.71	0.64	0.59	0.54
36 (m)	--	--	--	0.88	0.81	0.73	0.66	0.59	0.54	0.49

表 6.1.10 要求される標準せん断力係数 ( $a = 3.0$ 、浸水深 15m、開口率 0.3)

奥行階数	3F	4F	5F	6F	7F	8F	9F	10F	11F	12F
3 (m)	--	--	--	19.0	18.2	17.4	16.5	15.6	14.6	13.7
6 (m)	--	--	--	9.50	9.12	8.70	8.26	7.79	7.32	6.83 <sup>46</sup>
9 (m)	--	--	--	6.33	6.08	5.80	5.51	5.20	4.88	4.56
12 (m)	--	--	--	4.75	4.56	4.35	4.13	3.90	3.66	3.42
15 (m)	--	--	--	3.80	3.65	3.48	3.31	3.12	2.93	2.74
18 (m)	--	--	--	3.17	3.04	2.90	2.76	2.60	2.44	2.28
21 (m)	--	--	--	2.72	2.61	2.49	2.36	2.23	2.09	1.96
24 (m)	--	--	--	2.38	2.28	2.18	2.07	1.95	1.83	1.71
27 (m)	--	--	--	2.11	2.03	1.94	1.84	1.74	1.63	1.52
30 (m)	--	--	--	1.90	1.83	1.74	1.66	1.56	1.47	1.37
33 (m)	--	--	--	1.73	1.66	1.59	1.51	1.42	1.33	1.25
36 (m)	--	--	--	1.59	1.52	1.45	1.38	1.30	1.22	1.14

## 6.2 予想津波高に応じた津波浸水域検索システム

### 6.2.1 背景

平成23年の東日本大震災を教訓に、最大クラスの津波が発生した際も「なんとしても人命を守る」との考え方の下、各都道府県では「津波防災地域づくりに関する法律」に基づく最大クラスの津波浸水想定の設定が進められているとともに、関係市町村では、当該津波浸水想定を踏まえた津波ハザードマップの作成や避難訓練の実施等の警戒避難体制の整備が行われているが、実際には様々な規模・震源での津波の発生が想定されるため、これら最大クラス以外の津波に対しても、住民避難や水門操作等の事前の防災行動を適切に行うことが防災・減災上重要である。

このため、国総研海岸研究室では、地方公共団体の防災担当者等による防災行動を支援するための情報ツールの一つとして、津波予報で発表される「予想津波高」に応じた津波浸水域図の作成手法を検討した。

### 6.2.2 気象庁の津波予報の手法を参考にした浸水域図作成手法

気象庁の津波予報では、地震発生後約3分で地震の位置と規模から津波高や到達時間を予測し、5段階（「1m」、「3m」、「5m」、「10m」、「10m超」）の区分で、予想津波高が発表される。地震発生後に津波高の計算を開始すると、津波到達までに津波予報が間に合わないことから、気象庁では、あらかじめ津波を発生させる可能性のある断層を設定して津波の数値シミュレーションを行い、その結果を津波予報データベースとして蓄積し、地震発生時に当該データベースから津波高や到達時間を検索することで津波予報を発表するという方法がとられている。

津波予報を踏まえ、地方公共団体の防災担当者等は初動対応を開始することから、予想津波高に対応して浸水範囲や浸水深が分かる津波浸水域図を事前に作成しておくことで、地震発生直後の迅速な対応に役立つため、気象庁の津波予報データベースの手法を参考に、予想津波高に対応した津波浸水域図の作成手順を次のように検討し、ケーススタディを行った。（図-6.2.1）

- (1) 想定される断層モデルを複数設定
- (2) (1)の各断層モデルについて、津波高を計算
- (3) (2)の計算結果から、津波予報における津波高の各区分に相当する断層モデルを複数抽出（区分毎に津波高上位10ケース抽出）
- (4) (3)で抽出した断層モデルで浸水計算を行い、計算結果を津波高区分毎に重ね合わせ、予想津波高毎の津波浸水域図を作成

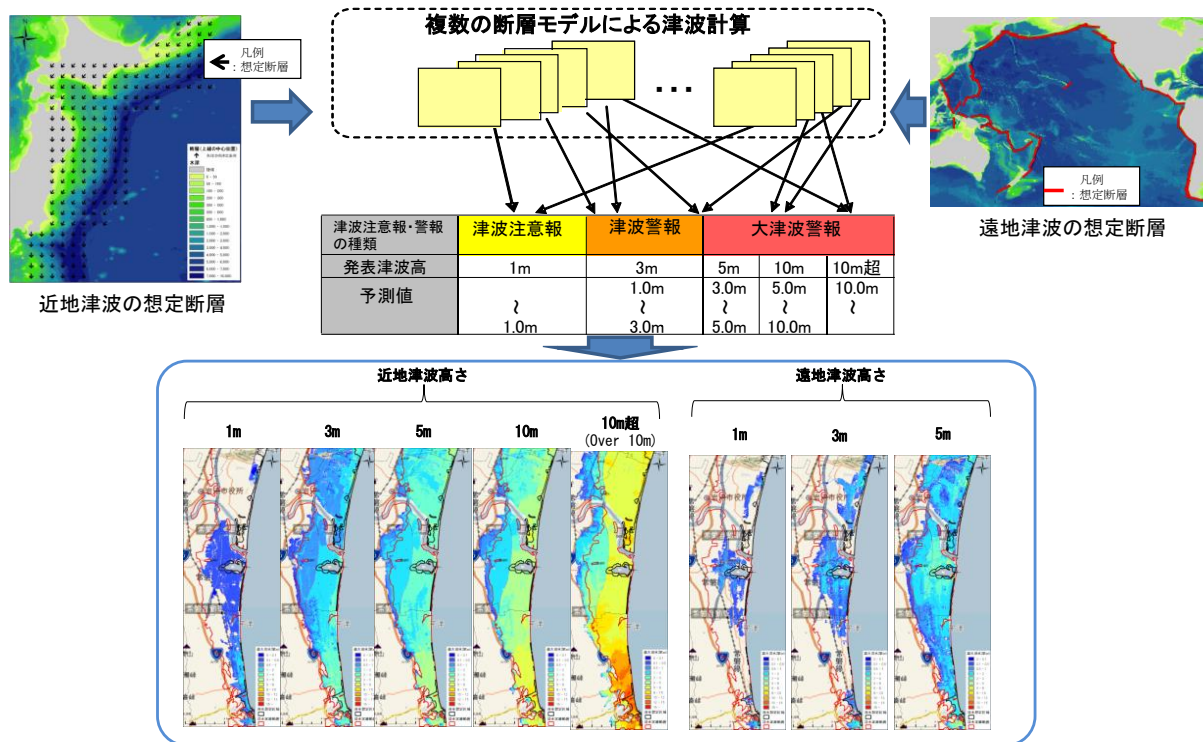
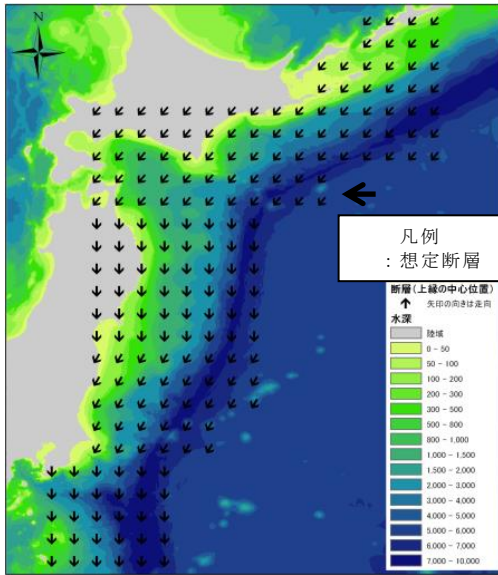


図-6.2.1 予想津波高に応じた津波浸水域図作成の流れ

(1)の断層モデルについては、気象庁の津波予報データベースで用いられる手法を参考に断層位置や断層パラメータを複数設定した。(図-6.2.2、6.2.3)

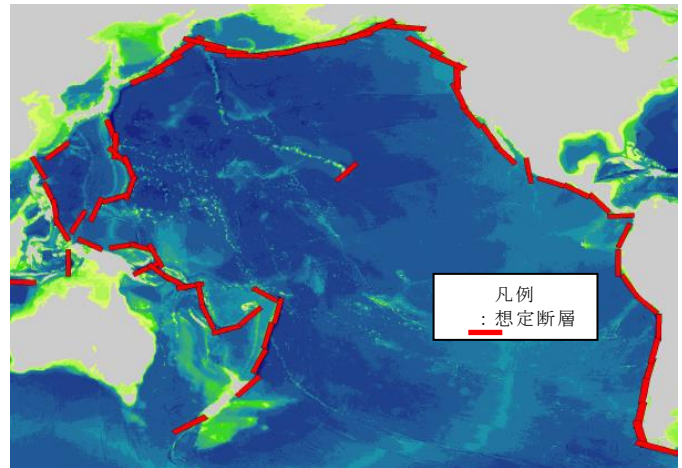
なお、計算の省力化を図る観点から、気象庁の津波予報データベースで用いられる断層パラメータのうち、津波高が比較的小さいと想定されるもの(近地津波の場合：震源深さ100km、マグニチュード6.2、遠地津波の場合：マグニチュード7.5、8.0)について、津波浸水域の計算上、設定を省略した。

また、気象庁の津波予報において、短時間での規模推定が困難なマグニチュード8を超える近地津波について、津波浸水域の計算上はケース設定が必要と考え、マグニチュード8.6を設定した。遠地津波についても、津波高の高いケースを想定し、気象庁の津波予報データベースで用いられるマグニチュード8.5に加え、1960年チリ地震を参考にマグニチュード9.5を浸水域計算上の断層パラメータとして設定した。



パラメータ	本検討での設定	(参考)気象庁の津波予報における設定
震源深さ	0km~60km (20kmきざみ)	0km~100km (20kmきざみ)
マグニチュード	6.8~8.6 (0.6きざみ)	6.2~8.0 (0.6きざみ)
走向	海溝軸に平行	海溝軸に平行
すべり角	90度(固定)	90度(固定)
傾斜角	45度(固定)	45度(固定)

図-6.2.2 近地津波に係る想定断層の配置図とパラメータ



パラメータ	本検討での設定		(参考)気象庁の津波予報における設定
震源深さ	10km		10km
マグニチュード	8.5	9.5	7.5~8.5 (0.5きざみ)
走向	海溝軸に平行		海溝軸に平行及び過去の地震を参考に決定
すべり角	90度(固定)		90度(固定)
傾斜角	45度(固定)		45度(固定)

図-6.2.3 遠地津波に係る想定断層の配置図とパラメータ

### 6.2.3 既往断層モデルをもとに予想津波高に応じた浸水域図を作成する手法

6.2.2の手法は、気象庁の予想津波高に応じた浸水域図を示すことができる点で警戒避難の面で有用であるが、数多くの想定断層での計算が必要となるため都道府県の負担が大きいことや、予想津波高ごとの浸水域図自体も複数の想定断層による津波浸水の重ね合わせであり、津波を発生させる断層の位置に応じた警戒避難が十分に行えないという課題がある。

このため、南海トラフの巨大地震モデル検討会(2012)、東南海・南海地震に関する専門調査会(2003)、東海地震に関する専門調査会(2001)といった国が示した断層モデルを活用し、今後発生の可能性が高い断層に絞り込んだかたちで、気象庁の予想津波高と連動した浸水域図の作成方法の研究を行った。なお、国が示した断層モデルは、各都道府県において津波浸水想定や設計津波水位の設定の際に活用されるものであり、これらの設定(又は見直し)の際に一体となって予想津波高別(規模別)の津波浸水域図の作成を行えば、6.2.2の手法に比べて都道府県の負担が少ないことを期待するものである。また、断層位置がある程度特定されることから、地震速報で示される断層位置とも連動した津波浸水域図を示

すことで、より合理的な警戒避難行動を期待するものである。

本研究では、徳島県の沿岸をモデルケースに既往断層モデルと気象庁の予想津波高を連動させた浸水域図の作成を以下の手順で行った。全体の流れを図-6.2.4に示す。

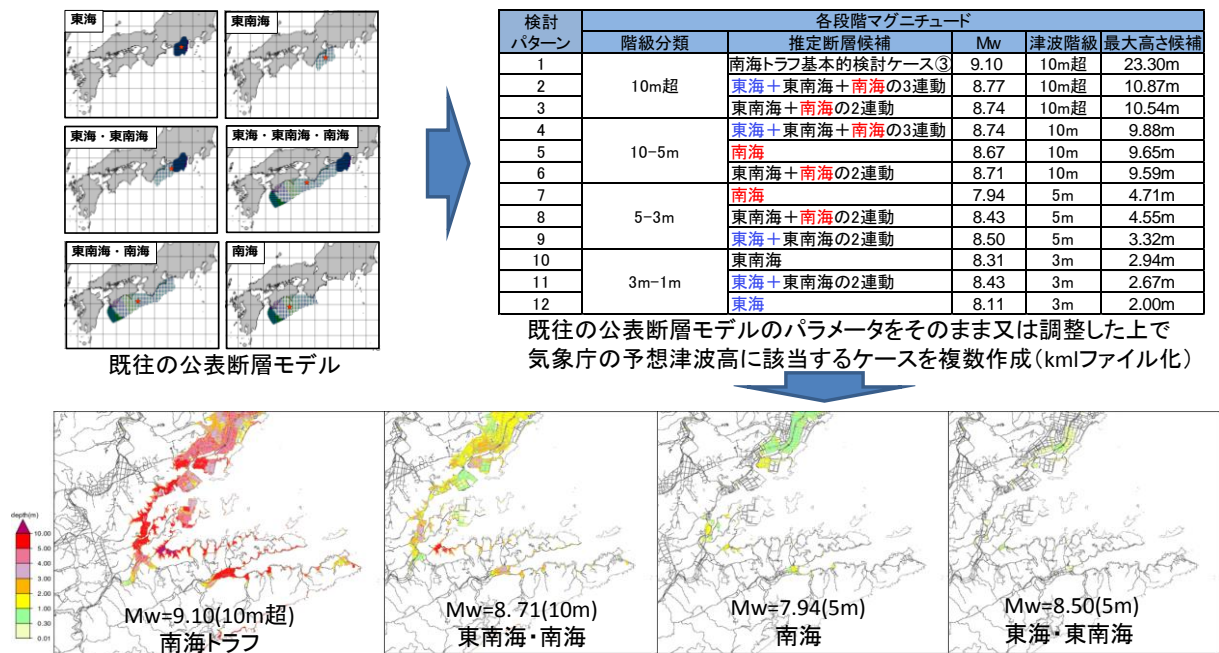


図-6.2.4 既往の断層モデルをもとに予想津波高に応じた浸水域図を作成する方法

### (1) 断層パラメータの設定

断層パラメータの設定について、図-6.2.5に示す。既往の断層モデルによる設定を第1段階とし、気象庁の予想津波高の階級がそろそろよう断層モデルのパラメータを調整し、12パターンのケースを設定した(図-6.2.6)。

### ■各段階のマグニチュードの設定

想定地震	1段階目			2段階目			3段階目			参考: 中央防災会議 (2003)の 津波高(m)
	津波警報の階級	Mw	最大津波高(m)	津波警報の階級	Mw	最大津波高(m)	津波警報の階級	Mw	最大津波高(m)	
東海地震、東南海地震、南海地震の3連動	10m超	8.77	10.87	10m	8.74	9.88	-	-	-	9.56
東南海地震、南海地震の2連動	10m超	8.74	10.54	10m	8.71	9.59	5m	8.43	4.55	9.55
東海地震、東南海地震の2連動	3m	8.43	2.67	5m	8.50	3.32	-	-	-	3.17
東南海地震	3m	8.31	2.94	-	-	-	-	-	-	2.23
南海地震	10m	8.67	9.65	5m	7.94	4.71	-	-	-	8.80
東海地震	3m	8.11	2.00	-	-	-	-	-	-	-
南海トラフ基本的検討ケース③*	10m超	9.10	23.30	-	-	-	-	-	-	-

\* 徳島県の計算条件を使用

気象庁津波警報・注意報の階級に対応したマグニチュードMwと最大津波高を設定した。

・1段階目は中央防災会議断層データ(2001, 2003年)のマグニチュードに対応した設定した。

・2段階目は津波警報10m~5m, 5m~3mの階級区分の上限に近い津波高さとして設定した。

→なお、東海地震、東南海地震の2連動については、中央防災会議(2003)の津波高が3.17mであることから、この値に近くなるようにマグニチュードを設定した。

・3段階目は東南海地震、南海地震の2連動について歴史地震でマグニチュード8.4クラスの地震が記録されていることを参考に設定した。

※2段階のマグニチュードの設定は、中央防災会議の想定地震6組の地震断層と起こりうるマグニチュードと津波警報階級の組み合わせにより11パターン<sup>※</sup>の断層を設定した。残りの断層の1ケースは南海トラフの基本検討ケース③(紀伊半島~四国沖に「大すべり域+超大すべり域」を設定)とし合計12パターンとした。

図-6.2.5 断層パラメータの設定

検討 パターン	各段階マグニチュード			
	津波階級	Mw	推定断層候補	最大高さ候補
1	10m超	9.10	南海トラフ基本的検討ケース③	23.30m
2	10m超	8.77	東海＋東南海＋南海の3連動	10.87m
3	10m超	8.74	東南海＋南海の2連動	10.54m
4	10m	8.74	東海＋東南海＋南海の3連動	9.88m
5	10m	8.67	南海	9.65m
6	10m	8.71	東南海＋南海の2連動	9.59m
7	5m	8.79	南海	4.71m
8	5m	8.43	東南海＋南海の2連動	4.55m
9	5m	8.50	東海＋東南海の2連動	3.32m
10	3m	8.31	東南海	2.94m
11	3m	8.43	東海＋東南海の2連動	2.67m
12	3m	8.11	東海	2.00m

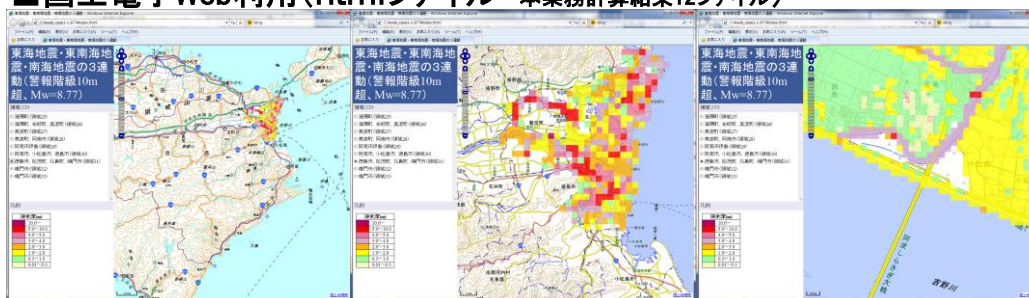
図-6.2.6 既往断層モデルと気象庁の予想津波高を連動させたケース設定

## (2) 利活用に留意した津波浸水域図の作成

(1)の12ケースの断層モデルにより、浸水域図の作成を行った。なお、単に浸水域図の作成を行うだけでなく、利活用面にも留意し、地理院地図やGoogle Earthに表示できるファイル形式で作成した(図-6.2.7)。

また、気象庁が発表する地震・津波に関する情報に対し、最も近い想定津波浸水域図が速やかに検索できるよう、検索フローチャート(図-6.2.8)並びに検索手順表(図-6.2.9)を作成した。

### ■国土電子Web利用(htmlファイル 本業務計算結果12ファイル)



### ■Google Earth利用(kmlファイル 本業務計算結果12ファイル)

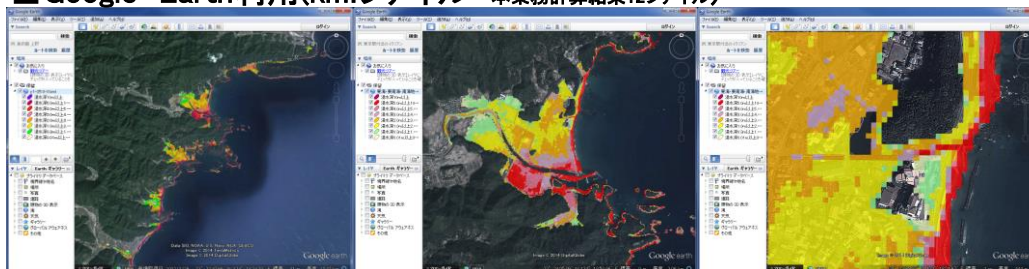


図-6.2.7 地理情報と連動できるファイル形式での津波浸水域図の作成

■各段階のマグニチュードで設定したMwの階級で分類					
検討パターン	各段階マグニチュード				
	階級分類	推定断層候補	Mw	津波階級	最大高さ候補
1	Mw ≥ 9.0	南海トラフ基本的検討ケース③	9.10	10m超	23.30m
2	9.0 > Mw > 8.75	東海+東南海+南海の3連動	8.77	10m超	10.87m
3	8.75 ≥ Mw > 8.70	東南海+南海の2連動	8.74	10m超	10.54m
4		東海+東南海+南海の3連動	8.74	10m	9.88m
5	8.70 ≥ Mw > 8.60	南海	8.67	10m	9.65m
6		東南海+南海の2連動	8.71	10m	9.59m
7	8.60 ≥ Mw > 8.45	東海+東南海の2連動	8.50	5m	3.32m
8		東南海+南海の2連動	8.43	5m	4.55m
9	8.45 ≥ Mw > 8.20	東南海	8.31	3m	2.94m
10		東海+東南海の2連動	8.43	3m	2.67m
11		南海	7.94	5m	4.71m
12	8.20 ≥ Mw	東海	8.11	3m	2.00m

- 手順
- ①各段階のマグニチュードを断層のタイプが重複しないようにMwを階級分類する。
  - ②震度分布の拡がりからMwを推定し当てはまる階級を選択する。
  - ③推定方法1また2で断層のタイプを選択する。
  - ④合致する断層がある場合はその浸水分布を表示する。
  - ⑤ない場合は同階級で最大の高さの浸水分布を表示する。

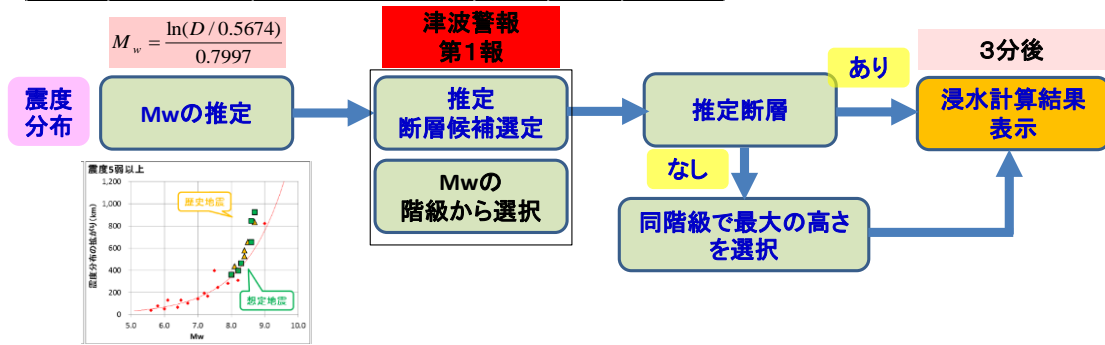


図-6.2.8 検索フローチャート

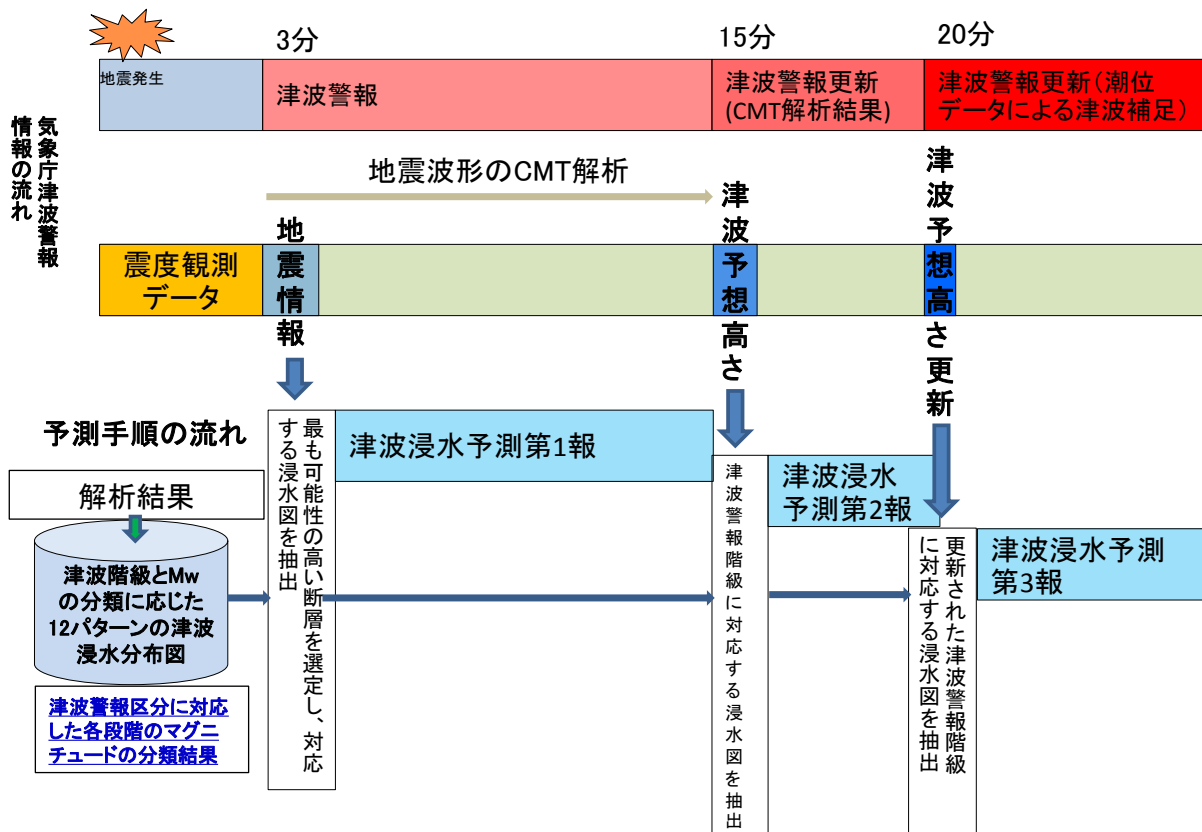


図-6.2.9 検索手順表

### (3) 研究成果の提供

(2)の一連の研究成果については、平成26年3月に徳島県に提供を行うとともに、同県の防災担当者と意見交換を行った。防災担当者からは、

- 1) 徳島県におけるレベル2津波の津波浸水想定は複数の断層の重ね合わせであることから住民避難の面では安全側が良いが、地方公共団体としては、断層位置が異なるケースの津波浸水域図の方が具体的な防災行動を事前に検討しやすい。
- 2) 毎年の防災訓練はレベル2津波の津波浸水想定という1つのケースでしか訓練を行ってこなかったため、今回のような複数ケースの津波浸水域図があれば、毎年異なる想定での訓練ができ、防災対応力の向上が期待される。
- 3) 徳島県では地理情報と連動した防災システムを構築しており、電子データでの津波浸水域図の活用は可能である。

といった意見を聴くことができた。

## 6.3 避難安全性評価手法、減災のための市街地整備計画手法開発

### 6.3.1 津波避難シミュレータの開発

東日本大震災では多数の人的被害が発生した。また、この地震による岩手県・宮城県・福島県における死因は溺死が92.4%であり、津波対策の重要性が指摘されることとなった。津波対策のうち人的被害軽減としては、短期的には迅速かつ確な避難誘導等が求められる一方、中長期的には海岸保全施設等の整備、土地のかさ上げ、避難場所の指定、津波避難ビルや避難路・避難階段の整備、土地利用・建築制限など、ハード・ソフトを組み合わせた地域づくりの推進が求められる。

避難場所・津波避難ビル・避難経路の整備や、土地利用制限といった市街地整備による津波対策については整備に時間を要すること、膨大な費用が必要となることから、効果的・効率的な整備を進めていくことが必要となる。そのため、市街地の津波避難安全性評価に基づきながら効率的に整備していく必要がある。

そこで本研究では、津波避難安全性評価手法として津波避難シミュレータの開発を行った。開発に際しては、実際に行われた避難行動を再現するのではなく、むしろ、避難行動を単純化・理想化し、ある程度合理的・理想的な行動を前提として、その中で、市街地の構造としてどの程度の安全性を確保できるかを評価できるモデルを作成することに主眼を置いた。また、避難手段としては、徒歩避難及び車両避難によるものとした。

#### (1) 徒歩避難のモデル開発

避難者の避難開始、避難経路及び避難先の選択等については、下記に基づくものとした。

- ・火災や津波が迫ると避難開始
- ・安全な避難地を選択
- ・安全な避難経路を選択
- ・避難地に危険が迫ると再避難
- ・一定以上の火災による熱を受ける又は一定以上の水深になると避難失敗

避難行動モデルについては、エージェントモデルを前提として、周囲の情報（避難経路の混雑状況、火災の状況、津波の状況、避難指示等）、身体的特性（歩行速度、通過可能な



段差や傾斜等)のほか、選好性、平時からの知識等に基づき、エージェント(避難者)が個別に状況判断して行動を決定するものとした。

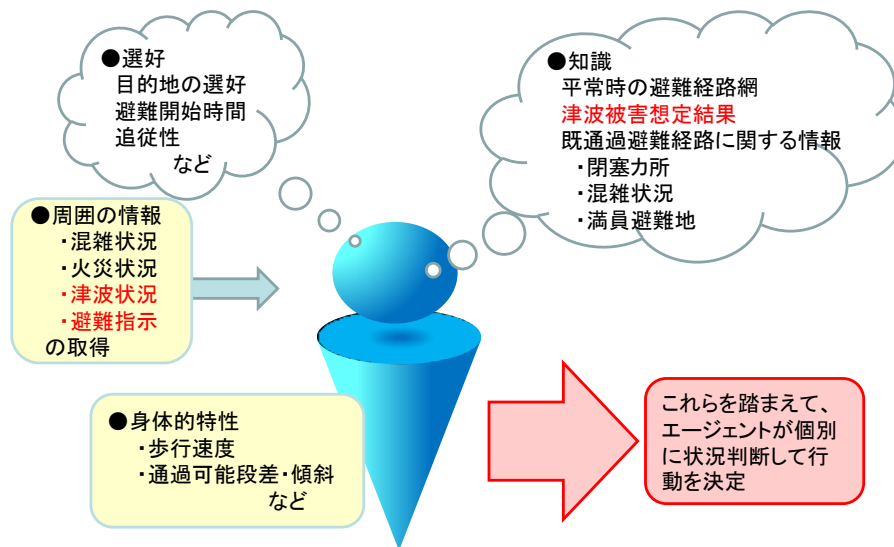


図-6.3.1 避難行動モデルの概念図

避難開始の意思決定については、現在地における避難者が認知する津波リスク(以下、「認知津波リスク」)が避難者自身の許容リスクを超えた時点で避難を開始するものとした。ただし、時間的な切迫性を認識していない場合にはすぐには避難を開始せず、他の行動(例えば家族の安否確認等)をとった上で、現在地から周囲の避難場所までの総合的な避難リスク最小値が、避難者自身の許容リスクを超えた時点で避難行動を開始するものとしている。なお、避難場所等に到着した場合であっても、津波に関する情報の更新によって認知到達リスクが増加すれば、再度、別の避難場所への避難を開始するものとしている。

避難目的地及び目的地への移動経路の選択モデルについては、避難者は周囲に複数の避難場所を認知している場合、その中から特定の1つの避難場所を選択し、当該避難場所までの移動経路を選択するものとした。これらの選択は、現在地から避難場所までの移動経路上で津波に巻き込まれるリスク及び避難場所が津波に巻き込まれるリスクを総合した総合避難リスクが最小となる選択を行うものとした。なお、避難場所を1つも認知していない場合には、目的地を失い、周囲の避難者の行動に追従して移動を行うものとした。

## (2) 車両避難のモデル開発

交通シミュレータについては現在様々なものが開発されているが、本研究では津波避難を円滑化するための市街地整備に資するよう、交通挙動を表-6.3.1及び図-6.3.2のように設定することによって開発を進めた。

表-6.3.1 津波避難シミュレータで表現する交通挙動

箇所	影響要因	交通挙動	考え方
A 単路部	a1.道路閉塞 (建物倒壊、液状化等)	・道路寸断に対応した避難経路の変更	・都市構造の安全性評価の上で重要
		・幅員減少に対応した速度低下(合流)	
	a2.複数車線	・複数車線における1車線のみ の滞留	・避難遅れに影響する要素
B 交差点部	b1.信号機停止	・交錯交通との相互干渉	・全ての信号機への非常用電源設置は非現実的 ・交互通行は、通常渋滞時の挙動に近く、切迫避難でない限りは現実的
	b2.信号制御	・信号機制御に従った通行	・非常用電源設置及び防災型信号設置による効果を検証
	b3.交差点先詰り	・交差点手前での空き待ち	・渋滞の伝播を反映
		・交差点での経路変更	・渋滞時の経路変更を反映
	b4.右折	・対向直進車に対する間隙待ち	・避難遅れの重要な要素
		・右折待ちに伴う後続直進車の阻害	・避難遅れの重要な要素
	b5.横断歩行者	・横断歩行者に対する間隙待ち	・避難遅れの重要な要素
b6.合流	・施設(街路)から幹線道路への合流時の間隙待ち	・交互通行は非現実的な合流なため(渋滞時は交互通行)	
C 避難先	c1.避難施設の容量	・駐車容量不足による滞留	・避難遅れの重要な要素
		・入口容量不足による滞留	・避難遅れの重要な要素

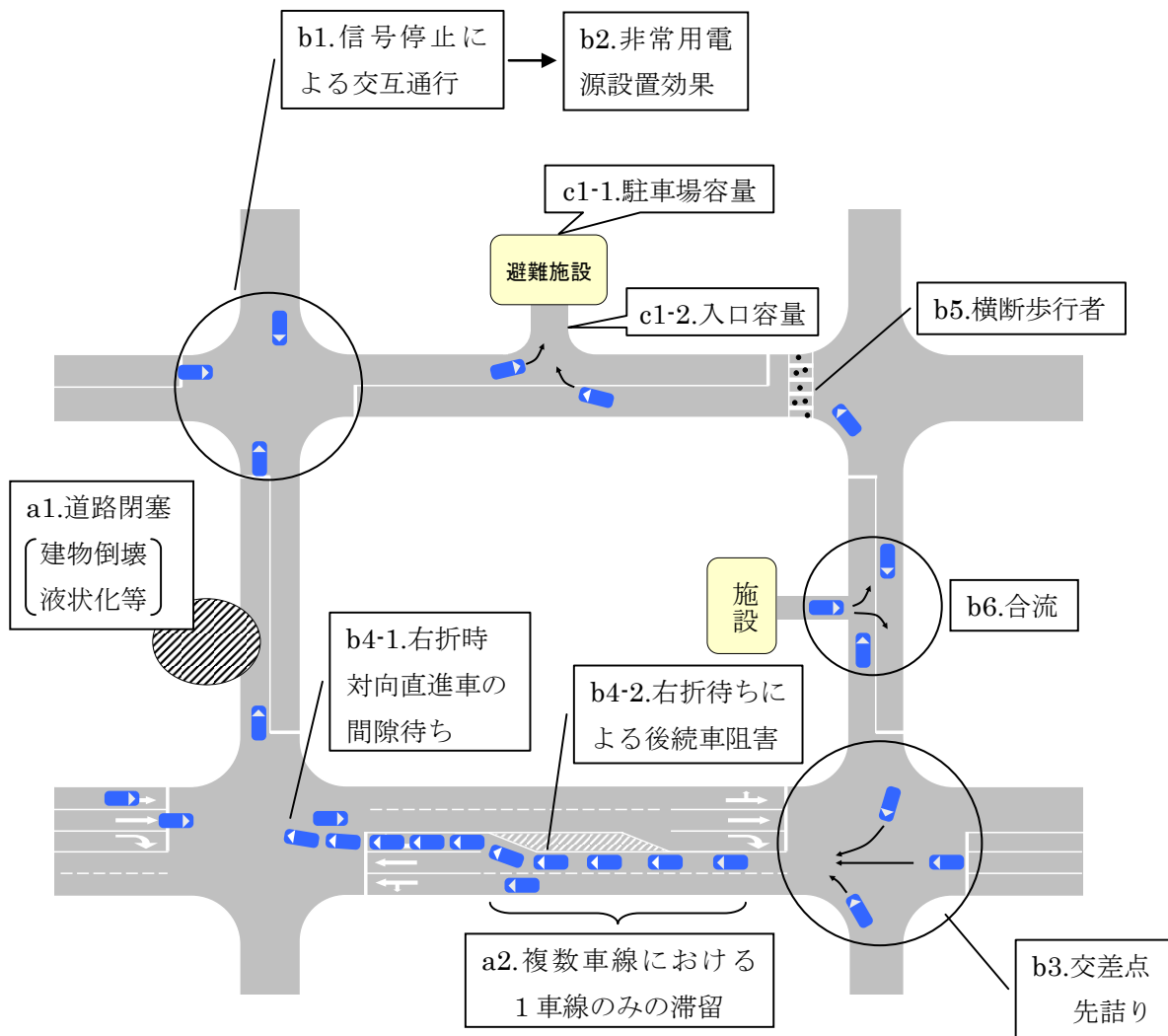


図-6.3.2 表現した交通挙動

車両の移動については、車両の密度（ $K$ ）に応じて通行可能な交通容量（ $Q$ ）が規定される $QK$ 曲線に従うものとして計算を簡略化して大規模ネットワークに対応するとともに、非現実的な容量が出現することの回避をはかった。また、車線数別容量や交差点における進行方向別の容量及び右折付加車線の影響も考慮可能なものとした。なお、既存の $QK$ モデルでは対応が困難なものもあるため、下記の改良を行うことで問題の解決を図った。

- ①交差点進行方向別容量は時間一定ではなく、逐次の交錯交通量によって時間可変
  - ・交錯交通の密集状況が時間によって大きく変化するため、交錯交通は、車両相互と車両対歩行者で分類する。
- ②複数車線における車線別混雑状況を計算に反映
  - ・通常時の都市部における慢性的な渋滞とは特性が異なるため、 $QK$ モデルにおける右折レーンの考え方を拡張することで対応。
- ③任意時刻におけるリンク上の位置（座標）を算出
  - ・個別車両のログから算出する。
- ④経路選択
  - ・一般的な車両モデルと同様の選択性を追加する。

以上の検討・設定等に基づいた車両モデルの計算フローの全体像は、図-6.3.3のとおり整理出来る。

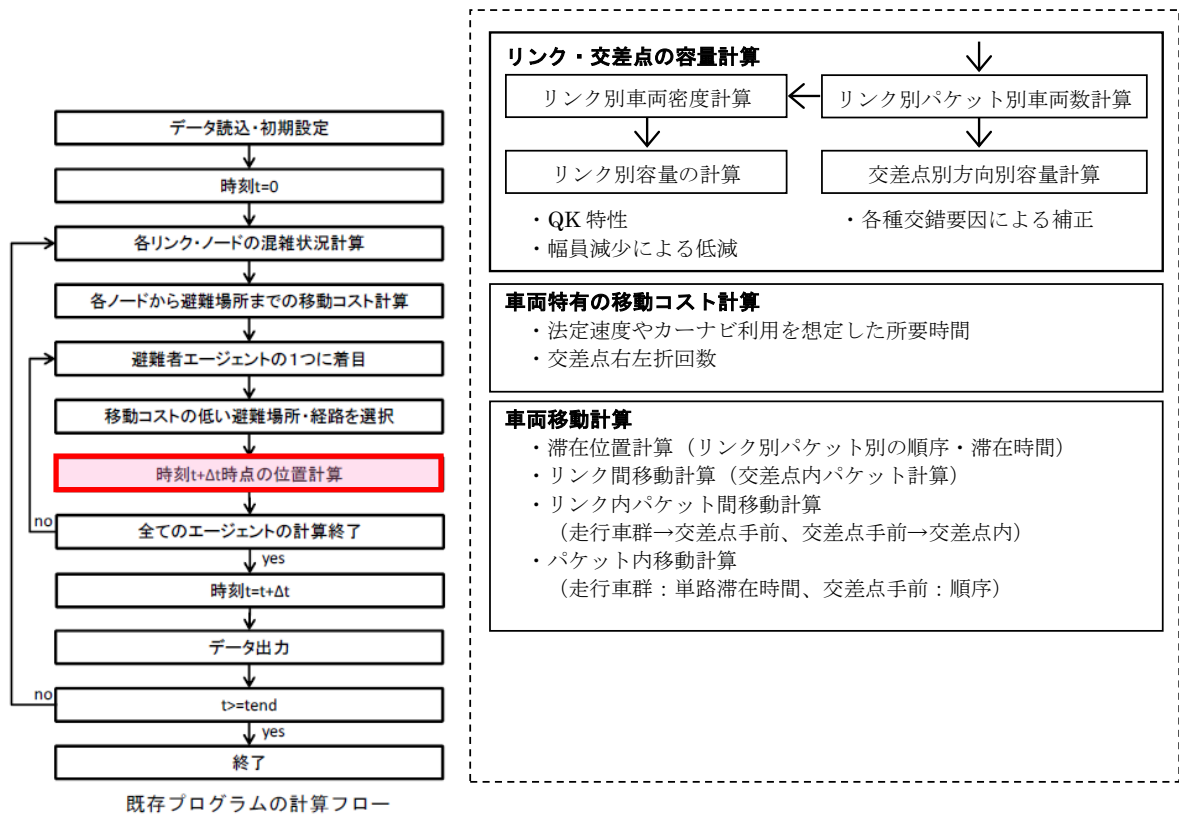


図-6.3.3 車両交通モデル計算フロー

なお、車両移動計算においては、個別の車両の移動を計算するのではなく、車両群をパケット化することで、計算の簡略化を図った。

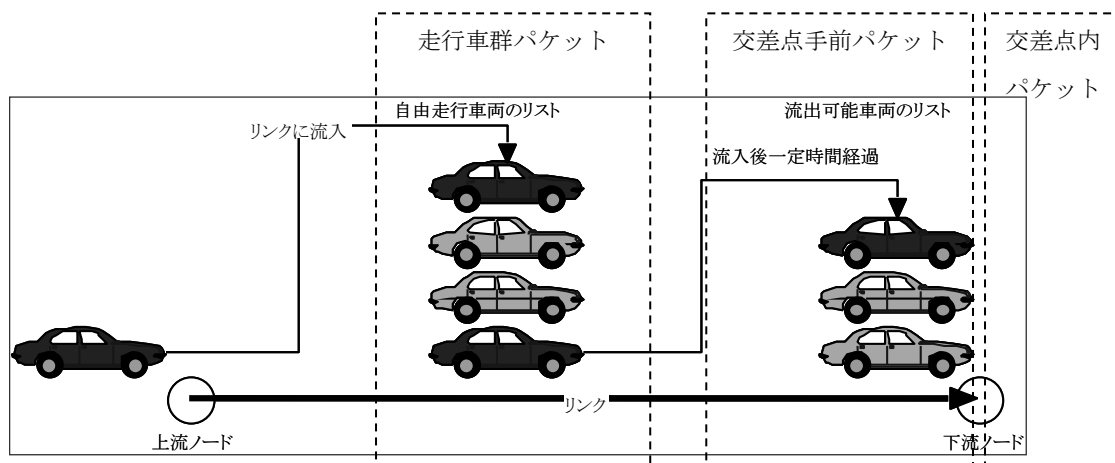


図-6.3.4 車両移動計算の概念図

開発したモデルについては、(一社)交通工学研究会の提唱する「verificationマニュアル」に従った検証項目に加え、津波避難時の移動計算に必要な以下の項目について検証を行った(表-6.3.2, 図-6.3.5参照)。その結果、概ね理論通りの結果が得られた。

表-6.3.2 検証項目一覧

番号	検証項目	種別	対応
1	車両発生 (評価対象内に車両が流入発生する際の挙動確認)	ネットワーク端に車両が流入する場合	マニュアルに従って検証
		建物付近に車両を発生させる場合	独自対応(指定した建物に車両が配置されるかを検証)
2	ボトルネック容量と飽和交通流率 (ボトルネック容量が安定して再現されるかの確認)	1車線の場合	マニュアルに従って検証
		複数車線の場合	独自対応(交通容量を変化させることで検証)
3	渋滞の延伸と解消 (渋滞の変化を正しく再現することが出来るかの確認)		マニュアルに従って検証
4	合分流部の容量 (合流部のボトルネック容量と合流比, 合流/被合流側での渋滞状況の再現性を確認)	分合流車線部	マニュアルでは検証項目となっているが、本モデルでは検証出来ない
		沿道施設からの合流時	独自対応(本線交通量に応じた合流台数を確認)
5	信号交差点での右折容量 (交差点を右折する交通容量が対向直進の交通量によって低下しているかの確認)	対向直進車の影響	マニュアルに従って検証
		道路の別による変化	独自対応(幹線道路と街路等での右折時の容量を検証)
6	経路選択 (移動コストに応じて経路選択がモデルどおりとなっているかの確認)		マニュアルに従って検証

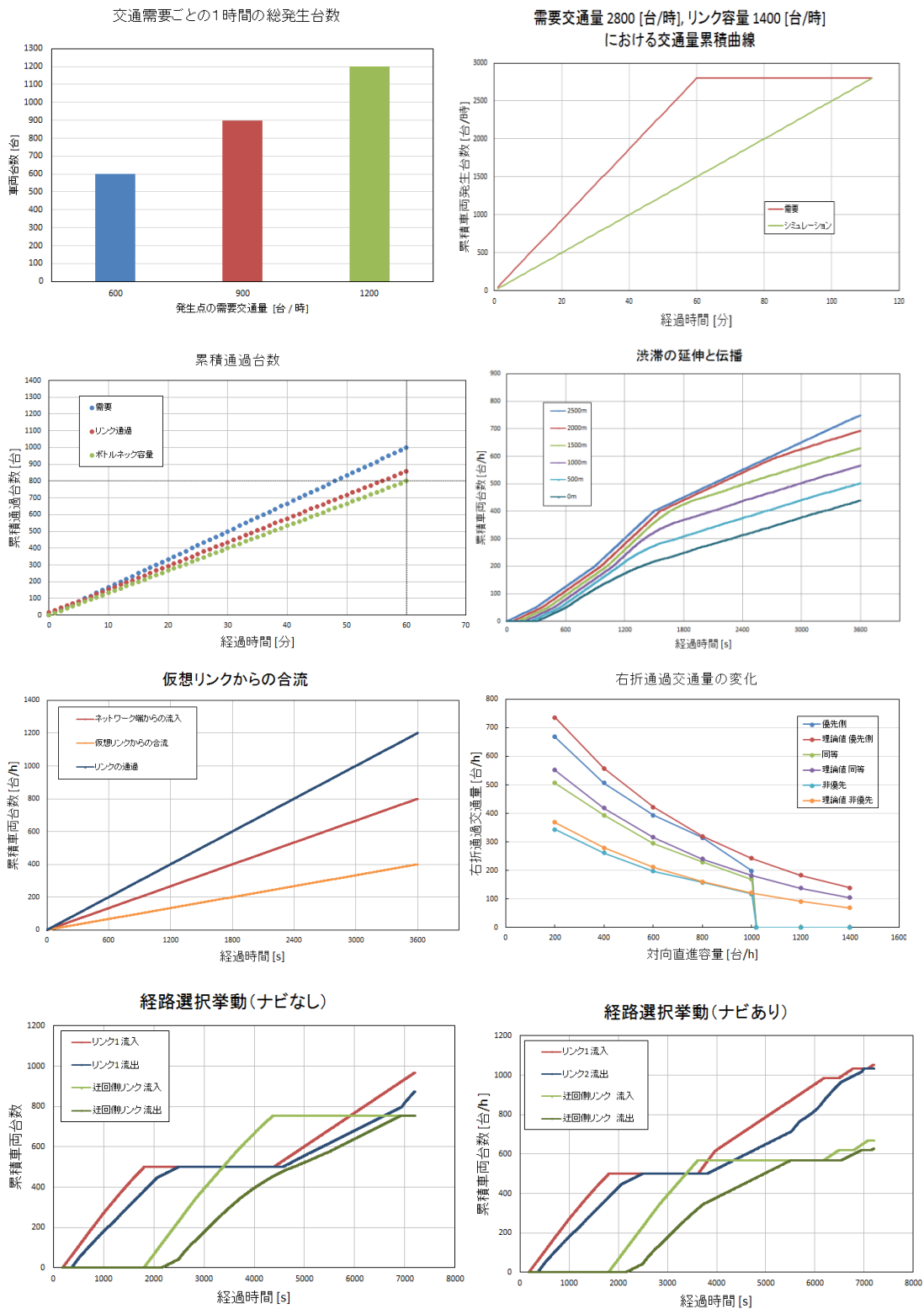


図-6.3.5 検証結果一覧

## 6.4 津波防災都市づくりにおける防災拠点機能の確保策の検討

### 6.4.1 非被災沿岸都市での防災拠点機能の確保策のケーススタディ

東日本大震災津波被災都市での都市防災拠点機能の喪失・回復等の実態調査結果(2.6)を踏まえて、平成25～26年度には、南海トラフ巨大地震の津波による被災想定都市において関係の自治体等の協力を得て、防災拠点機能確保のケーススタディを行った。対象は、津波防災地域づくり法に基づく最大規模の津波被災想定が示された東海～南海トラフ沿岸において、中心部を含む広範囲が浸水区域に含まれる徳島県美波町、和歌山県田辺市及び静岡県焼津市とした。

ケーススタディ都市においては、上記の津波被災想定や地域防災計画の想定をもとに、津波や地震動による都市防災拠点施設の被災等のパターンを複数設定した。その上で、当該都市の都市防災拠点施設に関するデータや地域防災計画やBCP等を収集・整理し、施設管理者や自治体担当部局へのヒアリング等も踏まえ、防災拠点施設の津波被災等の様相及び防災拠点機能の対応シナリオを作成した。

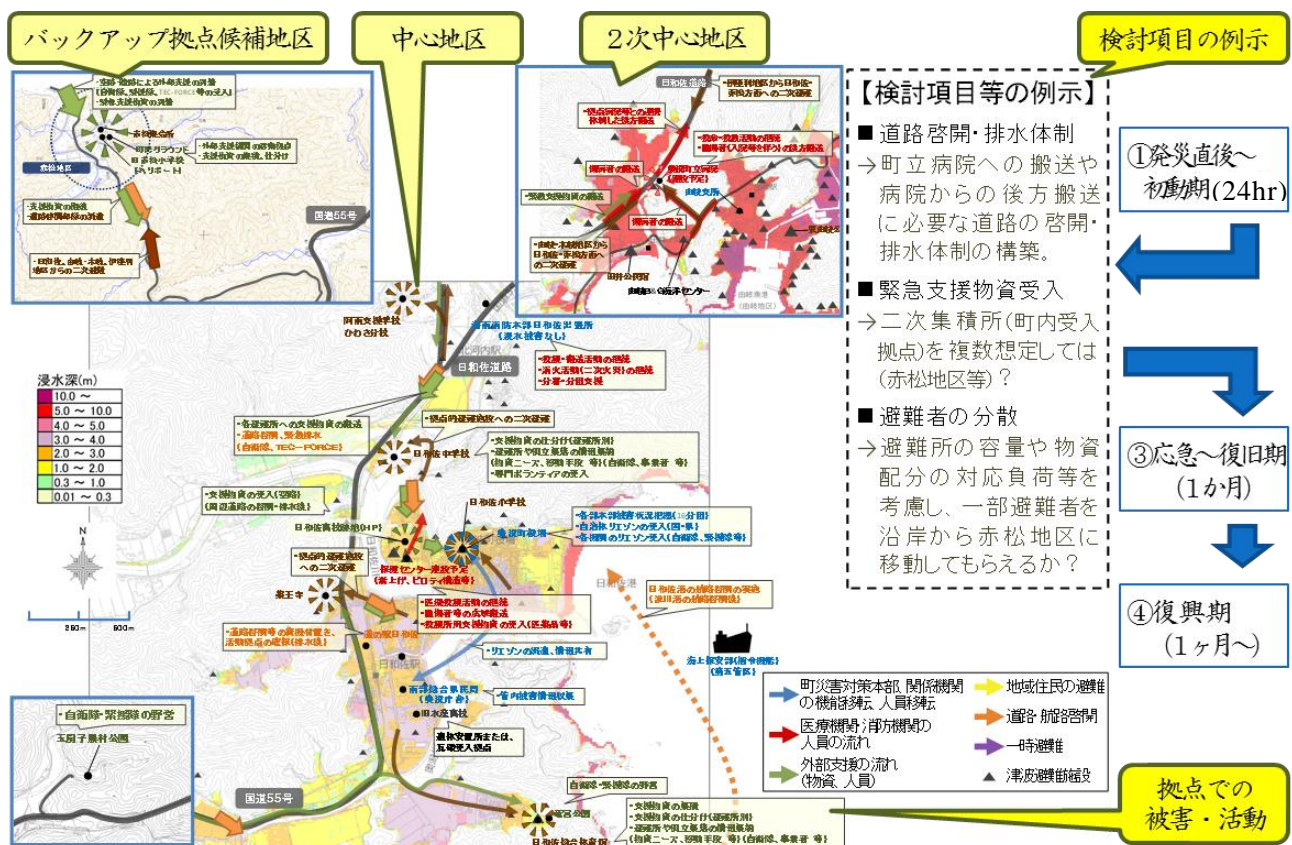


図-6.4.1 徳島県美波町での活動展開図の作成例：都市内での検討



図-6.4.2 徳島県美波町での活動展開図の作成例：広域レベルでの検討

対応シナリオは、東日本大震災被災都市における調査結果から得られた知見を活用しつつ、都市防災拠点機能の活動の概要及びそれに伴う人・モノ・情報の動き等の相互関係を網羅する災害対応フロー図、及び対応フェーズ毎のこれらの活動の状況等を地図上に図化した活動展開図として整理した。活動展開図においては、大都市圏から当該都市への広域支援の到達に、途中経路の浸水等被害により困難が予想されることや、隣接都市を含む圏域での活動展開が想定されていること、散在する沿岸集落の状況の考慮の必要性などから、都市及び広域を対象とする2種類を作成した（図-6.4.1、図-6.4.2）。シナリオの整理と記載にあたっては、本部機能、関係機関の機能移転をはじめ、医療・消防機関、地域住民、外部支援の動きを記載した。さらに、各機関の対応に併せて、初動期における住民や各機関職員の一時避難、応急・復旧期における道路・航路啓開の情報等についても記載した。



その上で、ケーススタディ都市の関係機関（自治体及び県（支分局）、警察、消防、災害拠点病院、海上保安庁、国道事務所等の地元機関の担当者を集めて、意見交換会を各2回ほど開催した（図-6.4.3）。意見交換会では、まず、こうしたシナリオや図面をもとに、津波浸水時の各機関の対応と代替施設の確保や、医療救護施設の連携体制、外部支援の受入拠点、道路・航路啓開等についての各機関の方針や考え方などについて確認・情報交換を行った。次に、防災拠点機能が発揮されるために対応が必要と考えられる時期毎の課題を提起するとともに、こうした課題に対応する東日本大震災での教訓や他都市の取組事例等の参考事例を紹介し、災害時における各防災拠点施設の災害対応・復旧指令機能の代替庁舎等における確保とBCP（事業継続計画）の作成や、SCU（広域搬送拠点臨時医療施設）の運用と患者の搬送ルート、DMAT（災害派遣医療チーム）の受け入れ、拠点病院における傷病者や避難住民への対応、想定される外部支援と活動スペースの確保、外部支援の受け入れに係る航路啓開の時間の想定等についての課題や意見、取組みについて議論を交わした。意見交換会を通じて、防災拠点機能・防災拠点施設の強化に必要と考えられる対策や、対策実施による災害対応活動への効果等を整理することができた。

意見交換会の参加者からは、これまで他機関にまたがる実質的な情報交換の場はなく、こういった情報の整理と共有に基づく意見交換会が有意義であったとの意見があった。



図-6.4.3 関係機関との意見交換会

#### 6.4.2 都市防災拠点機能確保のための検討の手引き（案）の検討と作成

以上の検討結果を踏まえて、平成26年度には以下を骨子とする「津波防災都市づくりにおける都市防災拠点機能確保のための検討の手引き（案）」の検討と作成を行った。なお、検討に当たっては表-6.4.1に示す委員を対象とする、表津波防災都市づくりにおける都市防災拠点機能確保のための検討の手引き作成WGを組織し、意見を聞いた。

表-6.4.1 津波防災都市づくりにおける都市防災拠点機能確保のための検討の手引き作成WG委員名簿

座長	牧 紀男	京都大学 防災研究所・地震災害研究センター 教授
委員	渡部 幹	東京海洋大学 特任教授
	大原 美保	独立行政法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター 水災害研究グループ 主任研究員
	日野 康彦	UR都市機構 都市再生部 全国まちづくり支援室 室長代理
	山田 晴彦	静岡県焼津市 都市基盤部 次長
オブザーバ	大島 敦仁	国土交通省 都市局 都市安全課 課長補佐
	山口 悟司	国土交通省 都市局 市街地整備課 課長補佐
協力委員	金子 弘	国土交通省 国土技術政策総合研究所 都市研究部 部長
	木内 望	国土交通省 国土技術政策総合研究所 都市研究部 都市計画研究室 室長
	竹谷 修一	国土交通省 国土技術政策総合研究所 都市研究部 都市防災研究室 室長
	勝又 濟	国土交通省 国土技術政策総合研究所 都市研究部 都市開発研究室 室長
	久保田 裕二	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 環境・設備基準研究室 主任研究官
	竹下 哲也	国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室 主任研究官

### (1) 手引き（案）作成の主な目的・効果

津波災害時における都市防災拠点施設の機能の強化に係わる計画と整備を、防災都市づくりの一環と位置づけ、これらの施設が津波災害時の活動拠点としての機能を発揮できるよう、市町村が他機関と協力して総合的に検討する手順を解説するものである。

手引きによる検討過程を通じ、必要な施策を市町村の都市部局や企画・政策部局等のまちづくりを所管する部局において、防災都市づくり計画、津波防災地域づくり推進計画、国土強靱化地域計画に反映することができる。防災・危機管理部局においても、地域防災計画、BCP、地区防災計画、津波避難計画、警戒区域指定等の場面で、都市防災拠点施設の防災機能強化の効用を検証できる。また、検討において作成した資料は、平時の防災訓練におけるシナリオ検討や広域支援を行う関係機関から建物レベルの施設管理者まで多様な関係主体との防災対策の調整協議のたたき台資料としても活用することが可能である。

### (2) 手引き（案）の構成

手引き案では、想定される災害対応に裏付けられた計画策定やまちづくりに係る以下の具体的な検討手順を、参照資料、参考事例とともに解説している（図-6.4.4）。

①都市防災拠点施設に係わる被害想定や災害対応業務、既往の整備計画など、基礎情報を収集・分析し、前提となる被災シナリオを抽出・整理する。

- ②発災後に展開される災害対応の各シナリオに基づく、時系列での活動展開と相互の関連を、災害対応フロー図及び空間展開図として整理し、都市防災拠点機能と対応時期の組み合わせの項目毎に、ボトルネックとなりうる課題を抽出する。
- ③想定される災害対応上の課題について、総合的な防災まちづくり事業の中で、対策を講じていくこととし、事前対策としてのソフト及びハードの取り組みからなる計画策定等の多様な対応策を実施可能時期毎に整理する。

### **(3) 手引き（案）の公表**

作成した手引き（案）については、関係部局との調整を踏まえて平成28年度内に国土技術政策総合研究所のホームページ等において公表の予定である。

## 6.5 6章のまとめ

6章のまとめについて、以下のとおり示す。

### (1) 避難ビルの構造上の要件等に係る基準の見直し

設計用浸水深と水深係数に基づき設計用津波荷重を算定する方法を示した。建築物に対する要求性能に関するケーススタディを行い、設計用浸水深が10mを超える地域では新築であっても津波避難ビルとするためには新耐震基準以上の水平耐力が求められることを明らかにした。

### (2) 予想津波高に応じた津波浸水域検索システム

- ・ 気象庁の発表する予想津波高に応じた津波浸水域検索システムの手法を確立するとともに、モデルケースとして試作した徳島県の津波浸水域図について、防災訓練用に徳島県に提供した。

### (3) 避難安全性評価手法

- ・ 津波避難を円滑化させる市街地整備を行う箇所の抽出等に寄与する、徒歩避難と車両避難を考慮した津波避難シミュレータを作成した。

### (4) 津波防災都市づくりにおける防災拠点機能の確保策の検討

- ・ 都市防災拠点機能の確保を事前検討するために必要となる事項を、「津波防災都市づくりのための都市防災拠点機能検討の手引き（案）」として作成した。

## 7. 研究の成果と今後の取り組み

本プロジェクト研究では、東日本大震災直後に被災調査に入るとともに、津波からの多重防御・減災に資する様々な課題を短期間のうちに集中的に検討し、その結果を行政サイドとも共有を図ることで、被災地の復興に貢献するとともに、津波防災地域づくり法や改正海岸法といった法制度やそれを支える各種基準類の整備というかたちで研究完了年を待たずに随時成果を出すという結果となった。

また、上記の法制度に基づき地方公共団体が行う津波浸水想定の設定や避難施設の整備等、津波防災地域づくりに対する取組に対し、技術的支援も精力的に実施してきた。（図-7.1.1）

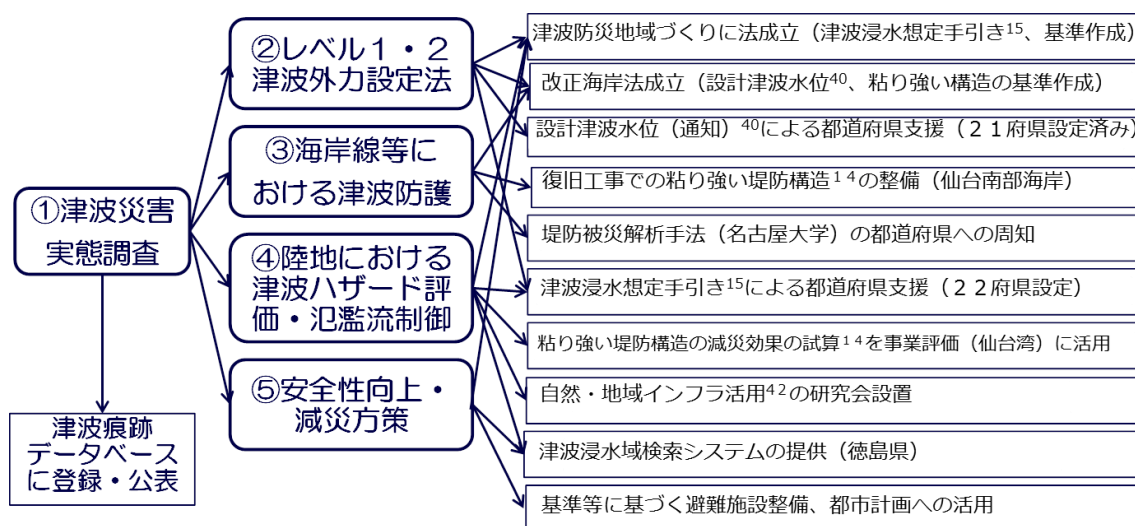


図-7.1.1 津波への多重防御・減災システムに関する研究の主な成果

今後の取り組みとしては、以下のとおりである。

●南海トラフや相模トラフ、日本海側の大規模地震等を踏まえ、今後、津波浸水想定や設計津波水位、粘り強い堤防構造の検討を予定する都道府県に対し、引き続き技術支援を積極的に実施する。

●津波浸水想定 of 進展に伴い、避難計画の見直しや避難施設の整備、津波防災地域づくり法に基づく推進計画の策定等を予定する市町村に対する技術支援を強化する。

（具体的には、市町村支援に資する研究成果（各種手引き等）の周知や、平成26年度よりワンストップ化した国総研「技術相談窓口」の有効活用を予定）

●自然・地域インフラに係る研究会や、行政や学会等が設置する委員会等、東日本大震災以降の津波関連の研究成果を共有・活用・発展させる取組に対して、引き続き国総研の知見を活かして積極的に支援していく。

## 謝辞

・「2.1 津波痕跡調査」、「2.2 地形変化調査」、「2.3 海岸堤防被災調査」、「2.4 河川堤防変形調査」にあたっては、被災地の地方公共団体や東北地方整備局、合同調査を実施した学会関係者の方々に調査にあたって多大な協力をいただいた。

・「2.6 都市防災拠点機能の喪失・回復等の実態調査」に関し、宮城県石巻市、宮城県南三陸町、岩手県大船渡市、岩手県釜石市、岩手県遠野市の関係自治体職員、及び対象とした防災拠点施設の職員の方々には、震災復興等の取組みでお忙しい中、ヒアリングへの対応等のご協力をいただいた。

・「2.5 建築物被害調査」および「6.1 避難ビルの構造上の要件等に係る基準の見直し」における報告の一部は、平成23年度建築基準整備促進事業40番「津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」に関する東京大学生産技術研究所と建築研究所の共同研究成果に基づいて記載しており、「津波避難ビル等の構造設計法等の検討委員会」の委員の方々のご協力をいただいた。

・「6.2 予想津波高に応じた津波浸水検索システム」については、徳島県防災担当職員の方々に地形データの提供やヒアリング等でご協力いただいた。

・「6.4 津波防災都市づくりにおける防災拠点機能の確保策の検討」に関し、徳島県美波町、和歌山県田辺市、静岡県焼津市の関係自治体職員、及び対象とした防災拠点施設の職員の方々には、ヒアリングへの対応等のご協力をいただいた。

以上、ここに記して深甚なる謝意を表す。

## 付録

### (1) 研究成果・所外発表論文等一覧

#### (a) 報告書・対外発表論文等

	研究室	章等	時期	報告書・対外発表論文等
1	海岸研究室	2	H23. 5	平成23年東北地方太平洋沖地震の緊急調査速報 (土木技術資料Vol. 53, (財) 土木技術センター)
2	各研究室	2. 5	H23. 5	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報)(東日本大震災)(国総研研究資料 636号)
3	海岸研究室	2	H23. 7	平成23年東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報(国総研資料No. 642, 国土技術政策総合研究所)
4	海岸研究室	2	H23. 8	津波による海岸及び海岸保全施設の被害 (土木技術資料Vol. 67, (財) 土木技術センター)
5	基準認証システム研究室	6. 1	H24. 2	津波避難ビル等の構造上の要件の解説 (講習会テキスト)
6	海岸研究室	2 4. 2	H24. 3	粘り強く機能を発揮する海岸堤防 (土木学会主催シンポジウム「東日本大震災あれから1年そしてこれからセッション参考資料, (社) 土木学会」)
7	海岸研究室	3	H24. 3	平成23年東北地方太平洋沖地震による津波対策のための津波浸水シミュレーションの手引きについて(雑誌海岸第51巻, (社) 全国海岸協会)
8	基準認証システム研究室	6. 1	H24. 3	津波避難ビル等の構造上の要件の解説 (国総研研究資料 673号)
9	各研究室	2. 5	H24. 3	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告(国総研研究資料 674号)
10	基準認証システム研究室	2. 5	H24. 3	壁谷澤寿一、福山洋、奥田泰雄、加藤博人、石原直、田尻清太郎、谷昌典：東北地方太平洋沖地震において鉄筋コンクリート造建築物に作用した津波荷重、構造工学論文集 Vol. 58B、pp. 91-96
11	海岸研究室	4	H24. 5	粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討(第一報)(国総研技術速報No. 1, 国土技術政策総合研究所河川研究部)

12	海岸研究室	3	H24. 6	河川砂防技術基準 調査編（国土交通省水管理・国土保全局）
13	海岸研究室	3, 5	H24. 6	津波防災地域づくりの概要とそれを支える主要な技術（土木技術資料Vol. 54, （一財）土木研究センター）
14	海岸研究室	4. 1	H24. 6	津波による海岸堤防の被災の分析～粘り強くする方向性を見いだすための被災分析～（土木技術資料Vol. 54, （一財）土木研究センター）
15	海岸研究室	2. 2	H24. 6	津波による地形変化に関する現地調査（土木技術資料Vol. 54, （一財）土木研究センター）
16	海岸研究室	3, 5	H24. 7	津波からの多重防御・減災システムに関する研究（建設マネジメント技術2012・7, （一財）経済調査会）
17	海岸研究室	4	H24. 5	粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討（第二報）（国総研技術速報No. 3, 国土技術政策総合研究所河川研究部）
18	海岸研究室	6. 2	H24. 11	加藤史訓、諏訪義雄、鳩貝聡、本間基寛、内田良始：津波の高さ予想に応じた津波浸水域の推定方法（土木学会論文集B2（海岸工学）, （公社）土木学会）
19	海岸研究室	5	H24. 11	加藤史訓、諏訪義雄、藤田光一、岸田弘之、五十嵐崇博、岡村次郎、林雄一郎：建築物等による津波のせき上げの評価方法（土木学会論文集B2（海岸工学）, （公社）土木学会）
20	海岸研究室	2. 3	H24. 11	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）, （公社）土木学会）
21	海岸研究室	4. 1	H24. 11	渡辺国広、諏訪義雄、加藤史訓、藤田光一：東北地方太平洋沖地震津波による海岸堤防の被災分析（土木学会論文集B2（海岸工学）, （公社）土木学会）
22	海岸研究室	4. 2	H24. 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）, （公社）土木学会）
23	海岸研究室	4. 2	H24. 12	粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討（雑誌河川No. 797, （公社）日本河川協会）



24	海岸研究室	2. 3, 4. 1, 4. 2	H24. 12	Fuminori Kato, Yoshio Suwa, Kunihiro Watanabe, and Satoshi Hatogai : Mechanisms of Coastal Dike Failure Induced by the Great East Japan Earthquake Tsunami (Proceedings of the 33 <sup>rd</sup> International Conference on Coastal Engineering, 米国土木学会)
25	海岸研究室	4. 2	H24. 12	粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (土木施工Vol. 54, オフィススペース)
26	海岸研究室 河川研究室	2, 3, 4	H25. 1	2011年東日本大震災に対する国土技術政策総合研究所の取り組みー緊急対応及び復旧・復興への技術支援に関する活動記録ー (国土技術政策総合研究所研究報告, 国土技術政策総合研究所)
27	海岸研究室	3, 5	H25. 3	津波浸水シミュレーションの活用における留意点 (雑誌河川No. 800, (公社) 日本河川協会)
28	海岸研究室	2. 3, 4. 1, 4. 2	H25. 8	Fuminori Kato, Yoshio Suwa, Kunihiro Watanabe, and Satoshi Hatogai : Damages to Shore Protection Facilities Induced by the Great East Japan Earthquake Tsunami (Journal of Disaster Research Vol. 8, 富士技術出版)
29	海岸研究室	4. 2	H25. 11	加藤史訓、鳩貝聡、諏訪義雄：津波越流に対するコンクリート平張り海岸堤防の粘り強い構造 (土木学会論文集B2 (海岸工学), (公社) 土木学会)
30	海岸研究室	4, 5. 3	H26. 1	超過設計津波への対応策～粘り強い海岸堤防と自然・地域インフラの活用～ (土木技術資料 Vol. 56, (一財) 土木研究センター)
31	海岸研究室	4. 2	H26. 4	加藤史訓、諏訪義雄、鳩貝聡、藤田光一：津波の越流に対して粘り強く減災効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (土木学会論文集B2 (海岸工学), (公社) 土木学会)
32	海岸研究室	4. 2	H26. 6	海岸堤防・防波堤の被災メカニズムと粘り強い構造の要件 (東日本大震災合同調査報告, (公社) 土木学会)
33	海岸研究室	4. 1, 4. 2	H26. 6	海岸堤防の被災と粘り強い構造 (東日本大震災合同調査報告, (公社) 土木学会)
34	海岸研究室	5. 3	H26. 8	自然・地域インフラとは何か (RIVERFRONT Vol. 79, (公財) リバーフロント研究所)
35	海岸研究室	4. 2	H26. 11	加藤史訓、齋藤雅彦、姫野一樹、諏訪義雄、石原正義、樋口敬芳、南部卓也、小津貴則：津波越流時の海岸堤防の被覆工下面に作用する圧力に関

				する気液二相流解析（土木学会論文集B2（海岸工学），（公社）土木学会）
36	海岸研究室	5.3	H27.3	自然・地域インフラを活かして津波減災をはかる（土木学会誌Vol.100,（公社）土木学会）
37	海岸研究室	5.3	H27.6	自然・地域インフラを活かして津波減災をはかる（土木技術資料Vol.57,（一財）土木研究センター）
38	海岸研究室	4.2,5	H27.11	渡辺国広、姫野一樹、榊原弘、有村盾一、八木裕子、越智達郎、諏訪義雄：海岸堤防の粘り強さ向上による減災効果の感度分析（土木学会論文集B2（海岸工学），（公社）土木学会）
39	都市防災研究室	2.6	H25.3	木内望、竹谷修一、岩見達也、勝又済ほか（2013）「東日本大震災の津波被害を中心とした被災都市における防災拠点機能の喪失と回復の実態」『東日本大震災2周年シンポジウム梗概集』日本建築学会
40	都市防災研究室	2.6	H25.8	N.Kiuchi（2013）“Studies on the Urban and Local Level Securement of Disaster Preparedness Functions of Coastal Cities and Towns after the Great Tohoku Earthquake” 2013年度国際都市計画シンポジウム
41	都市防災研究室	2.6	H26.4	木内望、勝又済（2014）「日本大震災津波による沿岸都市の防災拠点機能の喪失・回復と防災都市づくり」『国総研レポート2014』39p
42	建設経済研究室	6.4	H25.11	岩見達也、竹谷修一、木内望（2013）「津波避難リスクに基づく避難安全性評価手法に関する基礎的検討」『第48回土木計画学研究発表会・講演集』土木学会
43	建設経済研究室	6.4	H26.4	岩見達也、竹谷修一（2014）「安全な市街地整備に向けた津波避難安全性評価手法の開発」『国総研レポート2014』40p
44	都市防災研究室	6.4	H26.5	岩見達也、竹谷修一（2014）「津波と火災を考慮した避難シミュレータのプロトタイプ」『日本火災学会研究発表会概要集』日本火災学会pp.24-25
45	都市防災研究室	6.4	H26.12	岩見達也、竹谷修一（2014）「津波と火災を考慮した複合災害避難シミュレーションツールの開発」『第37回情報・システム・利用・技術シンポジウム 論文集』日本建築学会
46	都市防災研	6.4	H27.4	木内望、竹谷修一（2015）「円滑な津波避難を実

	研究室			現する市街地整備計画手法の開発」『国総研レポート2015』66p
47	都市計画研究室	6.4	H27.4	木内望、竹谷修一、勝又済（2015）「津波防災都市づくりにおける都市防災拠点機能の確保の検討に関する手引き案の作成」『国総研レポート2015』67p
48	都市計画研究室	6.4	H27.12 予定	木内望（2015）「津波防災都市づくりにおける防災拠点機能の確保について」『都市計画学会誌No.318』

## (b) 法令・技術基準等への研究成果の反映状況

	研究室	章等	時期	報告書・对外発表論文等
1	海岸研究室	3	H23. 7	津波に対する堤防高さの設定に必要な設計津波の水位の設定方法について取りまとめ、海岸関係省庁課長より通知
2	海岸研究室	3. 3	H23. 7	被災地域の迅速な復旧復興を支援するため、「平成23年東北地方太平洋沖地震による津波対策のための津波浸水シミュレーションの手引き」を公表
3	海岸研究室	3. 3	H24. 1 H24. 7	津波防災地域づくりに係る技術上の基準に関する研究成果(基準水位)が、津波防災地域づくり法第3条の「基本指針」、第75条の技術的基準、施行規則に反映
4	海岸研究室	3. 2	H24. 2	津波防災地域づくり法第8条の津波浸水想定都道府県による設定を支援するため、「津波浸水想定の設定の手引き」を公表
5	海岸研究室	4. 2	H26. 6	海岸法改正で「粘り強い堤防構造」が海岸保全施設に位置づけ
6	基準認証システム研究室	6. 1	H24. 11	「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について」(平成23年11月17日付国住指第2570号)における「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」をとりまとめた

(2) 広報・技術支援実績一覧

(a) 広報実績

	研究室	章等	時期	広報実績
1	海岸研究室		H23. 4	東日本大震災調査報告会
2	海岸研究室	2.	H23. 11	土木の日（津波の実験設備の公開、震災被害の概要説明など）
3	海岸研究室 河川研究室		H24. 3	国総研・土研 東日本大震災 報告会 ～震災から一年を経て、見えてきたこと～
4	基準認証システム研究室	2. 5	H24. 10	平成24年度国土技術研究会 津波避難ビルの技術基準及び設計例
5	基準認証システム研究室	2. 5	H24. 11	第10回環境研究シンポジウム 津波避難ビルの技術基準及び設計例
6	海岸研究室		H25. 3	東日本大震災報告会～震災から2年を経て～
7	海岸研究室	2.	H26. 10	釜石高校出前講座
8	海岸研究室	4. 2	H26. 11	土木の日（粘り強い堤防の実験動画公開）
9	海岸研究室	5. 3	H27. 2	自然・地域インフラの勉強会の開催
10	海岸研究室	4. 2	H27. 4	粘り強い堤防の実験動画をホームページ上に公開
11	都市防災研究室		H26. 1. 17	「防災都市づくりによる津波対策の研究に取り組んでいます」（国総研メールサービス No. 159）
12	都市防災研究室	6. 4	H26. 1. 16	「徳島県美波町での津波防災都市づくりに関する意見交換会の実施について」（都市防災研究室HP）
13	都市防災研究室	6. 4	H26. 4. 15	「和歌山県田辺市での津波防災都市づくりに関する意見交換会の実施について」（都市防災研究室HP）

(b) 技術支援の具体例（現地指導・検討委員会設置・委員参加等）

	研究室	章等	時期	検討委員会設置・委員参加
1	海岸研究室		H23. 11 H24. 2, 3 H25. 8	宮城県沿岸域河口部・海岸施設復旧における環境等検討委員会に委員として参加
2	海岸研究室	3. 3	H24. 2～3	津波浸水想定の設定の手引きに係る都道府県、コンサルタントへの説明会の参加
3	海岸研究室	3. 3	H24. 4～	津波浸水想定の設定の手引きに係る地方プロ

				ック説明会の参加
4	海岸研究室	5. 1 5. 2	H23. 11 H24. 2, 3, 10, H27. 2	岩手県津波防災技術専門委員会に委員として参加
5	海岸研究室	4. 2, 4. 3	H23. 4, 5, 7 , 8, 9, 10 H24. 1, 9	岩手県河川・海岸構造物の復旧等における環境・景観検討委員会に委員として参加
6	海岸研究室	3. 2 4. 2	H25. 3 H26. 3	直轄高知海岸地震津波対策検討委員会に委員として参加
7	海岸研究室		H25.	地震津波減災対策検討委員会に委員として参加
8	海岸研究室	5. 1	H25～	津波ハザード情報の利活用に関する委員会に委員として参加
9	海岸研究室	3. 2	H25～	海域における断層情報総合評価プロジェクト運営委員会に委員として参加
10	海岸研究室		H26.	岩手県復旧・復興に係る委員会
11	海岸研究室	3. 5. 1	H27. 3	福島県沿岸津波浸水想定策定に向けた技術検討会
12	海岸研究室	3. 5. 1	H26. 5, 8	沖縄県津波浸水想定設定委員会
13	海岸研究室	3. 4. 5.	H27. 7～	津波作用に関する研究レビューおよび活用研究小委員会に委員として参加
14	都市防災研究室	2. 6 6. 4	H23. 9～ H24. 3	平成23年度安全・安心まちづくり推進方策検討調査防災まちづくりWG(国土交通本省)に委員として参加(計3回)
15	建設経済研究室	2. 6 6. 4	H24. 9～ H25. 3	平成23年度安全・安心まちづくり推進方策検討調査防災まちづくりWG(国土交通本省)に委員として参加(計2回)
16	都市防災研究室	2. 6 6. 4	H24. 9～ H25. 3	平成24年度安全・安心まちづくり推進方策検討調査防災まちづくりWG(国土交通本省)に委員として参加(計5回)
17	建設経済研究室	2. 6 6. 4	H24. 9～ H25. 3	平成24年度安全・安心まちづくり推進方策検討調査防災まちづくりWG(国土交通本省)に委員として参加(計5回)

### (3) 参考論文一覧

- <sup>1</sup> 国土技術政策総合研究所、土木研究所：平成 23 年(2011 年) 東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査報告、国土技術政策総合研究所資料第 646 号、土木研究所資料第 4202 号、pp. 94~104、2011
- <sup>2</sup> 国土地理院ホームページ  
<http://www.gsi.go.jp/cais/chikakuhendo40007.html>
- <sup>3</sup> 国土技術政策総合研究所、土木研究所：平成 23 年(2011 年) 東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査報告、国土技術政策総合研究所資料第 646 号、土木研究所資料第 4202 号、pp. 124~239、2011
- <sup>4</sup> 東京大学 生産技術研究所：平成 23 年度 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書、2011.7
- <sup>5</sup> 東京大学 生産技術研究所：平成 23 年度 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その 2、2011.10
- <sup>6</sup> 東京大学 生産技術研究所：平成 23 年度 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」報告書、2012.3
- <sup>7</sup> 国土交通省：津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について、2011.11.17
- <sup>8</sup> 内閣府：津波避難ビル等に係るガイドライン、2005.6
- <sup>9</sup> (財)日本建築センター：平成 16 年度 津波避難ビルの技術的検討調査 報告書、2005.3
- <sup>10</sup> (財)日本建築センター：平成 17 年度津波避難ビルの技術的検討調査 報告書、2006.3
- <sup>11</sup> 朝倉良介、岩瀬浩二、池谷毅、高尾誠、金戸俊道、藤井直樹、大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究、海岸工学論文集、第 47 巻、pp911-915、2000.
- <sup>12</sup> 中埜良昭：スマトラ島沖地震津波の被害調査結果に基づく津波避難施設の設計外力評価、日本建築学会技術報告集、第 13 巻 第 25 号、2007.6
- <sup>13</sup> (財)日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、2001.10.
- <sup>14</sup> 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、pp.9~10、2011 (<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/>)
- <sup>15</sup> 渡辺 偉夫：日本被害津波総覧 [第 2 版]、248 頁、東京大学出版会、1998
- <sup>16</sup> 国土交通省：海岸における津波対策検討委員会第 2 回資料、2011  
([http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/kaigantsunamitaisaku/](http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kaigantsunamitaisaku/))
- <sup>18</sup> 農林水産省農村振興局整備部防災課長・水産庁漁港漁場整備部防災漁村課長・国土交通省水管理国土保全局砂防部保全課海岸室長・国土交通省港湾局海岸防災課長：設計津波の水位の設定方法等について (課長通知)、2011.7
- <sup>19</sup> 今村文彦：津波被害調査のマニュアル、津波工学研究報告、15、pp.107~117、1998
- <sup>20</sup> 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ、<http://www.coastal.jp/ttjt/index.php>、2011.8
- <sup>21</sup> 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：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 44p. 2011
- <sup>22</sup> 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で被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方 9p. 2011
- <sup>23</sup> K. Noguchi, S. Sato, and S. Tanaka, "Large-scale experiments on tsunami overtopping and bed scour around coastal revetment", Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, Vol.44, pp.296-300, 1997. (in Japanese)
- <sup>25</sup> 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ、2011.8  
(<http://www.coastal.jp/ttjt/index.php>)
- <sup>26</sup> 川越清樹、風間聡、沢本正樹：数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生

- 
- 確率モデルの構築、自然災害科学、Vol.27(1)、pp.69-83、2008
- 27 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部：粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討（第1報）、国総研技術速報、No.1、12p. 2012、  
（第2報）、国総研技術速報、No.3、21p. 2012
- 28 国土交通省水管理・国土保全局海岸室、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：津波浸水想定の設定の手引き Ver.2.00、2012
- 29 津波防災地域づくりに係る技術検討会：津波防災地域づくりに係る技術検討報告書、2012
- 30 渡辺国広、姫野一樹、榊原弘、有村盾一、八木裕子、越智達郎、諏訪義雄：海岸堤防の粘り強さ向上による減災効果の感度分析（土木学会論文集 B2（海岸工学）、Vol. 71, No. 2, I\_1597-I\_1602, 2015
- 32 NYS 2100 Commission: Recommendations to Improve the Strength and Resilience of the Empire State's Infrastructure, 2012  
(<http://www.governor.ny.gov/sites/governor.ny.gov/files/archive/assets/documents/NYS2100.pdf>)
- 33 福本 紘：日本の海浜地形の地理的特性とその形成環境、地理学評論 Ser. A、Vol. 62 No. 2 P 108-128、1989
- 34 角田清美：日本海および東シナ海沿岸の主な海岸砂丘地帯の形成期と固定期について、The Quaternary Research Vol. 14 No. 4、p251-276、1975
- 35 林野庁：津波に対する海岸防災林の効果に関する事例、  
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/siryou5.pdf>
- 36 一般社団法人日本応用地質学会：仙台市若林区荒浜 海岸公園冒険広場 現地調査結果・速報、(<http://www.jseg.or.jp/00-main/pdf/kaigan.pdf>)
- 37 仙台市：仙台市震災復興計画、2012、  
([http://www.city.sendai.jp/fukko/1202187\\_2757.html](http://www.city.sendai.jp/fukko/1202187_2757.html))
- 38 前川俊明、二瓶泰雄、中田遥香：海岸砂丘・盛土による津波減災効果の検討、土木学会論文集 B1（水工学） vol.69、No.4、I1453-I1458、2013
- 39 国土交通省：東日本大震災からの復興に係る公園緑地整備の基本的考え方 中間報告参考資料1、2011、(<http://www.mlit.go.jp/common/000168436.pdf>)
- 42 林野庁：東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会、2012、  
(<http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/kaiganbousairinsaisyuuhoukoku.pdf>)
- 40 国土交通省津波に対する堤防高さの設定に必要な設計津波の水位の設定方法について取りまとめ、2011.7
- 41 渡辺国広、姫野一樹、榊原弘、有村盾一、八木裕子、越智達郎、諏訪義雄：海岸堤防の粘り強さ向上による減災効果の感度分析
- 42 自然・地域インフラを活かして津波減災をはかる（土木技術資料 Vol.57, (一財) 土木研究センター)
- 43 建設省土木研究所：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動、国総研資料 3489 号、1997
- 44 国土技術政策総合研究所海岸研究室ホームページ  
(<http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/index.htm>)
- 45 奥田泰雄、阪田升：建築物に作用する津波のシミュレーション、その2 開口部の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008



-----  
国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告

PROJECT RESEARCH REPORT of NILIM

No.52

June 2016

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

-----  
本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675