

3.3.5 海岸分野

(1) 設計津波の水位の設定法

1) 検討の背景

東日本大震災を受けて開催された中央防災会議

「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」（以下、「専門調査会」という）報告¹⁾が公表された。これらの中で、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（いわゆる「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（いわゆる「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ことから、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とされた。また、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。

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、国総研は、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7月8日付の課長通知²⁾として発出された。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²⁾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。

- ・「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（図-3.3.5.1）。

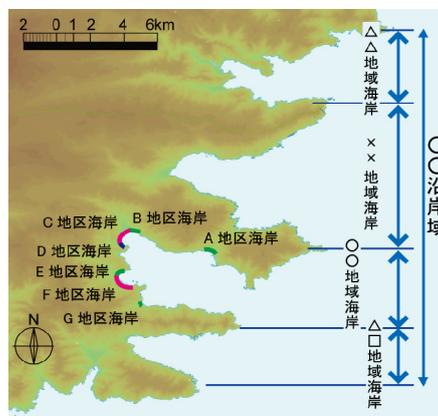


図-3.3.5.1 地域海岸のイメージ

・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-3.3.5.2）。図-3.3.5.2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等³⁾に基づき行われたものを収集整理する。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⁴⁾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。出来る限り海岸線近くの痕跡高を収集する。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」⁵⁾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の記録はあるが、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。

・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。一の地域海岸に対しては、一の設計津波の水位を設定することを基本とするが、設計津波の水位が当該地域海岸内の海岸線に沿って著しく異なることとなると判断される場合は、理由を明らかにしたうえで

で、地域海岸を分割して複数の設計津波の水位を定めることができる。

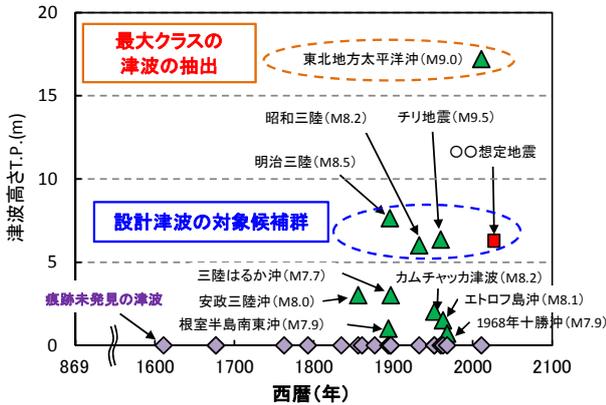


図-3.3.5.2 A地域海岸における津波高さの整理例

・堤防等の天端高は、津波・高潮の侵入防止機能、波浪による越波を減少させる機能を満足するよう、設計津波の水位、「設計高潮位+設計波のうちあげ高」または「設計高潮位の時の設計波により越波する海水の量を十分に減少させるために必要な値」に背後地の状況等を考慮して必要と認められる余裕高を加えた値以上とする基準に従い、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。

3) 従来との違い

岩手、宮城、福島の前被災3県では上記の作業を行い、設計津波の水位と計画堤防高の設定を終えている。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つは、発生頻度の考慮を明確にした点である。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つめは、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、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である。これにより、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つめは、地域海岸を設定することにした点である。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。

(2) 堤防被災分析

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¹⁾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⁶⁾。これらの提言類を踏まえて、国総研河川研究部では、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」での検討に用いるために関係省庁及び被災県の協力を得て、国土交通省水管理・国土保全局海岸室及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-3.3.5.3）。今次津波の直後に実施された現地調査では、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-3.3.5.1）、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-3.3.5.4）。

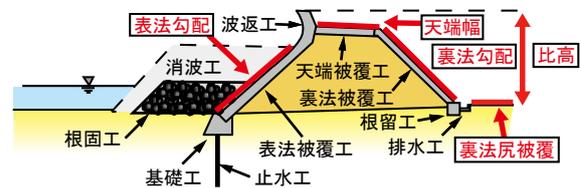


図-3.3.5.3 三面張り構造の海岸堤防の基本的な構造

2) 被災事例の分析方法

a) 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-3.3.5.5中の〇〇地区海岸）の中でも構造が一樣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-3.3.5.5 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、押し波による被災程度を全壊延長で評価すると過大となるため、その影響が緩和された指標として導入した。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-3.3.5.2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-3.3.5.1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⁴⁾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。



写真-3.3.5.1 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）

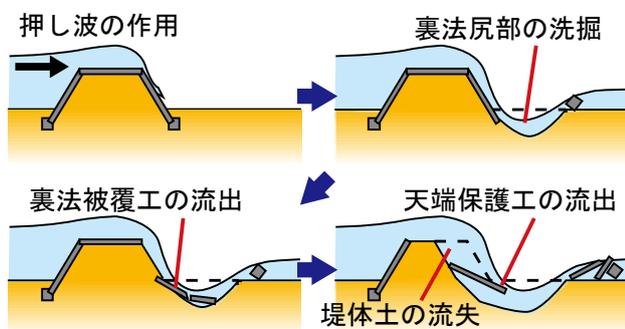


図-3.3.5.4 裏法尻負からの破壊過程

b) 衛星画像による全壊延長等の計測

具体的な被災状況については、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を国土地理院によって震災直後に撮影された空中写真及び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、著者らの再計測によって統一化した。

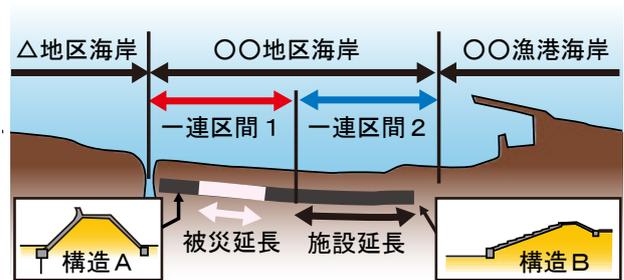


図-3.3.5.5 分析単位とする一連区間の模式図



写真-3.3.5.2 全壊した海岸堤防（宮城県岩沼市二のノ倉海岸）

c) 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。

・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-3.3.5.1のとおり絞り込んだが、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、次の多変量解析のみを実施した。

表-3.3.5.1 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				天端幅
	裏法尻被覆	表法勾配	裏法勾配	比高	
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

・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PBは2項分布を前提とした(1)式の多重ロジスティックモデルで表現されるとした。

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

ここにnは、考慮する要素数であり、 $X_1 \dots X_n$ は説明変数であり各構造要素の値が入る、 α は定数、 $\beta_1 \dots \beta_n$ 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⁷⁾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(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。

3) 被災事例の分析結果

a) 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-3.3.5.6(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。

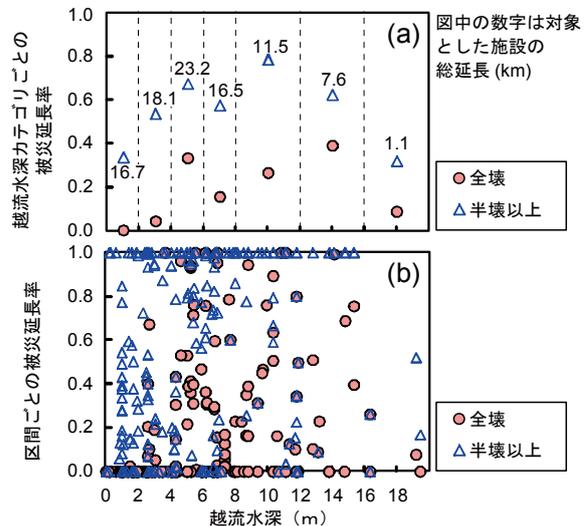


図-3.3.5.6 越流水深と被災延長率の関係

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-3.3.5.6(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-3.3.5.6(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に重要な情報であるので、実務上は図-3.3.5.6(b)のような図も確認する必要がある。

b) 構造要素ごとの2群比較の結果

・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-3.3.5.7(a))。区間ごとに見た場合もその傾向はうかがえた(図-3.3.5.7(b))。

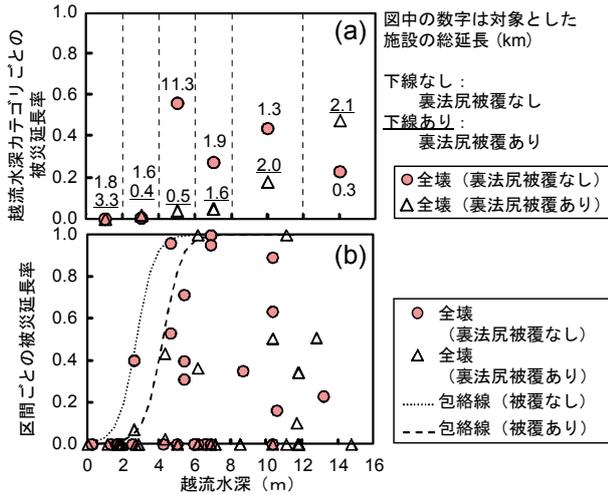


図-3.3.5.7 裏法尻被覆の有無による被災状況の違い

・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-3.3.5.8）。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-3.3.5.9）。

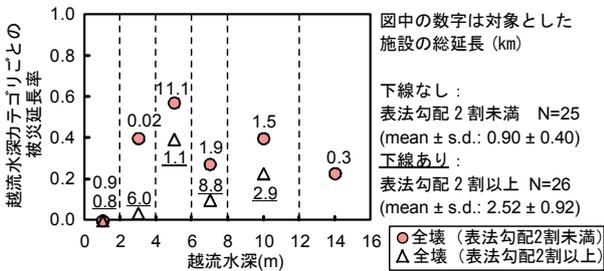


図-3.3.5.8 表法勾配による被災状況の違い（全壊）

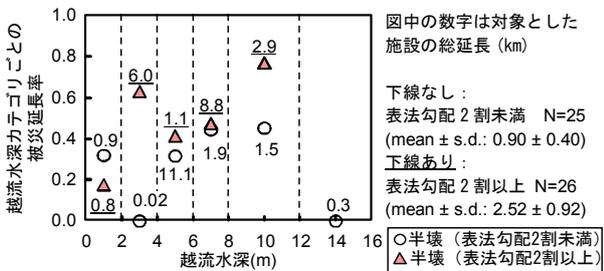


図-3.3.5.9 表法勾配による被災状況の違い（半壊）

・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-3.3.5.10）。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-3.3.5.11）。

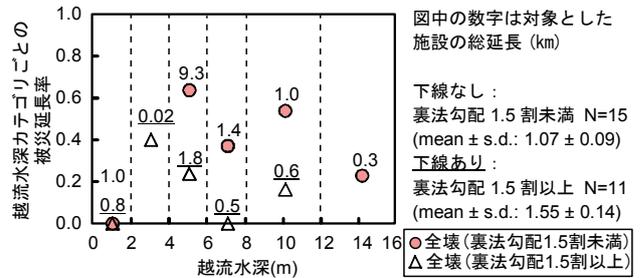


図-3.3.5.10 裏法勾配による被災状況の違い（全壊）

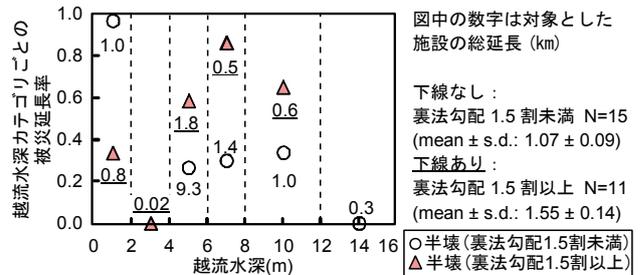


図-3.3.5.11 裏法勾配による被災状況の違い（半壊）

・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-3.3.5.12）。

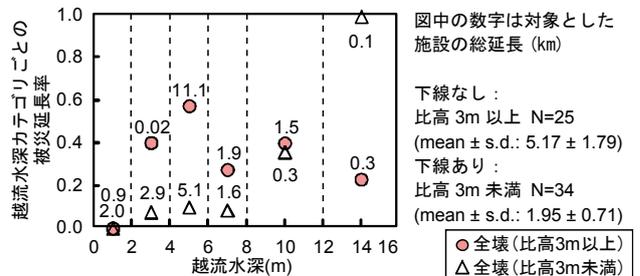


図-3.3.5.12 背後地盤との比高による被災状況の違い

c) 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-3.3.5.2)。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-3.3.5.2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、この点でも効果が有意と認められた。

表-3.3.5.2 多重ロジスティック回帰分析の結果

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

係数 β 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、表法勾配及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 β 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) 考察

a) 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。

b) 表法面及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。

c) 比高及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はならなかった。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。

d) 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(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-3.3.5.13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。

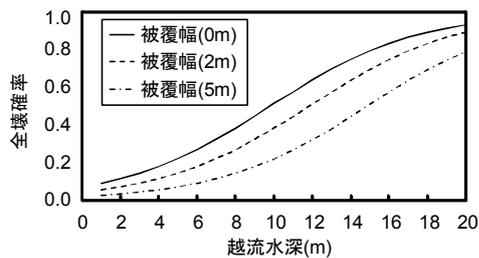


図-3.3.5.13 裏法尻部の被覆幅による全壊確率の違い

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-3.3.5.4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。

5) まとめ

東北地方太平洋沖地震津波によって被災した三面張り構造の海岸堤防の被災状況を分析することで、以下の結果及び施設を津波越流に対して粘り強い構造とするための方向性を得た。

a) 堤防の全壊に最も影響を与えたのは津波の越流水

深であることが確認された。しかし両者の関係は海岸によるばらつきが非常に大きいので、防災上の議論にあたっては本分析で示した集計値だけでなく、同じ越流水深で最も被害が激しかった事例を包絡線等で把握しておくことも必要である。

b) 裏法尻部の被覆、表法・裏法の緩勾配化が堤防の全壊確率を抑制することが示された。裏法尻被覆は最も影響が明瞭な構造要素であるので優先的に扱うことが望まれるが、表法勾配と裏法勾配については全壊と半壊で傾向が逆転するので慎重に扱う必要がある。

c) 比高が高くなると全壊確率が高い傾向が2群比較で見られたが、多変量解析では統計的に有意でなかった。

「海岸における津波対策検討委員会」では限られた時間の中で可能な分析に基づいて粘り強い構造の3つの方向性(①裏法尻部の洗掘防止、②天端保護工、裏法被覆工、表法被覆工の流失、堤体土の吸出防止、③波返工の倒壊防止)について報告を出したが、今回実施した詳細な分析からも裏法尻保護の重要性が改めて確認された。

これらの結果を踏まえ、次に記述する粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討では、裏法尻部及び裏法被覆について優先的に検討していくこととした。

(3) 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討

1) 検討の背景

「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」⁶⁾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、各県等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、国により実施される区間がある(東北地方整備局実施区間は約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、国総研河川研究部では、国土交通省水管理・国土保全局海岸室及び同東北地方整備局と連携して、構造上の工夫及び施工上の留意点の検討を、模型実験や解析等により行っている。その

成果は、平成24年5月14日及び8月10日に国総研技術速報として発出している^{8),9)}。

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-3.3.5.14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及び留意点について検討した結果を述べている。

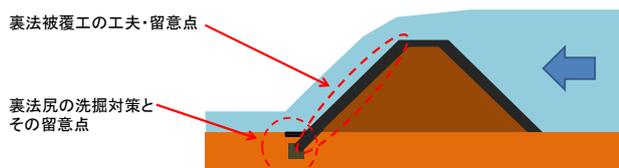


図-3.3.5.14 検討項目

主な留意点は以下の通りである。

・裏法及び裏法尻での高流速

津波が海岸堤防を越流する際には、裏法及び裏法尻では速い流れが発生する。模型実験を行ったところ、現地スケールで10m/s以上の流速が測定された。このような速い流れによる裏法尻での洗掘及び被覆工の流失への対応を検討する必要がある。

・裏法尻での洗掘と対策

裏法尻での洗掘の深さが越流水深とともに大きくなる傾向が模型実験で確認された。

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防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、堤防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-3.3.5.15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明らかになった。

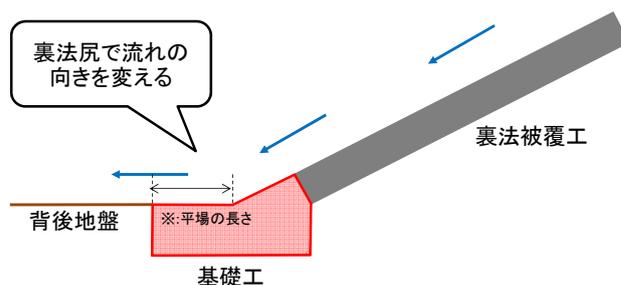


図-3.3.5.15 裏法尻の工夫案

・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-3.3.5.16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。

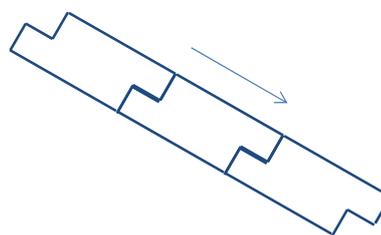


図-3.3.5.16 ブロック形状の工夫案

・揚圧力への対応の必要性

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。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らないように、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。

・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。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。

・負圧への対応

津波が堤防を越流するときには、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、越流水脈による静圧を大きく下回り、さらに負圧（大気圧を下回る圧力）までが発生することがあるので、対策が必要である。

(4) 海岸堤防耐震検討

「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」⁶⁾において、設計津波を生じさせる地震がレベル1地震動を超える強度の場合においても、生じる被害が軽微であり、かつ、地震後に来襲する津波に対して構造上の安全及び天端高を維持することが必要とされた。

現地の復旧にあたって、耐震照査や対策についての技術指導を（独）土木研究所土質・振動チームとともにに行っている。

(5) 河川・海岸構造物の復旧における景観検討会

岩手、宮城、福島の前被災3県では、海岸堤防300kmのうち190kmで全・半壊した。三陸地域では設計津波の水位が大きくなり、堤防天端高が上がることから、

これらの復旧堤防は新設であり、地域の景観に大きな影響を与える。

国、県等による河川・海岸構造物の復旧における景観への配慮を支援するため、国土交通省水管理・国土保全局では、「河川・海岸構造物の復旧における景観検討会」を開催し、河川・海岸構造物の復旧に当たって必要となる具体的な景観への配慮方法についての検討を行った。復旧の実務担当者が検討結果を参考にできるよう、その結果を「河川・海岸構造物の復旧における景観配慮の手引き」、「（別冊）ケーススタディ地区における景観配慮例」としてとりまとめた。配慮の基本的考え方、たとえば堤防線形においては、「今般の大震災からの施設復旧は、災害復旧事業により実施されることが想定され、原位置復旧が基本となるが、その場合においても、視覚的景観の向上、生態系への影響の極小化、サステナビリティの確保等に資する位置・線形を可能な限り設定することが肝要である」や法面処理における配慮の具体例、たとえば、直線的に連続する堤防に適度に縦方向のラインが見える工夫（縦のリブ模様の強調）を施すことで、“安定感、支える感覚”を表現する等が提案されている。

これを受け、東北地方整備局・宮城県は、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を設置し、配慮事項の整理・検討を行い、宮城県沿岸域河口部・海岸施設復旧における環境等への配慮の手引きとしてとりまとめた。岩手県でも岩手県河川・海岸構造物の復旧等における環境・景観検討委員会を設置し、検討結果を県版の手引き作成に反映することとしている。

国総研海岸研究室は、これら検討委員会に委員として参画した。

<参考：河川・海岸構造物の復旧における景観検討会について>

（検討の経過）

平成23年9月1日 第1回検討会

平成23年9月21日 第2回検討会

平成23年10月14日 第3回検討会

（委員名簿）

天野 邦彦 国土技術政策総合研究所 環境研究部
河川環境研究室長

萱場 祐一 独立行政法人土木研究所 自然共生研究

センター長

佐藤 慎司 東京大学大学院 教授
島谷 幸宏 九州大学大学院 教授 (座長)
諏訪 義雄 国土技術政策総合研究所 河川研究部
海岸研究室長

平野 勝也 東北大学大学院 准教授
松本 中 岩手県 県土整備部 河川課総括課長
後藤 隆一 宮城県 土木部 河川課長
宮崎 典男 福島県 土木部 河川整備課長
(オブザーバー)

西條 一彦 国土交通省 東北地方整備局 河川部
流域・水防調整官

(事務局)

国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課
国土交通省 水管理・国土保全局 治水課
国土交通省 水管理・国土保全局 防災課
国土交通省 水管理・国土保全局 海岸室

<参考 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>

(検討の経過)

第1回検討会 平成23年11月25日 (金)
第2回検討会 平成24年2月9日 (木)
第3回検討会 平成24年3月7日 (水)

(委員)

澤本 正樹 東北大学 名誉教授 (委員長)
諏訪 義雄 国土技術政策総合研究所 海岸研究室長
高崎 みつる 石巻専修大学 生物生産工学科 教授
高取 知男 元仙台市科学館 副館長
竹丸 勝朗 日本野鳥の会 宮城県支部 支部長
田中 仁 東北大学大学院 工学研究科 教授
内藤 俊彦 宮城植物の会 理学博士
平野 勝也 東北大学大学院 情報科学研究科准教授
真野 明 東北大学大学院 工学研究科 教授
(五十音順、敬称略)

(オブザーバー)

水産庁 漁港漁場整備部
林野庁東北森林管理局 森林整備部
林野庁東北森林管理局 宮城北部森林管理署
林野庁東北森林管理局 仙台森林管理署
農林水産省東北農政局 整備部
国土交通省水管理・国土保全局 防災課
東北地方整備局 港湾空港部

(事務局)

国土交通省 東北地方整備局 河川部

宮城県 河川課

(6) 津波浸水シミュレーションの手引き

東北地方太平洋沖地震に起因する津波災害を踏まえ、被災地域の復旧・復興計画の策定等を支援するため、迅速かつ適切な津波浸水シミュレーションを実施するための標準的な方法等を示した「平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き」¹⁾を国土交通省水管理・国土保全局海岸室とともに作成し、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伺い、平成23年7月に公表した。主な記載事項は以下の通りである。

- ・対象地震の断層モデルは、津波から見た最適断層モデル（広域における妥当性を検証されたモデル）を、各地域海岸の痕跡値に適合するように修正したものを設定することを基本とする。

- ・地形データは、東北地方太平洋沖地震の後にレーザプロファイラ等により取得された精度の高いデータから作成することを基本とする。

- ・予測シミュレーションでは、地震動や津波による構造物の被災を考慮することを基本とする。

- ・陸上での津波の遡上状況がわかるように、シミュレーションの結果として、最大浸水深等の平面分布や、代表断面における最高水位の岸沖方向分布などを出力するものとする。

また、本手引きの発出に合わせて、津波浸水シミュレーションに関する相談窓口を国総研海岸研究室に設置した。さらに、平成23年7～8月に、26の被災市町村を訪れ、本手引きに関する説明会を実施した。

(7) 津波浸水想定の設定の手引き

津波防災地域づくりに関する法律では、津波があった場合に想定される浸水の区域・水深（津波浸水想定）を都道府県知事が設定することとされている。その参考資料として、津波浸水想定を設定するための有効な手法である津波浸水シミュレーションやその活用方法を中心にとりまとめた「津波浸水想定の設定の手引き」⁶⁾を国土交通省水管理・国土保全局海岸室とともに作成し、平成24年2月に公表した。作成・公表にあたっては、学識経験者の助言を得た。

本手引きの主な記載内容は以下の通りである。

- ・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。

・最大クラスの津波は、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。

・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の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して設定することができる。

・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。

・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の結果として、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、本手引きに関して、都道府県、建設コンサルタントを対象とした説明会を平成24年2～3月に実施した。また、平成24年4月以降、津波浸水想定の設定における技術的な課題を解決するため、全国の沿岸を10ブロックに分けて、関係する都道府県及び地方整備局の担当者を集めて意見交換会を行っている。

(8) 津波防災地域づくりに係る技術的検討

これまでの津波対策は一定頻度の津波レベルを想定して主に海岸堤防等のハードを中心としたものであったが、東北地方太平洋沖地震による津波災害を受け、国土交通省では津波防災地域づくりについて検討し、法制度として成立した。津波防災地域づくりとは、最大クラスの津波が発生した場合でも人命を守るため、ハード・ソフトの施策を組み合わせた「多重防御」の発想により、津波浸水想定に基づいて、津波防護施設の整備、開発行為及び建築の制限、警戒避難体制の整備等を総合的に推進するものである。その中で、避難先となる建築物等の前面における津波のせき上げの評価手法、浸水のおそれがある区域での開発行為の地盤部分となる盛土・切土の技術上の基準、津波防護施設の技術上の基準について、有識者や行政関係者からなる「津波防災地域づくりに係る技術検討会」（座長：中央大学福岡捷二教授⁷⁾）において検討した。検討会では、国総研河川研究部・海岸研究室は水管理・国土保全局海岸室とともに事務局を務めた。

1) 建築物等によるせき上げの評価

都道府県知事が津波災害警戒区域または津波災害特別警戒区域を指定する際には、基準水位（せき上げを考慮した浸水深）を公示することになっている。市町村長は、この基準水位を活用して、津波災害警戒区域内において一定の基準に適合するものを指定避難施設として指定できる。また、津波災害特別警戒区域内の社会福祉施設、学校及び医療施設等（以下、「特定開発行為」という）の許可要件の一つは、居室の床の高さが基準水位以上であることとされている。

基準水位は、津波浸水想定のため実施する津波浸水シミュレーションで得られる各計算格子の比エネルギーの最大値を採用することとした。その妥当性は、仮想建築物を配置した津波浸水シミュレーション、及び実績の痕跡高を用いた検証により確かめられた。

この成果は、「津波防災地域づくりの推進に関する基本的な指針」（平成24年1月16日国土交通省告示第51号）に反映された。

2) 盛土・切土の技術上の基準

特定開発行為に関わる盛土・切土により生ずるがけが、遡上した津波に対して安全なものとなるよう、技術上の基準を検討した。

・擁壁等で被覆されていないがけ面は、津波浸水シミュレーションを用いて津波の流況からがけ面の侵食深さを算出した結果を踏まえ、モルタル吹付けによらず、芝張りにより保護することとした。

・がけ面の法尻での洗掘に対しては、想定される最大洗掘深を考慮して、円弧すべりによる安定解析を行い、その結果に基づき保護工の設置または洗掘を前提とした盛土・切土上のセットバックを行うこととした。

・がけの上端部では津波の越流により侵食が生じることが考えられることから、河川の低水護岸の天端工の規定を活用し、対策を行うこととした。

これらの成果は、「津波防災地域づくりに関する法律（第9章関係）の施行について」（平成24年7月31日付都市局長・水管理・国土保全局長・住宅局長施行通知）に反映された。

3) 津波防護施設の技術上の基準

津波防護施設は、最大クラスの津波に対して人命を守ることを目的とするものであり、内陸部において後背市街地への津波による浸水を防止する機能を有する、盛土・構築物・護岸、胸壁、閘門とされている。技術上の基準では、津波防護施設の目標達成性能及び安

全性能を定めた上で、それらの照査において考慮すべき条件と方法を整理した。

この成果は、津波防災地域づくりに関する法律施行規則（平成23年12月26日国土交通省令第99号）に反映された。

<参考 津波防災地域づくりに関する検討会>

（開催経緯）

第1回検討会平成23年11月8日

第2回検討会平成23年11月28日

第3回検討会平成23年12月9日

第4回検討会平成24年1月11日

（委員名簿）

<有識者>

佐藤慎司：東京大学大学院工学系研究科
社会基盤学専攻教授

福岡捷二：中央大学研究開発機構教授（座長）

藤間功司：防衛大学校システム工学群
建設環境工学科教授

二木幹夫：(財)ベターリビングつくば建築試験
研究センター所長

（五十音順）

<行政関係者>

松本中：岩手県県土整備部河川課総括課長

後藤隆一：宮城県土木部河川課長

千葉琢夫：宮城県土木部建築宅地課長

浅野俊和：福島県土木部河川計画課長

村田和彦：浜松市都市整備部長

<事務局>

国土交通省水管理・国土保全局

（河川計画課、海岸室）

国土交通省都市局（都市計画課開発企画調査室）

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）

謝 辞

本項で報告した技術支援の実施にあたっては、技術的課題についての議論や現場事務所・有識者との調整等を通じて国土交通省水管理・国土保全局海岸室に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

堤防被災分析で用いた海岸保全施設台帳等の資料は、「海岸における津波対策検討委員会」における調査の一環として収集されたものである。被災調査結果及び施設台帳を提供いただいた青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、千葉県及び国土交通省東北地方

整備局、漁港区域の再計測等で協力いただいた株式会社アルファ水工コンサルタンツには、ここに記して謝意を表す。

現地調査にあたっては、東北地方整備局河川部、同岩手河川国道事務所及び仙台河川国道事務所、岩手県県土整備部の関係各位より多大なご便宜を図っていただいた。ここに記して、深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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、平成23年7月8日（課長通知）、2011
- 3) 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
- 4) 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>、参照2011-08-26.
- 5) 渡辺偉夫：日本被害津波総覧 [第2版]、東京大学出版会、238p.、1998
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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2報）、国総研技術速報、No.3、21p.、2012
- 10) 国土交通省水管理国土保全局：河川・海岸構造物の復旧における景観配慮の手引き、37p.、2011
- 11) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室・国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き、22p.、2012
- 12) 国土交通省水管理国土保全局海岸室・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、77p.、2012

- 13) 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、62p.、2012