

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1035

June 2018

津波越流に対する海岸堤防の粘り強い構造の要点

国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室

Essential Points to Construct Overtopping-resistant Coastal Dike during Tsunami

Coast Division, River Department, NILIM

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

津波越流に対する海岸堤防の粘り強い構造の要点

諏訪 義雄	*
加藤 史訓	**
竹下 哲也	***
鳩貝 聡	****
姫野 一樹	****

概要

本資料は、津波が海岸堤防を越流することによって生じる水理現象と海岸堤防の破壊現象、及びそれに対する構造上の工夫について、水理模型実験等から得られた要点をまとめたものである。

キーワード : 津波、海岸堤防、粘り強い構造、減災

-
- * 河川研究部河川研究室長（元海岸研究室長）
 - ** 河川研究部海岸研究室長
 - *** 河川研究部海岸研究室主任研究官
 - **** 元河川研究部海岸研究室研究官

Essential Points to Construct Overtopping-resistant Coastal Dike during Tsunami

Yoshio SUWA	*
Fuminori KATO	**
Tetsuya TAKESHITA	***
Satoshi HATOGAI	****
Kazuki HIMENO	****

Synopsis

This note is a summary of findings obtained from hydraulic model experiments etc. on the hydraulic phenomena and the failure phenomena of coastal dike caused by the tsunami overflow and the structural devises.

Key Words : Tsunami, Coastal Dike, Tenacious Structures, Disaster Mitigation

* Head of River Division, River Department
(Former Head of Coast Division)

** Head of Coast Division, River Department

*** Senior Researcher of Coast Division, River Department

**** Former Researcher of Coast Division, River Department

目次

1. はじめに	1
1. 1 本資料の位置づけ	1
1. 2 粘り強い構造の定義とその効果	2
2. 津波越流によって生じる水理現象と堤防の破壊現象	6
2. 1 津波越流の水理的特徴	6
2. 1. 1 津波波力	7
2. 1. 2 高流速	9
2. 1. 3 被覆工表面に作用する圧力	11
2. 1. 4 裏法尻での洗掘	14
2. 1. 5 浸透と被覆工下圧力の上昇	17
2. 2 津波越流による海岸堤防の破壊現象	22
2. 2. 1 破壊に至る素過程と破壊現象	22
2. 2. 2 波返工の破損	23
2. 2. 3 根留工の不安定化	24
2. 2. 4 裏法被覆工の不安定化	27
2. 2. 5 法肩の不安定化	29
2. 2. 6 堤体材料の吸い出し	30
2. 2. 7 パイピング	31
2. 2. 8 表法被覆工の不安定化	32
コラム 東日本大震災における海岸堤防の被災実態とその分析	33
3. 構造上の工夫の考え方と要点	35
3. 1 総説	35
3. 2 裏法尻の洗掘対策	38
3. 3 裏法被覆工	48
3. 4 天端被覆工	51
3. 5 表法被覆工	53
3. 6 表法先の洗掘対策	55
3. 7 樹林	58
コラム 堤体の材料	59
4. おわりに	60
謝辞	61
参考文献	62

研究担当者名簿

(研究期間：平成 23 年度～平成 26 年度)

所属	役職	氏名	担当期間	担当
河川研究部 海岸研究室	元室長	諏訪 義雄	H23.4～H27.3	研究総括、1 章～3 章
	室長	加藤 史訓	H23.4～H26.6	研究総括、1 章～4 章
	主任研究官	竹下 哲也	H26.7～H27.3	2～3 章
	研究官	鳩貝 聡	H23.4～H25.3	2～3 章
	研究官	姫野 一樹	H25.4～H27.3	2～3 章

1. はじめに

1. 1 本資料の位置づけ

平成 23 年 3 月の東北地方太平洋沖地震では、東北地方の太平洋沿岸を中心に、津波による浸水被害が生じ、堤防等の海岸保全施設も多く被災した。その災害復旧においては、数十年から百数十年に一度程度来襲すると考えられる津波を海岸保全施設の設計対象に用いることが「設計津波の水位の設定方法等について」（平成 23 年 7 月 8 日海岸省庁課長通知）により明確化され、その設計津波の水位を超える津波が越流しても堤防等が粘り強く効果を発揮することが「海岸堤防等の粘り強い構造及び耐震対策」（平成 23 年 12 月 15 日海岸省庁課長通知）により求められた。

国土交通省国土技術政策総合研究所では、東北地方太平洋沖地震の発生直後から海岸堤防の被災機構について調査するとともに、津波が越流しても粘り強く減災効果を発揮する海岸堤防の構造について研究を行ってきた。それらの成果は、国総研資料 No.646、国総研技術速報 No.1 及び No.3、国総研プロジェクト研究報告第 52 号、土木学会論文集（鳩貝ら；2012、加藤ら；2013、2014）等で順次発表してきたところである。

本資料は、津波が海岸堤防を越流することによって生じる水理現象と海岸堤防の破壊現象、及びそれに対する構造上の工夫の要点をまとめたものである。そのとりまとめにあたっては、「「海岸保全施設の技術上の基準について」の一部改正について」（平成 27 年 2 月 2 日海岸省庁局長通知）に記載された海岸堤防の粘り強い構造に関する規定との整合を図りつつ、これまでに発表した成果をもとに、海岸堤防の粘り強い構造の理解を容易にすることを意識した。

本資料では、2 章において津波越流によって生じる水理現象と堤防の破壊現象を説明し、3 章において構造上の工夫の考え方と要点を示し、4 章に全体の概要をまとめている。

1. 2 粘り強い構造の定義とその効果

平成 23 年に発生した東日本大震災の以前においては、海岸堤防の天端高は設計津波の水位等をふまえて設定することは規定されていたが、設計津波を超える津波が越流した状態での海岸堤防の機能や要求性能は定められていなかった。東日本大震災において、設計津波を超える津波が海岸堤防を越流することにより多くの海岸堤防が被災し、また、背後地に甚大な被害が発生した。

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」は、津波対策を構築するにあたって、海岸堤防等の構造物により人命・財産を守ることを目指す比較的頻度の高い津波と、避難等のソフト対策を軸に何としても命を守ることを目指す最大クラスの津波の 2 つを想定すること、あわせて、海岸堤防等の施設については、設計を上回る津波に対しても粘り強く効果を発揮する技術開発を行い、整備を進めることを平成 23 年 7 月に提言した。

その提言を受けて、海岸関係省庁が設置した「海岸における津波対策検討委員会」は、比較的頻度の高い津波を数十年から百数十年に一度程度の頻度で到達すると想定される津波とし、その津波が海岸堤防を乗り越えて堤内地側へ侵入しないことを条件とした津波シミュレーションを行う等により算出された水位を設計津波の水位として設定することを提言した。また、設計津波を上回る津波に対して海岸堤防等の施設を粘り強い構造とすることで期待する効果を以下のように示した（海岸における津波対策検討委員会、2011）。

海岸堤防の粘り強い構造の基本的な考え方は、津波が越流した場合であっても、以下のいずれかもしくは両方の効果を発揮するよう構造上の工夫を施すものである。

- 1)施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くする
- 2)施設が完全に流失した状態である全壊に至る可能性を少しでも減らす

また、海岸堤防の粘り強い構造により施設の効果が粘り強く発揮された場合には、以下に示す効果が期待される。

- ・浸水までの時間を遅らせることにより避難のためのリードタイムを長くする効果
- ・浸水量が減ることにより浸水面積や浸水深を低減し、浸水被害を軽減する効果、第 2 波以降の被害を軽減する効果
- ・施設が全壊に至らず、一部残存した場合には、迅速な復旧が可能となり二次災害のリスクが減る効果や、復旧費用を低減する効果
- ・今次津波においては、堤防が残存した箇所では侵食（砂浜幅の減少）が殆ど見られなかった事例も確認されており、海岸地形を保全する効果

平成 26 年に改正された海岸法では、津波、高潮等により海水が当該堤防を越えて侵入した場合にこれによる被害を軽減するため、当該堤防と一体的に設置された根固工又は樹林

を含めて海岸保全施設と規定された。また、海岸法改正後に改められた「海岸保全区域等にかかる海岸の保全に関する基本的な方針」（平成 27 年 2 月 2 日農林水産・国土交通省告示第一号）では、以下のような方針が示された。

- ・海岸保全施設の整備に当たっては、背後地の状況を考慮しつつ、津波、高潮等から海水の侵入又は海水による侵食を防止するとともに、海水が堤防等を越流した場合にも背後地の被害が軽減されるものとする。
- ・背後地の状況等を考慮して、設計の対象を超える津波、高潮等の作用に対して施設の損傷等を軽減するため、粘り強い構造の堤防、胸壁及び津波防波堤の整備を推進する。

以上のことをふまえ、本資料では、背後地の被害軽減を目的とした、堤防の損傷等を軽減する機能を有する構造を「粘り強い構造」として取り扱い、設計津波を超える津波の作用に対して海岸堤防を粘り強い構造とするための要点をまとめることとする。また、海岸堤防にはさまざまな型式のものがあるが、本資料では、**図-1.2.1**のような台形断面の土堤の表面が被覆された傾斜堤を主に対象とする。

注：「海岸保全施設の技術上の基準について」の一部改正について」（平成 27 年 2 月 2 日海岸省庁局長通知）における「根固工」は、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」（海岸保全施設技術研究会編、平成 16 年 3 月）における基礎工（表法先に設置するもの）、根固工（表法先に設置するもの）、または根留工（裏法尻に設置するもの）に相当する。これらの混同を避けるため、本資料では、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」に沿って、**図-1.2.1**に示す表記で統一する。

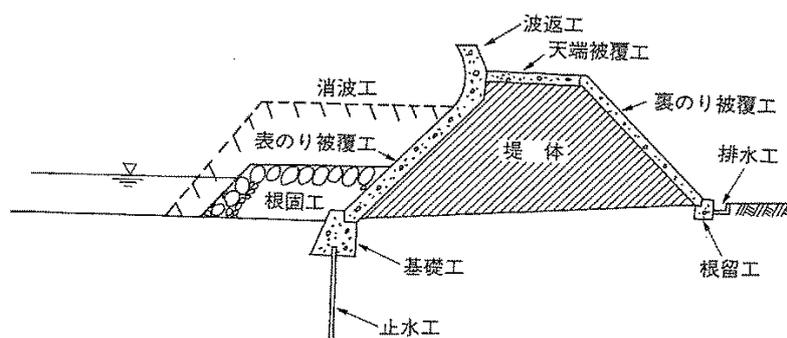


図-1.2.1 堤防の各部分の名称

参考

「「海岸保全施設の技術上の基準について」の一部改正について」（平成27年2月2日海岸省庁局長通知）における堤防の規定（下線部は粘り強い構造に関する部分）。

3. 2 堤防

3. 2. 1 目的と機能

堤防は、海岸背後にある人命、資産を高潮、波浪及び津波から防護するとともに、陸域の侵食を防止することを目的として設置される海岸保全施設である。

堤防は、設計高潮位の海水若しくは設計波又は設計津波の作用に対して、高潮若しくは津波による海水の侵入を防止する機能、波浪による越波を減少させる機能、若しくは海水による侵食を防止する機能のいずれかの機能又は全ての機能を有するものとする。

これらの機能に加えて、当該堤防の背後地の状況等を考慮して、設計高潮位を超える潮位の海水若しくは設計波を超える波浪又は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。

3. 2. 2 設計の方針

設計高潮位の海水若しくは設計波又は設計津波の作用に対して所定の機能が発揮されるよう、堤防の型式、天端高、天端幅、法勾配及び法線を定めるものとする。

また、設計高潮位を超える潮位の海水若しくは設計波を超える波浪又は設計津波を超える津波の作用に対して所定の機能が発揮されるよう、堤防の型式、天端幅及び法勾配（根固工にあっては型式、幅及び厚さ、樹林にあっては樹種並びに盛土の幅及び厚さ）を適切に定めるものとする。

3. 2. 3 要求性能

堤防は、所定の機能が発揮されるよう、適切な性能を有するものとする。また、堤防は、設計高潮位以下の潮位の海水、設計波、設計津波、設計の対象とする地震及びその他の作用に対して安全な構造とするものとする。

さらに、設計高潮位を超える潮位の海水若しくは設計波を超える波浪又は設計津波を超える津波の作用に対して、背後地の状況等を考慮して、当該堤防の損傷等を軽減する構造とするものとする。

3. 2. 4 照査において考慮すべき条件

堤防の構造型式や構造諸元の決定に当たり考慮すべき条件は以下のとおりとする。

- (1) 自然条件
 - a) 潮位
 - b) 波浪

- c) 津波
- d) 流れ
- e) 漂砂
- f) 海底地形及び海浜地形
- g) 地盤
- h) 地震

(2) その他の条件

- a) 背後地の重要度
- b) 海岸の環境
- c) 海岸の利用及び利用者の安全
- d) 船舶航行条件
- e) 施工条件

3. 2. 5 目的達成性能の照査

堤防の設置目的を達成するための性能は、原則として天端高、表法勾配、天端幅、裏法勾配、根固工の型式、幅及び厚さ、樹林の樹種並びに盛土の幅及び厚さの組合せにより評価するものとする。

性能の照査に当たっては、当該海岸における設計潮位、設計波、設計津波等を適切に設定し、波のうちあげ高若しくは越波流量又は設計津波の水位（堤防によるせり上がりを考慮した津波高さ）が所定の値（うちあげ高にあつては天端高、越波流量にあつては許容越波流量、設計津波の水位にあつては地震後の天端高）を上回らないことを確認するものとする。

また、当該堤防における設計高潮位を超える潮位の海水若しくは設計波を超える波浪又は設計津波を超える津波の作用に対する所定の性能の照査に当たっては、当該堤防の損傷等を軽減する機能を有していることを確認するものとする。

照査手法は、信頼性のある適切な手法を用いるものとする。

3. 2. 6 安全性能の照査

堤防は、波力、地震力、土圧等の作用に対して安全な構造とするものとするとともに透水をできるだけ抑制し得るものとする。安全性能の照査では、信頼性のある適切な手法を用いるものとする。

ただし、構造の細目については実績のある適切な例を参考にして設定することができるものとする。

2. 津波越流によって生じる水理現象と堤防の破壊現象

2. 1 津波越流の水理的特徴

堤防天端を超える水位となる津波が来襲し、越流が生じると、波返工や堤体の海側に作用する津波波力、天端から裏法尻にかけての高流速（およびそれに伴うせん断力）、流線の曲がりによる裏法肩周辺での圧力低下と裏法尻周辺での圧力上昇、裏法尻での洗掘、基礎地盤・被覆工下の堤体への浸透と被覆工下圧力の上昇などが同時に発生していく（図-2.1.1）。コンクリートブロック張式のように被覆工の密閉性が低い場合には、ブロック間の隙間での浸透や浸出が生じる（図-2.1.2）。

引き波時には、堤体上に押し波時とは逆向きの流れが生じるため、波返しや堤体には冲向きの津波波力、天端から表法先にかけての高流速、表法肩付近での圧力低下と表法先付近での圧力上昇、表法先での洗掘が生じる。

津波波力については2. 1. 1で、高流速については2. 1. 2で、裏法肩付近での圧力低下と裏法尻付近での圧力上昇など被覆工表面に作用する圧力については2. 1. 3で、裏法尻の洗掘については2. 1. 4で、浸透と被覆工下圧力の上昇については2. 1. 5で説明する。なお、引き波時の現象は、押し波時とは逆方向の作用で生じるものなので、説明を省略する。

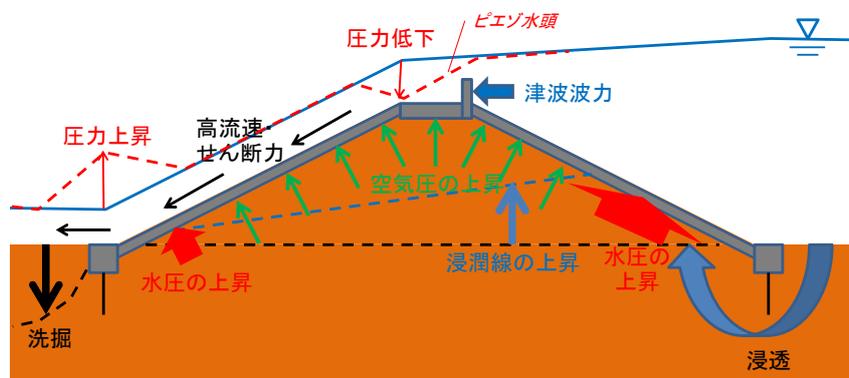


図-2.1.1 津波越流（押し波）によって生じる水理現象（被覆工の密閉性が高い場合）

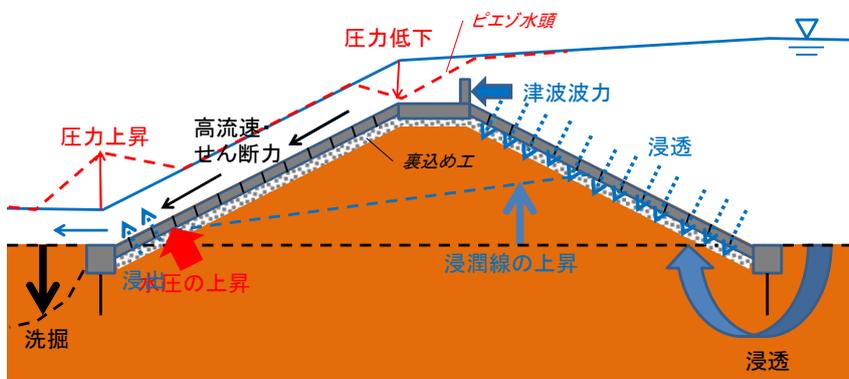


図-2.1.2 津波越流（押し波）によって生じる水理現象（被覆工の密閉性が低い場合）

2. 1. 1 津波波力

津波が海岸堤防に到達すると、津波に起因する海水の流動によって水位上昇とともに海岸堤防表面の圧力が上昇する。また、津波による流れが速い場合には、津波が海岸堤防に衝突する際に衝撃的な圧力が生じる場合もある。このような圧力上昇によって構造物全体に作用する力を津波波力と呼ぶ。

構造物の設計には、**図 2.1.1.1** のように、進行波の波高（構造物の影響を受けない場合の波高） a_I を波圧の最大作用高さ η^* 及び静水面高さの最大波圧強度 p_1 と関連づけて表された波圧の時間最大値を用いることが多い。この分布の係数は津波の状態や水理条件に応じて変わりうるが、その技術的系統は国総研報告 No.57 に整理されている。

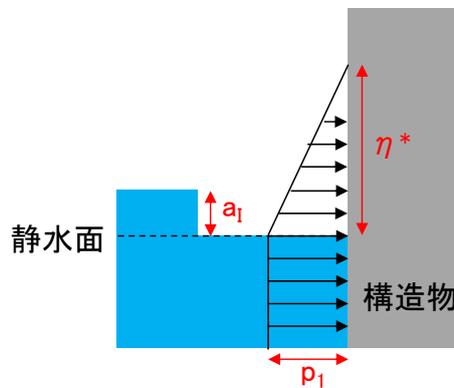


図-2.1.1.1 直立壁に作用する津波波圧の分布

谷本ら（1984）は、段波性津波を対象とした水理実験の結果から、海中の断面 2 次元構造物（津波進行と直角の方向には形状が一樣）に作用する波圧の分布を式 2.1.1.1～2 のように提案している。ここで w_0 は水の単位体積重量である。

$$\eta^* = 3.0a_I \quad (2.1.1.1)$$

$$p_1 = 2.2w_0a_I \quad (2.1.1.2)$$

式 2.1.1.1 の係数は水深係数（ここでは 3.0）、式 2.1.1.2 の係数は波圧強度（ここでは 2.2）と呼ばれる。水深係数は流体のフルード数 F_r と相関があると言われている。たとえば、榊山（2012）は、水理実験及び数値計算を行い、陸上にある断面 2 次元構造物に作用する波圧を計算する際の水深係数 α を式 2.1.1.3 のように求めている。

$$\alpha = 1.0 + 1.4F_r \quad (0.0 \leq F_r \leq 2.0) \quad (2.1.1.3)$$

上記の谷本式などは構造物を越流しない場合に適用できる。構造物を越流する場合には、構造物の海側および陸側の水位に対応した静水圧から津波波力を求める方法が提

案されている（国土交通省港湾局(2013)、水産庁漁港漁場整備部防災漁村課・国土交通省港湾局海岸・防災課(2015)）。

2. 1. 2 高流速

津波が海岸堤防を越流する際には、堤防の比高や裏法勾配、津波の越流水深などに応じて、天端から裏法および根留工上において高流速が発生する。

図-2.1.2.1～図-2.1.2.2は、縮尺 1/25 の固定床実験（堤防の比高（裏法尻から天端までの高さ）6m（現地換算値））での断面平均流速の分布を示している。断面平均流速 q/h はどの越流水深（表法先での水位と天端高との差）でも流下方向に増加する傾向にある。裏法尻（縦断距離 0m）においては、越流水深 2m 以上では 10m/s 以上の高流速が生じている。堤防の陸側の平坦面上ではさらに高流速となり、越流水深 6m 以上では 12m/s 以上となる。

図-2.1.2.3 に越流水深と断面平均流速の関係を示す。裏法肩および裏法上部での断面平均流速は越流水深とともに大きくなるが、裏法尻や裏法下部での断面平均流速は越流水深 2m を超えると頭打ち傾向にある。

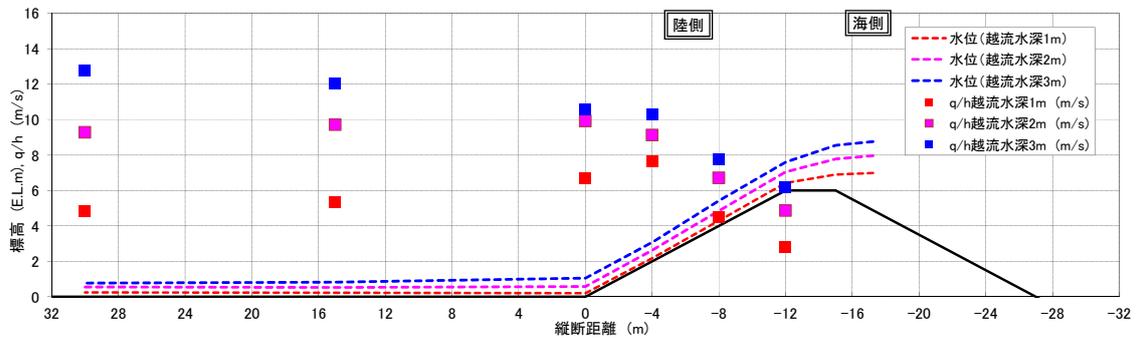


図-2.1.2.1 水位および断面平均流速の分布（越流水深 1m、2m、3m）

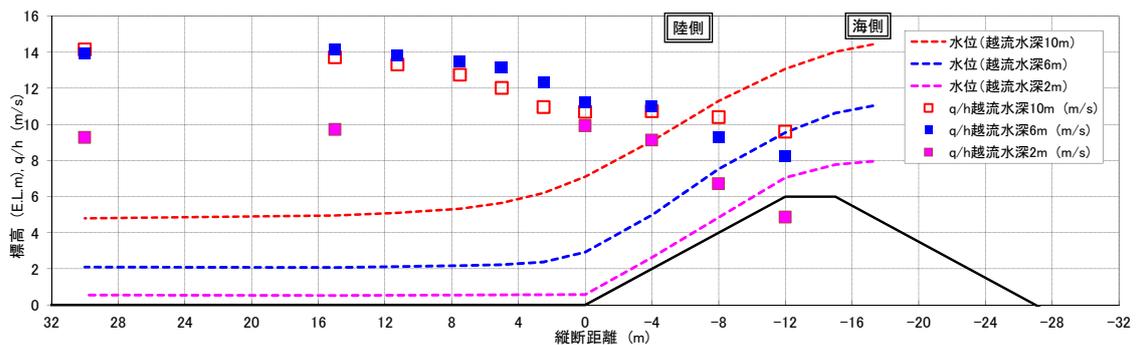


図-2.1.2.2 水位および断面平均流速の分布（越流水深 2m、6m、10m）

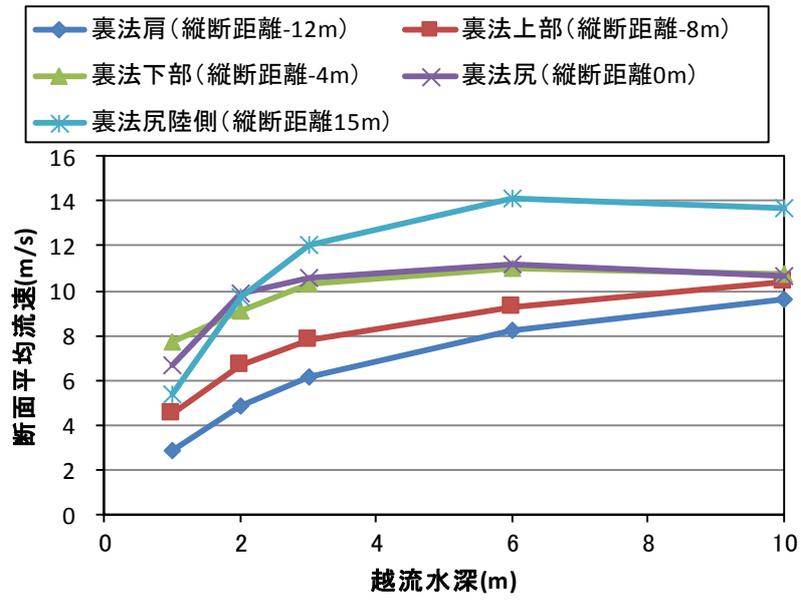


図-2.1.2.3 越流水深と断面平均流速の関係 (堤防の比高 6 m, 法勾配 2 割)

2. 1. 3 被覆工表面に作用する圧力

津波が海岸堤防を越流する際には、裏法肩周辺において圧力低下、裏法尻周辺において圧力上昇が生じる。

図-2.1.3.1～図-2.1.3.2は、模型実験（比高 6m）でのピエゾ水頭（現地換算値）の分布を示している。ピエゾ水頭は裏法肩（縦断距離-12m）において水位を下回り、流水深 6m 以上では負圧になるほど低下している。一方、裏法尻（縦断距離 0m）においては、ピエゾ水頭は水位を大きく上回っており、越流水深が大きいほど広い範囲で圧力が上昇している。

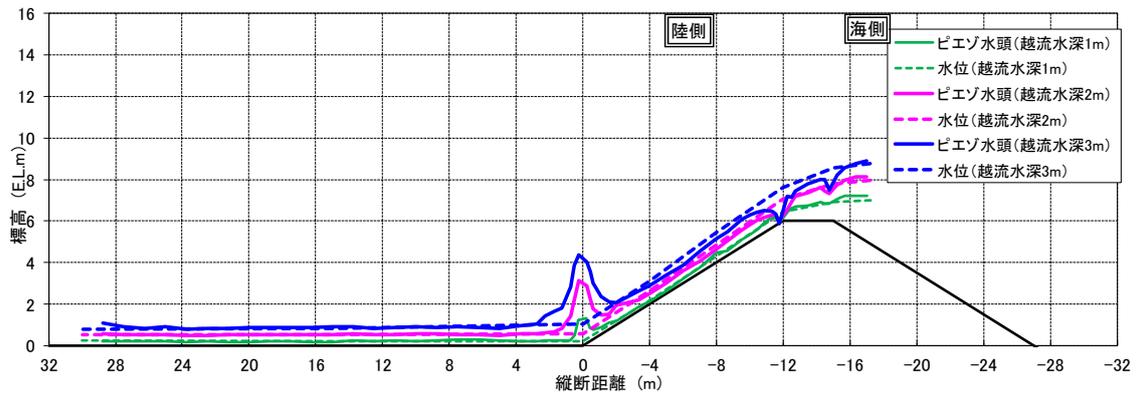


図-2.1.3.1 水位およびピエゾ水頭の分布（越流水深 1m、2m、3m）

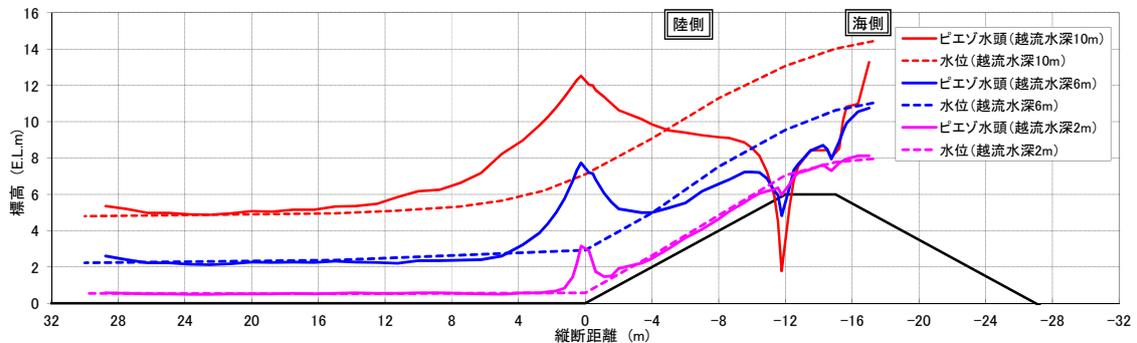


図-2.1.3.2 水位およびピエゾ水頭の分布（越流水深 2m、6m、10m）

ピエゾ水頭と水位の差分を式 (2.1.3.1) による圧力分布補正係数 λ により表現する。

$$\lambda = 1 + \frac{\Delta p}{2\rho gh} \quad (2.1.3.1)$$

ここで Δp : 底面における圧力の静水圧からのズレ、 $\Delta p/\rho g$: 底面におけるピエゾ水頭から水位を差し引いた値、 h ; 水深、である。なお上式は、圧力の静水圧からのズレに関する水深方向分布を直線近似して導いている。

図-2.1.3.3は裏法尻（縦断距離 0 m）での λ 値と越流水深の関係を、図-2.1.3.4は同じ

く裏法尻付近について堤防陸側（図-2.1.3.1～図-2.1.3.2 の縦断距離が正の位置）で $\lambda > 1$ となる範囲と越流水深の関係を整理したものである。裏法尻での λ 値は越流水深が大きくなると1に近づく。また、 $\lambda > 1$ となる範囲は越流水深とともに大きくなっている。裏法尻での圧力上昇は越流水の流向が裏法面に沿った向きから堤防陸側での水平方向に変わることによって、越流水深が小さい方が裏法尻での曲率が大きくなるのが効いて、図-2.1.3.3および図-2.1.3.4のような結果になったと考えられる。

図-2.1.3.5は、裏法肩（縦断距離 -12 m）での λ 値と越流水深の関係を整理したものである。裏法肩での λ 値は越流水深とともに1から離れて行く。越流水深とともに流速が大きくなる一方、曲率があまり変わらない裏法肩で、遠心力効果が増すことが効いて、越流水深の増大に伴い λ 値が小さくなる。

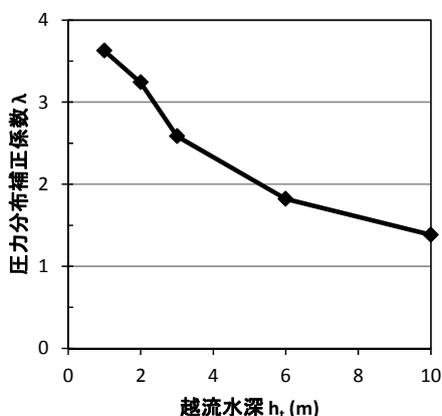


図-2.1.3.3 裏法尻（縦断距離 0 m）での圧力分布補正係数と越流水深の関係

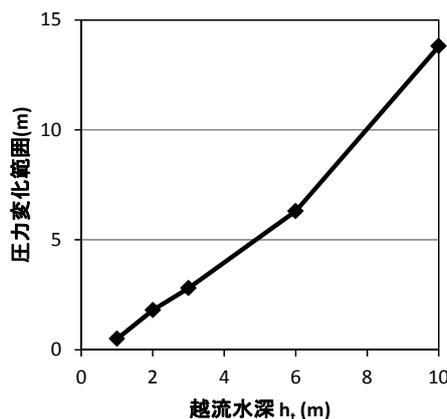


図-2.1.3.4 堤防陸側での圧力変化範囲と越流水深の関係

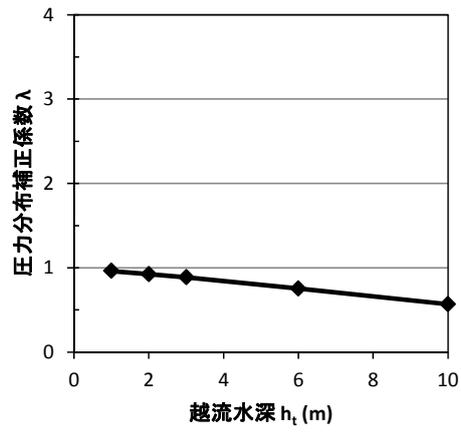


図-2.1.3.5 裏法肩（縦断距離 -12 m）での圧力分布補正係数と越流水深の関係

2. 1. 4 裏法尻での洗掘

津波が海岸堤防を越流する際には、堤防陸側で洗掘が生じる。

津波の越流による堤防陸側の洗掘に関する実験（縮尺 1/25）を行った結果を紹介する。

図-2.1.4.1 のように越流水深の波形を与えた実験後における堤防陸側の洗掘深の流下方向分布を図-2.1.4.2 に示す。堤防模型は比高が 6 m、裏法勾配が 1:2、天端幅 3 m とし、裏法尻に幅 1 m、厚さ 1 m の根留工を据え付けている（寸法は現地換算値）。また、堤防模型の陸側は、砂（中央粒径 0.25 mm、均等係数 1.85、土粒子の密度 2.7 g/cm³）を厚さ 5 cm 毎に締め固めた移動床とした（締め固め度平均 88.7%）。この移動床の材料は現地スケールで約 6 mm の礫に相当するため、現地より粗い材料を使っている可能性が高いが、越流水のせん断力によって洗掘が生じるという基本的な特徴は再現できている。堤防陸側の洗掘の深さおよび範囲は、最大越流水深とともに大きくなる傾向が見られる。なお、最大越流水深 10 m のケースでは、越流前の地表より 12.5 m 下の水路床が露出した。このケースを除くと、越流水深が大きいほど、洗掘深が最大となる位置が堤防から離れている。

図-2.1.4.3 は、最大越流水深との関係で、越流後の最大洗掘深と根留工際の洗掘深を図化したものである。根留工際の洗掘深は、最大越流水深 3 m 以下で根留工の厚さ以下にとどまり、変化も小さいのに対し、越流水深 6 m 以上では根留工の厚さを上回り、最大越流水深の増大とともに大きくなる。

図-2.1.4.4 は、図-2.1.3.1～図-2.1.3.2 に示した堤防陸側の圧力変化（上昇）範囲と、その各データの越流水深と同じ値を最大越流水深とするケースでの根留工際の洗掘深の関係を示している。図中の破線は、根留工の幅（横軸）と深さ（縦軸）である。根留工際の洗掘深が 1 m 以下にとどまっている範囲は、堤防陸側の圧力上昇範囲で言うと 2.8 m 以下に対応している。この値は根留工幅 1 m の 3 倍程度にあたる。

図-2.1.4.5 は、堤防模型の比高が 4m、裏法勾配が 1:1、天端幅が 3m、最大越流水深が 1m の条件で、根留工が有るケースと無いケースの越流終了後の地形を比較したものである。この図のように、根留工があるケースでは根留工際の洗掘深が小さくなっている。

以上のことから、1)裏法尻での根留工の存在により流向が変化することで根留工際の洗掘が緩和される効果が発揮される、2)この効果発揮には、堤防陸側の圧力上昇を根留工が受け止め、流向を確実に変えることが必要である、という推論が成り立つ。

図-2.1.4.6 は、裏法勾配 1:2 の条件で、比高 6m 及び 9m（現地換算値）の場合の越流後の断面形を比較したものである。比高が大きい方が、根留工際の洗掘深及び最大洗掘深が大きくなっている。比高 9m の場合、根留工際の洗掘深は、最大越流水深 2m でも根留工の厚さ（1m）を上回っている。

図-2.1.4.7 は、比高 9m（現地換算値）の条件で、裏法勾配 1:2 及び 1:3 の場合の越流後の断面形を比較したものである。裏法勾配 1:3 の方が、根留工際の洗掘深及び最大洗掘深が若干小さくなっており、根留工際の洗掘深は最大越流水深 2m でも根留工の厚さ（1m）を上回らない。

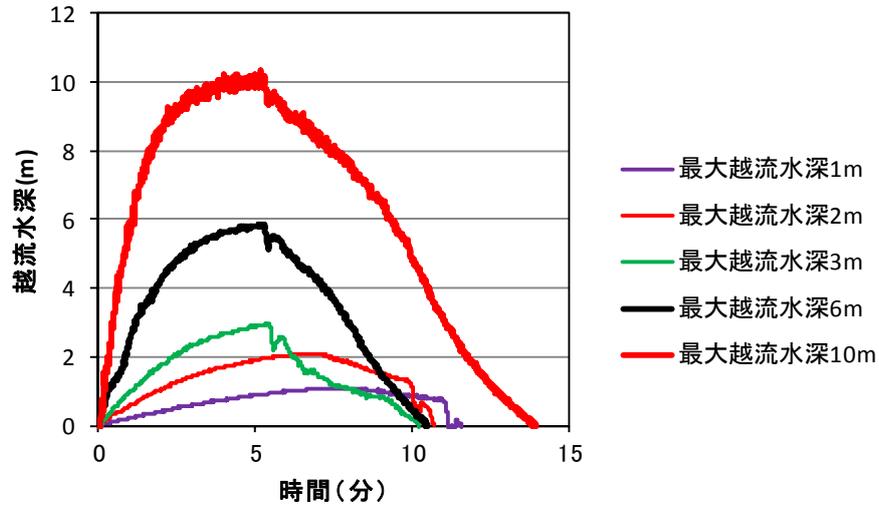


図-2.1.4.1 越流水深の時間変化（現地換算値）

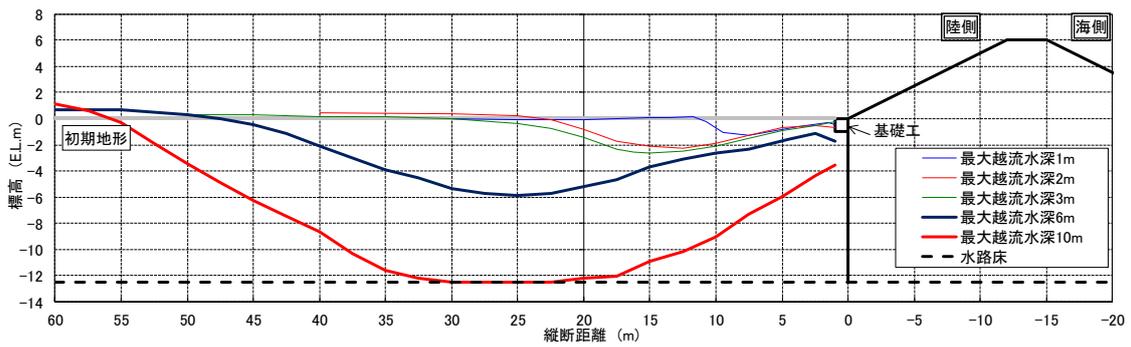


図-2.1.4.2 越流終了後の地形（比高 6m、裏法勾配 1:2）

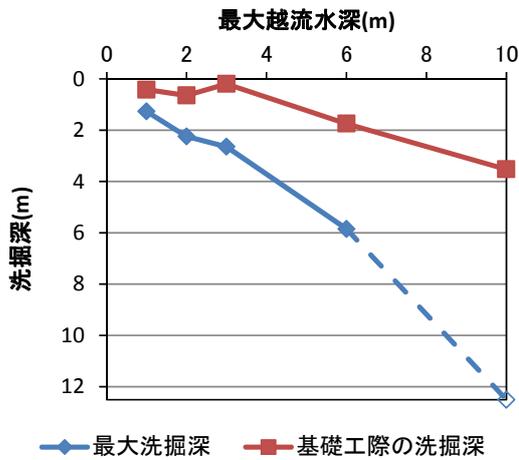


図-2.1.4.3 洗掘深と最大越流水深の関係
（比高 6m、裏法勾配 1:2）

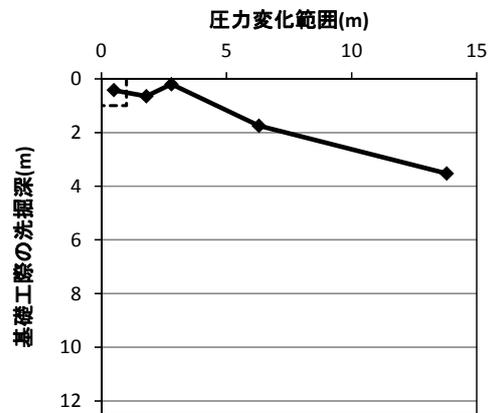


図-2.1.4.4 圧力変化範囲と根留工際の洗掘深の関係

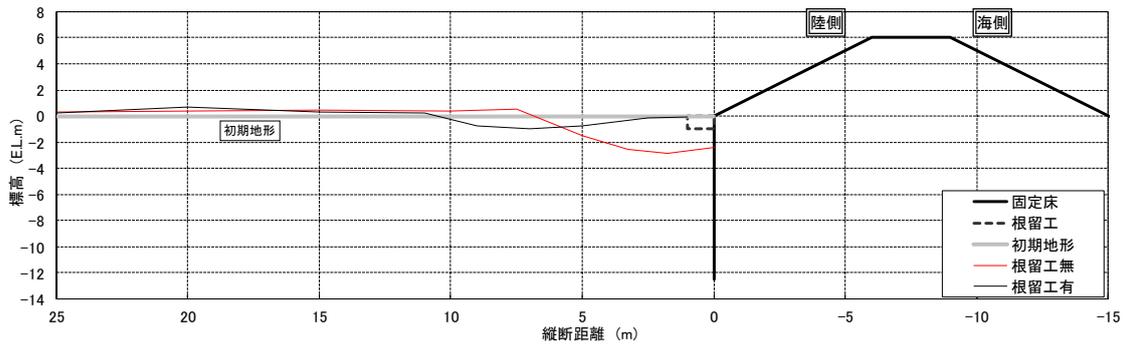


図-2.1.4.5 根留工の有無による越流終了後の地形の違い(裏法勾配 1:1、最大越流水深 1m)

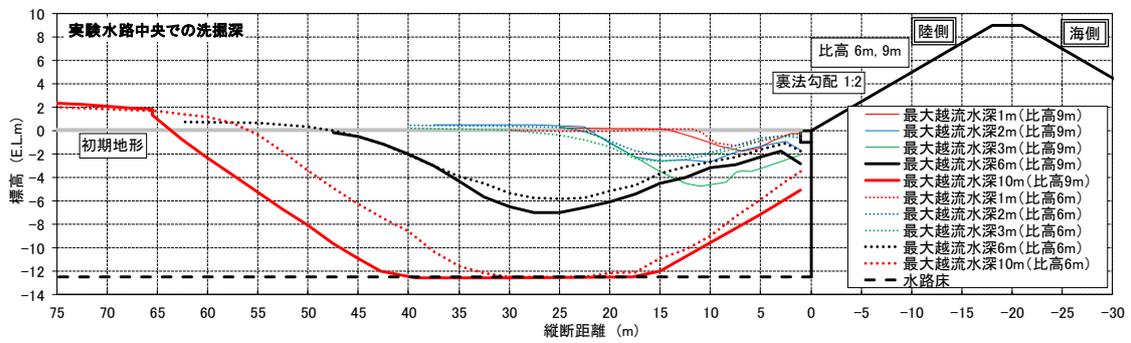


図-2.1.4.6 比高による越流終了後の地形の違い(裏法勾配 1:2)

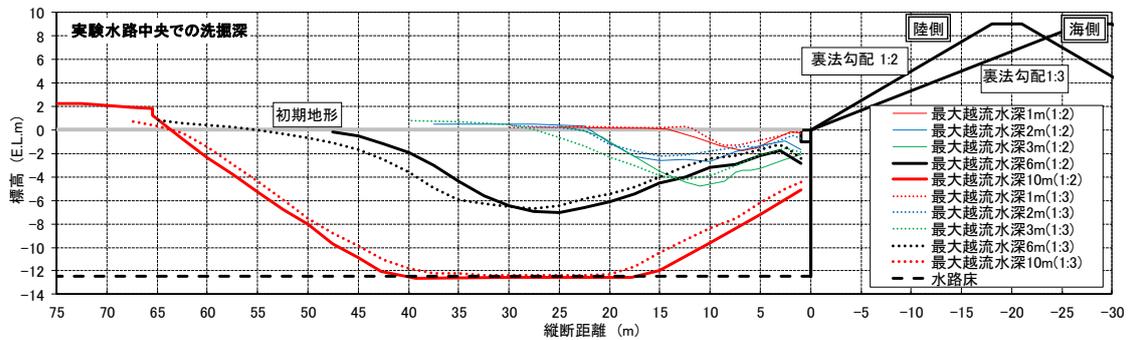


図-2.1.4.7 裏法勾配による越流終了後の地形の違い(比高 9m)

2. 1. 5 浸透と被覆工下圧力の上昇

津波が海岸堤防を越流する際には、海水が基礎地盤や被覆工下の栗石・フィルター層、堤体土に浸透し、堤体土内の浸潤線上昇やそれに伴う被覆工下の水圧上昇が起こる。また、被覆工の遮水性が高い場合には空気が密閉され、空気圧上昇が起こる懸念がある。

津波越流時の浸透による被覆工下の圧力上昇に関する実験（縮尺 1/2）を行った結果を以下に示す。

図-2.1.5.1のように、長さ 50.8m、幅 1m、高さ 6m の水路に設けた砂地盤（中央粒径 0.25mm）の上に、盛土の三面を平張りコンクリートで被覆した傾斜堤（法勾配 1:2）を想定した堤防模型（比高 2.5m、天端幅 1.5m）を設置した。砂地盤および盛土（中央粒径 0.25mm）は捲き出し厚 30cm で締固めた。厚さ 0.25m の表法被覆工および裏法被覆工は、施工性の観点から、それぞれ 3 分割して水路内に搬入した後、緩衝材を挟んだ状態で境目の上下を鋼材で押さえることで、現場打ちコンクリートと同様の一体性を確保した。堤防模型の表法先および裏法尻には根留工を設け、被覆工と同様に水路壁に固定した。なお、被覆工の気密性を確保するため、被覆工間および根留工と被覆工との間は緩衝材とシリコンを、被覆工および根留工と水路壁との間はモルタルを充填した。

被覆工および基礎工の下面や表法先の材料については、表-2.1.5.1 及び図-2.1.5.2 のように 3 ケースを設定した。被覆工下のフィルター層は割栗石（粒径 25~75mm）の上層（厚さ 15cm）と碎石（RC-20）の下層（厚さ 10cm）の 2 層構造で、基礎工下のフィルター層は碎石（厚さ 5cm）としている。越流前に散水を行い、砂地盤表面が飽和するようにした。越流水深は、鳩貝ら(2012)と同様に、最大で 1m、継続時間 7 分となるように、時間的に変化させた。

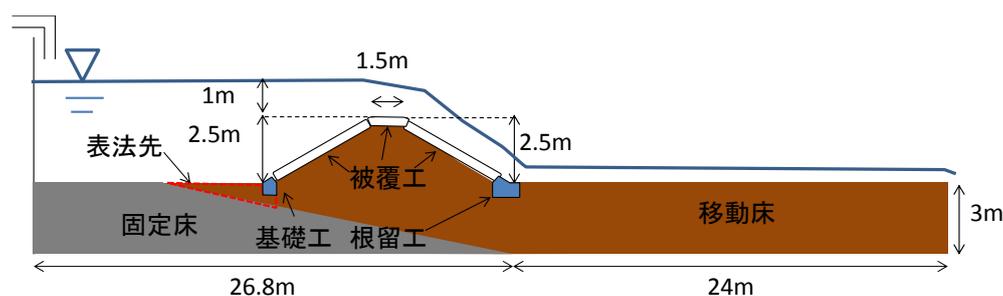


図-2.1.5.1 模型断面

表-2.1.5.1 実験条件

ケース	被覆工・基礎工・根留工下面	表法先
1	砂	砂地盤
2	フィルター層	砂地盤
3	フィルター層	割栗石

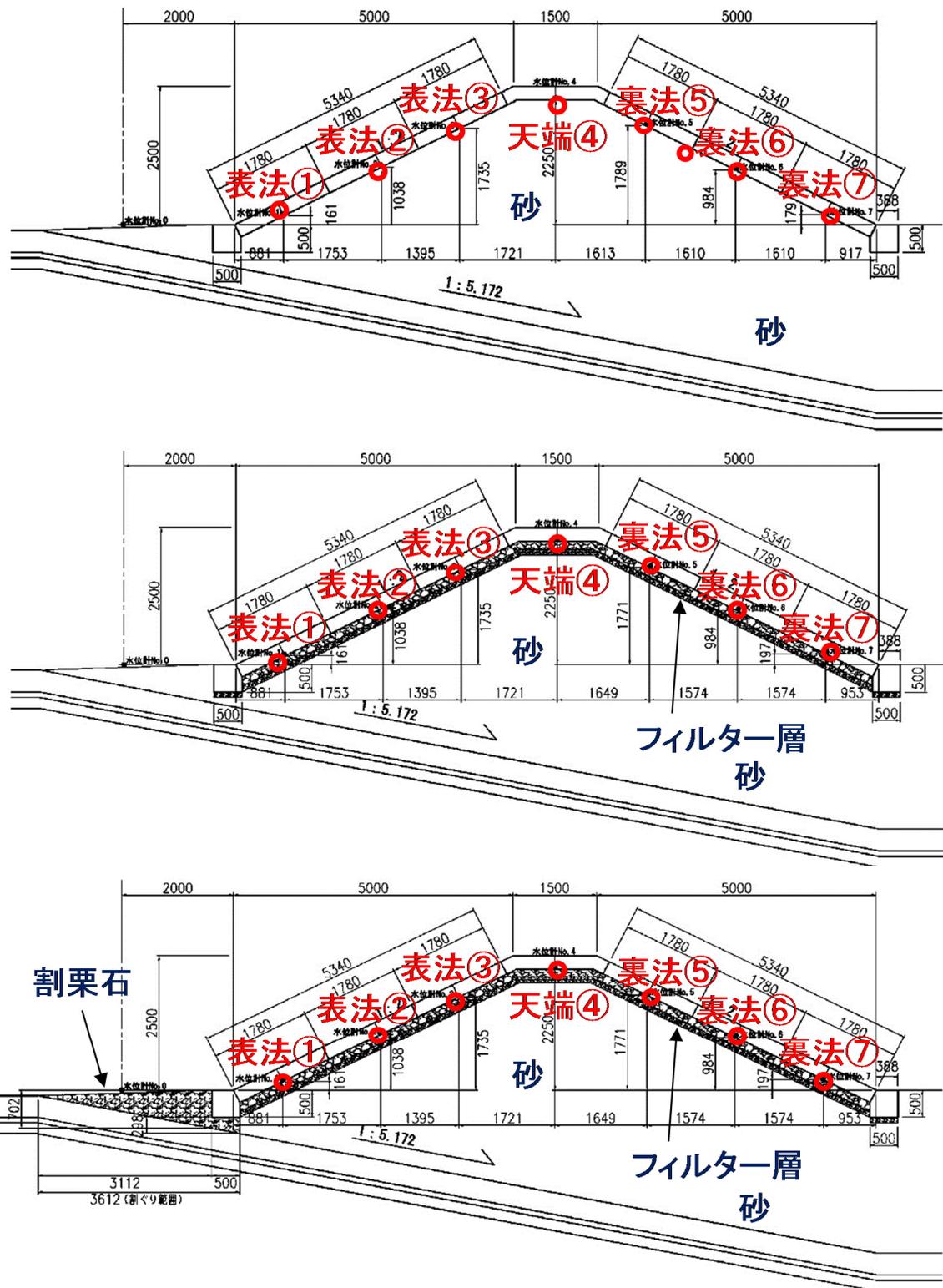


図-2.1.5.2 各ケースの堤防模型（上から、ケース1、ケース2、ケース3、赤丸は圧力計の設置位置、寸法の単位：mm）

図-2.1.5.3 にケース 1 での越流後の地形を示す。越流によって裏法尻では洗掘が生じており、裏法尻の根留工近傍では根留工下面程度まで洗掘された。なお、ケース間で地形の違いはほとんどなかった。

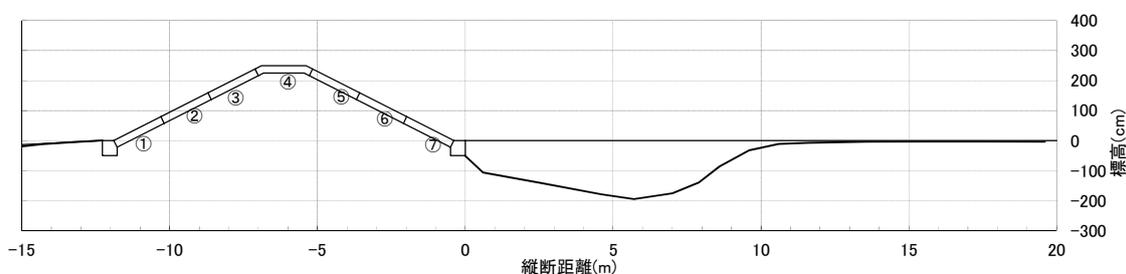


図-2.1.5.3 越流後の地形 (ケース 1)

図-2.1.5.2 に示された 7 点で測定した被覆工下面での圧力の変動量を水頭表示した結果を図-2.1.5.4 に示す。

堤体土の上に直接被覆工を置いたケース 1 では、表法中央に設置した表法②を除くと、圧力は表法先の水深のピークから遅れて最大となり、その水頭の最大値は 0.5m 以下で、測点間の差は小さい。浸潤面上昇によって堤体内の空気圧がほぼ均等に増加しているものと考えられる。表法②の圧力は、越流開始 (経過時間 0sec、表法先水深 2.5m) 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。被覆工の周囲に生じたわずかな隙間からの浸透が表法②に達して局所的に飽和し、表法上の水圧変化に応じて圧力の変化が生じたものと考えられる。

盛土と被覆工の間にフィルター層を設けたケース 2 では、表法被覆工下面の圧力が下の測点から順に急上昇し始めており、表法①～③での圧力の最大値は天端のフィルター層の下面の高さ (2m) を超えるとともに、その水圧計間の差は水圧計の設置高さの差とほぼ一致している。これは、表法先の基礎工の下からの浸透によって表法被覆工の下のフィルター層が水で満たされていき、その水位が天端のフィルター層の下面の高さを越えると裏法のフィルター層に水が流入したため、表法①～③ではフィルター層内の静水圧が測定されたと考えられる。また、天端被覆工や裏法被覆工の下面に位置する④～⑦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①～③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に位置する④～⑦ではフィルター層が飽和しないまま、空気圧が一様に変化していたと考えられる。なお、表法①以外では越流開始直後に負圧となり、圧力が小刻みに振動しているのは、裏法尻での洗掘孔で流れの剥離により生じた負圧が根留工下のフィルター層を通じて被覆工下のフィルター層に伝わったためと考えられる。また、その影響により、飽和していない④～⑦では、ケース 1 より圧力の最大値が小さくなったと考えられる。

フィルター層に加えて、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いることから、表法先から堤体内への浸透が速く進んでいると考えられる。このため、表法被覆工下面の①～③ではケース 2 よりも最大値が増加する一方、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。裏法⑥および裏法⑦が飽和したのは、表法先から流入した水が表法および天端のフィルター層を通過して裏法のフィルター層に達して貯まったためと考えられる。また、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。なお、ケース 2 で見られた負圧は生じていない。

以上のように、海岸堤防を津波が越流する状況において、コンクリート被覆式のような被覆工の気密性・水密性が高い構造では、表法先から浸透しやすく、裏法尻から空気や水が抜けにくい条件では、被覆工下面に作用する圧力が上昇しやすいことがわかる。

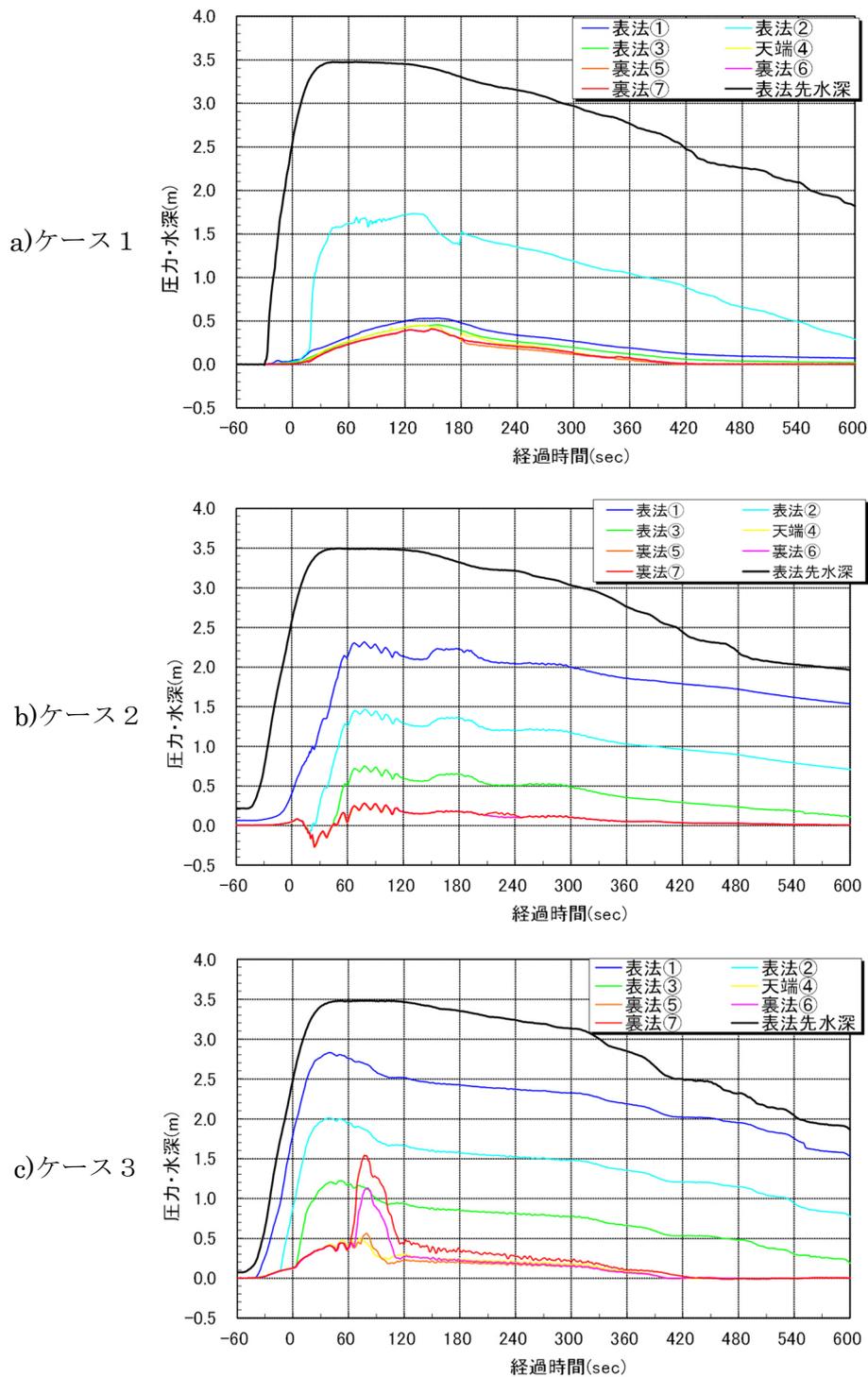


図-2.1.5.4 被覆工下面の圧力

2. 2 津波越流による海岸堤防の破壊現象

2. 2. 1 破壊に至る素過程と破壊現象

2. 1で説明した津波越流時の水理現象に伴う海岸堤防の破壊現象は、波返工の破損、根留工の不安定化、裏法被覆工の不安定化、法肩の不安定化、堤体材料の吸い出し、パイピングなどの素過程に分類できる。これらが同時かつ相互に影響しながら破壊が進行し、全壊に至ると考えられる。

押し波時の傾斜堤の破壊に至る素過程は図-2.2.1.1のように整理される。波返工の破損については2. 2. 2で、根留工の不安定化については2. 2. 3で、裏法被覆工の不安定化については2. 2. 4で、法肩の不安定化については2. 2. 5で、堤体材料の吸い出しについては2. 2. 6で、パイピングについては2. 2. 7で説明する。このほか、引き波時の表法被覆工の不安定化について、2. 2. 8で説明する。

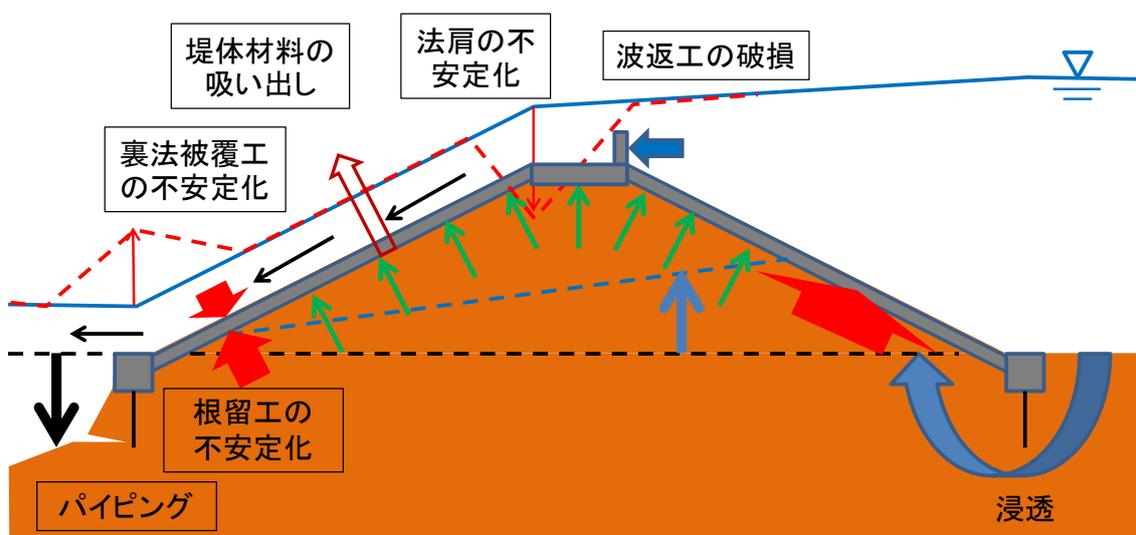


図-2.2.1.1 傾斜堤の破壊に至る素過程

2. 2. 2 波返工の破損

波返工は、風波やうねり、それらによるしぶきが堤内側に入るのを防ぐことを目的に、天端上に突出して設けられる構造物である。波返工は風波等による波力に耐えられるよう、**図-2.2.2.1**のように表法被覆工と一体化されることが多い。このため、津波波力が作用すると、波返工が表法被覆工とともに倒壊し、それが全壊に至るきっかけとなる恐れがある。

津波が各地の海岸堤防を越流した東北地方太平洋沖地震では波返工が多数破損した。**写真-2.2.2.1**では、波返工が打ち継ぎ目で破断し、陸側に転倒している。**写真-2.2.2.2**では、引き波時に波返工が裏側から水圧を受けて、表法被覆工とともに海側に倒壊している。

波返工の破損を防ぐための要点は、津波波力に対して必要な配筋を施すこと、または波返工を設置しないことである。これらについては3. 1で述べる。

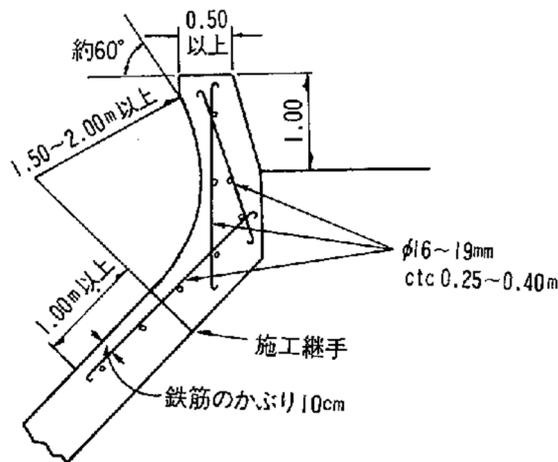


図-2.2.2.1 波返工の配筋例



写真-2.2.2.1 波返工の破損事例
(福島県豊間海岸)



写真-2.2.2.2 表法被覆工と一体化した
波返工の破損事例
(岩手県下甫嶺海岸)

2. 2. 3 根留工の不安定化

図-2.2.3.1 をもとに、津波越流時に根留工が不安定になるメカニズムを説明する。津波の越流が生じると、根留工の上面には越流水のせん断力や水圧が作用するほか、根留工の陸側が洗掘されることで受働土圧が期待できなくなり、洗掘が根留工の下面まで進むと根留工下面の摩擦力が低下する。また、堤体内の浸潤線上昇により、裏法被覆工と堤体土の間の摩擦が低下し、裏法被覆工の自重によって根留工を下に押し出そうとする力が大きくなる。さらに、根留工の下面に作用する水圧が上昇することで、根留工下面の摩擦力も低下する。以上の結果、根留工は不安定になり、陸側への滑動や転倒が生じやすくなる。根留工は裏法被覆工を支えているので、根留工の移動や流失は裏法被覆工での隙間の発生による堤体土の吸い出しや、裏法被覆工の流失に繋がる。

写真-2.2.3.1 は、水理模型実験において根留工が洗掘の進行とともに流失し、裏法被覆ブロックが流失しつつある状況である。写真-2.2.3.2 は根留工の流失から半壊した堤防の例である。図-2.2.3.2 及び写真-2.2.3.3 は、水理模型実験において、矢板と一体化した根留工が、裏法被覆工とともに裏法尻の洗掘範囲に向けて移動した例である。

根留工の不安定化を防ぐための要点は、根留工際の洗掘を軽減することである。その構造上の工夫は3. 2で説明する。

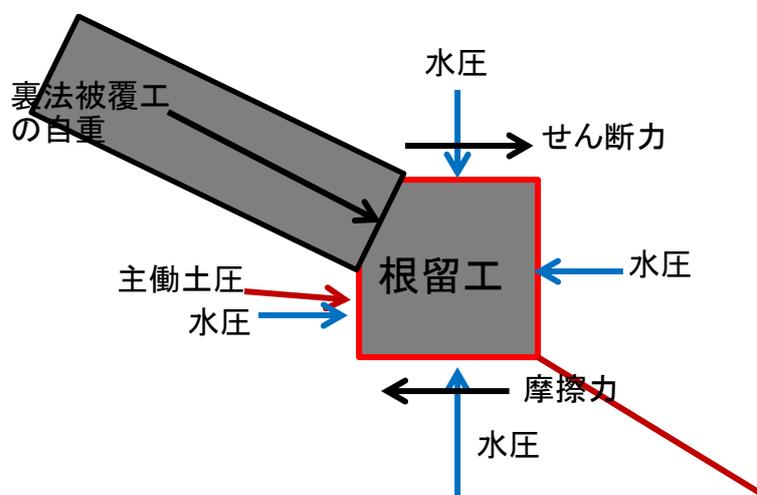


図-2.2.3.1 根留工に作用する力

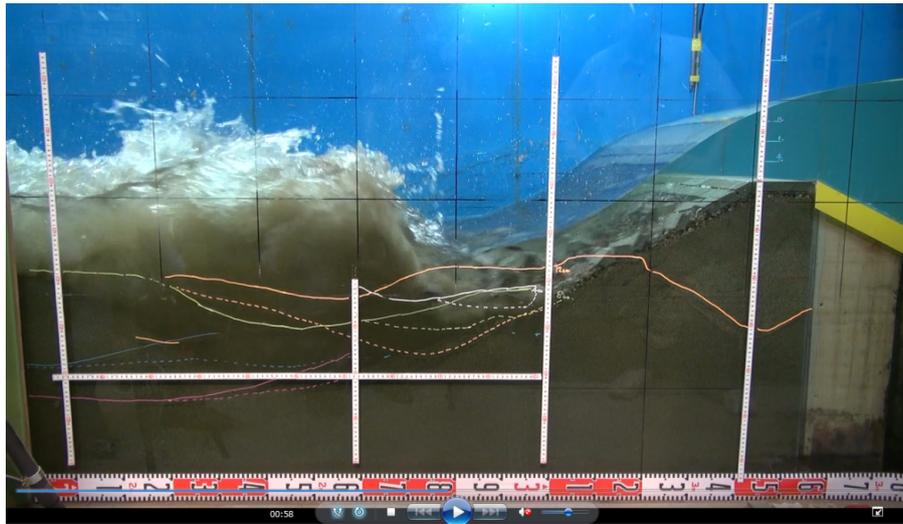


写真-2.2.3.1 根留工流失からの破壊状況（縮尺 1/25 水理模型実験）



写真-2.2.3.2 裏法尻洗掘から根留工が流失し半壊した堤防（岩手県接待海岸）

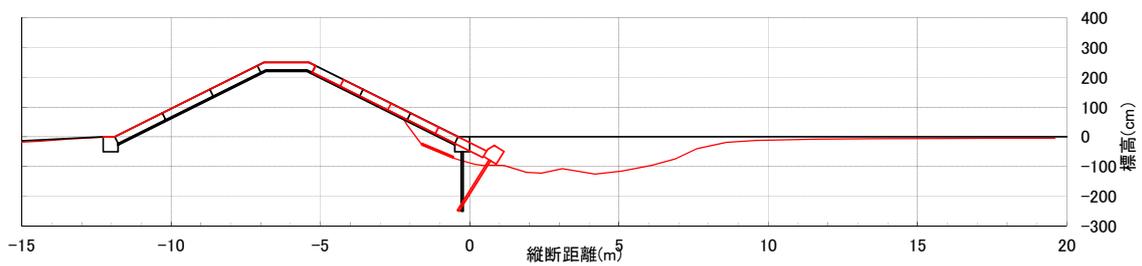


図-2.2.3.2 矢板と一体化した根留工が移動した例（黒線：越流前、赤線：越流後）

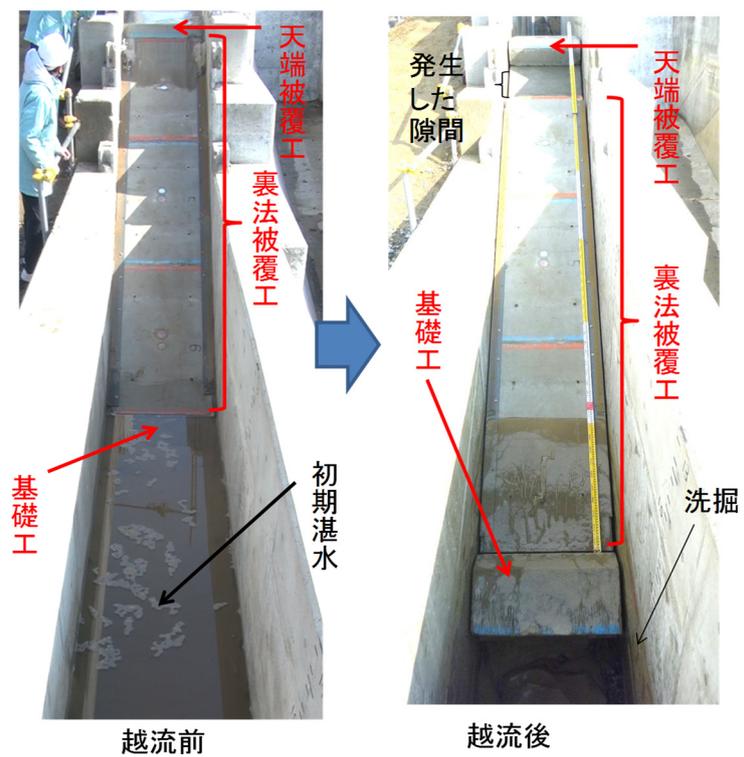


写真-2.2.3.3 矢板と一体化した根留工が移動した例

2. 2. 4 裏法被覆工の不安定化

津波の越流によって裏法で高流速が発生している中で、堤体土の吸い出しなどによって被覆工に不陸が生じると、その不陸面には大きな流体力（主に抗力）が作用する。また、浸透によって裏法被覆工下面の圧力が増大することで、裏法被覆工下面の摩擦が低下してずれ落ちやすくなる。これらに根留工の移動・流失や裏法被覆工の上面に作用する圧力低下の影響も加わることで、裏法被覆工がさらに不安定化する。

写真-2.2.3.1 は根留工の流失によって裏法の被覆ブロックが流失した例であったが、写真-2.2.4.1 も根留工の移動によって裏法被覆工が滑動し、裏法被覆工と天端被覆工の間に隙間が生じた。一方、写真-2.2.4.2 は、根留工の流失を考慮していない、堤防陸側を固定床とした水理模型実験において、図-2.2.4.1 のように裏法被覆工が上部からめくれあがった例であり、これは浸透によって裏法被覆工の下面の圧力が増大したほか、裏法肩周辺での圧力低下が影響したものと考えられる。裏法をブロックで被覆した場合でも、写真-2.2.4.3 のように、裏法上部の被覆ブロックがめくれた例があり、これは根留工の移動によって生じたブロック間の隙間からの吸い出しのほか、裏法肩周辺での圧力低下が影響したものと考えられる。裏法肩周辺での圧力低下に関しては、2. 2. 5 法肩の不安定化と共通する。

裏法被覆工の不安定化を防ぐための要点は、堤体土の吸い出しを防ぐこと、被覆工表面に不陸を作らないこと、被覆工下面の圧力上昇を軽減することである。これらの構造上の工夫については、3. 3で説明する。

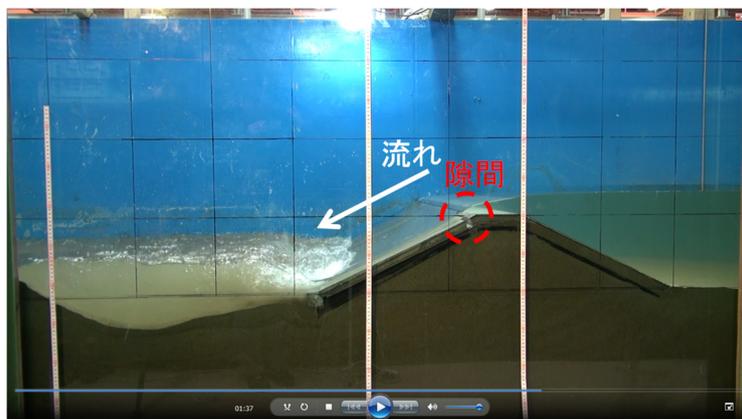


写真-2.2.4.1 裏法被覆工の滑動



写真-2.2.4.2 裏法被覆工のめくれ (左：めくれる前、右：めくれた瞬間)

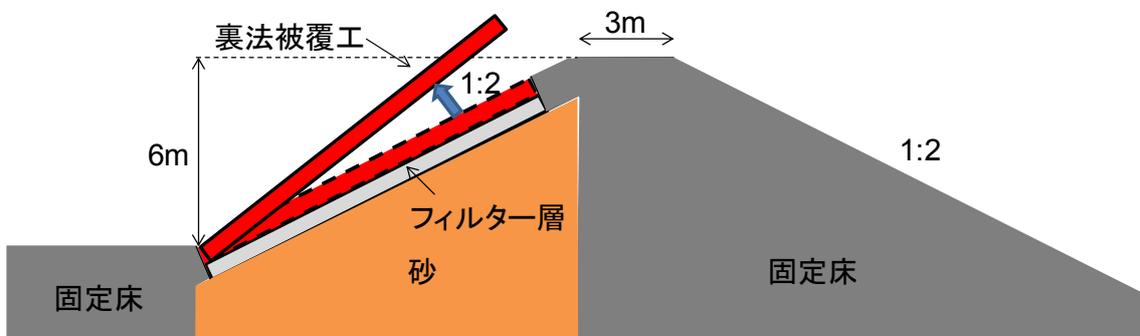


図-2.2.4.1 裏法被覆工のめくれ

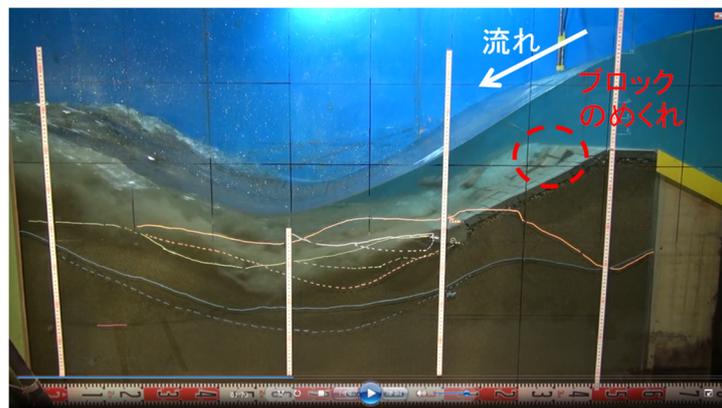


写真-2.2.4.3 裏法の被覆ブロックのめくれ

2. 2. 5 法肩の不安定化

裏法肩を独立した被覆構造にすると、**図 2.2.3.1** および**図 2.2.3.2** に示した裏法肩で生じる圧力低下（場合によっては負圧）により不安定化する。法肩の被覆が流失すると、そこから堤体土が吸い出されて破堤に至る恐れがある。

写真-2.2.5.1 は、裏法肩に独立して設置した被覆ブロックが越流によって流失した例である。

法肩の不安定化を防ぐための要点は、法肩の圧力低下の範囲・程度などを考慮して、被覆工の厚さや一体性を確保することである。その構造上の工夫は3. 4で説明する。



写真-2.2.5.1 水理模型実験で見られた裏法肩のコンクリートの流失

2. 2. 6 堤体材料の吸い出し

津波の越流時の高流速によって、被覆工の隙間（被覆ブロックに設けられた孔、被覆工間の空隙など）から堤体材料が吸い出されることがある。

写真-2. 2. 6. 1 は、裏法被覆工の下にある裏込め工と堤体土が被覆ブロックの孔から吸い出された模型実験の事例であり、吸い出しにより裏法被覆工が沈下している。

このほか、津波の越流時においてその水位がピークを過ぎて低下している際に、堤体内の残留水圧により裏法被覆工が持ち上がり、堤体材料が吸い出される恐れがある。写真-2. 2. 6. 2 はその例であるが、裏法被覆工が持ち上がってできた隙間から堤体土が流失している。

堤体材料の吸い出しを防ぐための要点は、被覆工の空隙を裏込め工の粒径より小さくすること、堤体内の残留水圧を小さくすることである。前者については3. 3で説明する。後者については、パイピングと合わせて2. 2. 7で説明する。

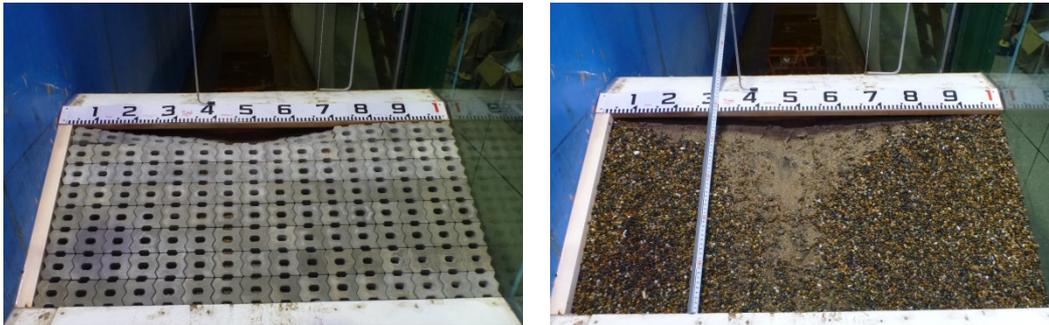


写真-2. 2. 6. 1 吸い出しによる裏法被覆工の部分沈下（左）と被覆工下の状況（右）

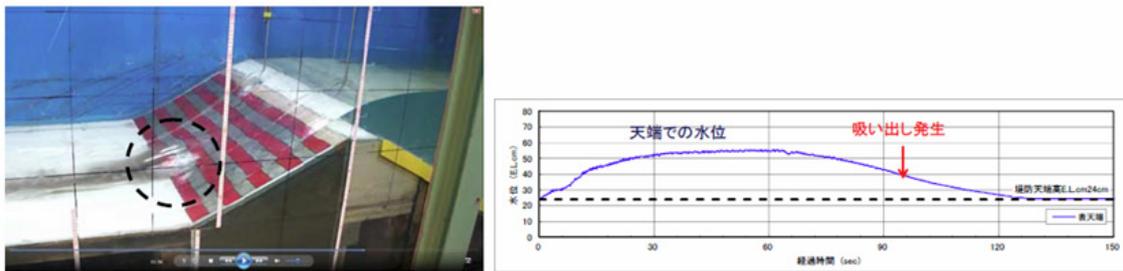


写真-2. 2. 6. 2 水理模型実験で見られた水位低下時の吸出し

2. 2. 7 パイピング

海岸堤防の設計においては、高潮時の堤防内外の水位差によるパイピングが生じないように、止水工の長さ等を設定している。しかし、設計津波を超える津波が来襲し、堤防内外の水位差が大きくなる一方、海岸堤防の陸側での洗掘により堤防内外の浸透路長が短くなると、パイピングが生じる恐れがある。海岸堤防の法勾配が急で敷幅が狭い場合や、基礎地盤や堤体土の透水係数が大きい場合には、特に生じやすい。

写真-2.2.7.1は、コンクリート重力式の堤体を対象にした縮尺 1/25 の水理模型実験において、越流時に堤体下にパイピングによる水みちが生じ、堤体が傾いた事例である。越流時には海側（写真右側）と陸側（写真左側）との間で水位差が生じる一方、越流によって堤防陸側の地盤が洗掘されることで堤防下の浸透路長が短くなることで、パイピングに至ったと考えられる。

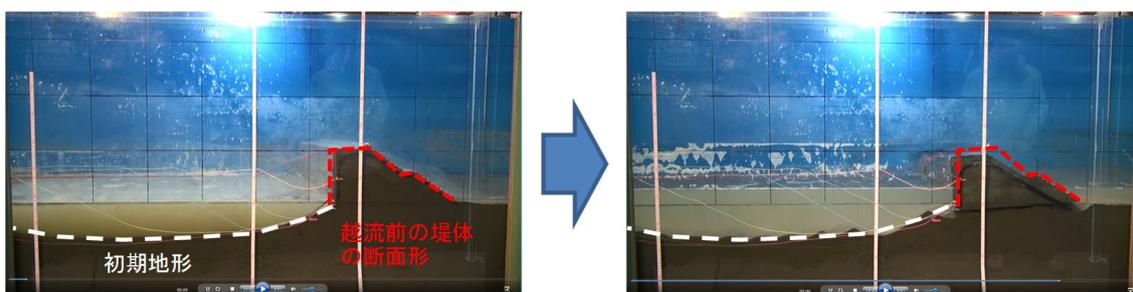


写真-2.2.7.1 パイピングによって堤体下に水みちが生じて傾いた直立堤の例

なお、パイピングを生じさせる水みちは、堤体の下だけでなく、堤体内にも生じる恐れがある。表法や裏法の被覆にコンクリートブロックを用いる場合、そのブロックの下にフィルター層を設けることがあるが、それが堤防内外に連続していると水みちになる恐れがある（図-2.2.7.1）。

パイピングを防止するための要点は、堤防の敷幅を広げること、洗掘を軽減すること、浸透路長が長くなるように止水することである。

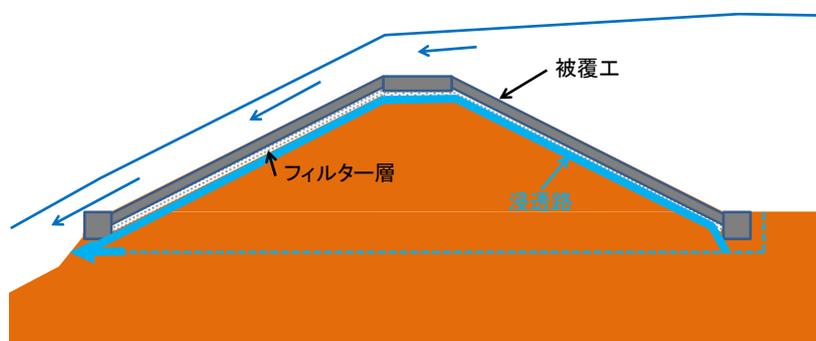


図-2.2.7.1 フィルター層による水みちの形成

2. 2. 8 表法被覆工の不安定化

津波の来襲に対して、表法被覆工は、押し波時には堤体土とともに波力を受け止め、引き波時には高流速が被覆工上を流下する中で堤体土を侵食から守る。台形断面の盛土の表面を被覆する構造の堤防の場合には、津波波力が作用しても表法被覆工は堤体土の反力によって支えられる。ただし、表法被覆工と波返工とが一体構造になっている場合には、波返工部分に作用する津波波力によって、打ち継ぎ目の破断や表法被覆工の転倒・滑動が生じる恐れがある。また、裏法被覆工が押し波時に越流によって不安定化するのと同様に、表法被覆工は引き波時に不安定化する恐れがある。

図-2.3.1 は、東日本大震災で津波越流が生じた千葉県から青森県までの三面張り構造の海岸堤防について、越流水深と全壊率、被災率（半壊以上の延長率）の関係性をグラフに整理したものである。図は、越流水深カテゴリ別に合計した全壊率、被災率を算出したグラフと、構造が同じ一連区間に別々に全壊率、被災率を算出し散布図として整理したグラフの2種類作成している。

図から、越流水深が大きくなるほど全壊率・被災率ともに大きくなること、全壊率・被災率のばらつきが大きいことがわかる。また、半壊としている事例も図中写真のように堤土が露出し、越流水が作用すれば容易に破壊が進む状態である。

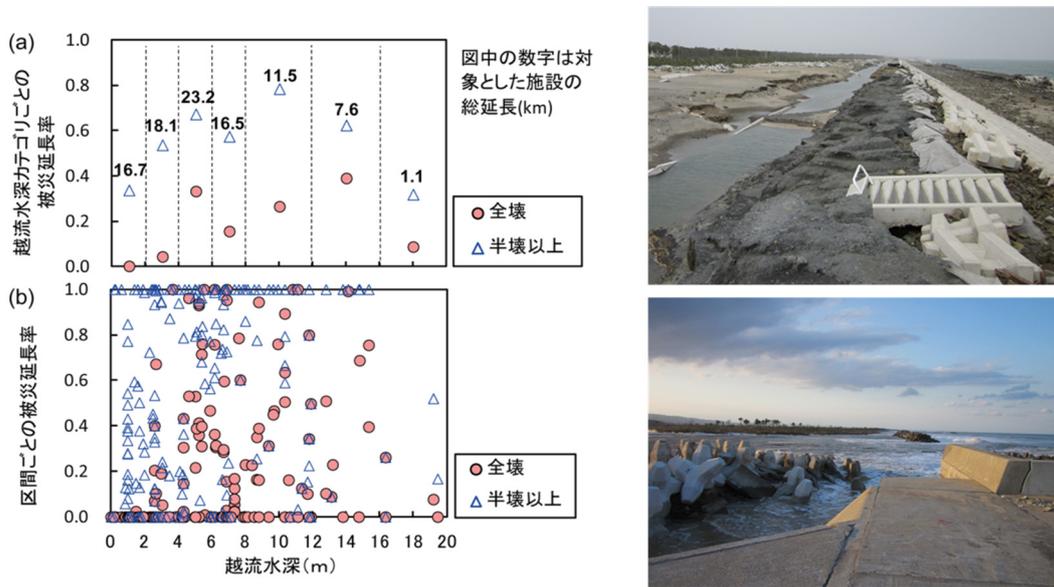


図-2.3.1 東日本大震災における津波越流による三面張り堤防の被災実態

図-2.3.2 は、東日本大震災で越流が確認された三面張海岸堤防について、越流水深、天端幅、比高、表法勾配、裏法勾配、裏法尻被覆幅の6項目の数値が得られたものについて、多重ロジスティック回帰分析を行った結果である。海岸堤防の全壊に影響する度合を示す表の標準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、比高の順に大きかった。天端幅については、全壊と関係があるのか判断できなかった。

東日本大震災で津波越流が見られた既設堤防の被災実態から、構造上の工夫として、裏法尻被覆を設けること（簡易舗装ではない舗装道路を裏法尻に設置することも含む）、表・裏の法勾配を緩くすること、比高を小さくすることで全壊の可能性を減らすことができることがわかる。

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

表-2 多重ロジスティック回帰分析の結果

説明変数 (平均 ± s. d.)	係数 β	p 値	標準化 回帰係数	オッズ比 (95% CI)
越流水深 (m) (5.8 ± 3.9)	0.261	<0.001	1.013	1.30 (1.23-1.37)
裏法尻被覆幅 (m) (1.6 ± 3.1)	-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 (m) (3.5 ± 1.9)	0.096	0.075	0.183	1.10 (0.99-1.22)
天端幅 (m) (3.6 ± 2.3)	0.019	0.830	0.044	1.02 (0.84-1.18)

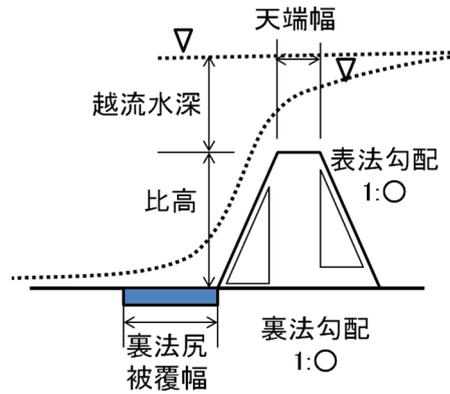


図-2.3.2 多重ロジスティック回帰分析結果

3. 構造上の工夫の考え方と要点

3. 1 総説

津波の越流に対して堤防が粘り強く効果を発揮するための構造上の工夫の考え方や要点を紹介する。

2. 2. 1に示したように、津波による被災過程においては、複数の被災形態が複合的に発生することも多いと考えられることから、粘り強い構造の検討においては、特定の対策工法のみに限定せず、複数工法の組み合わせを検討することが望ましいとされている。これは、特定の部位を強化しても、堤防全体が壊れにくくなるとは限らないことを示唆している。

三面張り堤防でも、表法被覆工や裏法被覆工がコンクリートブロック張式とコンクリート被覆式では、津波越流時の浸透や被覆工下面の圧力上昇の状況が異なる。コンクリートブロック張式では、津波越流時にブロック間の隙間から水が浸入するとともに、ブロックの下にある裏込め工（フィルター層）が水みちになりやすいが、堤体への浸透により浸潤線が上昇しても、その隙間により被覆工下面の空気圧上昇が緩和される。一方、コンクリート被覆式では、津波越流時に法面からの水の浸入は起こりにくいが、堤体への浸透により浸潤線が上昇すると、被覆工下面の空気圧が上昇しやすい。

以上のことから、津波越流に対する三面張り堤防の構造上の工夫を検討する上での留意すべき現象を、コンクリートブロック張式およびコンクリート被覆式に共通するものと、それぞれに関するものに分類すると、表-3.1.1のように整理できる。これらをふまえて、3. 2以降に示す各部位の強化を検討する必要がある。

表-3.1.1 三面張り堤防の構造上の工夫を検討する上で特に留意すべき現象

共通する現象	
・裏法尻での洗掘による根留工の不安定化 ・高流速や法肩での圧力低下による被覆工や法肩の不安定化 ・津波波力による波返工の破損（波返工を設ける場合）	
コンクリートブロック張式における現象	コンクリート被覆式における現象
・高流速による堤体材料の吸い出し ・裏込め工の水みち化	・被覆工下面の圧力上昇

(1) コンクリートブロック張式およびコンクリート被覆式に共通する現象への対処

図-3.1.1 では、コンクリートブロック張式およびコンクリート被覆式に共通する破壊現象への対処を黒枠内に示しており、押し波時の現象に対するものを青字で、引き波時の現象に対するものを緑字で、押し波時、引き波時とも生じる現象に対するものを黒字で表記している。2. 2. 3に示したように、法面を流れ下った越流水による洗掘に対し、裏法尻および表法先における対応が必要となる。また、2. 2. 4および2. 2. 5に示したように、高流速や法肩での圧力低下に対し、裏法被覆工や法肩が不安定化しないような対応が必要となる。2. 2. 2に示したように、波返工がある場合には、津波波力により破損しないような対応が必要となる。

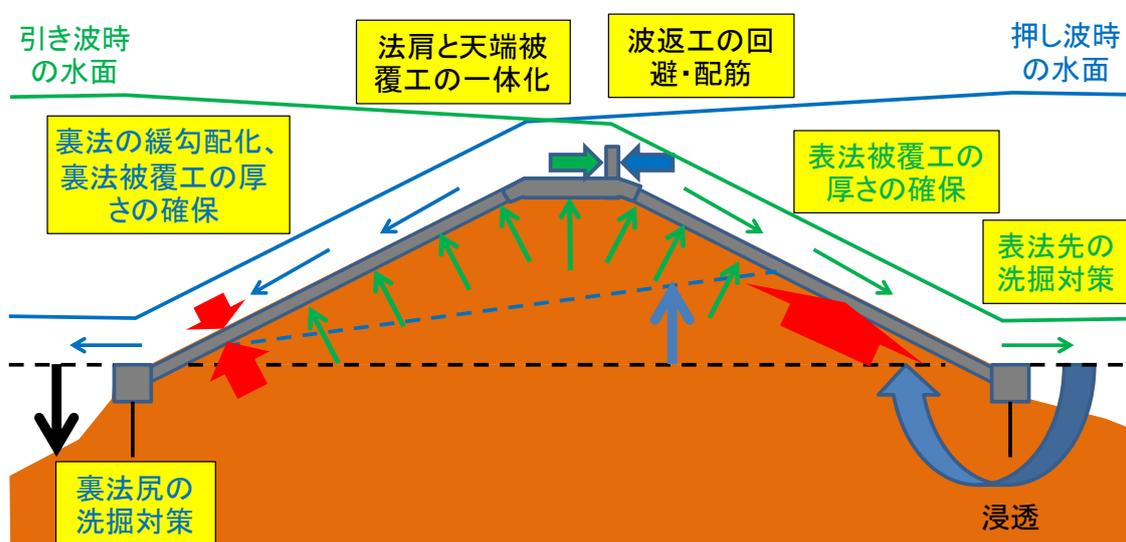


図-3.1.1 コンクリートブロック張式およびコンクリート被覆式に共通する現象への対処

(2) コンクリートブロック張式における現象への対処

図-3.1.2 では、コンクリートブロック張式における破壊現象への対処を黒枠内に示しており、押し波時の現象に対するものを青字で、引き波時の現象に対するものを緑字で、押し波時、引き波時とも生じる現象に対するものを黒字で表記している。2. 2. 6に示したように、コンクリートブロック張式の被覆工は、高流速による堤体材料（裏込め工の材料を含む）の吸い出しへの対応が必要となる。また、津波越流時にブロック間の隙間から裏込め工に水が浸入するとともに、表法先から浸透した水が裏込め工に浸入することで、裏込め工が水みちとなり、パイピングが生じる恐れへの対応が必要となる。

(3) コンクリート被覆式における現象への対処

図-3.1.3 では、コンクリート被覆式における破壊現象への対処を黒枠内に示している。コンクリート被覆式の被覆工は、津波越流時に法面からの水の浸入は起こりにくいですが、堤

体への浸透により被覆工下面の圧力上昇への対応が必要となる。また、コンクリートブロック張り式とは異なり、被覆工の下は裏込め工ではなく捨てコンクリートとすることが多いが、堤体と被覆工との間に隙間ができると、そこが水みちになる恐れがあることから、普段からの空洞化の監視が重要である。また、コンクリートブロック張り式より急勾配の法面にも適用することが多いが、透水性が高い基礎地盤の上に敷幅が狭い（法勾配が急である）堤体を設置すると、基礎地盤が水みちとなってパイピングが生じる恐れが皆無ではないので、基礎地盤の状況にも留意する必要がある。

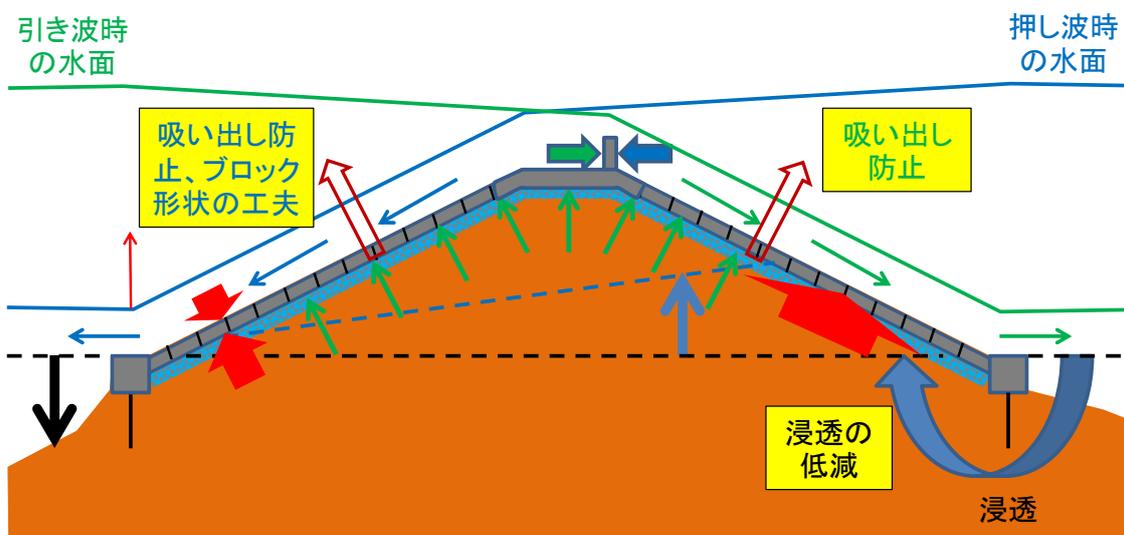


図-3.1.2 コンクリートブロック張り式における現象への対処

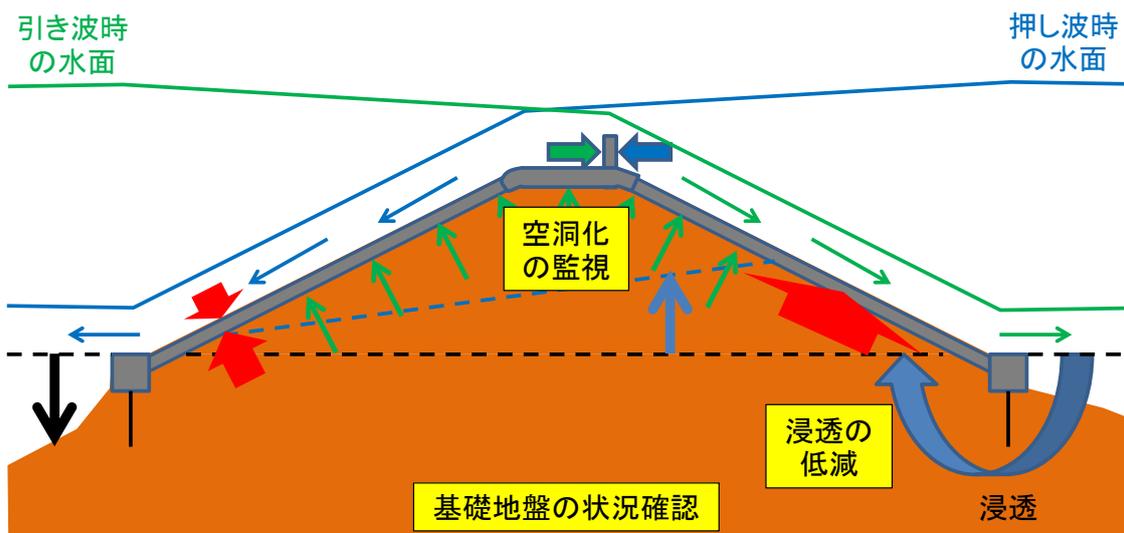


図-3.1.3 コンクリート被覆式における現象への対処

3. 2 裏法尻の洗掘対策

(1) 考え方

2. 1. 4で述べた裏法尻の洗掘に対しては、その洗掘を軽減する構造、あるいは洗掘が生じても壊れにくい構造とすることが考えられる。

裏法尻の洗掘を軽減する構造として、2. 1. 4で述べたように裏法勾配を緩くするとともに、裏法尻を被覆して洗掘から保護することが考えられる。裏法尻の被覆方法は、地盤改良、舗装などが考えられる。

洗掘が生じても壊れにくい構造としては、根留工を大きくしてその自重により流失しにくくさせることのほか、地盤に打ち込んだ矢板と根留工を一体化し、洗掘が生じても矢板によって自立させることが考えられる。

以上のような構造について、以下で説明する。

(2) 裏法尻を被覆して洗掘を軽減する構造上の工夫

裏法尻の洗掘はその範囲を全て被覆することで軽減できるが、2. 1. 4で示したようにその洗掘の範囲は広いことから、その全てを被覆することは現実的ではない。また、被覆した部分には流体力などが作用することから、被覆部分が流されないようにしなければならない。以上のことをふまえ、裏法尻被覆の範囲と工法について説明する。

1) 裏法尻被覆の範囲

2. 1. 4で示したように、越流による裏法尻での圧力上昇範囲の一定割合を保護することで、根留工際の洗掘深を軽減できる。その構造上の工夫を検証するために行った縮尺1/2の水理模型実験の結果を以下に示す。

実験は、長さ45 m、幅1 m、高さ4 mの水路で行った。図-3.2.1および図-3.2.2のように、現地スケールでの堤防模型の比高、裏法勾配、天端幅などを設定し、堤防の盛土部分と堤防陸側の平坦床は砂（中央粒径0.25 mm）を厚さ30cm毎に締固めて作成した。各ケースの条件を表-3.2.1に、実験前の堤防模型および平坦床の状況を写真-3.2.1に示す。また、根留工周辺の地盤改良は津波堆積土（仙台市若林区井土地区、細粒分含有率50%のシルト）とセメントを配合して養生したものであり、宇多ら（1997）に示された方法で測定したその引っ張り破壊応力は 5.9 N/cm^2 であった。水路はポンプで給水できるようになっており、現地スケールで最大越流水深が2 m、越流継続時間が10分となるように水位を時間的に変化させた（図-3.2.3）。なお、電波流速計で測定した裏法尻での表面流速の最大値は約9 m/sである。なお、実験に際しては、移動床内の洗掘の進行や被覆ブロックが移動した時点を把握するため、堤防陸側の移動床内および裏法被覆工のブロック内に加速度センサーを埋め込んだ。

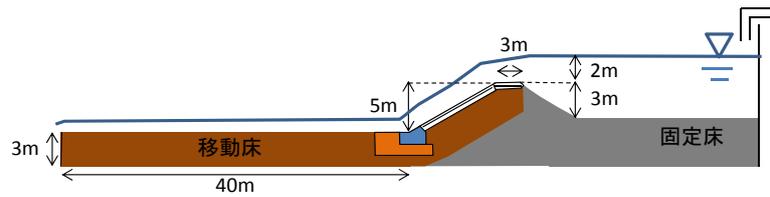


図-3.2.1 大規模実験の模型断面図（縦断方向、寸法は現地換算値）

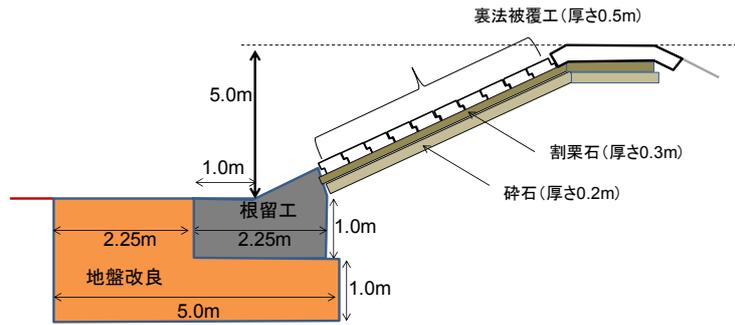


図-3.2.2 裏法尻の保護と裏法被覆工の工夫（寸法は現地換算値）



写真-3.2.1 越流前の堤防模型および平坦床

表-3.2.1 裏法尻の保護と裏法被覆工の工夫に関する大規模実験の条件設定

ケース	地盤改良	最大越流水深 (現地換算値)
1	無し	2 m
2	有り	2 m

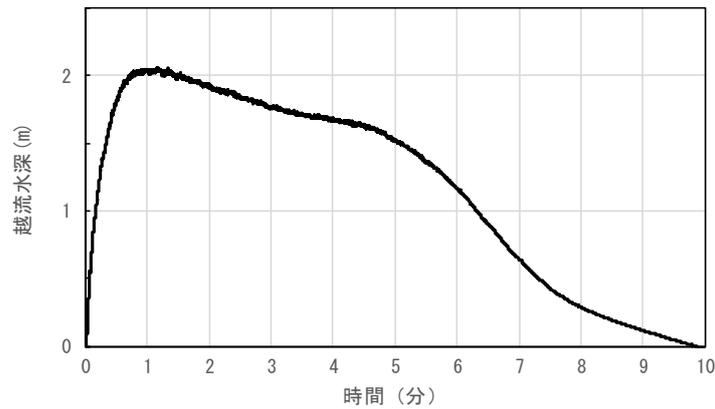


図-3.2.3 ケース 2 の越流水深の経時変化 (寸法は現地換算値)

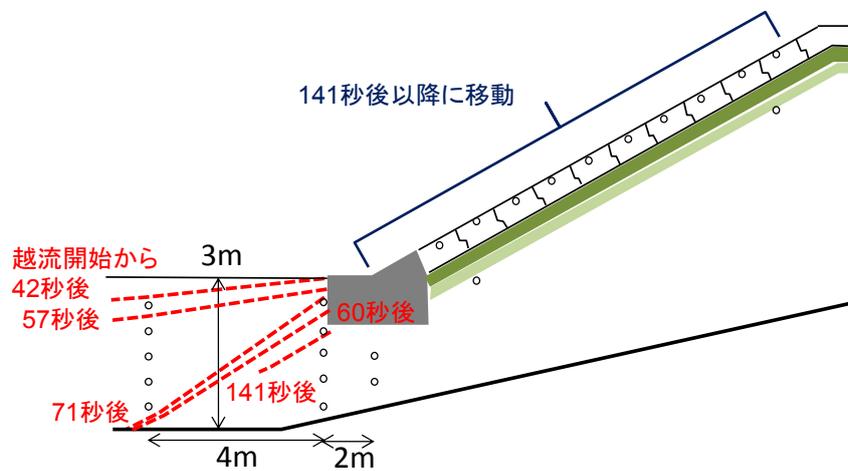


図-3.2.4 裏法尻での洗掘の進行過程 (ケース 1、寸法・時間は現地換算値)

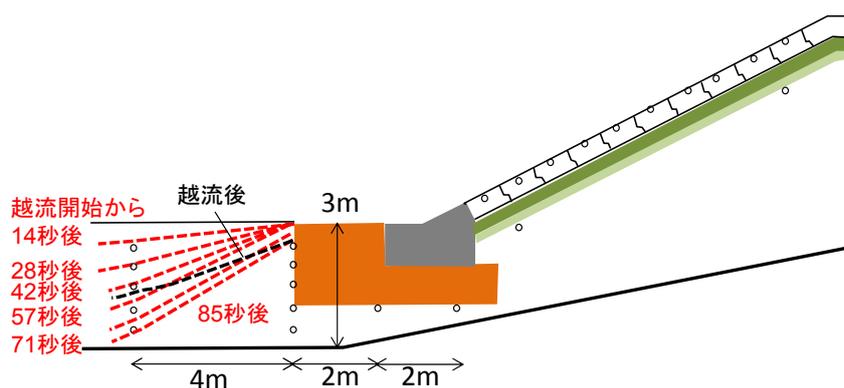


図-3.2.5 裏法尻での洗掘の進行過程 (ケース 2、寸法・時間は現地換算値)

図-3.2.4 および図-3.2.5 は、加速度センサーから推定された、裏法尻での洗掘の進行状況を示している。図中の白丸は加速度センサーの設置位置であり、根留工または地盤改良部分のすぐ陸側および 4 m 陸側において 50 cm 間隔で鉛直方向に配置するとともに、裏法

の被覆ブロック内のほか、根留工や裏法被覆工の下部にも設置している。越流開始直後は裏法および堤防陸側において射流となっていたが、下流側で生じた跳水の位置が堤防に向かって移動し、越流開始から 57 秒後（現地換算値）には裏法尻に達した。

図-3.2.4 のように、地盤改良を施さなかったケース 1 では、越流開始から 42 秒後（現地換算値）まで根留工から陸側 4 m の範囲で洗掘深は 0.5 m 未満であったが、越流開始から 71 秒後（現地換算値）までに根留工の陸側 4 m の加速度センサーが全て流失した後、越流開始から 140 秒後（現地換算値）に根留工が洗掘によって露出したのを引き金に、その 1 秒後（現地換算値）に裏法中央のブロックが流失し、その後に根留工と全てのブロックが流失した。

一方、地盤改良を施したケース 2 では、図-3.2.5 のように、越流開始から 85 秒後（現地換算値）までの間に地盤改良部分の陸側 4 m での洗掘が進行したが、地盤改良部分の陸側端部では洗掘深は 50 cm に達せず、裏法被覆工および根留工に変状はなかった。両ケースの比較から、根留工の陸側に地盤改良を施すことで根留工直近での洗掘が低減され、根留工および裏法被覆工が被災する可能性を減じたと考えられる。

写真-3.2.2 と写真-3.2.3 はケース 1 とケース 2 における越流終了後の裏法尻の状況を、図-3.2.6 は越流終了後の堤防および背後地盤の断面形を示している。地盤改良を施さなかったケース 1 では、裏法被覆工に続いて堤体土も流失したため、裏法が大きくえぐられた形状となっている。また、流失した裏法被覆工が縦断距離 10 m 付近に留まったため、その陸側の洗掘が生じていない。一方、地盤改良を施したケース 2 では、裏法被覆工、根留工、地盤改良部分が原形を留め、地盤改良部分の下面が露出するほどの洗掘は生じなかった。ただし、地盤改良部分から陸側 20 m 以上の範囲が洗掘されていた。



写真-3.2.2 越流終了後における裏法尻の状況（ケース 1）



写真-3.2.3 越流終了後における裏法尻の状況（ケース 2）

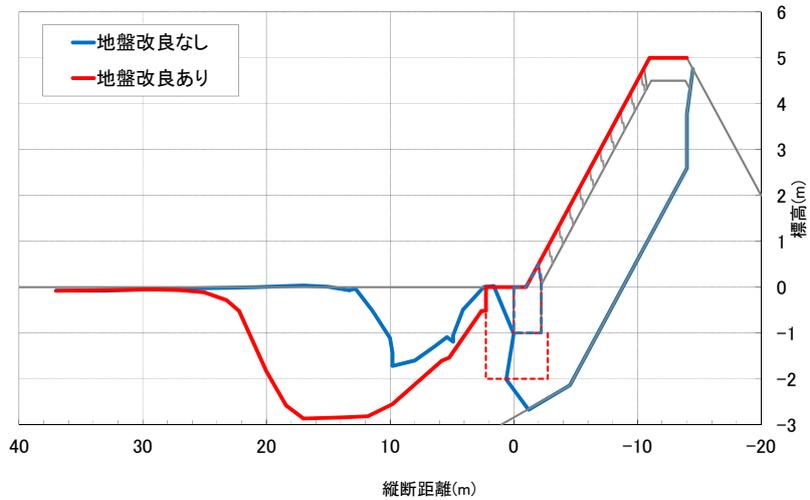


図-3.2.6 越流終了後の断面形

図-3.2.7は、図-2.1.3.1に示した越流水深2mでの水位およびピエゾ水頭について裏法尻周辺を拡大するとともに、図-3.2.1で示した裏法尻の保護の範囲を示している。ピエゾ水頭等の分布は比高6mのものであるが、5mの場合と大きな違いはないとして考察を進める。裏法尻において圧力が上昇している範囲（幅約2m）は、根留工面の平場（幅1m）より長く、根留工上面と地盤改良上面を合わせた長さ（3.25m）より短い。これを図-3.2.4および図-3.2.5に示した地盤改良付加の有無による洗掘状況の違いと対比すると、圧力上昇範囲の半分程度しか保護しない根留工の幅は洗掘に対して不十分である一方、圧力上昇範囲を超えて保護する地盤改良の幅は洗掘深を軽減する上で十分であったと考えられる。現地スケールの粒径が小さい場合には圧力上昇範囲全体の保護が基本になると考えられる。

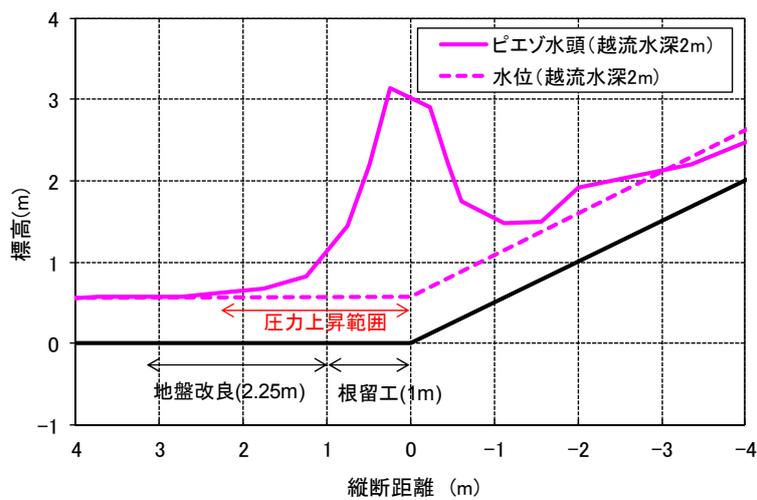
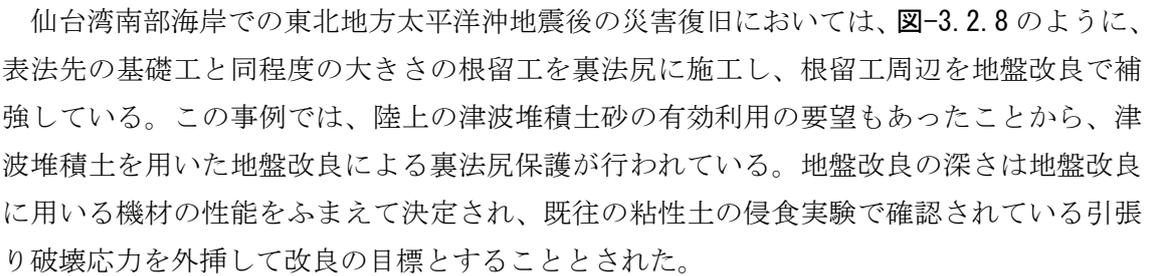
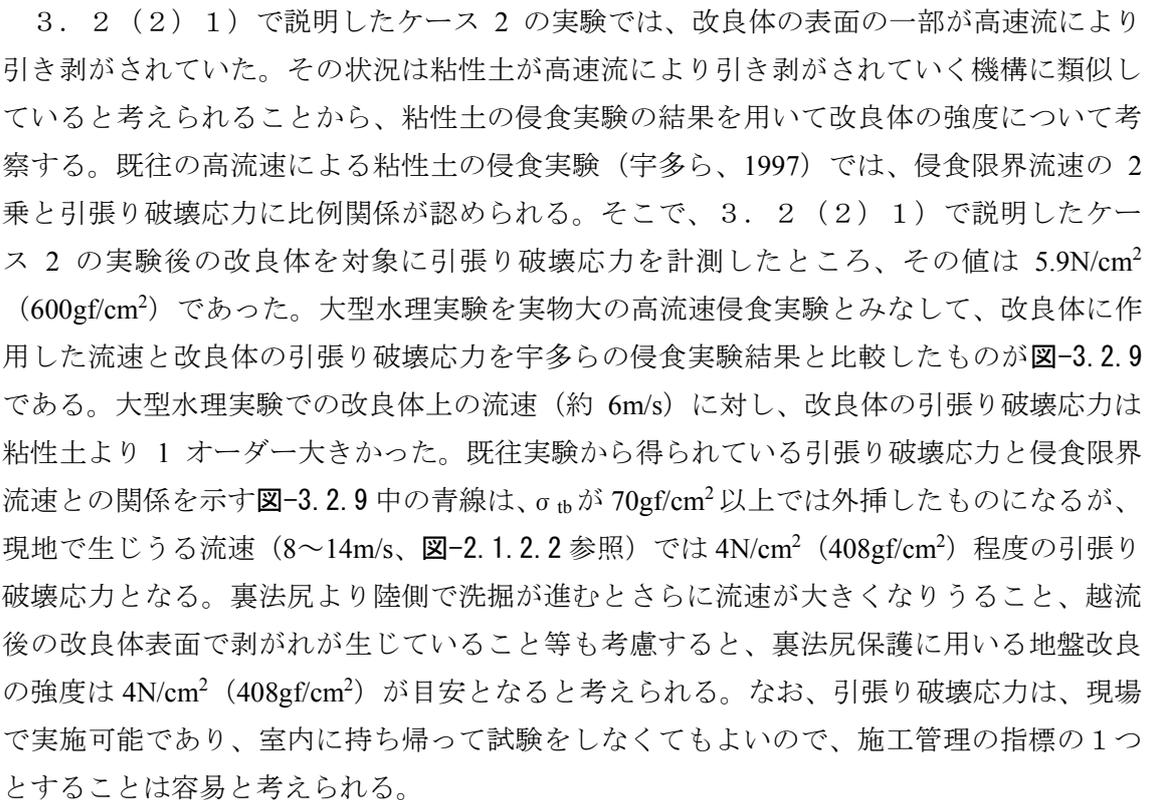
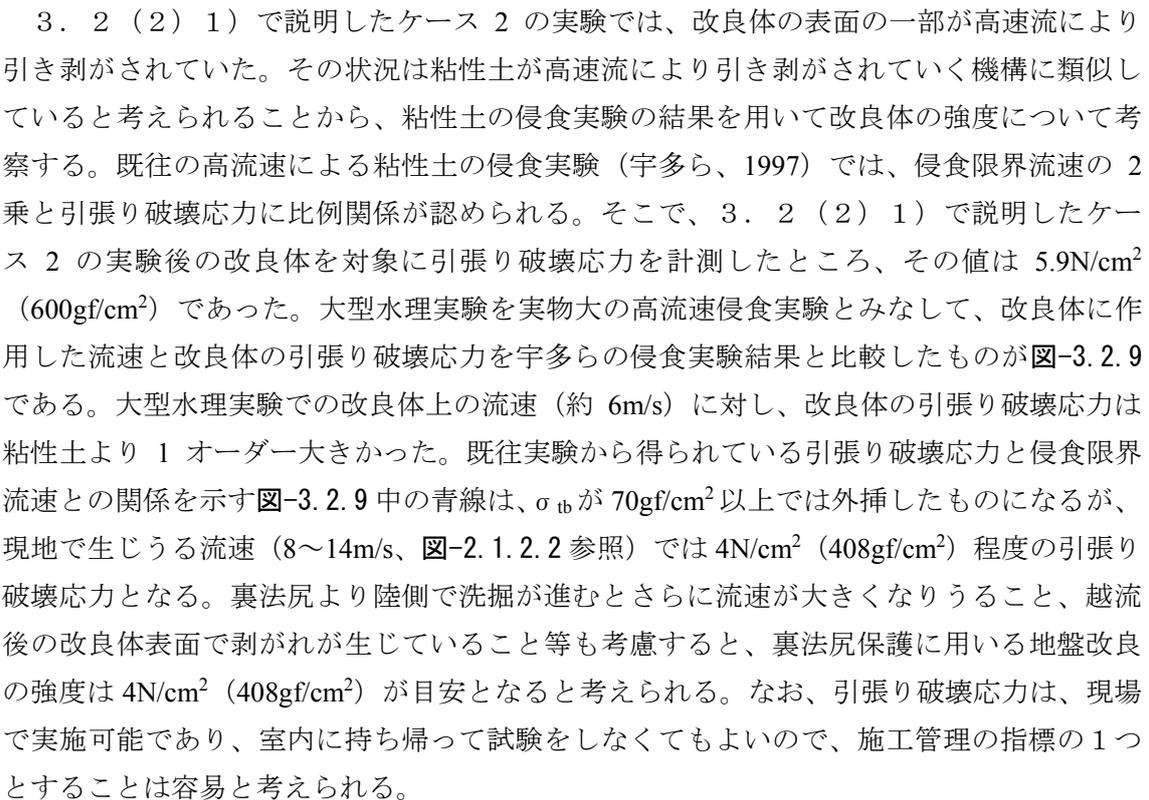
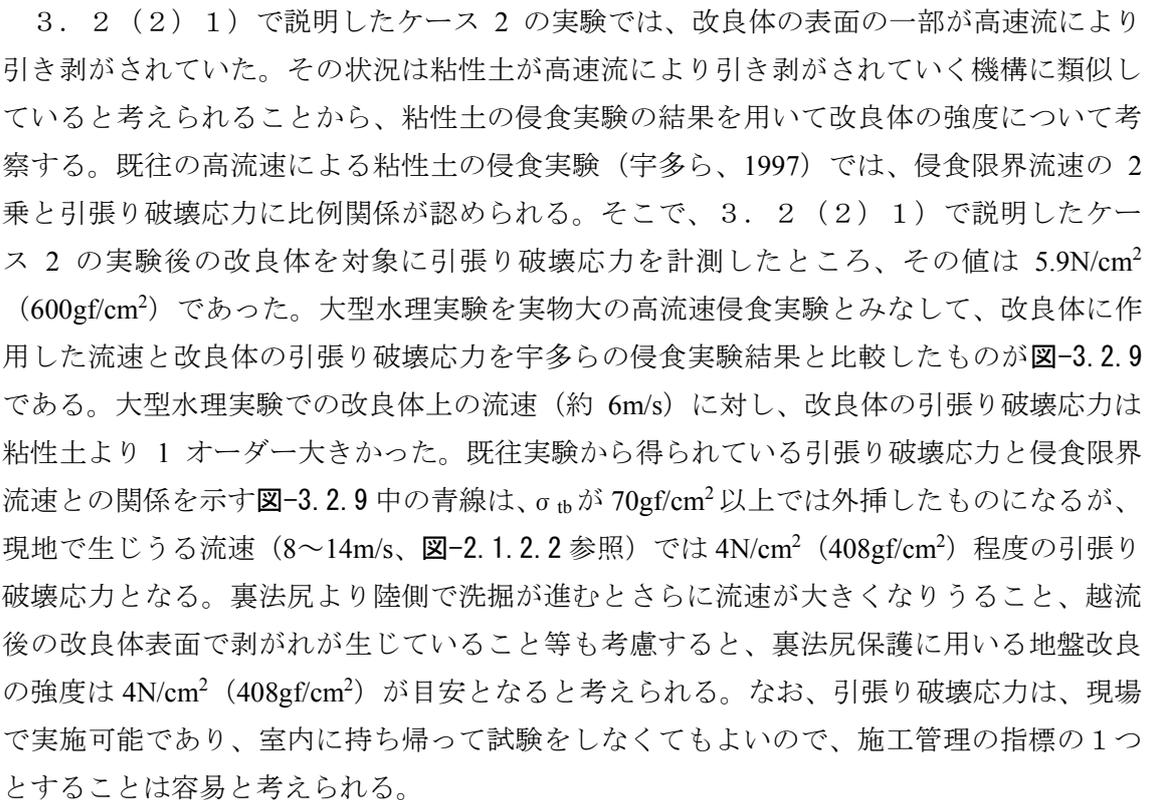


図-3.2.7 裏法尻での圧力上昇範囲と根留工および地盤改良の被覆範囲の比較

2) 地盤改良による裏法尻保護

仙台湾南部海岸での東北地方太平洋沖地震後の災害復旧においては、のように、表法先の基礎工と同程度の大きさの根留工を裏法尻に施工し、根留工周辺を地盤改良で補強している。この事例では、陸上の津波堆積土砂の有効利用の要望もあったことから、津波堆積土を用いた地盤改良による裏法尻保護が行われている。地盤改良の深さは地盤改良に用いる機材の性能をふまえて決定され、既往の粘性土の侵食実験で確認されている引張り破壊応力を外挿して改良の目標とすることとされた。

3. 2 (2) 1) で説明したケース 2 の実験では、改良体の表面の一部が高速流により引き剥がされていた。その状況は粘性土が高速流により引き剥がされていく機構に類似していると考えられることから、粘性土の侵食実験の結果を用いて改良体の強度について考察する。既往の高流速による粘性土の侵食実験 (宇多ら、1997) では、侵食限界流速の 2 乗と引張り破壊応力に比例関係が認められる。そこで、3. 2 (2) 1) で説明したケース 2 の実験後の改良体を対象に引張り破壊応力を計測したところ、その値は 5.9N/cm^2 (600gf/cm^2) であった。大型水理実験を実物大の高流速侵食実験とみなして、改良体に作用した流速と改良体の引張り破壊応力を宇多らの侵食実験結果と比較したものが である。大型水理実験での改良体上の流速 (約 6m/s) に対し、改良体の引張り破壊応力は粘性土より 1 オーダー大きかった。既往実験から得られている引張り破壊応力と侵食限界流速との関係を示す 中の青線は、 σ_{tb} が 70gf/cm^2 以上では外挿したものになるが、現地で生じうる流速 ($8\sim 14\text{m/s}$ 、参照) では 4N/cm^2 (408gf/cm^2) 程度の引張り破壊応力となる。裏法尻より陸側で洗掘が進むとさらに流速が大きくなりうること、越流後の改良体表面で剥がれが生じていること等も考慮すると、裏法尻保護に用いる地盤改良の強度は 4N/cm^2 (408gf/cm^2) が目安となると考えられる。なお、引張り破壊応力は、現場で実施可能であり、室内に持ち帰って試験をしなくてもよいので、施工管理の指標の 1 つとすることは容易と考えられる。

3) 裏法尻を舗装することによる洗掘対策

2章のコラムで紹介した東日本大震災で越流が生じた海岸堤防の多重ロジスティック回帰分析結果から、海岸堤防の全壊率に対して関係が深いのは越流水深に次いで裏法尻被覆幅である。この分析対象となった現地の裏法尻被覆は、チリ津波対策時に設置された堤防の裏法尻水叩き（多くが幅 2~3m 程度）と裏法尻が舗装道路だった事例である。海岸堤防の裏法尻に舗装道路があることは結果として2)の地盤改良と同様、越流水の流向を水平に変える裏法尻保護の役割を果たす。ここで注意が必要なのは、アスファルト舗装であれば何でもよいということではない点である。

写真-3.2.4は、津波が遡上した陸地の簡易舗装箇所ではしばしば見られた損傷事例である。アスファルト舗装の下面に圧力が伝わると、その圧力によってアスファルト舗装は浮き上がりやすくなる。また、写真-3.2.5は、縮尺 1/2 の水理模型実験において、裏法尻に設けたアスファルト舗装（アスファルト：厚さ 5cm、路盤：厚さ 15cm）に長さ 100cm、幅 20cm の切り込みを 2 箇所設け、津波越流を生じさせる前後の裏法尻を示している。越流が始まると、まずアスファルト舗装の切り込み部分が流失し、その後にアスファルト舗装が破断した。以上のことから、管理用通路によく用いられる簡易舗装は薄いため亀裂が入りやすく、裏法尻保護の効果は期待できない。



写真-3.2.4 簡易舗装の損傷事例

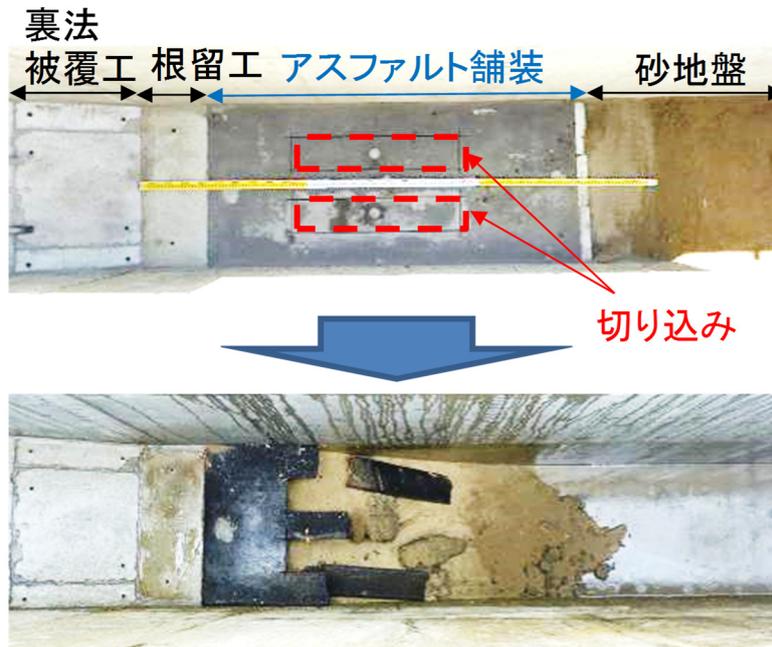


写真-3.2.5 損傷のあるアスファルト舗装の流失（縮尺 1/2 の水理模型実験）

（3）洗掘に対する根留工の安定性を向上させる工夫

裏法尻に越流水の流向を水平に変える保護工を施工できる用地を確保できない場合には、根留工の下に矢板を取り付けた複合構造を採用することが考えられる。

根留工と矢板を一体化する構造の効果に関して、縮尺 1/2 の水理模型実験の結果を紹介する。(2) 1) で紹介した実験と同じ水路に、高さ 2.5m、天端幅 1.5m、法勾配 1:2 の堤防模型を設置した。堤防の構造は、盛土（中央粒径 0.25mm）の表法、天端、裏法の上に厚さ 25cm のコンクリート板を載せたものである（図-3.2.10）。なお、被覆コンクリートの設置前に盛土の表面を厚さ 5cm の捨てコンクリートを施し、水路の側壁と被覆工との間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ている。また、天端被覆工の中心に直径 5cm の空気孔を設け、碎石（RC-20）を詰めた。越流時間は 7 分（現地換算で 10 分）、最大越流水深は 1m（現地換算で 2m）とした。長さ 2m の矢板が無いケースでは、越流開始から 43 秒後に根留工が流失した後、裏法被覆工が裏法尻の洗掘箇所に移動した（図-3.2.11）。一方、長さ 2m の矢板が有るケースでは、根留工際において根留工の厚さ以上に洗掘が進んだが、根留工および裏法被覆工は移動しなかった。

以上のように、根留工の下に矢板を取り付けることで、地盤改良と同様に、洗掘に安定性を向上させることができる。

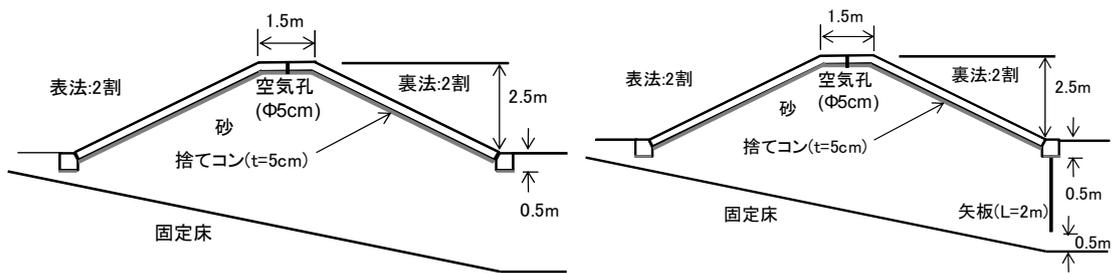


図-3.2.10 比較する堤防形状 (左：矢板無し、右：矢板有り)

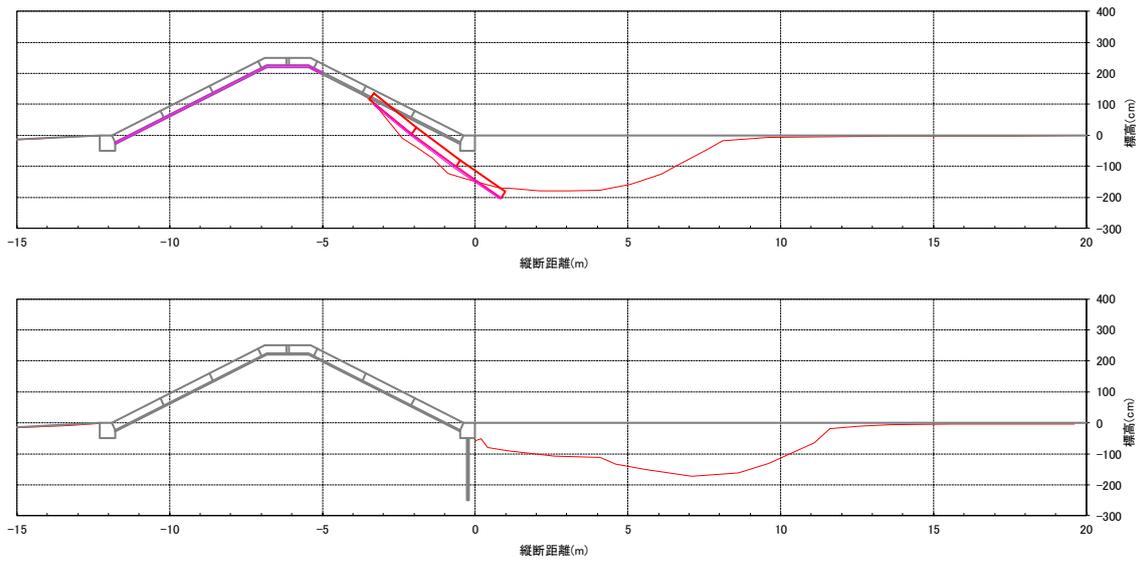


図-3.2.11 越流後の地形及び堤防形状 (上：矢板無し、下：矢板有り)
(黒線：越流前、赤線：越流後)

3. 3 裏法被覆工

(1) 考え方

裏法被覆工は、設計高潮位以下の潮位および設計波以下の波浪による越波で裏法が侵食されないように堤体を被覆するものである。このため、表法被覆工が厚さ 50cm 程度確保されているのが一般的であるのに対し、裏法被覆工の厚さは 10~20cm 程度であることが多い。

裏法被覆工の構造は、コンクリートブロック張式、コンクリート被覆式、コンクリート法枠式に大別される。コンクリートブロック張式は水密性・気密性が小さい一方、長期間にわたる堤体土の締め固まり・地震動による変形・基礎地盤の圧密沈下により堤体土が変形してもブロックが追随するので、変状を発見しやすい。コンクリート被覆式は、水密性・機密性が高く、一体性・剛性も高いので、長期間にわたる堤体土の締め固まりや地震動による変形・基礎地盤の圧密沈下により堤体土が変形しても被覆工に変状が現れない場合が多い。法枠式は、法枠内が空張であればコンクリートブロック張式に近い性質を持ち、コンクリート張であればコンクリート被覆式に近い性質をもつ。

裏法被覆工は、津波越流時には、高流速が堤体土に直接作用して侵食・洗掘することを防止する役割を持つ。その役割を果たすためには、裏法被覆工が流失しないようにしなくてはならない。その方法の一つは、裏法被覆工の厚さを増すことであり、東北地方太平洋沖地震の災害復旧では表法被覆工と同じ 50cm が確保された。そのほか、裏法被覆工の構造に応じて、以下のような構造上の工夫が考えられる。

(2) コンクリートブロック張式

コンクリートブロック張式では、「流体力の増大をもたらす不陸を生じさせないこと」、「吸出しを抑制すること」、「浸透水によるブロック下面の水圧上昇を抑制すること」が重要である。

1) 流体力の増大をもたらす不陸を生じさせないこと

長期間にわたり堤体土が一切変形しないようにすることは現実的ではないので、ブロックに多少の不陸が発生することは想定する必要がある。ここで重要なのは、-3.3.1 左に示すような高流速下でブロック端部に流体力が作用する状態ではなく、-3.3.1 右に示すように不陸が発生しても端部に流体力が作用しにくい状態にすることである。そこで、不陸が生じても流体力がまともに作用する面ができないように、-3.3.1 右のとおり両端に切り欠きを設けたブロックを噛み合わせることが有効である。

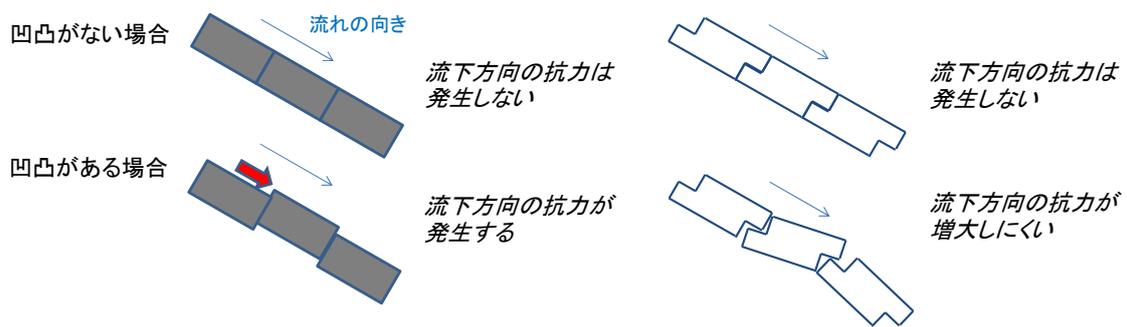


図-3.3.1 流体力が発生する不陸（左）と発生しない不陸（右）

2) 吸出しを抑制すること

2. 2. 6で説明したように、津波越流時の高流速によって被覆ブロックの穴やブロック間の隙間から裏込材や堤体土が吸い出される恐れがあり、特に圧力低下が生じている法肩部が吸い出されやすい。また、被覆工上の水位が急激に低下すると、被覆工下に残留した水圧で被覆工が持ち上げられ、吸出しが発生する恐れがある。ブロック張式とする場合には吸出し対策が必要である。

一つの方法としては、図-3.3.2のように、被覆ブロックの下に2重のフィルター層を設けることが有効である。この場合、2. 1. 5に示したブロック下の水圧上昇が起こらないよう、表法にフィルター層が必要な場合は、フィルター層が海側から堤体内に連続しないように注意しなければならない。ブロックに穴空き構造のものを用いる場合には、ブロック下面の水圧が上昇しにくくなる利点を有するが、2. 2. 6で示した穴からのフィルター材の吸い出しが起こらないようブロックの穴の大きさに留意する必要がある。

なお、仙台湾南部海岸の裏法被覆工で穴がないブロックを採用しているのは、津波越流時に生じる10m/s級の流れでは穴からのフィルター材の流失を防ぐのは困難と判断したためである。さらに、津波越流時に上昇した水圧・空気圧が抜けるように、ブロック間の隙間には練りの処理を行わず、一定の通気性を確保している。これらに関して、ブロックに穴があると、ブロックの上下面の圧力差が生じにくくなりブロックがめくれにくくなる一方、フィルター材が礫サイズでも吸い出される可能性が十分にあることから、フィルター材の動き・吸い出しを許すような穴を設けず、ブロック下面からの圧力を逃がす通気性・通水性を確保することが求められる（加藤ら、2014）。

フィルター層設置以外の吸出し対策としては、ブロックの下に薄い捨てコンクリートを打つことも有効である。この場合、津波越流時には堤体への浸透により捨てコンクリート下の空気圧上昇が懸念されるので、3. 4で述べる空気抜き穴の設置が必要になる。

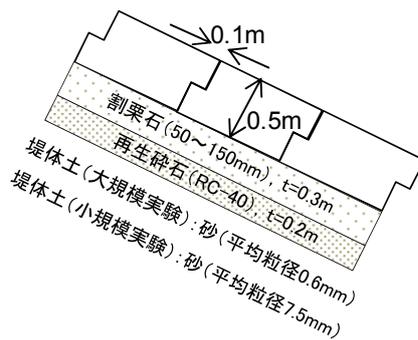


図-3.3.2 ブロック張式におけるフィルター層の例

3) ブロック下面の圧力上昇を抑制すること

ブロックの下をフィルター層とした場合には、被覆工下面の圧力上昇に注意しなければならない。裏法被覆工に穴あきブロックを用いると、被覆工下面の圧力上昇は回避されるが、前述のように吸い出しが問題となる。このため、図-3.3.2のように穴のないブロックを採用して吸い出しを抑制する一方、ブロック間の隙間には練りの処理を行わないことで水圧・空気圧を逃がすことが有効である。

なお、ブロック下面のフィルター層における水圧は流入してくる水量が排水量を上回ることによって上昇するので、表法側で流入を抑制することも有効と考えられる。3.5に示すように表法被覆工の構造に留意するとともに、表法被覆工に穴あきブロック及びフィルター層を設ける場合には表法での浸透によるフィルター層の圧力上昇が天端被覆工や裏法被覆工の下面に伝わらないよう、フィルター層を縁切りすることが望ましい。また、天端被覆工と裏法被覆工との間の隙間からの流入にも留意する。

(3) コンクリート被覆式

コンクリート被覆式は、水密性・気密性や一体性・剛性が高いため、流体力が作用する不陸や吸い出しが生じにくい。しかし、水密性・気密性が高いことから、津波越流時の浸透により被覆工下面の圧力が上昇しやすい。このため、ブロック張式よりも被覆工下面に水が入りにくくする工夫が求められる。その方法としては、捨てコンクリートの打設が有効であり、フィルター層の設置は避けるべきである。

空気圧に対する配慮は、3.4(3)を参照されたい。

3. 4 天端被覆工

(1) 考え方

天端被覆工は、裏法被覆工と同様に、設計高潮位以下の潮位および設計波以下の波浪による越波で侵食されないように堤体を被覆するものである。天端被覆工の厚さ、構造、津波越流時の役割は裏法被覆工と同様である。津波越流時の役割を果たすための方法の一つは、天端被覆工の厚さを増すことであり、東北地方太平洋沖地震の災害復旧では表法被覆工と同じ 50cm が確保された。そのほか、以下のような構造上の工夫が考えられる。

(2) 法肩の構造

2. 2. 5 で述べたように、裏法肩では津波越流時に圧力が低下するため、裏法肩を独立した被覆構造にすると不安定化する恐れがある。このため、裏法肩を独立した構造にせず、**図-3.4.1** のように表法被覆工の上部及び裏法被覆工の上部と天端被覆工を一体化した構造が望ましい。

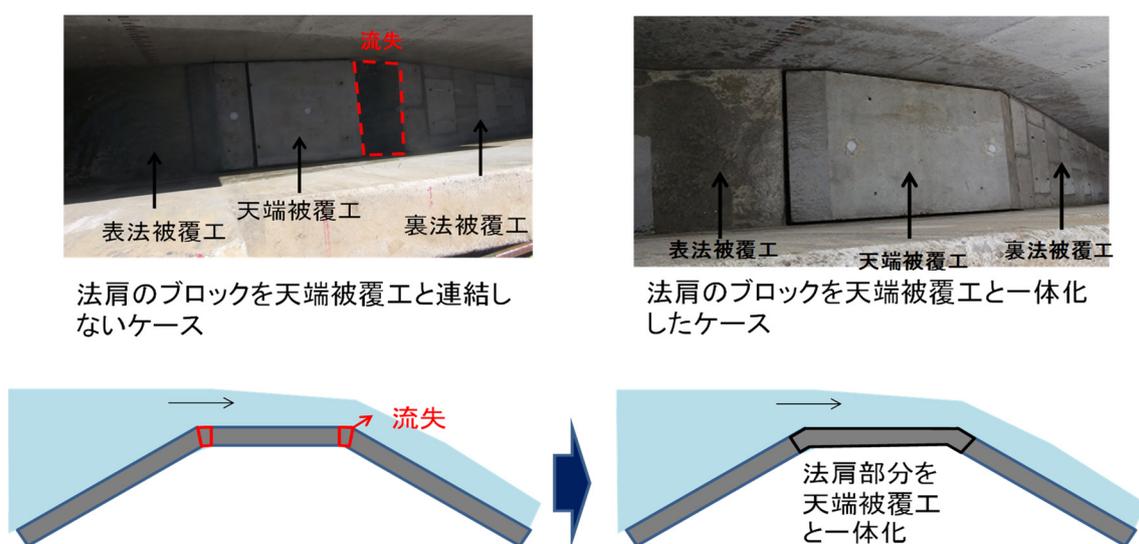


図-3.4.1 天端被覆工と法肩帯工の一体化

(3) 空気孔の設置

2. 1. 5 で述べたように、津波越流時には被覆工下面に作用する圧力が上昇する恐れがある。また、経年的な堤体の沈下等により堤体と天端被覆工との間に空洞が生じると、津波越流時にパイピングを引き起こすような水みちになる恐れや、天端被覆工が陥没する恐れがある。

これらに対して、空気抜きと点検孔を兼ねた穴を天端被覆工に設けることが考えられる。仙台湾南部海岸の堤防の天端被覆工には、直径 10cm の点検穴兼空気抜き穴が沿岸方向 2m

毎に1カ所設けられている（写真-3.4.1）。なお、越流水の過剰な流入を抑制するため、点検穴兼空気抜き穴には砕石（RC-40）が詰められている。



写真-3.4.1 天端被覆工に設けられた点検穴兼空気抜き穴（仙台湾南部海岸）

3. 5 表法被覆工

(1) 考え方

表法被覆工は、波浪の作用から堤体土を保護し、また堤体や波返工と一体となって高潮、波浪、津波の侵入を防止する機能を有する。表法被覆工の厚さはこれまでの実績から 50cm とすることが多い。表法の勾配によって波のうちあげ高や越波流量が変わることから、設計波及び設計潮位に対する所要の目的達成性能を確保するように表法の勾配は設定される。その際、海浜の利用状況なども考慮することになっている。

傾斜型の表法被覆工には、コンクリートブロック張り式やコンクリート被覆式などがある。コンクリートブロック張り式は、従来、軟弱地盤などで不同沈下の恐れがある場合、屈とう性を確保するために用いられてきた。表法面からの浸透水や堤体からの浸出水に対するフィルターとしての機能を確保するため、ブロックの下には裏込め工を敷設する。裏込め工は厚さ 50cm 以上とすることが多く、栗石や砕石などが使用される。

2 章のコラムのように、東日本大震災で津波越流が生じた海岸堤防の多重ロジスティック回帰分析結果では、堤防の全壊率は表法勾配が緩い方が小さかった。このことから、表法勾配を緩くすることが構造上の工夫の 1 つになりうる。ただし、砂浜幅が十分でない海岸に緩勾配の堤防を施工すると、貴重な砂浜がコンクリートで被覆されることになるとともに、風波等が越波しやすくなったり、表法先からの吸い出し等による堤防の被災が生じやすくなったりすることに留意する必要がある。

(2) 構造上の工夫

波返工と一体構造になっているコンクリート被覆式 (図-3.5.1) および重力式 (図-3.5.2) の表法被覆工については、津波波力による破壊等が生じないように、打ち継ぎ目等に十分に配筋を施す必要がある。また、波返工の必要性についても再検討する必要がある。

引き波時における表法被覆工の不安定化のメカニズムは 3. 3 で述べた裏法被覆工に関するものと同様である。しかし、裏法被覆工とは異なり、表法被覆工は普段から水圧や波浪が作用することが多く、それらに対する所要の安全性を確実に確保しなければならない。よって、設計潮位および設計波に対する構造の安定性を確保した上で、裏法被覆工に対する構造上の工夫を適用できるかどうか検討する必要がある。なお、2. 2. 1、2. 2. 7 で述べたように、被覆工の下にフィルター層を表法先から裏法尻まで連続して設けると、そこが津波越流時に水みちとなって被覆工下の圧力上昇やパイピングを生じさせる恐れがあることから、表法被覆工の下にフィルター層を設ける場合には天端被覆工との間で縁を切る必要がある。

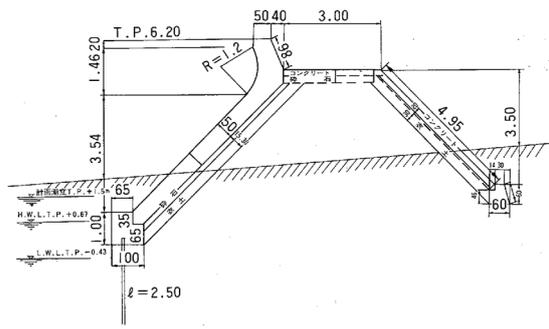


図-3.5.1 コンクリート被覆式表法被覆工の例

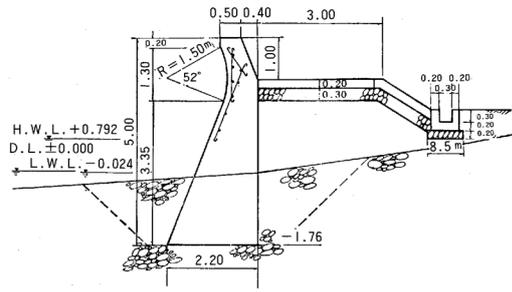


図-3.5.2 重力式表法被覆工の例

3. 6 表法先の洗掘対策

(1) 考え方

2. 1. 4で述べた裏法尻での洗掘と同様に、引き波時の越流により表法先が洗掘され、基礎工が流失する恐れがある。

表法先には、波浪による洗掘を防止して表法被覆工や基礎工を防護することを目的とした根固工や、波のうちあげ高や越波流量の低減を目的とした消波工が設置されることがある。また、止水効果を高めるため、あるいは洗掘に対抗するため、基礎工の下に矢板を打つことがある。これらは設計対象の潮位や波浪に対する所要の効果を発揮するためのものであるが、津波越流時の堤防の粘り強さにも寄与する可能性がある。

表法先の洗掘に対する構造上の工夫を以下で説明する。

(2) 構造上の工夫

引き波時における基礎工の不安定化のメカニズムは、3. 2で述べた根留工に関するものと同様である。しかし、根留工とは異なり、基礎工は普段から水圧や波浪が作用することが多く、それらに対する所要の安全性を確実に確保した上で、津波越流時に粘り強さを発揮しなければならない。

表法先に設置される消波工に用いる異形ブロックは空隙率が大きく、表法先の洗掘を低減する効果が小さい。また、根固工に用いる程度の異形ブロックでは引き波時の高流速に対して質量が不足する。図-3.6.1のように、消波工の異形ブロックの下に吸い出し防止工（アスファルトマット）を敷設することで、表法先での洗掘を低減できる可能性がある（写真-3.6.1）。ただし、異形ブロックを載せた吸い出し防止工自体が津波の越流によって浮き上がる（写真-3.6.2）と、表法先と吸い出し防止工との隙間から吸い出しが生じて洗掘が進行するので、津波の越流に対する異形ブロックや吸い出し防止工の安定性が十分かどうか確認しなければならない。

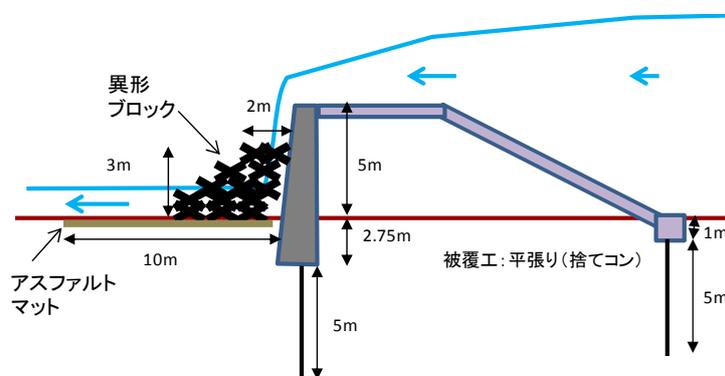


図-3.6.1 引き波による表法先の洗掘に関する実験の模型断面（寸法は現地換算値）

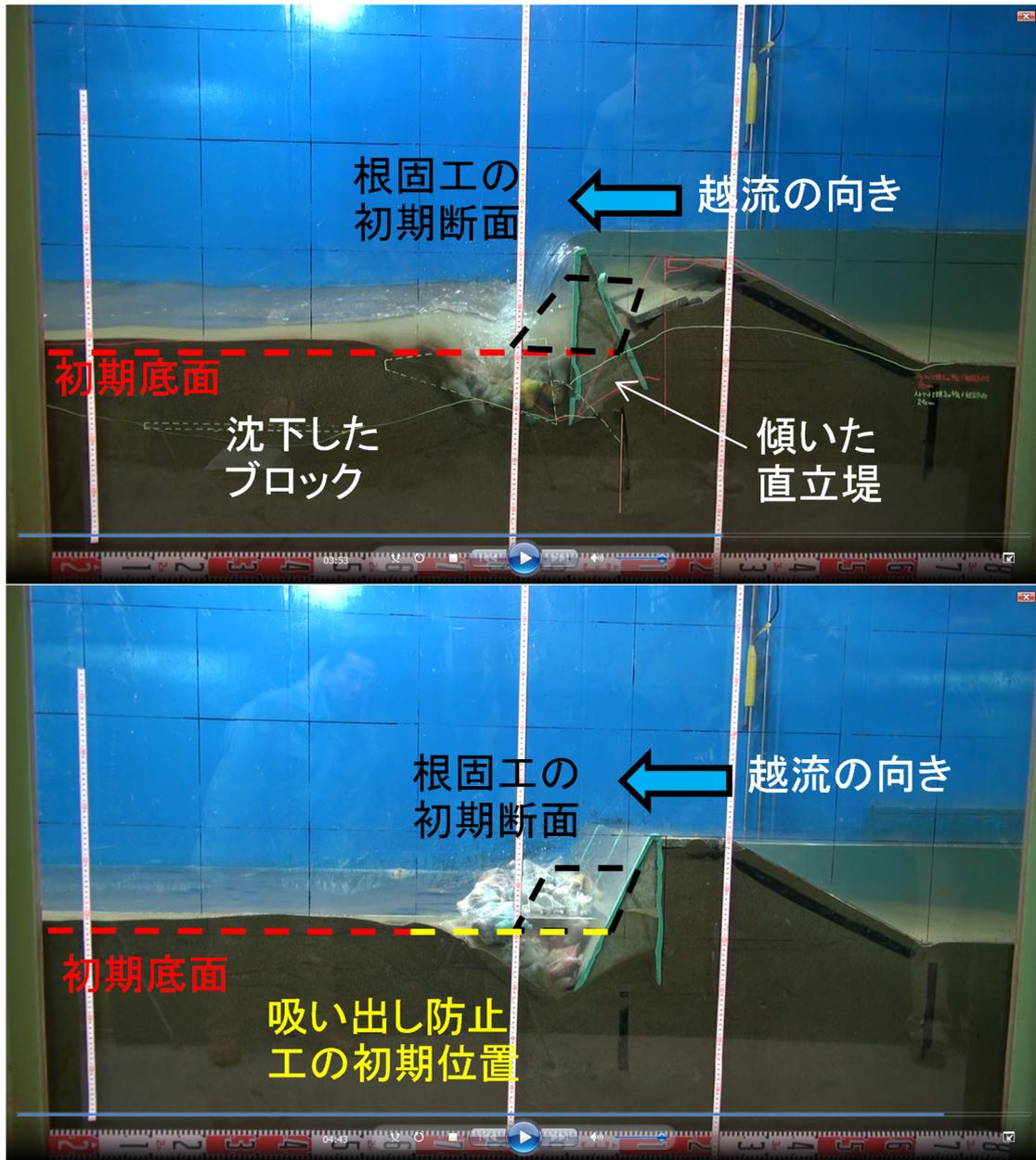


写真-3. 6. 1 引き波による表法先の洗掘

(上：吸い出し防止工無し、下：吸い出し防止工有り)

(縮尺 1/25 の水理模型実験にて 2t 相当のブロックを連結、吸い出し防止工：厚さ 50cm (現地換算値) のアスファルトマット、最大越流水深 2m (現地換算値))

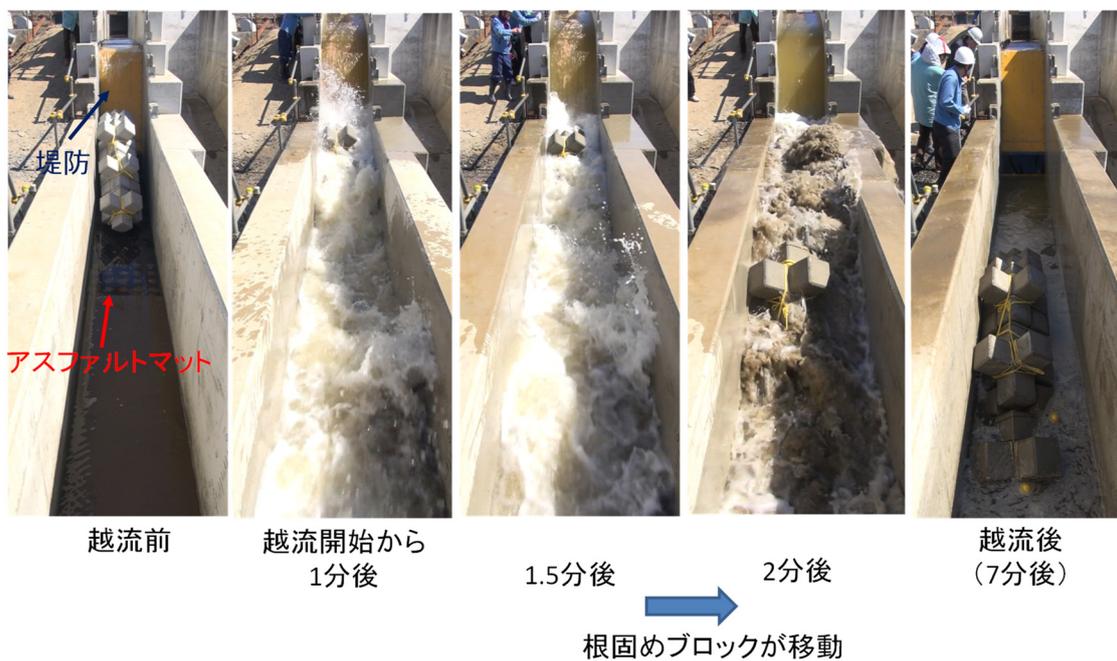


写真-3.6.2 引き波による異形ブロック及び吸い出し防止工の移動
 (縮尺 1/2 の水理模型実験にて 2t 相当のブロックを連結、吸い出し防止工：厚さ 50cm (現地換算値) のアスファルトマット、最大越流水深 2m (現地換算値))

3. 7 樹林

(1) 考え方

平成 26 年の海岸法改正により、津波、高潮等により海水が当該施設を越えて侵入した場合にこれによる被害を軽減するため、堤防または胸壁と一体的に設置された樹林は海岸保全施設に含まれることになった。「海岸保全施設の技術上の基準を定める省令」においては、設計津波を超える津波等の作用に対して堤防の損傷等を軽減する機能が確保されるよう、樹種並びに盛土の幅及び厚さを定めるものとされている。

堤防と一体的に設置された樹林及び盛土は、津波、高潮等により海水が堤防を越えて侵入した場合の被害を軽減する役割を担う。その役割としては、樹林により越流、越波を減勢すること、盛土が堤防の裏法被覆工等を覆うことによって越流等による流体力が直接作用するまでの時間を稼ぐこと、越流等による盛土の侵食を樹林の根により遅らせることなどが考えられる。加藤ら（2017）は、全国 7 海岸の樹林等の根を調査し、その根量密度が比較的高く、一定の耐侵食性を有する層が地表から 10cm までの範囲にある箇所が多いことを確認している。

(2) 留意点

盛土上の樹林が生育し、津波に対して根返りせずに盛土の侵食を軽減するためには、一定の厚さの盛土が必要である。津波による根返りを防止する観点から盛土による生育基盤を造成する場合、クロマツ植栽地の有効土層は 1.5m 以上確保することが望ましいとされている（独立行政法人森林総合研究所、2015）。また、国土交通省都市局公園緑地・景観課の「東日本大震災からの復興に係る公園緑地整備に関する技術的指針」では、垂直根の発達のため、最低でも地下水位より上に 1.5m、特に津波被害の軽減を期待する場合は地下水位より 2.0m 程度の厚さの植栽基盤を確保することが望ましいとされている。

平成 27 年度に施工された仙台湾南部海岸の緑の防潮堤では、堤防陸側の樹林の盛土は堤防天端と同程度の天端幅、厚さ 3m、法勾配 4 割となっている（図-3.7.1）。また、裏法被覆工と盛土が接する面ですべりが生じないように、浸透した雨水が盛土外に排出されるようにドレーン工が盛土下部に設けられている。

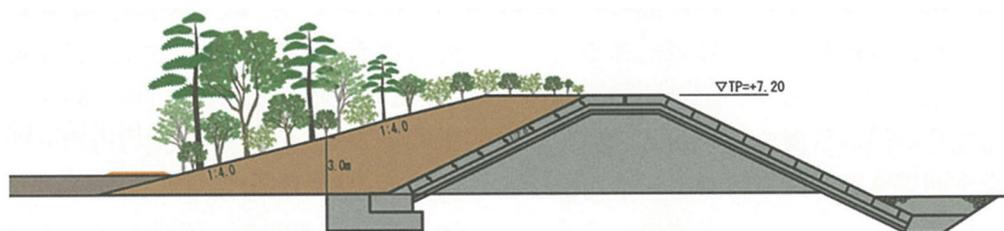


図-3.7.1 仙台湾南部海岸の緑の防潮堤の断面図

コラム 堤体の材料

堤体の盛土材料は、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」では、原則として多少シルト・粘土を含む砂質又は砂礫質のものをを用い、適当な含水量の状態、各層、全面にわたり均等に締固めを行うものとされている。

堤体は海岸堤防の主体となるものであり、波力、地震力、浸透などの作用に対して所要の安全性を確保する必要がある。粘り強い構造の検討にあたっては、設計対象の地震動に対する所要の安全性を確保した上で、津波越流時における堤体への作用を考慮する必要がある。

2. 1. 5で示したように、津波越流時には浸透により浸潤線が上昇し、被覆工下面の圧力が上昇する恐れがある。これに対して、盛土材料や締固めにより、堤体の透水性を小さくすることが望ましいと考えられる。なお、2. 1. 2で示した津波越流時の高流速に対しては、堤体は被覆工により保護する必要がある。

図-3.8.1は、細粒分含有率と締固め度、透水係数の関係を調べた試験結果である。図から、細粒分が比較的高い砂質土Ⅱや粘性土では、締固め度を上げることにより、透水係数を小さくできることがわかる。以上より、堤体土の品質確保のためには、適切な材料の選定と締固め度を確保する施工管理が有効であることがわかる。

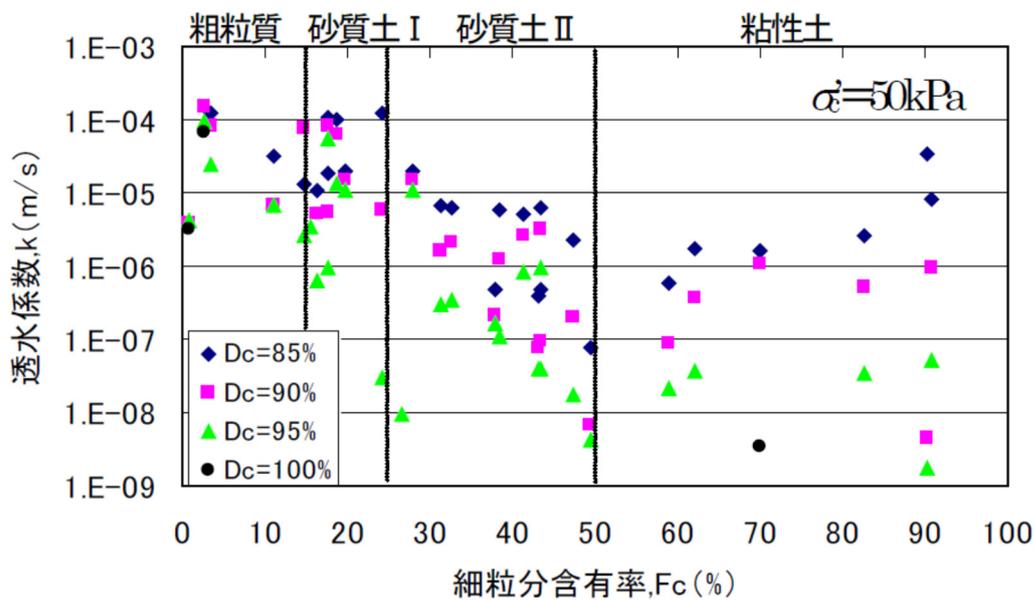


図-3.8.1 締固め度(Dc)、細粒分含有率、透水係数の関係 (土木研究所、2011)

4. おわりに

本資料では、津波が海岸堤防を越流することによって生じる水理現象と海岸堤防の破壊現象、及びそれに対する構造上の工夫の要点をまとめた。その概要は以下の通りである。

- ・津波が来襲し、押し波による越流が生じると、波返工や堤体の海側に作用する津波波力、天端から裏法尻にかけての高流速・せん断力、流線の曲がりによる裏法肩周辺での圧力低下と裏法尻周辺での圧力上昇、裏法尻での洗掘、基礎地盤・被覆工下の堤体への浸透と残留空気の圧力上昇などが同時に発生していく。押し波時とは逆向きの流れが生じる引き波時には、波返しや堤体には冲向きの津波波力、天端から表法先にかけての高流速、表法肩付近での圧力低下と表法先付近での圧力上昇、表法先での洗掘が生じる。

- ・津波越流時には、津波波力による波返工の倒壊、裏法尻の洗掘による根留工の不安定化、高流速や法肩での圧力低下による被覆工や法肩の不安定化、高流速による堤体材料の吸い出し、パイピングなどが同時かつ相互に影響しながら、海岸堤防の破壊が進行する。

- ・このように、複数の被災形態が複合的に発生することが多いと考えられることから、粘り強い構造の検討においては、特定の対策工法のみ限定せず、複数工法の組み合わせを検討することが望ましい。

- ・裏法尻の洗掘に対しては、裏法勾配を緩くするとともに、地盤改良等により裏法尻を被覆することが有効である。また、根留工を大きくしてその自重により流失しにくくさせることのほか、地盤に打ち込んだ矢板と根留工を一体化し、洗掘が生じても矢板によって自立させることも有効である。

- ・裏法被覆工の流失を防ぐには、裏法被覆工の厚さを増すことのほか、裏法被覆工の構造に応じた構造上の工夫が有効である。コンクリートブロック張式では、両端に切り欠きを設けたブロックを噛み合わせることで流体力の増大をもたらす不陸の発生を防ぎ、そのブロックには孔を設けないがブロック間には練りの処理を行わないことで堤体土の吸い出しとブロック下面の圧力上昇を抑制する。コンクリート被覆式では、被覆工の下に捨てコンクリートを打設し、被覆工下面の圧力上昇を抑制する。

- ・天端被覆工の流失を防ぐには、裏法被覆工と同様に厚さを増すとともに、裏法肩を独立した構造にせず、表法被覆工の上部及び裏法被覆工の上部と天端被覆工を一体化した構造にすることが有効である。また、被覆工下面の圧力上昇の抑制や堤体と被覆工下面の間の空洞の監視のため、天端被覆工に孔を設けた例がある。

- ・波返工と一体構造になっているコンクリート被覆式および重力式の表法被覆工については、津波波力による破壊等が生じないように、打ち継ぎ目等に十分に配筋を施す必要がある。また、波返工の必要性についても再検討する必要がある。

本資料により津波越流に対して傾斜堤を粘り強くする構造上の工夫は整理できたと考えられ、その成果が東北地方太平洋沖地震の災害復旧にも活用されている。ただし、本資料の主な検討対象である傾斜堤以外の型式の海岸堤防については、さらなる検討が必要であ

る。その検討においては、さまざまな型式に対応できる数値計算の活用が考えられるが、本資料で説明した複雑な水理現象を全て考慮して破壊現象を再現する実用的な数値計算手法は確立していない。また、粘り強い構造の導入による背後地の被害軽減効果を定量的に評価するには、津波の越流が始まってから堤防が壊れるまでの時間を見積もる必要があるが、その見積もりは現時点の知見だけでは難しい。以上の点については、今後の課題としたい。

謝辞：

津波越流に対する海岸堤防の粘り強い構造に関する研究は、国土交通省水管理・国土保全局海岸室、東北地方整備局河川部および仙台海川国道事務所との連携のもと行われた。水理模型実験に際しては、高知工科大学の磯部雅彦教授、東京大学大学院工学系研究科の佐藤慎司教授、防衛大学校システム工学群建設環境工学科の藤間功司教授、関西大学社会安全学部の高橋智幸教授、東北大学災害科学国際研究所の越村俊一教授、京都大学防災研究所の森信人准教授および安田誠宏助教（現関西大学環境都市工学部准教授）からご助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 宇多高明, 望月達也, 藤田光一, 平林 桂, 佐々木克也, 服部 敦, 藤井政人, 深谷 渉,
平館 治: 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, 土木研究
所資料, 第 3489 号, pp.97-214, 1997.
- 海岸における津波対策検討委員会: 平成 23 年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災
した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方, 9p., 2011.
- 海岸保全施設技術研究会編: 海岸保全施設の技術上の基準・同解説, 2004.
- 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), Vol.70, No.2, pp.I_971-I_975, 2014a.
- 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), Vol.70, No.1, pp.31-49, 2014b.
- 加藤史訓, 鳩貝 聡, 諏訪義雄: 津波の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), 第 69 巻, pp.1021-1025, 2013.
- 加藤史訓, 原野 崇, 浜口耕平: 津波防災地域づくりにおける自然・地域インフラの活用
に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.986, 61p., 2017.
- 国土技術政策総合研究所: 東日本大震災に対して国土技術政策総合研究所が行った 5 年間
の調査研究の全記録, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.57, pp.86-94, 2016.
- 国土技術政策総合研究所: 津波からの多重防御・減災システムに関する研究, 国土技術政
策総合研究所プロジェクト研究報告, No.52, pp.58-101, 2016.
- 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., <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/sokuhou/file/120514.pdf>,
2012.
- 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., <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/sokuhou/file/120810.pdf>,
2012.
- 国土技術政策総合研究所, 独立行政法人土木研究所: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平
洋沖地震土木施設被害調査速報, 国土技術政策総合研究所資料, No.646, pp.124-139,
2011.
- 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 35p., 2013.
- 国土交通省都市局公園緑地・景観課: 東日本大震災からの復興に係る公園緑地整備に関す
る技術的指針, 58p., 2012.
- 小竹康夫・磯部雅彦: 津波の越流時に海岸堤防の法面に作用する圧力特性に関する実験的
研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_891-I_895, 2012.
- 水産庁漁港漁場整備部防災漁村課・国土交通省港湾局海岸・防災課: 津波を考慮した胸壁

- の設計の考え方（暫定版），22p.，2015.
- 鈴木幸一，道上正規，川津幸治：床固め直下流部の流れと局所洗掘について，第26回水理講演会論文集，pp.75-80，1982.
- 独立行政法人森林総合研究所：津波被害軽減機能を考慮した海岸林造成の手引き，53p.，2015.
- 土木研究所：盛土施工の効率化と品質管理向上技術に関する研究（3），平成22年度重点研究プロジェクト報告書，2011.
- 中尾秀之・佐藤慎司・Harry Yeh：津波の越流による海岸堤防の破壊メカニズムに関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp. I_281-I_285，2012.
- 鳩貝 聡・諏訪義雄・加藤史訓：津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp. I_406-I_410，2012.
- 原野 崇・浜口耕平・加藤史訓・伊藤幸義：津波越流時を想定した植生を有する地盤の耐侵食性の評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.73，No.2，pp. I_379-I_384，2017.
- 福岡捷二，藤田光一，加賀谷均：アーマ・レビー法尻工の水理設計，第31回水理講演会論文集，pp.365-370，1987.
- 渡邊国広，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），第68巻，pp.356-360，2012.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

No. 1035

June 2018

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