

東北以外で初！駿河海岸 粘り強い構造の海岸堤防の整備に向けた取組

栗山康弘¹・吉永匡宏¹

¹静岡河川事務所 海岸課（〒420-0068 静岡市葵区田町3-108）

海岸堤防と背後の盛土が一体となり設計津波を超える津波に対して減災効果を発揮するために必要な海岸堤防の粘り強い構造及び整備効果の検討を行った。堤防の改良と設計津波の水位以下の盛土により東北モデルでの想定と同等の機能が確保できることを明らかにした。さらに、「L2津波が越流する形状の盛土」の場合、越流後でも現況堤防高以上の盛土高が確保される可能性が高いことを確認した。また、「越流しない形状の盛土」の場合、堤防の損壊や盛土機能への影響が生じる可能性は低く、海岸保全施設として改良する範囲が津波にさらされる天端保護工のみの整備で効果を発揮できることを確認した。

キーワード：津波、粘り強い構造の海岸堤防、駿河海岸、模型実験、背後盛土

1. はじめに

駿河湾は、図-1のように水深が2,500mに達する日本で一番深い海であり、海底勾配も急なため、波のエネルギーが減勢されず海岸線に襲来し、過去から甚大な被害を被ってきた。また、駿河海岸では、高潮被害防止を目的に、直轄工事施工として昭和39年より整備を進め、高潮の高さを満足する堤防整備は昭和60年頃に完了し、以降、離岸堤等の整備を進めていた折に、東日本大震災が発生した。

当海岸は、南海トラフ巨大地震による津波被害の発生が危惧されており、巨大地震が発生した場合には、10mを超える津波が2～4分で到達し甚大な被害の発生が想定されるなど、危険性が非常に高い地域であることから、東日本大震災被災地以外では直轄海岸で全国初となる、既設堤防を「粘り強い構造へ改良」するための整備を進めることとした。

また、静岡県では津波到達時間が短いという地域特有の課題¹⁾に対し、避難などソフト対策だけでは住民の生命を守ることができないと想定される場合に、設計津波（以下、L1津波という）を超える津波を減衰させるための施設整備（「静岡モデル」と称している）が検討されており、駿河海岸においても図-2のように海岸堤防の背後に、市町・県・国が連携してL1津波の水位以上の盛土（以下、L1以上盛土という）を実施することとしている。

一般的に「粘り強い構造の海岸堤防」とは、東日本大震災での甚大な津波被害を受け新たに設定されたもので

あり、L1津波を超える津波が来襲した場合でも、施設の効果が粘り強く発揮できるようにするための構造上の工夫である。そのため、現時点で構造細目を定める技術基準が策定されていない。

本検討では、東日本大震災被災地以外では直轄海岸で全国初となる、駿河海岸での堤防諸元・津波外力等による、海岸堤防と背後の盛土が一体となりL1津波を超える津波に対して減災効果を発揮するために必要な海岸堤防の粘り強い構造及び整備効果の検討を水理模型実験を用いて行う。

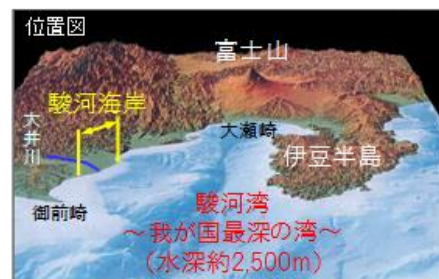


図-1 駿河海岸位置図

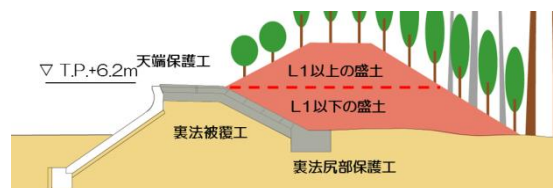


図-2 本検討で対象とする堤防形状のイメージ

2. 水理模型実験

(1) 実験条件

実験模型は、国総研での既往実験結果²⁾³⁾との比較を行うため、同一の模型縮尺1/25とした。図-3に示す実験水路は、二次元水路（B=1.0m, H=1.0m, L=20m）を用いることとした。海岸堤防地点における水位上昇速度となるように水路端部から給水し、海岸堤防を越流する津波を再現した。なお、水位ピーク到達後は水位一定とした。

a) 越流水深の設定

越流水深の設定は、図-4に示す市町の想定する盛土天端高に対する沿岸領域ごとの津波水位と堤防高の差分値を0.5m間隔で切り上げた数値を実験対象越流水深として、対象とする工区（工区A：1.5m, 工区B：2.0m）ごとに設定した。

b) 盛土構成材の土砂条件

盛土と基礎地盤の土砂は、粘性の影響を受けない最小粒径程度となる中央粒径0.3mmの均一砂とし、基礎地盤については十分に転圧・締固めを行った状態（単位体積質量1.62g/cm³）、盛土については所定の形状を形成するための最小限の締固めを行った状態（単位体積質量1.41g/cm³）とした。また、盛土及び基礎地盤の含水比は、図-5に示す盛土を対象した予備実験により、最も崩壊の進行が進む飽和状態（含水比20%）に設定した。

c) 対象堤防条件

堤防は2工区の断面形状を対象にした。基本構造の検討では、比高差の大きい工区Aの断面形状を対象にし、L1以上盛土の効果を踏えた堤防構造の設定では工区A、工区Bの断面形状を対象にした。堤防の被覆材は、表法

面・天端・裏法被覆ブロック・裏法尻部保護工のパーツごとに比重を調整したモルタルにより製作した。

3. 海岸堤防の基本構造の検討

国土交通省が整備する海岸堤防と盛土（L1津波の水位以下の部分）を対象として、仙台湾南部海岸の事業評価で想定されている破堤遅延時間（越流開始から破堤に至るまでの時間）3～5分⁴⁾が確保できる堤防の基本構造を検討した。時間や長さの諸元はFroude則により現地スケールに換算して示す。

(1) 破堤基準の設定

実験の中で堤防模型の被災が生じた時点を破堤として扱うことが一般的である。しかし、この方法ではブロック模型のかみ合わせや不陸の状況によって、破堤時間にバラツキが生じる。そのため、本検討では堤防背後の洗掘深を閾値とした以下の2つの破堤基準を設定し、幅を持った堤防の破堤遅延時間として評価した。

a) 最小基準洗掘深の設定

基礎工の陸側地盤が洗掘されると受動土圧が低下し、基礎工が移動・流出するリスクが高まると想定して、基礎工底高までの洗掘を評価の基準とした。

b) 最大基準洗掘深の設定

堤防構造（天端保護工+裏法被覆工+裏法尻部保護工）を対象に事前に実施した図-6に示す繰り返し実験の中で、堤防被災の生じた最も小さい洗掘深（基礎工底高から1.7m）を基準とした。

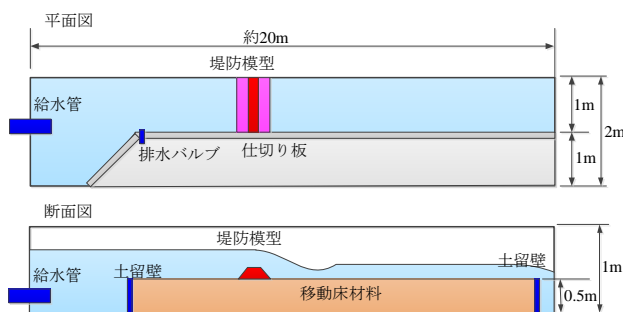


図-3 水路構造のイメージ

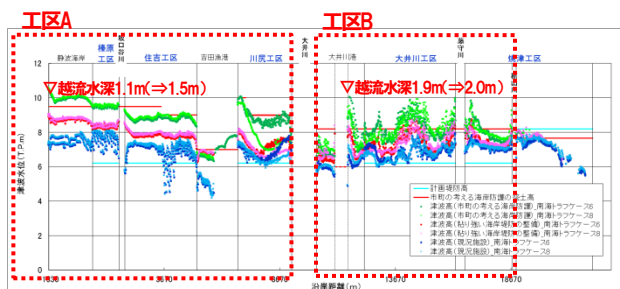


図-4 数値解析による沿岸領域ごとの津波高

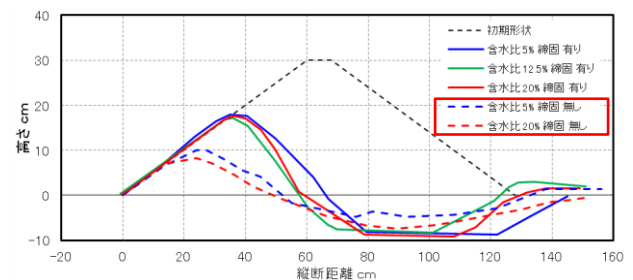


図-5 土砂性状ごとの盛土の変状（予備実験）

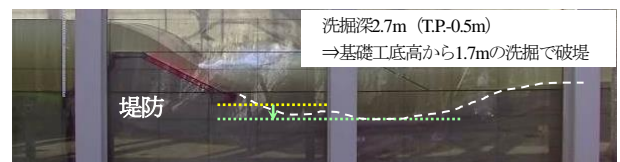


図-6 事前実験での堤防被災時の洗掘状況

(2) 実験ケース

粘り強い堤防のための構造補強の諸元は、図-7に示す東北モデルを基本とし、表-1に示すように、堤防構造の補強箇所が異なる5ケースの実験を行った。

(3) 海岸堤防構造ごとの破堤遅延時間

実験ケースごとの破堤基準に基づく破堤時間と堤防が損壊した時間の比較を表-2、破堤基準に基づく破堤時間における洗掘状況を図-8に示す。実験1-1-4を除き、洗掘深による破堤遅延時間だけを見れば、2.0～4.5分といずれのケースも同程度の破堤時間となっている。堤防が実際に損壊するまでの時間を見ると、本実験1-1-1～2'は破堤基準の洗掘深到達直後となっており、余力のない構造となっている。

この結果から、仙台湾南部海岸と同等の粘り強さが発揮され、余力のある構造である本実験1-1-3「天端保護工+裏法被覆工+裏法尻部保護工」が優位と判断した。

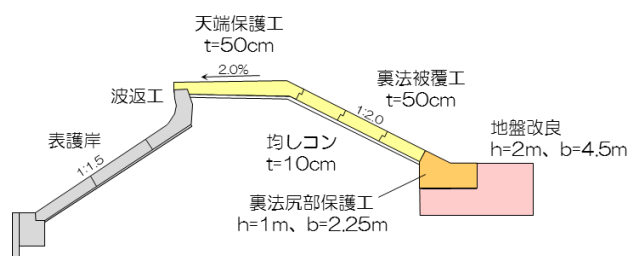


図-7 粘り強い堤防構造の基本諸元

表-1 基本構造検討の実験条件

ケース番号	堤防構造				盛土 (B4.0m)		越流水深 ※1
	天端保護工	裏法被覆工	裏法尻部保護工	地盤改良	高さ	土砂性状	
1-1-1	○				L1以下	基本条件	1.5m相当
1-1-2	○	○					
1-1-2'	○	○	△※2		堤防	D: 0.3mm	
1-1-3	○	○	○		天端高	W: 20%	
1-1-4	○	○	○	○	TP6.2m	締固め無	

※1: L1以上盛土時の越流水深

※2: 図-7に示す裏法尻保護工と同形状でh=1.0m, b=1.0mとした基礎工に変更

表-2 破堤基準に基づく破堤時間と堤防が損壊した時間の比較

◆: 模型上堤防が実際に破堤する時間

ケース名	堤防構造	破堤までの時間 (min)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
東北モデル (目標値)	裏法被覆工 裏法尻部保護工 地盤改良工					3~5min						
盛土なし												
本実験1-1-1						2.0~2.5min						
L1以下盛土 (基本条件)	裏法被覆工					2.5minで模型上の堤防損壊						
本実験1-1-2						2.5~3.5min						
L1以下盛土 (基本条件)	裏法被覆工					4.0minで模型上の堤防損壊						
本実験1-1-2'	裏法被覆工 大型基礎					3.0~4.0min						
L1以下盛土 (基本条件)						4.5minで模型上の堤防損壊						
本実験1-1-3	裏法被覆工 裏法尻部保護工					3.0~4.5min						
L1以下盛土 (基本条件)						15.0minで模型上の堤防損壊						
本実験1-1-4	裏法被覆工 裏法尻部保護工 地盤改良工											10min以上
L1以下盛土 (基本条件)												

4. L1以上盛土の効果を踏まえた構造の設定

前章の実験は、最大越流時間が約9分（540秒）であるため、粘り強い構造の違いによる破堤遅延時間の変化に着目して検討した。しかし、L1以上盛土を整備した場合、図-9に示すように盛土天端高が高くなることにより最大越流時間が約1.4分（81秒）と大幅に短くなり、前章の破堤基準まで至らないため、本章の実験では「L1以上盛土による効果」と「不等沈下を想定した場合の影響」の把握の検討を行った。

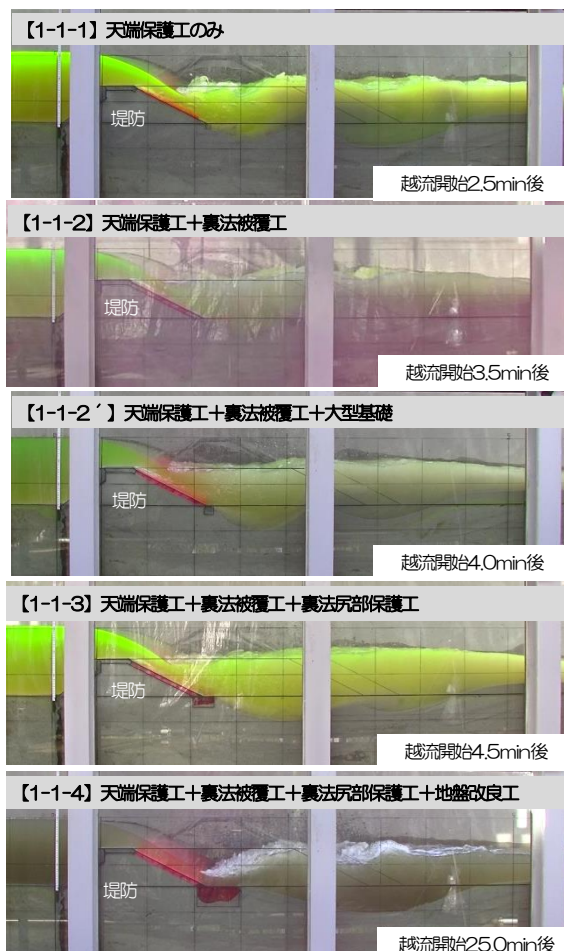


図-8 破堤基準(b)に基づく破堤までの洗掘時間の比較

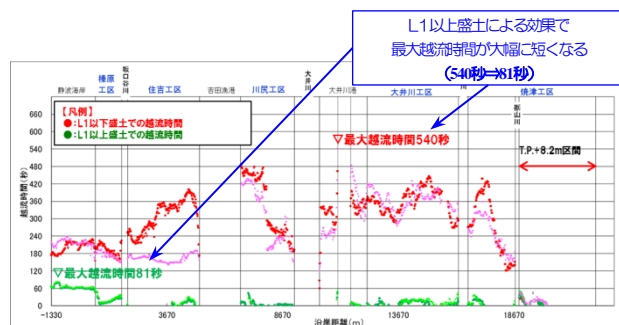


図-9 駿河海岸における最大クラスの津波による越流時間

(1) L1以上盛土による効果

L1以上盛土は駿河海岸の市町により計画されるため、工区ごとに設定されている高さが異なる。大きく分類すると、想定する津波高が盛土高以上となる「越流する盛土」と想定する津波高が盛土高以下となる「越流しない盛土」の種類の盛土となる。それぞれ懸念される現象が異なるため、別々にその効果を実験により把握した。

a) 越流する盛土の堤防防護効果

越流する盛土の実験では、表-3に示す3ケースの堤防構造及び盛土を対象に越流による盛土天端高の経時変化を評価した。ケースごとの盛土天端高の変化量を表-4に、越流開始1.4分後の盛土天端高の比較を図-10に示す。

実験の結果、全ケースで最大越流時間1.4分後に現況堤防高以上の盛土高を確保しており、流水からL1以上盛土が裏法尻部保護工や裏法被覆工を保護する効果が1.4分後まで持続することが確認できた。また、盛土天端幅8mの場合、洗掘に時間を要するため、越流後の盛土高は

表-3 越流する盛土の実験条件

ケース番号	堤防構造	盛土			越流水深	備考
		高さ	天端幅	土砂性状		
1-2-1	基本構造 天端保護工＋ 裏法被覆工＋ 裏法尻保護工	L1以上	4.0m	基本条件 D: 0.3mm W: 20% 締固め無	1.5m	工区A
1-2-2		TP9.5m	8.0m			
2-1	天端保護工＋ 裏法被覆工＋ 裏法尻保護工	L1以上	4.0m		2.0m	工区B
		TP8.2m				

表-4 盛土形状ごとの盛土天端高の変化量

ケース	1-2-1	1-2-2	2-1
工区	榛原・(住吉・川尻地区)		大井川・焼津工区
盛土天端幅	4m	8m	4m
越流水深	1.5m		2.0m
盛土天端高 (T.P.m)	初期	+9.5	+9.5
	1.4分後	+8.6	+9.0
盛土天端低下量(m)	0.9	0.5	1.5

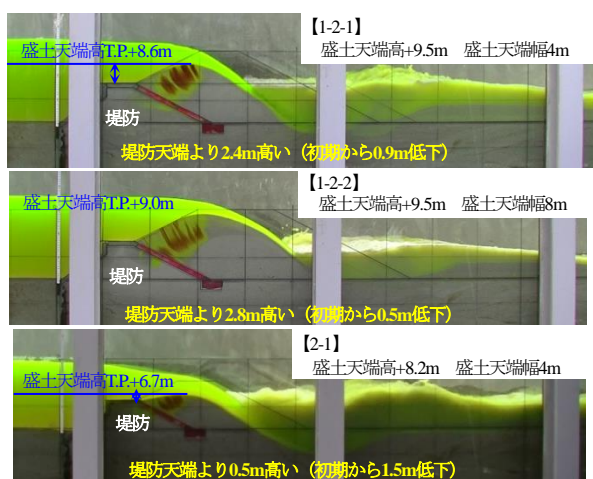


図-10 越流開始1.4分後の盛土天端高の比較

盛土天端幅4mの場合より高くなる傾向になった。

b) 越流しない盛土の効果

越流しない盛土の実験は、一般的に堤防被災の主要因と言われている越流⁵⁾が生じないため、越流する盛土の実験とは異なり、最高潮位から潮位が低下する「引き波」を想定し、盛土の堤防防護効果を検証した。

堤防模型は表-5、図-11のように設定し、津波波形は平面2次元津波氾濫計算の海岸堤防地点における波形を近似した図-12の波形を対象とした。

実験の結果、図-13に示すようにブロック間から若干の土砂の吸出しが生じたものの堤体の損壊はなく、盛土についても洗掘は確認できなかった。

この結果から、越流しない形状の盛土とした場合、堤防の損壊及び盛土の変形が生じる可能性は低い。そのため、引き波発生時に流水にさらされる「天端保護工」のみの施工が可能と判断した。

表-5 越流しない盛土の実験条件

堤防構造	盛土			越流水深	備考
	高さ	天端幅	土質条件		
基本構造※1	L1以上		基本条件		
	T.P.+11.0m		D ₅₀ : 0.3mm		
天端保護工＋ 裏法被覆工＋ 裏法尻保護工	越流なし	4.0m	W: 20% 締固め無	0.0m ※2	引き波現象を再現

※1: 浸透による影響を把握するため表法ブロックを透過性に変更
※2: 盛土天端高 (T.P.+11.0m) まで水位を上昇・低下させる



図-11 実験模型の全景

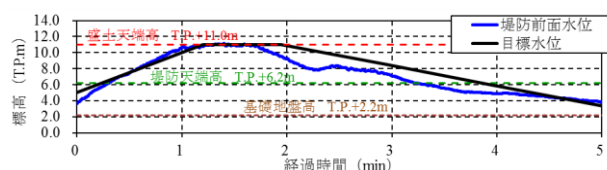


図-12 堤防前面水位の経時変化

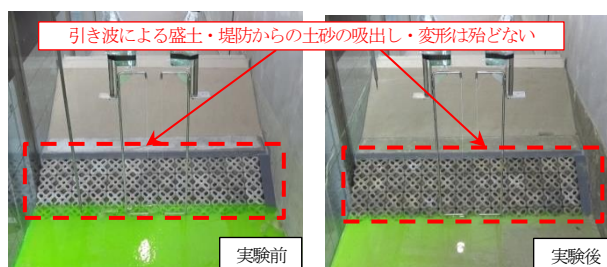


図-13 実験前後の堤防海側状況

(2) 不等沈下を想定した場合の影響

盛土は地震動により不等沈下が生じるなど不確実性が内在していることから、不等沈下が生じたと想定して、越流する流れが1箇所集中した場合の盛土機能について検証した。不等沈下の幅や沈下量については、明確な設定根拠がなかったため、図-14のように幅10m、沈下量1.0mと仮定した。その他の実験条件は表-6のように設定した。

実験の結果、越流しない盛土は、最大越流時間（約1.4分後）において盛土裏法面の一部が洗掘されたが、天端高は殆ど低下しなかった（図-15上図参照）。一方、越流する盛土は切欠き部の洗掘が先行し、最大越流時間（約1.4分後）には盛土は堤防天端高まで洗掘され、裏法被覆工の一部が露出した（図-15下図参照）。この結果から、越流しない盛土では不等沈下など盛土に内在する不確実性を考慮した場合も、盛土が流出し堤防が露出する可能性が小さく、越流する盛土では堤防の一部が露出する可能性があるかと判断した。

(3) L1以上盛土の効果を踏まえた粘り強い堤防構造

L1以上盛土の効果を踏まえて、粘り強い堤防構造を盛土形状ごとに図-16のように設定した。越流しない盛土は、不等沈下など盛土に内在する不確実性を考慮しても、盛土の効果が失われる可能性が低いいため、基本構造のうち天端保護工のみの整備とする方針とした。一方、越流する盛土は、L1以上盛土により最大越流時間後も堤防天端高以上の盛土高を保持することが確認できたが、不等沈下など盛土に内在する不確実性を考慮すると裏法部の露出等の危険性があるため、裏法被覆工及び裏法尻部保護工の改良も行う方針とした。

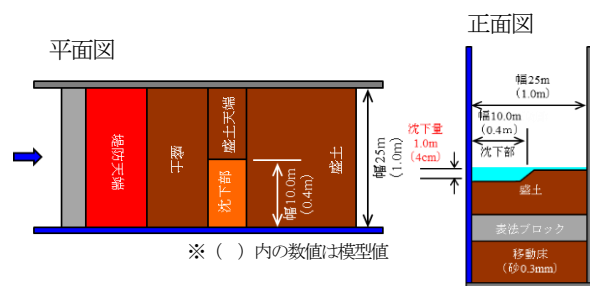


図-14 不等沈下を想定した実験の模型

表-6 不等沈下を想定した場合の実験条件

ケース番号	堤防構造	盛土			越流水深※	備考
		高さ	天端幅	土質条件		
1-3	基本構造	L1以上 T.P.+11.0m	4.0m	基本条件 D ₅₀ : 0.3mm	0.0m	越流しない盛土
2-3	天端保護工+裏法被覆工+裏法尻部保護工	L1以上 T.P.+8.2m		W: 20% 締固め無	2.0m	越流する盛土

※沈下していない盛土天端を基準とした水深

5. 被害軽減額の算出

実験で得られたレベル2津波越流時の盛土天端高の経時変化と堤防を粘り強い構造とすることによる破堤遅延時間を考慮した平面二次元津波浸水シミュレーションを実施し、盛土及び粘り強い構造の海岸堤防を整備した場合に期待できる被害軽減額を算出した。

シミュレーションの結果、表-7に示すように基本構造（1-1-3）において仙台湾南部海岸の構造と同程度の被害軽減効果となり、L1以上盛土を設置することにより、基本構造の約3倍の被害軽減効果を発揮することが明らかになった。

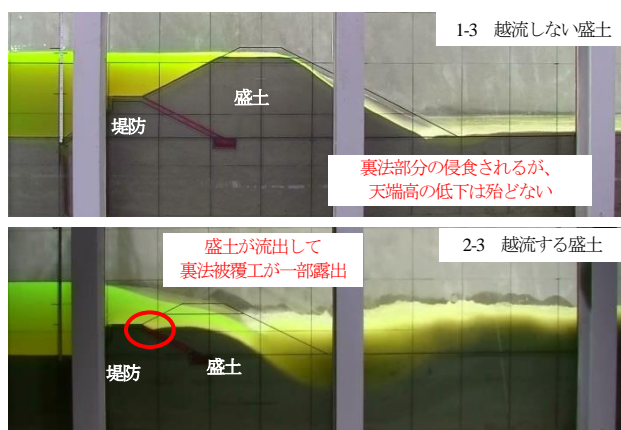


図-15 最大越流時間（越流開始1.4分後）の堤防断面形状

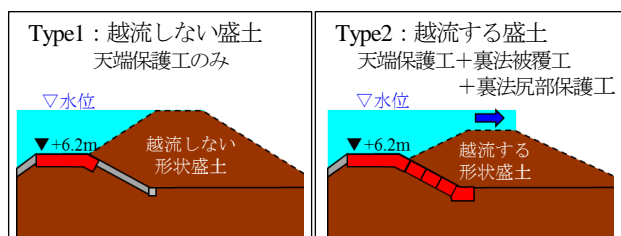


図-16 設定した粘り強い堤防構造

表-7 算定した堤防構造別の被害軽減効果の一覧

検証実験	堤防構造	破堤遅延時間	津波浸水シミュレーションによる浸水被害軽減額
基本実験	東北モデルの構造で駿河海岸を整備した場合	3～5分を想定【実験結果】10分以上	被害軽減額：約1,065億円 現況被害額：約3,180億円 対策後被害額：約2,115億円
1-1-3	+天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工	3.0～4.5分	被害軽減額：約1,030億円 現況被害額：約3,180億円 対策後被害額：約2,150億円
1-1-4	+天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工 +地盤改良	10分以上	被害軽減額：約1,260億円 現況被害額：約3,180億円 対策後被害額：約1,920億円
1-2-1	[L1以上盛土] +天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工	—	被害軽減額：約2,980億円 現況被害額：約3,180億円 対策後被害額：約200億円 (L1以上盛土の高さを段階的に変化した条件での解析)
2-1	[L1以上盛土] +天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工	—	
3	[L2盛土] +天端保護工	—	

6. おわりに

本検討では、海岸堤防と背後の盛土が一体となりL1津波を超える津波に対して減災効果を発揮するために必要な海岸堤防の粘り強い構造及び整備効果の検討を水理模型実験により得られた主な結果を以下に示す。

駿河海岸の堤防及び津波越流条件では、「天端保護工＋裏法被覆工＋裏法尻部保護工」の組み合わせにおいて破堤遅延時間約3～4.5分を有し、仙台湾の事例と同等の粘り強さを確保することが確認された。この結果を踏まえ、駿河海岸においては地盤改良を実施しない本構造を粘り強い海岸堤防の基本構造とした。

基本構造に加えて市町が実施するL1津波を越える高さの盛土は、想定される最大越流時間（81秒）が作用した場合においても盛土天端高が堤防天端高以上を保持すること、天端幅が広くなるに従って堤防天端低下量が減少することを模型実験で明らかにした。

実験での盛土天端高の経時変化を反映した津波浸水シミュレーションにより、陸側の浸水被害を大幅に軽減することを明らかにし、経済的な観点も踏まえて最終的な駿河海岸における粘り強い構造を設定した。

参考文献

- 1) 静岡県：津波浸水想定について（解説），
<https://www.pref.shizuoka.jp/bousai/4higaisoutei/documents/tsunami-sinsui-soutei-kaisetsu.pdf>,
pp.12, 2015.
- 2) 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)， Vol. 69, No. 2, pp. I_1021-I_1025, 2013.
- 3) 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)， Vol. 70, No. 1, 31-49, 2014.
- 4) 国土交通省東北地方整備局：海岸事業再評価仙台湾南部海岸直轄海岸保全施設整備事業，
<http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00360/h13jhyouka/281129/shiryous2804/161129kaiganbc.pdf>
- 5) 吉川勝秀（編著）：河川堤防学 新しい河川工学，
pp.1-278 2008