

第4回 駿河海岸保全検討委員会  
～L1以上盛土を含めた最終的な形状～

平成28年12月8日  
国土交通省中部地方整備局  
静岡河川事務所

～模型実験による検証～

# 【第3回委員会でのご意見】 第3回委員会資料の再掲

➤駿河海岸における粘り強い海岸堤防の基本構造を、①-1-4「天端保護工+裏法尻被覆工+裏法尻部保護工+地盤改良」ではなく、①-1-3「天端保護工+裏法被覆工+裏法尻部保護工」を選定したことについて、住民目線にも配慮した、わかりやすい説明をする。

	堤防構造	破堤遅延時間※1	津波浸水シミュレーションによる浸水被害軽減額	事業費	被害軽減額と費用の差分
検証実験	<p>東北モデルの構造で駿河海岸を整備した場合</p>	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	約76億円	約989億円
①-1-1	<p>十天端保護工</p>	2.0～2.5分	被害軽減額：約800億円 現況被害額：約3,180億円 対策後被害額：約2,380億円	約18億円	約782億円
①-1-2	<p>十天端保護工 +裏法被覆工</p>	2.5～3.5分	被害軽減額：約885億円 現況被害額：約3,180億円 対策後被害額：約2,295億円	約54億円	約831億円
①-1-2'	<p>十天端保護工 +裏法被覆工 +通常のブロック基礎</p>	3.0～4.0分	被害軽減額：約1,000億円 現況被害額：約3,180億円 対策後被害額：約2,180億円	約57億円	約943億円
①-1-3	<p>十天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工</p>	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	約62億円	約968億円
①-1-4	<p>十天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工 +地盤改良</p>	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	約76億円	約1,184億円

※1：堤防破堤までの時間は、最も危険側の評価となる堤防構造の一部の損壊が生じた場合とする。  
 ※2：L1以上盛土設置時の水位

現在、海岸堤防は、比較的発生頻度の高い津波、『L1津波』を対象として施設整備が進められている。

また、発生頻度の低い最大クラスの津波『L2津波』に対しては、住民の生命・財産を守ることを最優先として、ハードとソフトの施策を柔軟に組み合わせた、多重防御により対処することとされている。

駿河海岸は、外洋に面しており、地形上、津波に対して極めて脆弱な地形特性である。そのため、最大クラスの津波に対しても、いかに被害軽減を図るかが喫緊の課題である。

駿河海岸整備検討会（平成27年3月～平成27年8月）では、堤防背後の土地利用、さらには、ソフト対策等と一体となった各自治体における海岸防護の考え方を踏まえ、**最大クラスとなる地震・津波に対する被害の軽減を図るための海岸保全のあり方**を検討した。

本検討委員会では、駿河海岸整備検討会での報告を踏まえ、駿河海岸において、各自治体が整備するL1津波を越える高さに対応する施設整備と、一体となった粘り強い効果を発揮する海岸堤防の具体的構造について検討することとした。

平成23年3月  
東北太平洋沖地震による未曾有の津波被害

平成23年9月  
・東北太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策の考え方が示される。（L1津波、L2津波）

平成25年6月  
「静岡県第4次地震被害想定（第一次報告）」  
「静岡県地震・津波対策アクションプログラム2013」  
の策定・公表

平成26年7月  
駿河湾沿岸海岸保全基本計画変更  
・防護の目標に“二つのレベルの津波”を明記  
・粘り強い構造の海岸堤防の追記  
・総合的な防災・減災対策の推進を追記 等

平成27年3月～8月  
駿河海岸整備検討会  
・駿河海岸における最大クラスとなる地震・津波に対する被害の軽減を図るための海岸保全のあり方を示す。

平成28年3月 駿河海岸保全検討委員会  
・各自治体が整備するL1津波を越える高さに対応する施設整備と一体となった粘り強い効果を発揮する海岸堤防の具体的構造を検討

# 【第3回委員会でのご意見】 第1回委員会資料の再掲

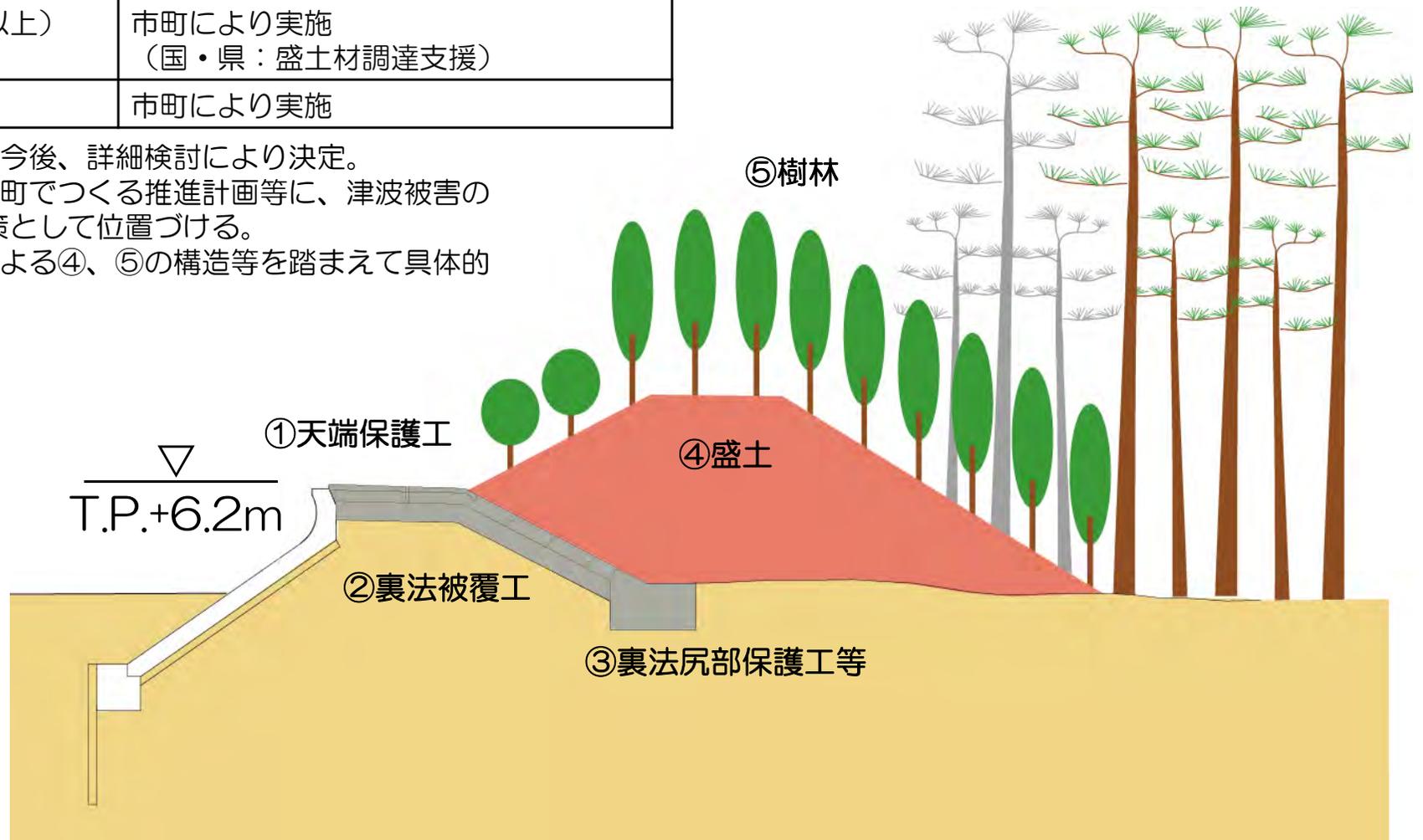
## ■施工の役割分担イメージ～

①天端保護工		国の海岸事業により実施
②裏法被覆工		国の海岸事業により実施
③裏法尻部保護工		国の海岸事業により実施
④盛土	(現況堤防高まで)	国の事業により実施 (国の事業で発生する土砂を有効活用)
	(現況堤防高以上)	市町により実施 (国・県：盛土材調達支援)
⑤樹林		市町により実施

※各種構造については、今後、詳細検討により決定。

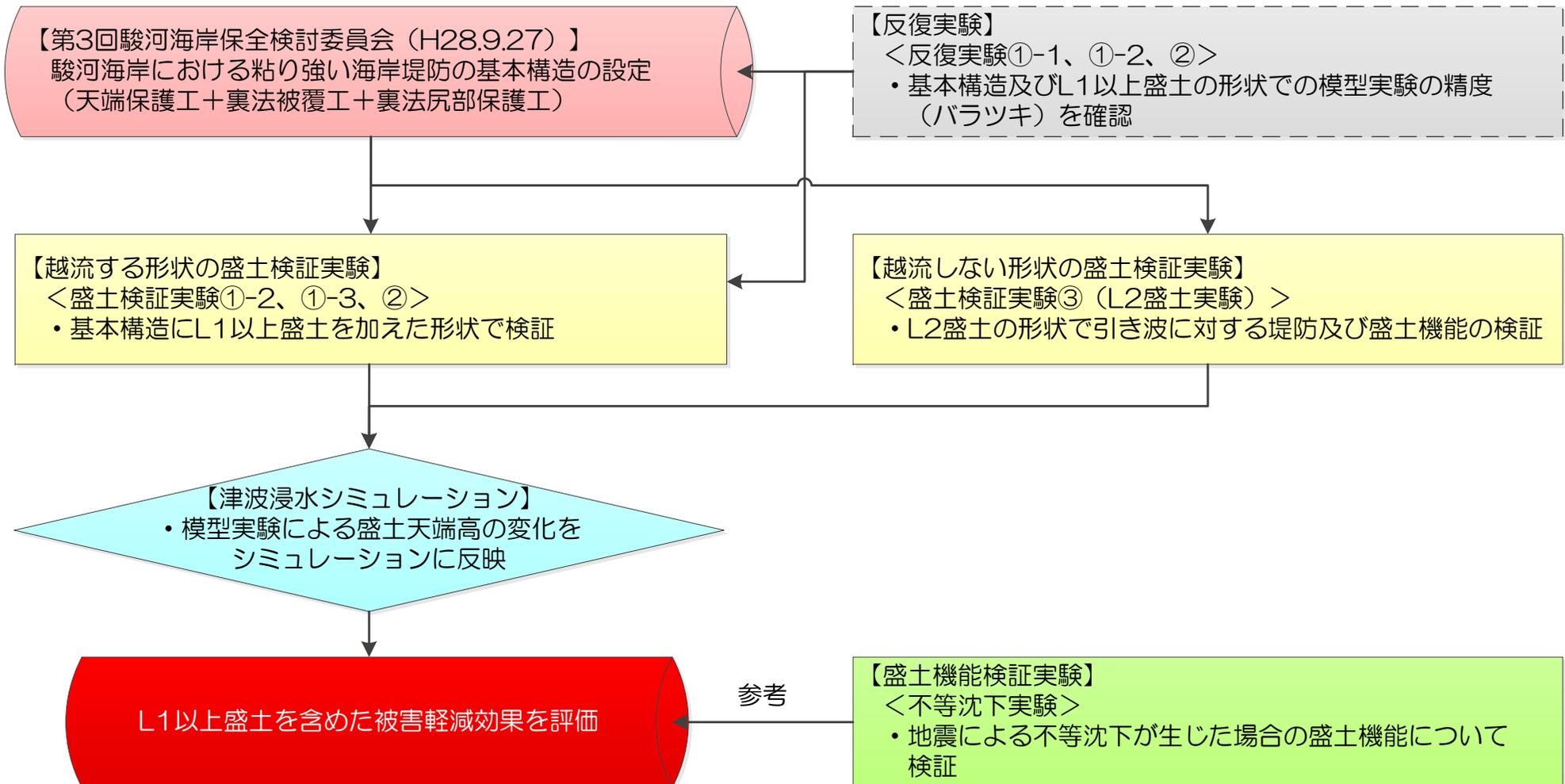
※④、⑤については、市町でつくる推進計画等に、津波被害の軽減を目的とする対策として位置づける。

※①、②、③は、市町による④、⑤の構造等を踏まえて具体的な構造を検討する。



# 1. L1以上盛土の模型実験による検証

- 第3回委員会において、東北モデルと同等の機能を有する、駿河海岸での粘り強い堤防の基本構造について設定。
- 本日は、L1以上盛土を含めた最終的な形状として、「越流する形状の盛土（L1以上盛土）」「越流しない形状の盛土（L2盛土）」について検証実験を実施。
- また、「地震による不等沈下が生じた場合の盛土機能」について検証実験を実施。
- この他、基本構造及びL1以上盛土の形状での模型実験の精度（バラツキ）を確認する反復実験について実施。
- 模型実験における盛土天端高の経時変化について、津波浸水シミュレーションに反映させ被害軽減効果について評価。
- これらより、粘り強い堤防の基本構造にL1以上盛土を加えた、駿河海岸における最終的な形状について確認する。

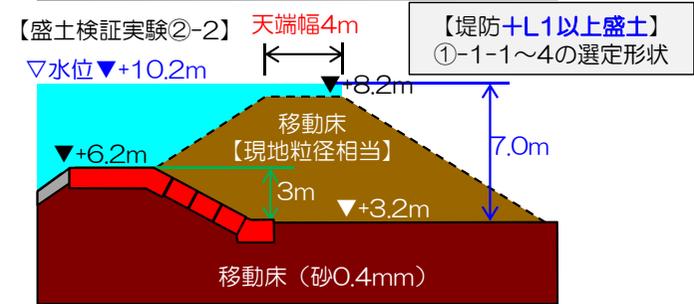
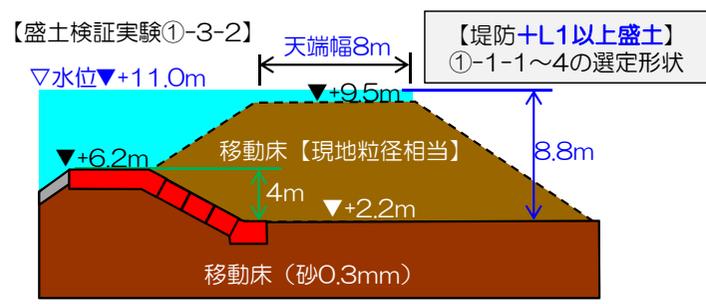
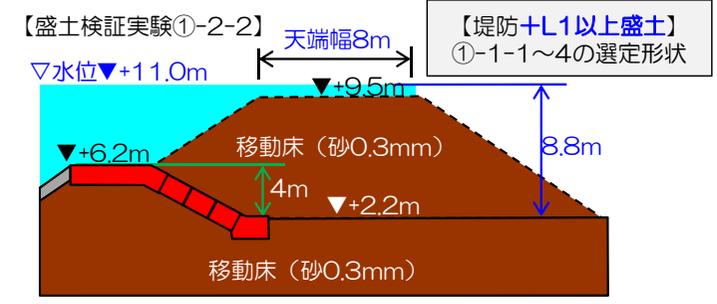
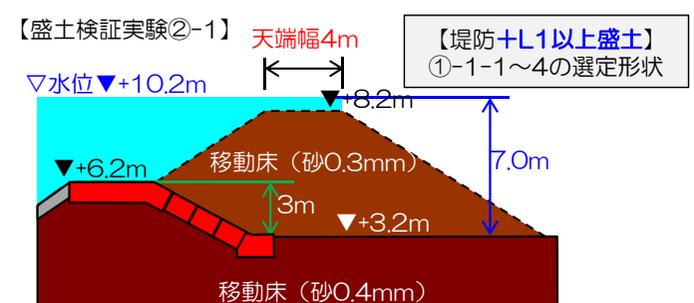
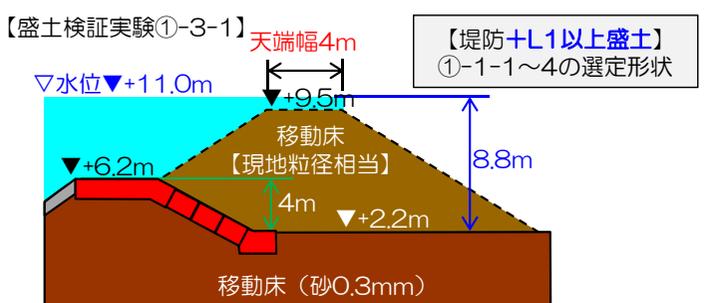
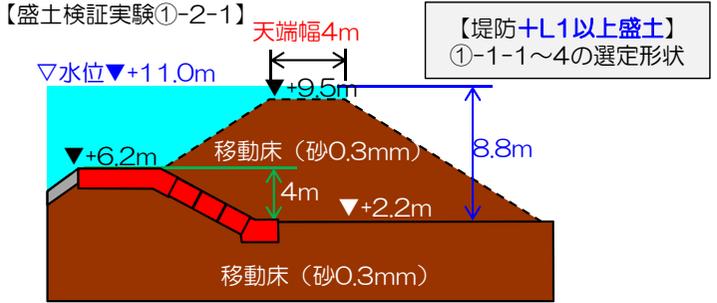


# 2. 実験ケース①

## 越流する形状の盛土検証実験

	堤防形状	実験の目的	堤防形状	盛土条件	土質性状	越流水深	
盛土検証実験 ①-2-1	榛原工区 (住吉工区) (川尻工区)	盛土性状・盛土幅別のL1以上盛土の形状について経時変化を把握	基本構造+L1以上盛土 【単一粒径(0.3mm)】でL1以上盛土(4m、8m)の効果を確認	基本構造	L1以上盛土 H=9.5m B=4.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	1.5m (津波波形：急勾配)
盛土検証実験 ①-2-2				基本構造	L1以上盛土 H=9.5m B=8.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	1.5m (津波波形：急勾配)
盛土検証実験 ①-3-1				基本構造	L1以上盛土 H=9.5m B=4.0m	現地粒径相当 含水比12.5% 締固め有り	1.5m (津波波形：急勾配)
盛土検証実験 ①-3-2				基本構造	L1以上盛土 H=9.5m B=8.0m	現地粒径相当 含水比12.5% 締固め有り	1.5m (津波波形：急勾配)
盛土検証実験 ②-1	大井川工区 焼津工区 (T.P.+6.2 m区間)	大井川工区・焼津工区の形状で、盛土性状・盛土幅別のL1以上盛土の形状について経時変化を把握	基本構造+L1以上盛土 【単一粒径(0.3mm)】で大井川工区・焼津工区を確認	基本構造	L1以上盛土 H=8.2m B=4.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	2.0m (津波波形：急勾配)
盛土検証実験 ②-2				基本構造	L1以上盛土 H=8.2m B=4.0m	現地粒径相当 含水比12.5% 締固め有り	2.0m (津波波形：急勾配)

※川尻工区、住吉工区は越流しない盛土を想定しているが、堤防諸元が同等のため堤防形状では( )としている

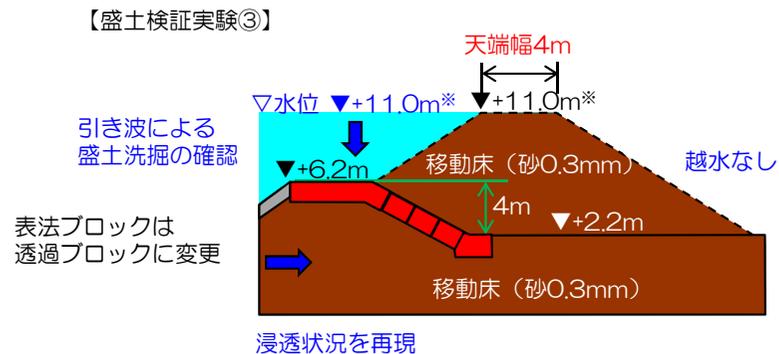


## 2. 実験ケース②

### ■越流しない形状の盛土検証実験

	堤防形状	実験の目的		堤防形状	盛土条件	土質性状	越流水深
盛土検証実験 ③ (L2盛土実験)	住吉工区 川尻工区	越水をさせない盛土形状における堤防及び盛土機能の検証	盛土を越流しないL2盛土での引き波を想定した堤防の損壊及び盛土流出の確認	基本構造 (盛土高T.P.11.0m) ※越水しない高さ ※表法面は透過ブロックに変更	L2盛土 H=11.0m※ B=4.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	越流なし
【参考】 追加検証			湛水10分させた後に堤防の損壊及び盛土流出の確認				

※模型実験における堤防高T.P.+11.0mは、川尻工区・住吉工区で想定する堤防高と異なるが、越流させない実験とすることから、他の実験で設定した波形の水位11.0mとして実施している



※模型実験における堤防高T.P.+11.0mは、川尻工区・住吉工区で想定する堤防高と異なるが、越流させない実験とすることから、他の実験で設定した波形の水位11.0mとして実施している。

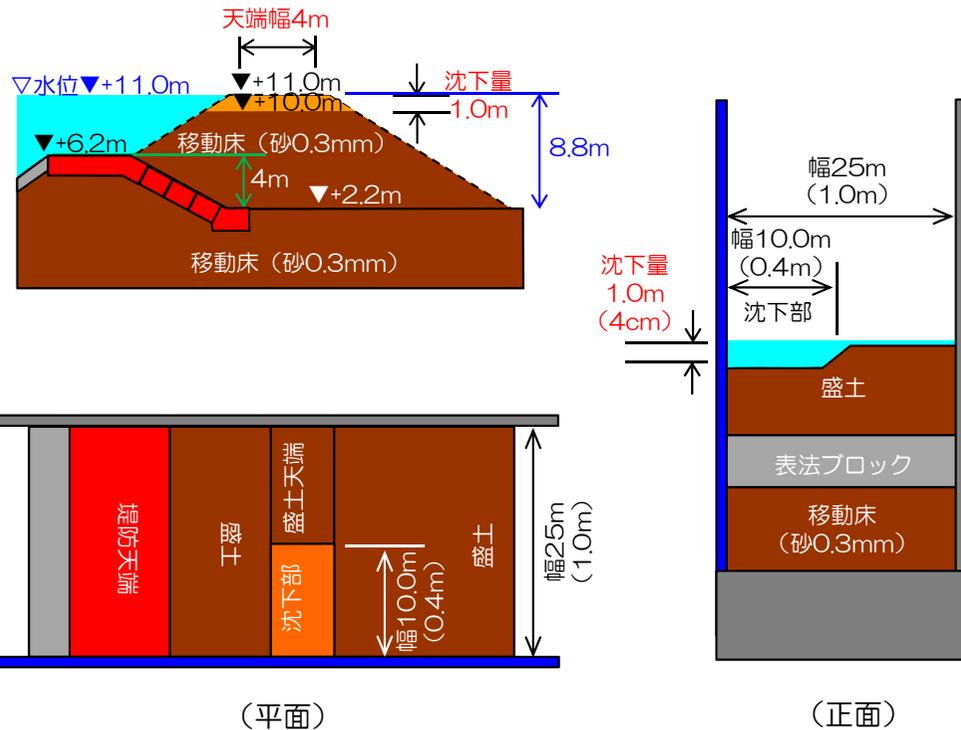
# 2. 実験ケース③

## ■盛土機能検証実験

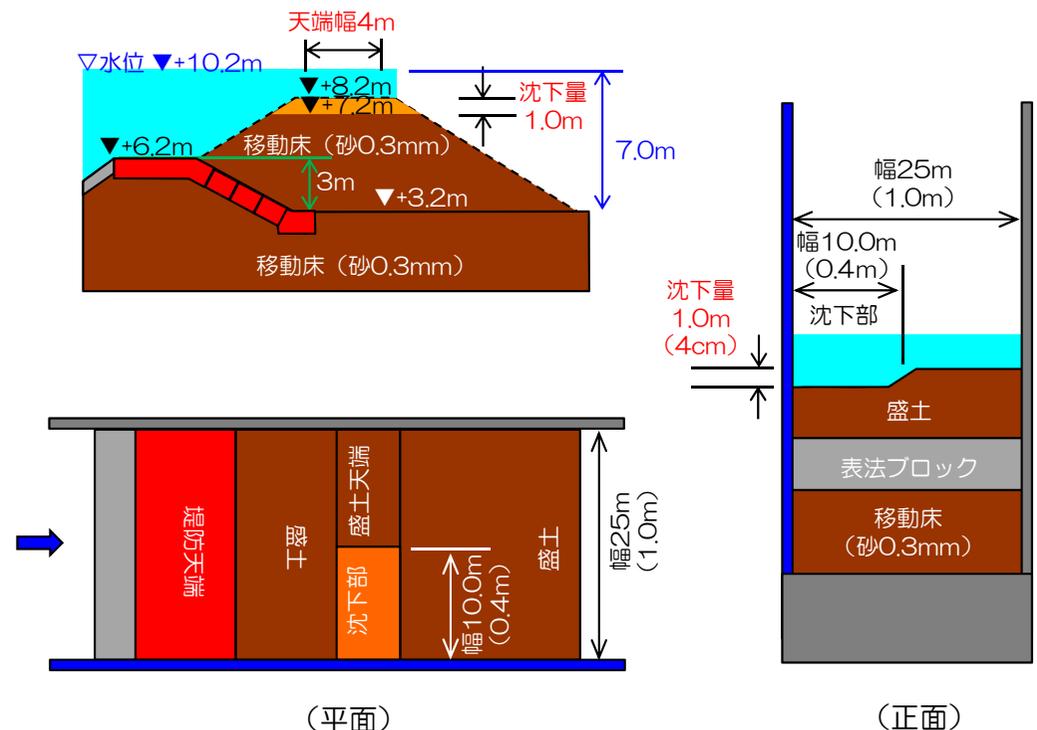
	堤防形状	実験の目的	堤防形状	盛土条件	土質性状	越流水深	
不等沈下実験	越流しない形状の盛土	地震動により不等沈下が生じた場合の盛土機能の検証	部分的な不等沈下が生じた場合における盛土の流出状況の確認	基本構造 (盛土高T.P.11.0m※) 沈下量1.0m、幅10.0m	L2盛土 H=11.0m※ B=4.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	天端高程度での越流 (切欠き高を基準として 1.0m程度)
	越流する形状の盛土			基本構造 (盛土高T.P.8.2m) 沈下量1.0m、幅10.0m	L1以上盛土 H=8.2m B=4.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	2.0m (津波波形：急勾配)

※模型実験における堤防高T.P.+11.0mは、川尻工区・住吉工区で想定する堤防高と異なるが、越流させない実験とすることから、他の実験で設定した波形の水位11.0mとして実施している

【不等沈下実験（越流しない形状の盛土）】



【不等沈下実験（越流する形状の盛土）】



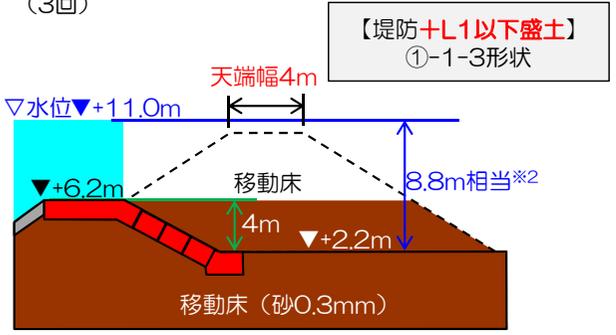
# 2. 実験ケース④

## ■実験結果のバラツキ把握のための反復実験

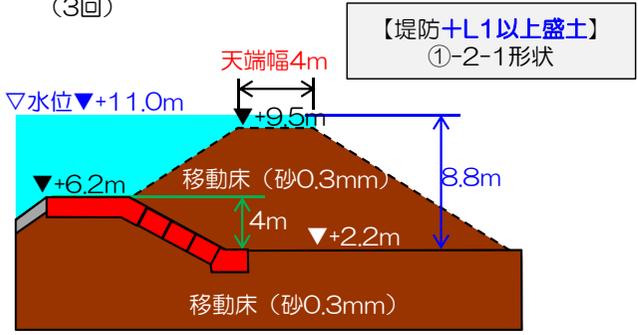
	堤防形状	実験の目的		堤防形状	盛土条件	土質性状	越流水深
反復実験①-1 (3回)	榛原工区 (住吉工区) (川尻工区)	模型実験の精度(バラツキ)を確認	設定した基本構造の破堤遅延時間のバラツキを確認	①-1-3の堤防形状 (2回目)	L1以下盛土 H=6.2m B=4.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	1.5m (津波波形：急勾配)
反復実験①-2 (3回)			基本構造+L1以上盛土形状(天端幅4m)の経時変化のバラツキを把握	①-2-1の堤防形状 (2回目)	L1以上盛土 H=9.5m B=4.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	1.5m (津波波形：急勾配)
反復実験② (3回)	大井川工区 焼津工区 (T.P.+6.2m区間)		大井川工区・焼津工区の形状で、基本構造+L1以上盛土形状(天端幅4m)の経時変化のバラツキを把握	②-1の堤防形状 (2回目)	L1以上盛土 H=8.2m B=4.0m	砂0.3mm 含水比20% 締固め無し	2.0m (津波波形：急勾配)

※川尻工区、住吉工区は越流しない盛土を想定しているが、堤防諸元が同等のため堤防形状では( )としている

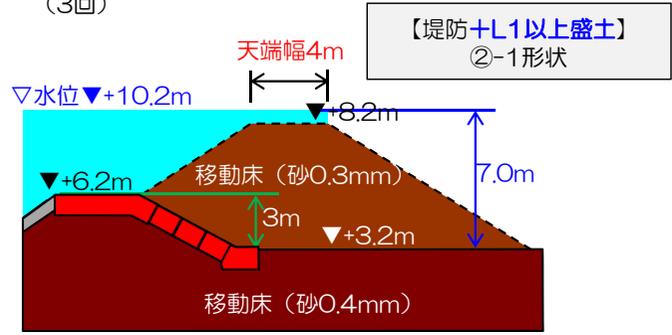
【反復実験①-1】  
(3回)



【反復実験①-2】  
(3回)



【反復実験②】  
(3回)



※2 L1以上盛土実施時の越流水深を確保した波形から想定される実際の越流水深(堤防天端から3.3m)

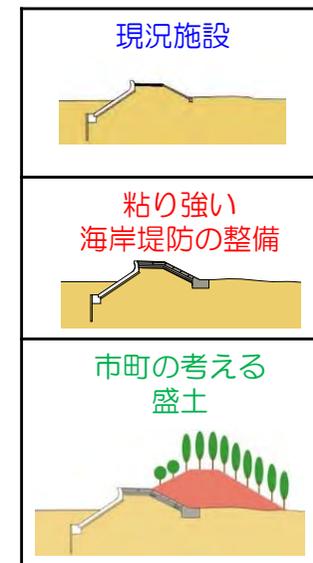
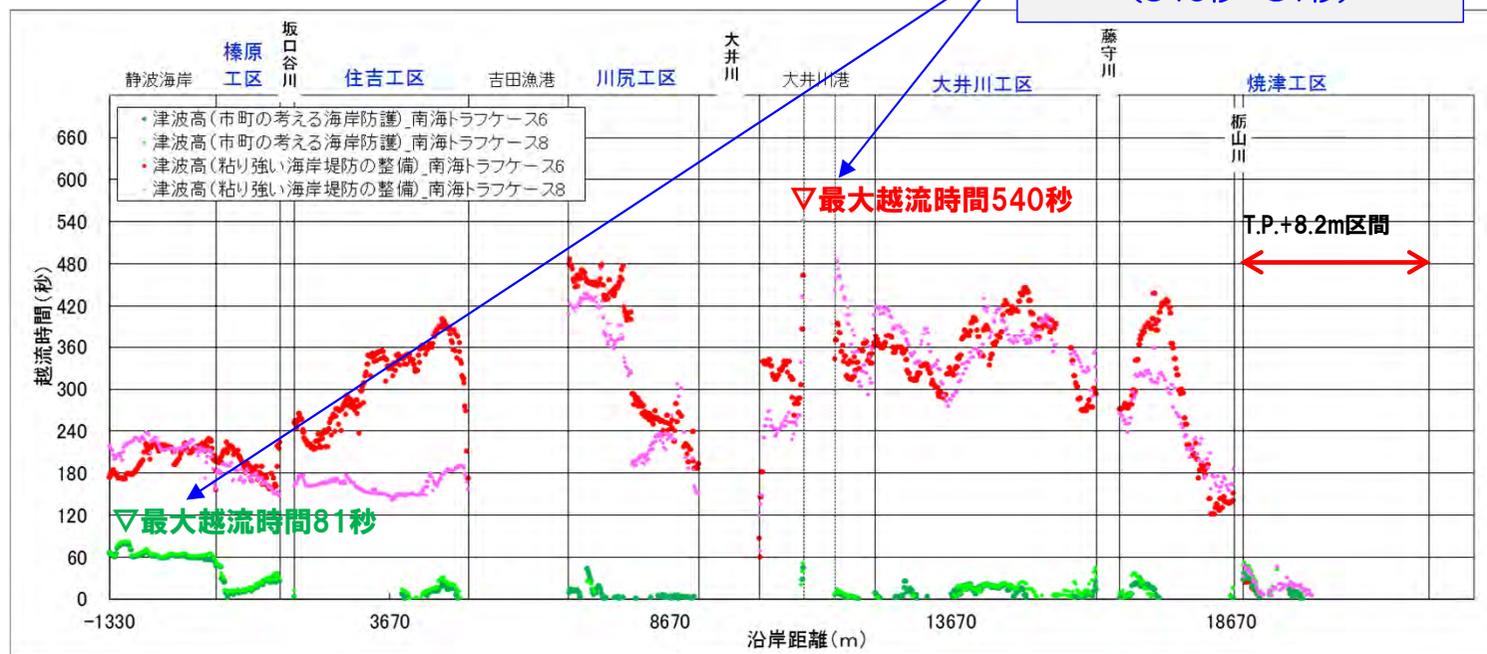
### 3. L1以上盛土の評価方法【実験での評価】

■基本構造を選定するための実験は、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に着目して検討した。一方で、L1以上盛土の場合、盛土天端高が高いことから最大越流時間が約1.4分（81秒）と大幅に短くなる。このため「盛土天端高の経時変化」に着目して評価を行う。

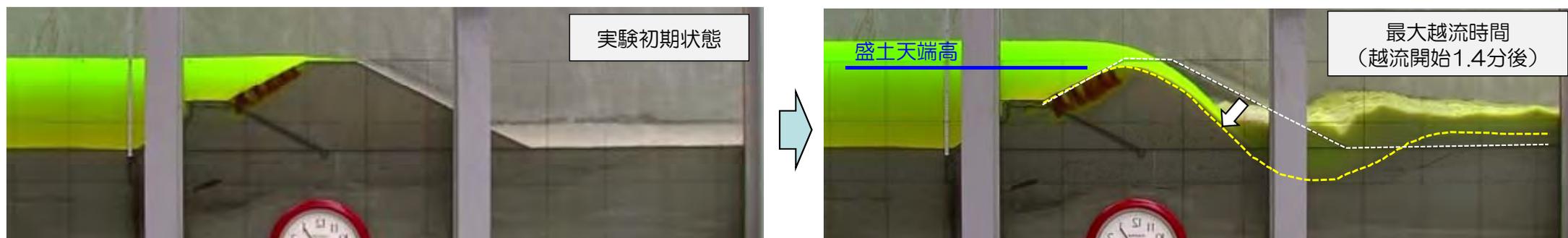
➤盛土天端高の経時変化の確認

➤最大越流時間（約1.4分（81秒））が経過した時点の盛土天端高

L1以上盛土による効果で  
最大越流時間が大幅に短くなる  
(540秒⇒81秒)



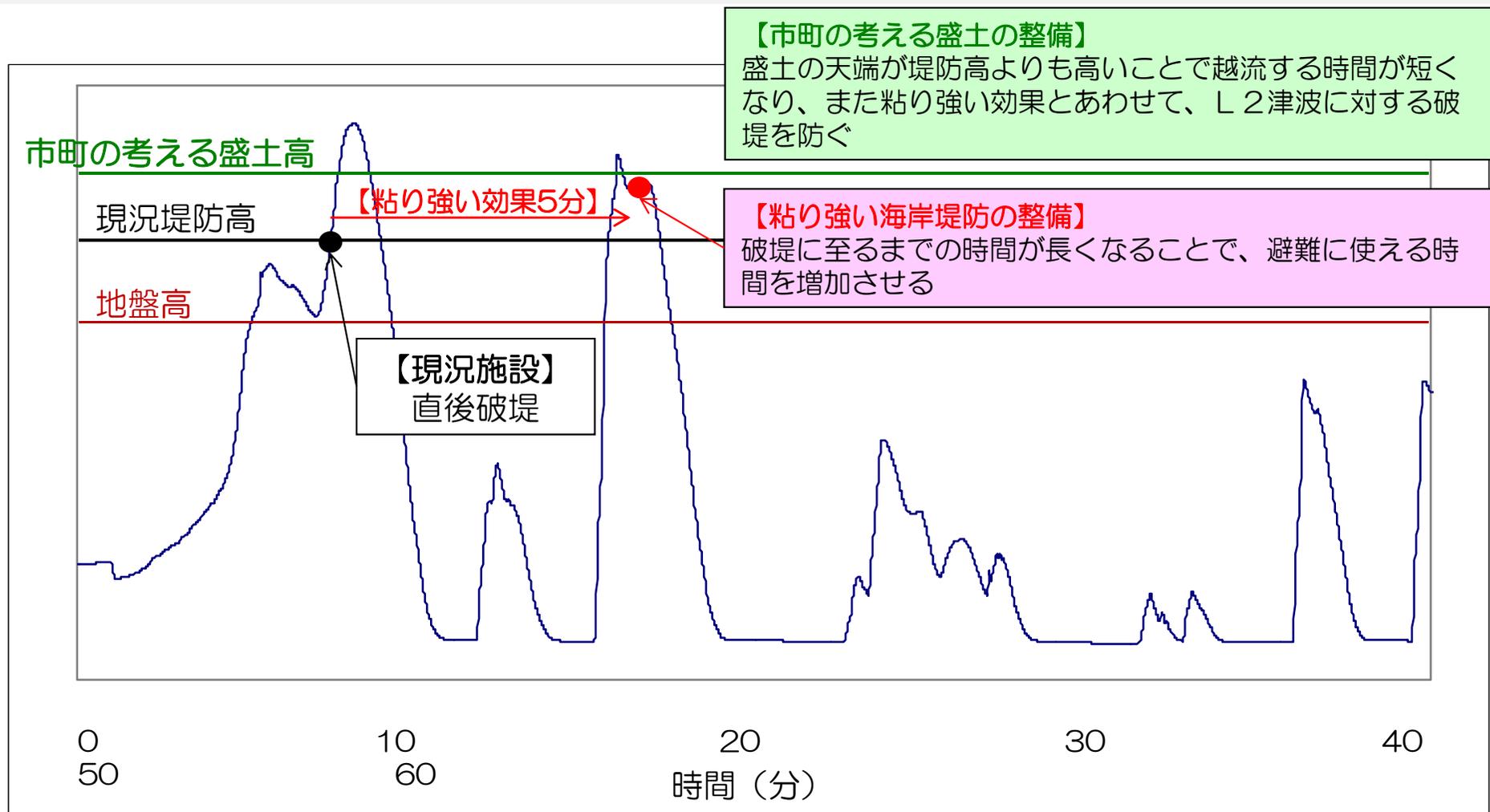
駿河海岸における最大クラスの津波による越流時間



予備実験時のL1以上盛土の天端高変化状況

# 【参考】 L1以上盛土の評価方法(整備効果のイメージ)

- 「現況施設」で、L1津波は、現況堤防高を超えない。しかし、L2津波は、現況堤防高より高いため、海岸堤防の越流とともに直後破堤する。
- 「粘り強い海岸堤防の整備」により、避難に使える時間を増加させることができ、浸水エリア外や避難施設への避難が可能となる。海岸堤防の粘り強い効果として、5分間粘ることを想定して試算。
- 「市町の考える盛土の整備」により、盛土の天端が堤防よりも高いことで越流する時間が短くなることから、更なる被害軽減の効果を確認する。



L2津波波形と海岸堤防のイメージ図

# 3. L1以上盛土の評価方法【津波浸水シミュレーションでの評価】

- L1以上盛土の効果もL1以下盛土と同様に津波浸水シミュレーションによる被害軽減額とその事業費の差分で比較する。
  - L1以上盛土とした場合、最大越流時間が約1.4分（81秒）となり、目標とする東北モデルと同等の破堤遅延時間（3～5分を想定）まで至らない。
- ⇒ L1以上盛土における被害軽減額の試算については、「破堤遅延時間」でなく「最大越流時間までの盛土天端高の経時変化」を津波浸水シミュレーションに反映して算出する。

	堤防構造	破堤遅延時間※1	津波浸水シミュレーションによる浸水被害軽減額	事業費	被害軽減額と費用の差分
検証実験		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	約76億円	約989億円
①-1-3 基本構造		+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	約62億円 (約●●億円) (約●●年)	約968億円
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	約76億円 (約●●億円) (約●●年)	約1,184億円
①-2-1 榛原工区 (住吉工区) (川尻工区)		【L1以上盛土】 +天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工	◎◎億円 (実験のL1以上盛土の高さを段階的に変化させた条件での解析)	◎◎億円 (約●●億円) (約●●年)	◎◎
②-1 大井川工区 焼津工区		【L1以上盛土】 +天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工			
L2実験 住吉工区 川尻工区		【L2盛土】 +天端保護工			

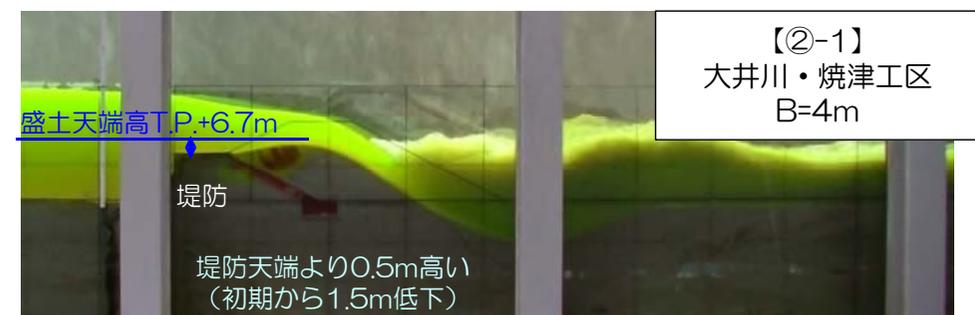
# 4. 検証実験結果(越流する形状の盛土)①

## 【盛土天端高の経時変化】

- 天端幅8mの場合、洗掘に時間を要するため、盛土高は天端幅4mの場合より高い。
- L1以上盛土により、最大越流時間1.4分後でも現況堤防高以上の盛土高を確保している。
- 「大井川・焼津工区」は比高差が小さいため盛土量が少なく、また、越流水深が大きいことから、「榛原・(住吉・川尻工区)」と比較すると、最大越流時間1.4分後の盛土天端の低下量は大きくなっている。

➤盛土の土質性状の条件が厳しい実験での、盛土天端高の経時変化を工区ごとに反映した津波浸水シミュレーションにより、被害軽減額を試算しL1以上盛土による事業効果を評価する。

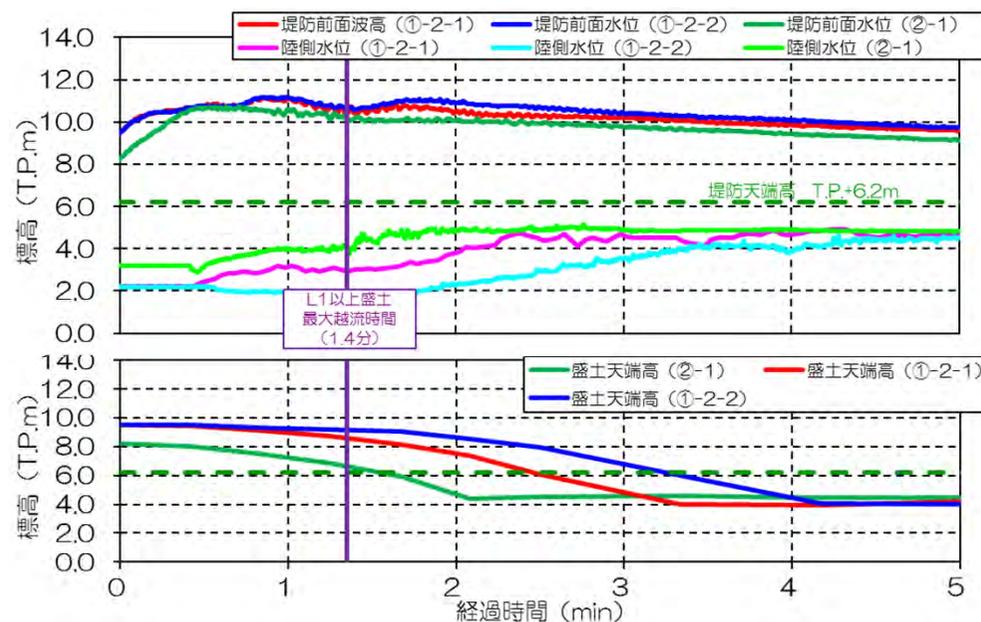
【砂0.3mm、含水比20%、締固め無し】



越流開始1.4分後の盛土天端高の比較

実験ケースごとの結果一覧

ケース	①-2-1	①-2-2	②-1	
工区	榛原・(住吉・川尻工区)		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	+8.2
	1.4分後	+8.6	+9.0	+6.7
盛土天端低下量 (m)	0.9	0.5	1.5	



# 4. 検証実験結果(越流する形状の盛土)②

## 【現地粒径相当での実験結果】

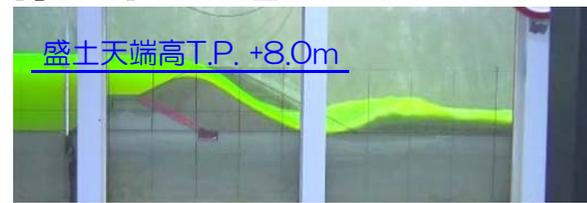
- 現地粒径相当で締め固まった状態を想定した実験において、盛土の流出時間に大きな差は見られなかった。
- 盛土の形状については、天端幅4mの現地粒径相当の盛土裏法尻部で、洗掘がされにくい状況が確認された。これは、盛土内の巨礫・粗石が法尻に近いところに堆積し、法尻の地盤表面が保護されたためと推察される。
- しかし、天端幅8mでは逆の現象となっており、土質性状の違いによる評価は、今回の実験では困難であった。

【砂0.3mm、含水比20%、締固め無し】

【現地粒径相当、含水比12.5%、締固め有り】

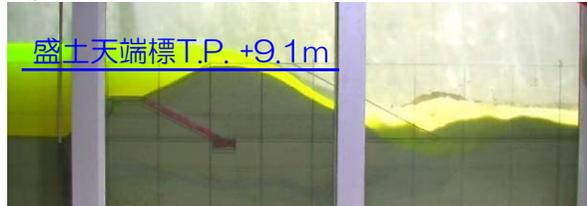
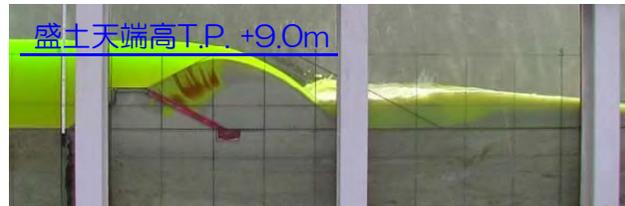
【①-2-1】 L1以上盛土B=4.0m

【①-3-1】 L1以上盛土B=4.0m



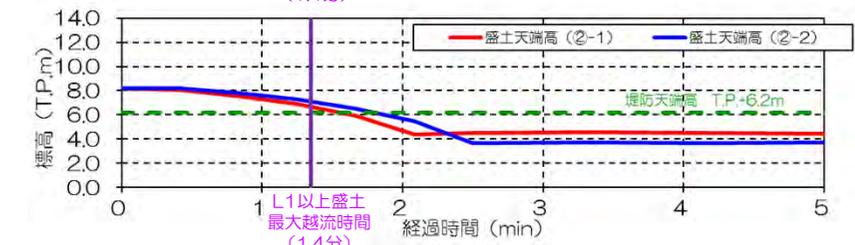
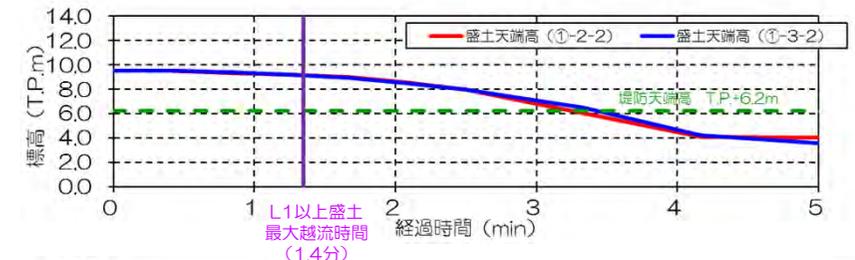
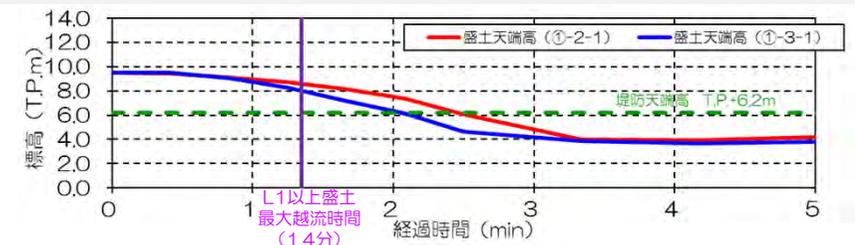
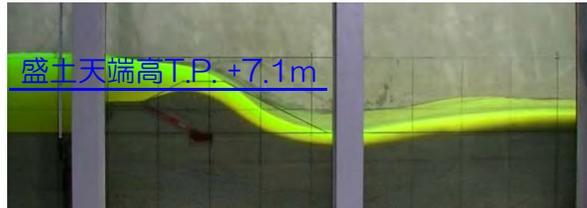
【①-2-2】 L1以上盛土B=8.0m

【①-3-2】 L1以上盛土B=8.0m

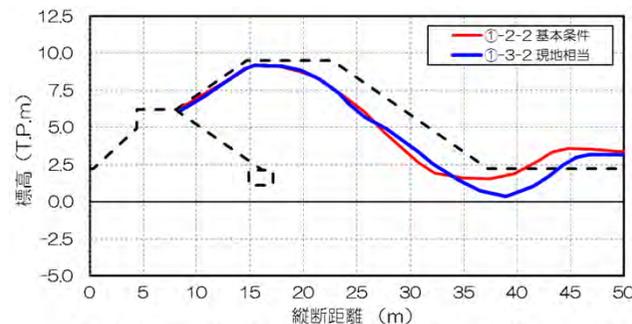
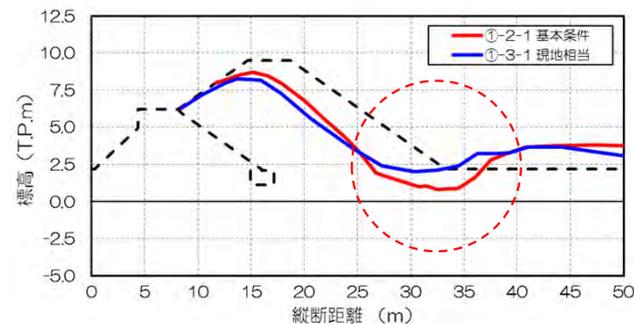


【②-1】 L1以上盛土B=4.0m

【②-2】 L1以上盛土B=4.0m

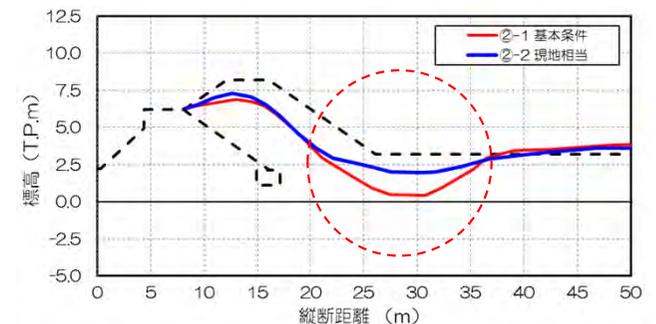


越流開始1.4分後の盛土形状の比較



越流開始1.4分後の盛土断面形状の比較

盛土天端高の経時変化の比較



# 4. 検証実験結果(越流しない形状の盛土)①

## 【引き波に対する安全性の確認】

- 越流しない形状の盛土検証実験は、一般的に堤防被災の主要因と言われている越流が生じないため、盛土の洗掘状況や盛土高を確認する実験とは異なり、越流現象以外の「引き波」を想定し、堤防及び盛土機能について検証をした。

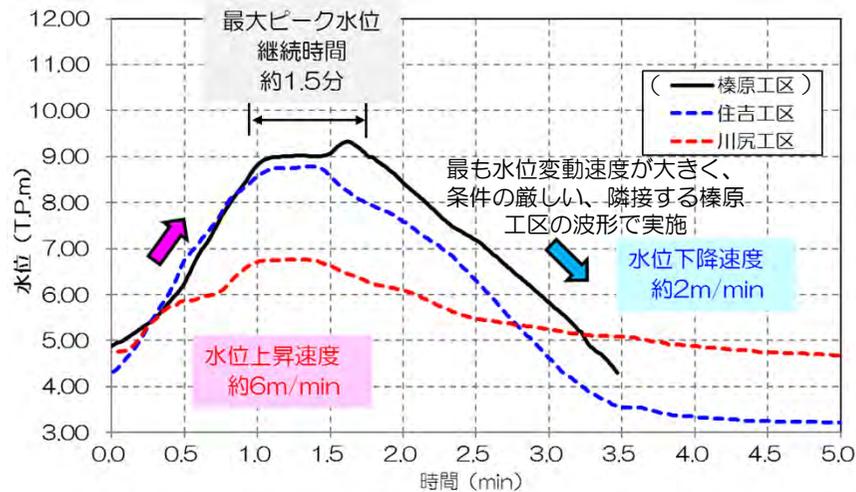
### ■実験条件

波 形：解析波形に近似した水位の上昇速度、下降速度を設定

堤防構造：基本構造（天端保護工+裏法被覆工+裏法尻保護工）

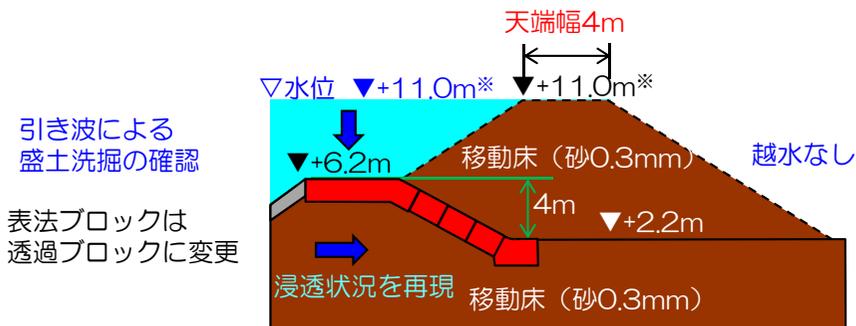
堤防からの土砂の吸出しや浸透の影響等を確認するため、堤防表法面に透過ブロックを配置  
浸透による影響等が確認できるように堤防表法尻の止水版を撤去

盛 土：L2盛土（B=4.0m）、土質性状（砂0.3mm、含水比20%、締固め無し）

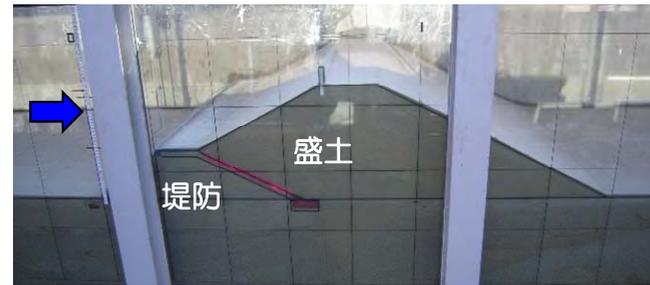


引き波実験での波形条件

※近似波形の最高水位を盛土高のT.P.+11.0mにオフセットした波形を実験で用いる



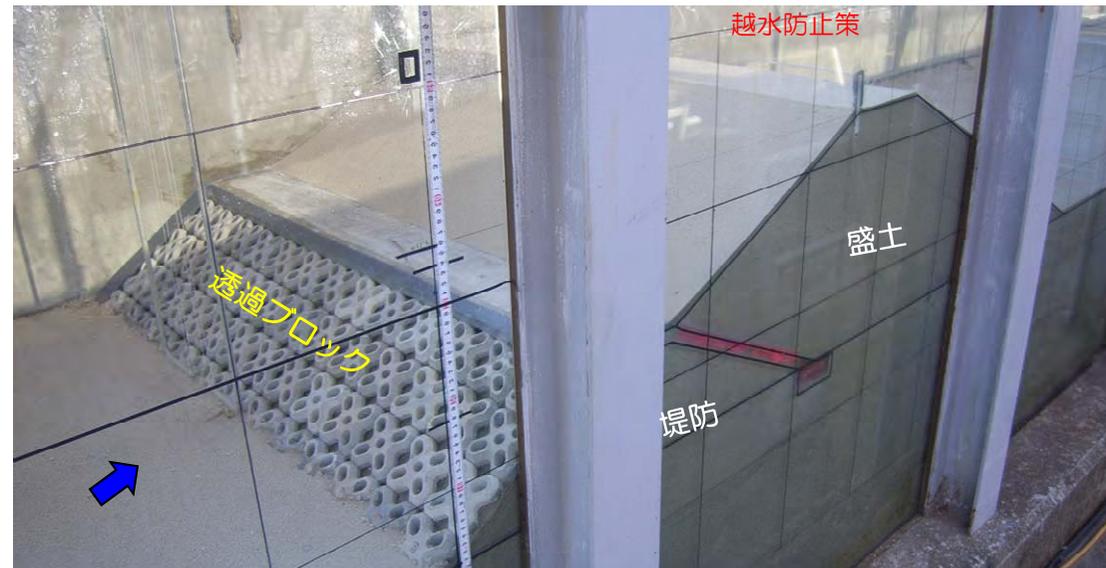
引き波実験での堤防の基本構造のイメージ



模型側面写真



透過性ブロック (2t相当)

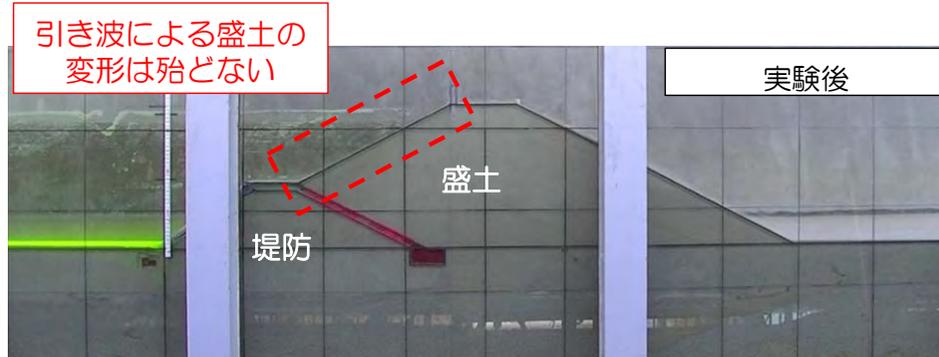
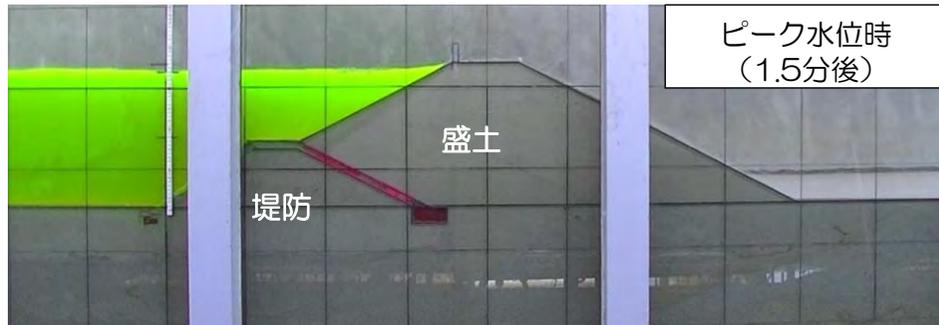


模型全景写真

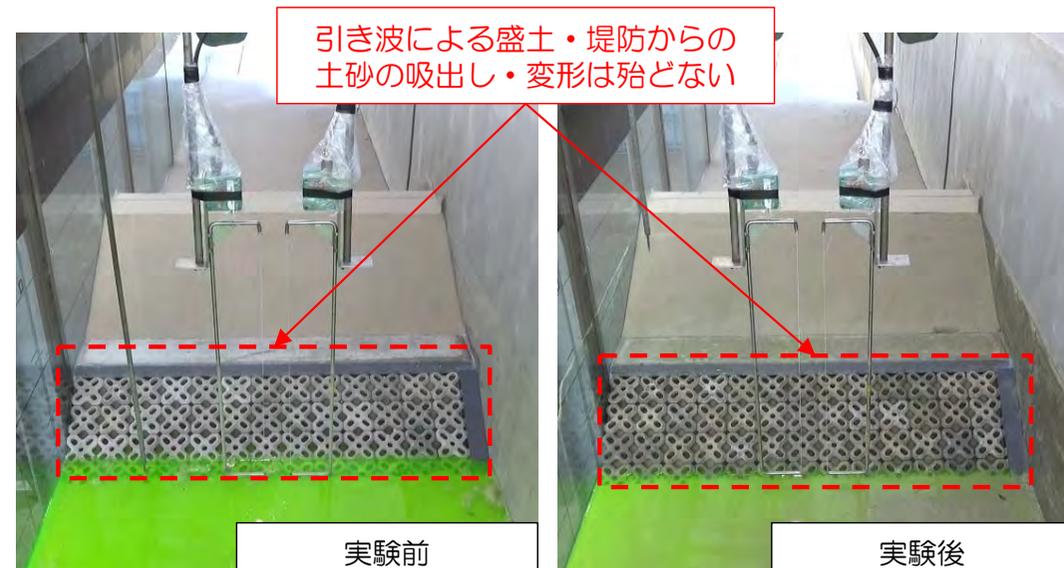
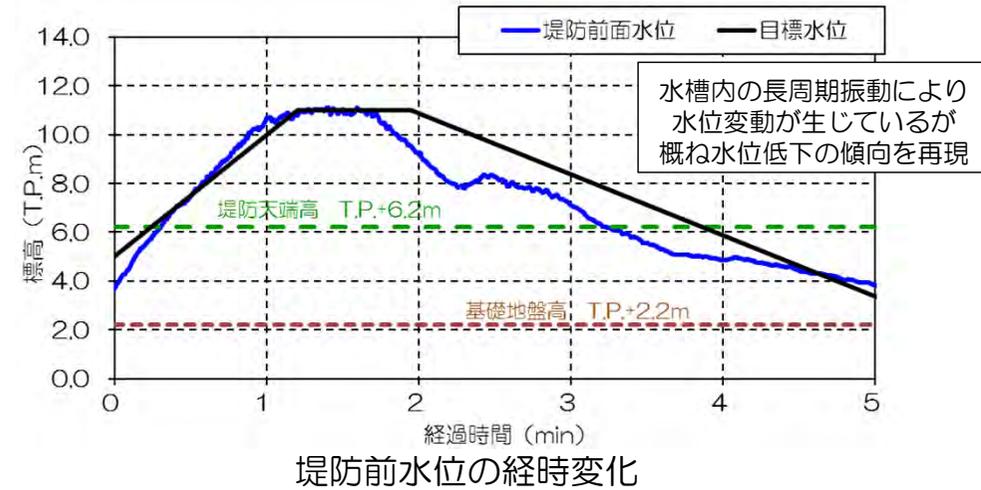
## 4. 検証実験結果(越流しない形状の盛土)②

### 【堤防及び盛土機能への影響】

- 引き波時に、ブロック間から若干の土砂の吸出しが生じたものの、堤体の損壊は見られない。
  - 盛土についても、洗掘(変形・移動)は見られなかった。
- 越流しない形状の盛土とした場合、堤防の損壊及び盛土機能への影響が生じる可能性は低いと考えられることから、基本構造のうち、天端保護工のみの施工が可能と考える。  
ただし、背後の盛土が天端保護工の施工に引き続き施工され、その形状が一定の安定度を持っている必要がある。



時間ごとの断面形状の変化



実験前後の海側堤防状況

# 4. 検証実験結果(不等沈下実験)①

【不等沈下が生じた場合の堤防機能の検証】

- 盛土においては不確実性が内在していることから、地震動により不等沈下が生じたと想定して、越流する流れの力が1箇所に集中した場合の盛土機能について検証した。

## ■実験条件

### ①越流しない形状の盛土

波形：沈下部（切欠き部）から盛土高T.P.+11.0mの高さで流下（適宜給水）

堤防構造：幅10m×沈下量1.0m相当の沈下部※を水路側面部に設置した盛土を①-1-3形状堤防に設置

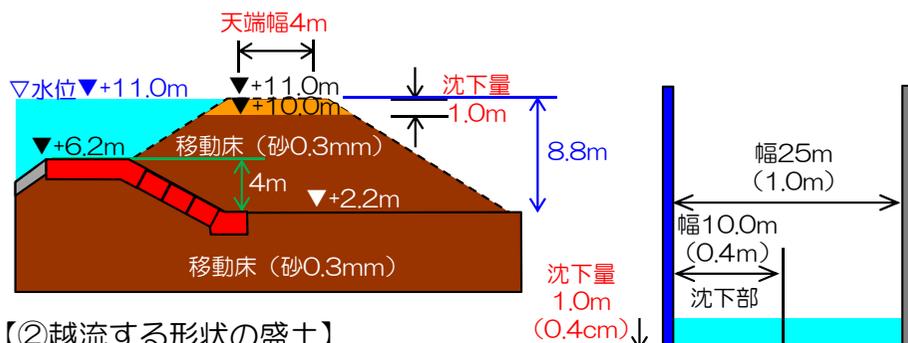
### ②越流する形状の盛土

波形：越流水深2.0mの津波波形

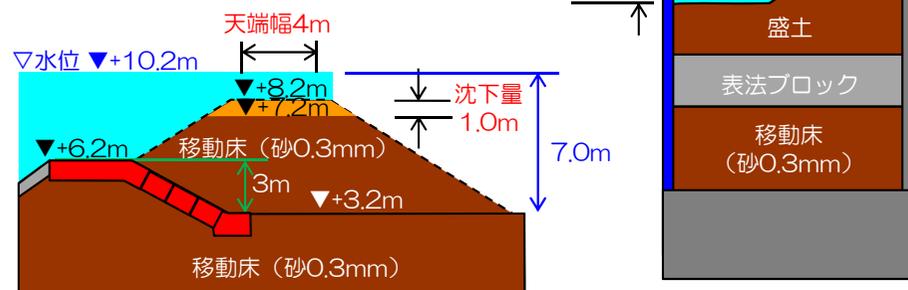
堤防構造：幅10m×沈下量1.0m相当の沈下部※を水路側面部に設置した盛土を②-1形状堤防に設置

※沈下部として設定した幅10mは実験水路の半分程度、沈下量1.0mは不等沈下有り無しとして、洗掘状況の差が確認できると想定して設定した形状

### 【①越流しない形状の盛土】



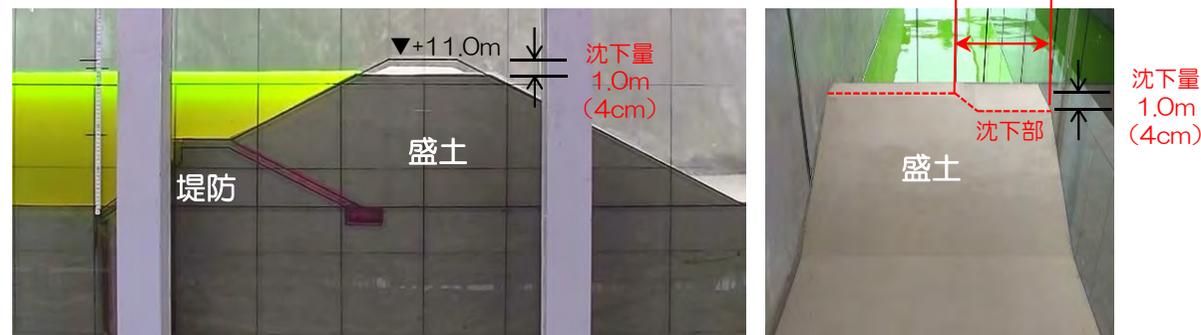
### 【②越流する形状の盛土】



(正面)

不等沈下実験での堤防の基本構造のイメージ

### 【①越流しない形状の盛土】



### 【②越流する形状の盛土】

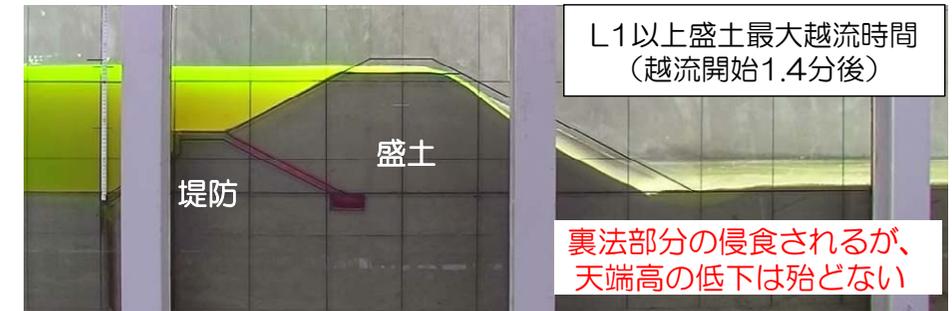


実験模型写真

# 4. 検証実験結果(不等沈下実験)②

- 越流しない形状の盛土は、切欠き部に越流が集中し、その箇所だけ盛土の洗掘が進行したが、最大越流時間約1.4分後において、天端高は殆ど低下しなかった。
  - 越流する形状の盛土は、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達し、裏法被覆工の一部が露出した。
- 「越流しない形状の盛土」では、不等沈下など盛土に内在する不確実性を考慮しても、盛土機能への影響が生じる可能性が低いと考える。
- 「越流する形状の盛土」では、盛土に内在する不確実性を考慮し、粘り強い堤防の基本構造での整備が必要と考える。

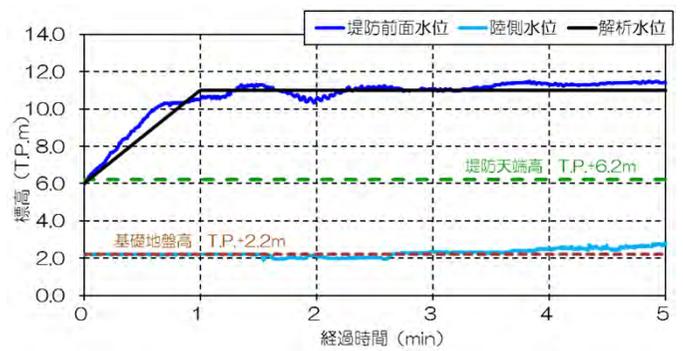
【①越流しない形状の盛土】



最大越流時間時の堤防断面形状



時間ごとの越流状況の変化 (陸側から)

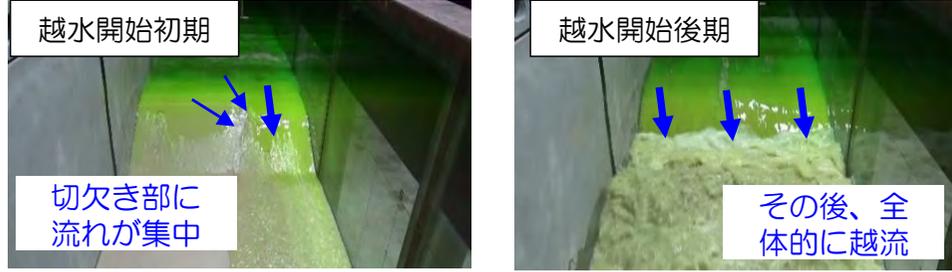


堤防前面水位の経時変化

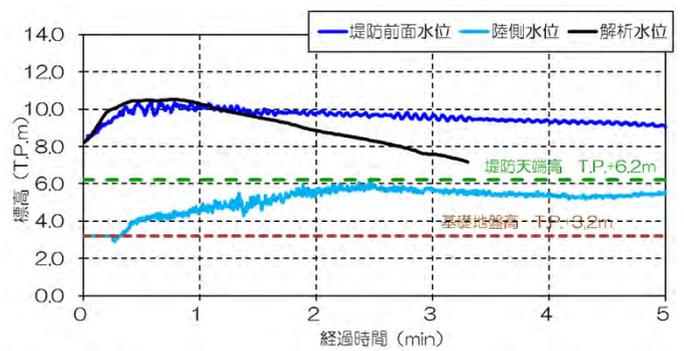
【②越流する形状の盛土】



最大越流時間時の堤防断面形状



時間ごとの越流状況の変化 (陸側から)



堤防前面水位の経時変化

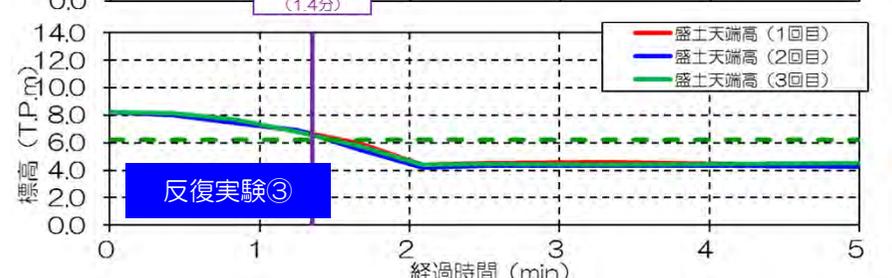
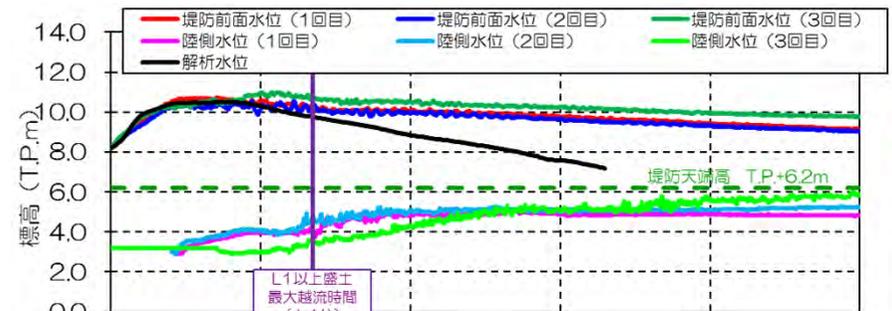
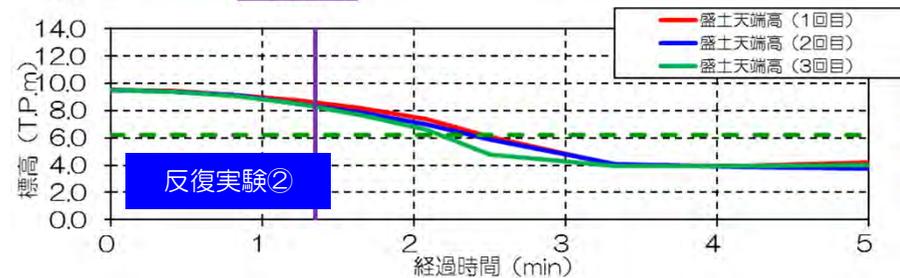
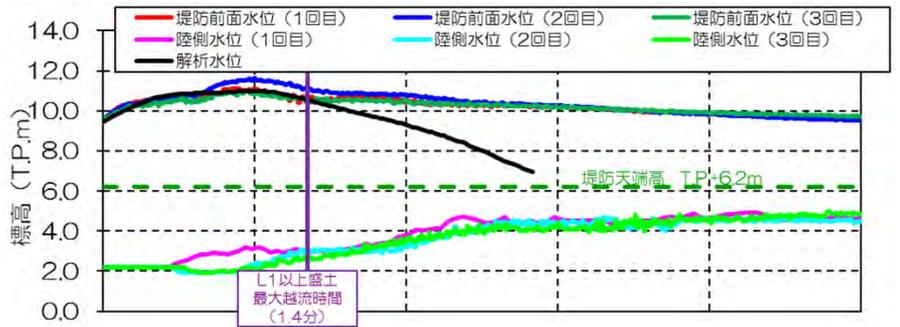
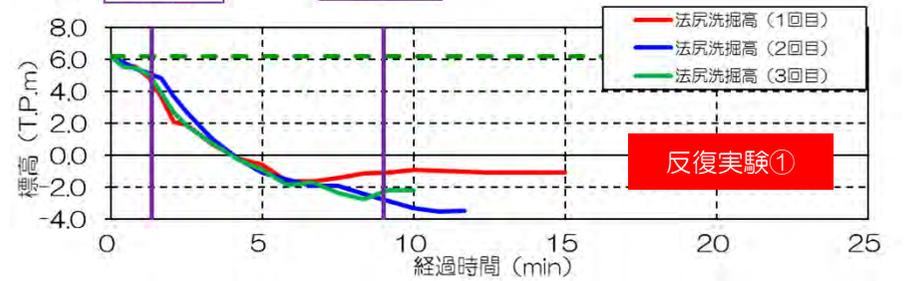
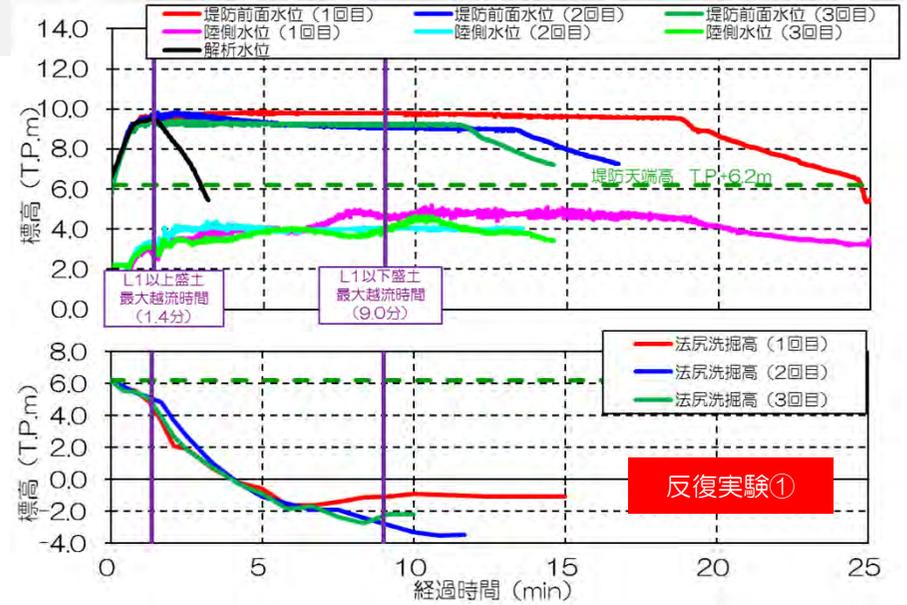
# 5. 反復実験結果(実験結果のバラツキ把握)

## 【模型実験の精度 (バラツキ)】

- 越流による破堤遅延時間のバラツキは、同様の結果となった(反復実験①)。
  - 越流による盛土天端高のバラツキは、0.2~0.3m程度あったが概ね同様の結果となった(反復実験②、③)。
- 実験波形や模型の状況により多少のバラツキは見られるものの、概ね同様の結果となっており、模型実験については一定程度の再現性が確認された。

バラツキの評価一覧

実験ケース	反復実験①	反復実験②	反復実験③
実験条件	榛原工区・(住吉工区・川尻工区)	榛原工区・(住吉工区・川尻工区)	大井川工区・焼津工区
	L1以下盛土 盛土天端幅 4m相当	L1以上盛土 盛土天端幅 4m	L1以上盛土 盛土天端幅 4m
評価項目	破堤基準洗掘深に達するまでの時間	越水開始1.4分後の盛土天端高	越水開始1.4分後の盛土天端高
1回目	3.0~4.5分	T.P.8.6m	T.P.6.7m
2回目	3.0~4.5分	T.P.8.3m	T.P.6.6m
3回目	3.0~4.5分	T.P.8.3m	T.P.6.5m
平均	3.0~4.5分	T.P.8.4m	T.P.6.6m
最小	3.0~4.5分	T.P.8.3m	T.P.6.5m



堤防前面水位、陸側水位、法尻洗掘高、盛土天端高の経時変化

# 6. L1以上盛土を含めた最終形状での評価

- ・国において粘り強い堤防の基本構造を整備することで、目標とする東北モデルと同等の機能（3～5分程度）を確保。
  - ・粘り強い堤防整備と合わせ、市町の考える盛土の整備により、駿河海岸における浸水被害は大きく軽減。
- 駿河海岸においては、国・市町一体となった整備より、東北モデル以上の被害軽減の効果を期待するものである。

検証実験	堤防構造	破堤遅延時間※1	津波浸水シミュレーションによる浸水被害軽減額	事業費	被害軽減額と費用の差分
	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	約76億円注1	約989億円
①-1-3 基本構造		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	約62億円注1 (約64億円)注2 (約20年 +L1以下盛土)注3	約968億円
①-1-4		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	約76億円注1 (約78億円)注2 (約26年 +L1以下盛土)注3	約1,184億円
①-2-1 榛原工区 (住吉工区) (川尻工区)		—	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 変化させた条件での解析)	62億円注1 (約73億円)注2 (約20年 +L1以上盛土)注3	約2,500億円 以上

②-1 大井川工区 焼津工区		【L1以上盛土】 +天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工
③ 住吉工区 川尻工区		【L2盛土】 +天端保護工

【事業費及び事業期間の算出方法】  
 注1. 事業費欄の最上段は、海岸保全施設として国が実施する粘り強い海岸堤防の事業費として、H27事業評価監視委員会で提示した約62億円を基本として、構造別の事業費を算出したもの。なお、住吉・川尻工区においては天端保護工のみの施工とするか確定していないため、事業費は基本構造としている。また、L1以下盛土については、他事業で発生する土砂を有効活用するとして、海岸保全施設としての事業費には含めていない。  
 注2. 事業費欄における上段（ ）は、盛土（L1以下盛土・L1以上盛土）を含む事業費の試算値。なお、盛土費用の試算にあたっては、盛土材に関する想定費用で試算しており、市町による散策路、公園利用、樹木等に要する費用は見込んでいない。  
 ・L1以下盛土：発生土（仮置き無し）+整地・法面整形（締固め無し）【約2万円/m】  
 ・L1以上盛土（盛土材）：発生土（仮置き無し）+整地・法面整形（締固め有り）【約3万円/m】  
 ・L1以上盛土（植樹部分）：購入土+整地・法面整形（締固め無し）【約7万円/m】  
 注3. 事業費欄における下段（ ）は粘り強い堤防整備に要する事業期間の試算値。なお、事業期間の試算にあたっては、H27事業評価監視委員会で提示した約62億円（盛土費用は含まない）を事業期間20年間（H46まで（予定））で除し、約3億円/年として試算。盛土整備に要する期間については、他事業で発生する土砂の活用、また、L1以上盛土は市町が実施するため試算が困難であり「+」として記載。なお、実際の整備にあたっては、速やかな効果発現に向け事業進捗に努めたい。  
 注4. 市町の考える盛土形状については確定したのではなく、市町で想定する盛土高から国において盛土形状を想定し、模型実験による検討を行ったものである。このため、今後、想定した盛土形状と大きく異なる場合には、必要に応じ、本委員会で検討する。

※1：堤防破堤までの時間は、最も危険側の評価となる堤防構造の一部の損壊が生じた場合とする  
 ※2：L1以上盛土設置時の水位

～洗掘シミュレーションによる検証～

# 1. 模型実験の再現計算①

【再現実験ケース本実験①-2-1】

L1以上盛土（締固め無し：B=4m）：榛原・（住吉・川尻工区）

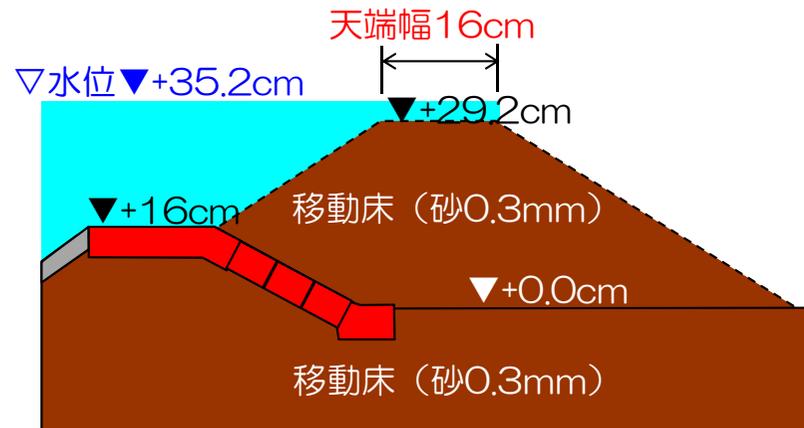
【粘り強い堤防+L1以上盛土の模型実験について再現性を確認】

- L1以上盛土最大越流時間16.8秒後（現地換算1.4分後）の盛土天端高の実験値24.4~25.2cmに対し計算値24.1cmと概ね再現できた。
- 盛土天端が堤防天端高まで侵食される時間は、実験値約30秒に対し計算値約35秒と概ね再現できた。
- 堤防前面水位は、越流初期段階（0秒～約10秒）は概ね一致しているものの、以降は計算値が若干低くなっている。

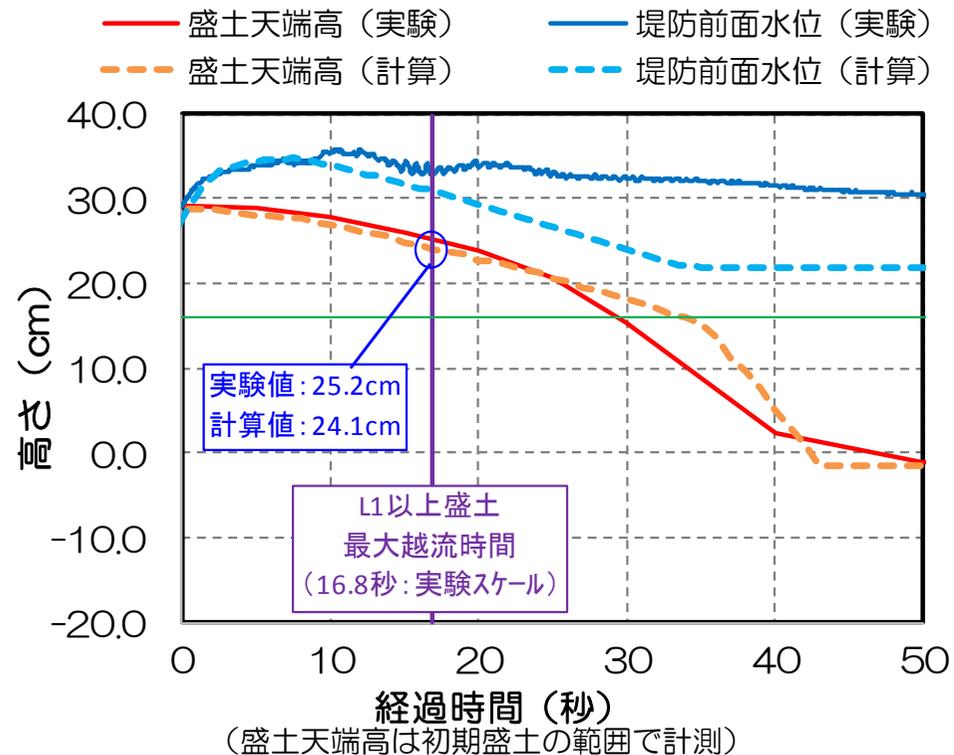
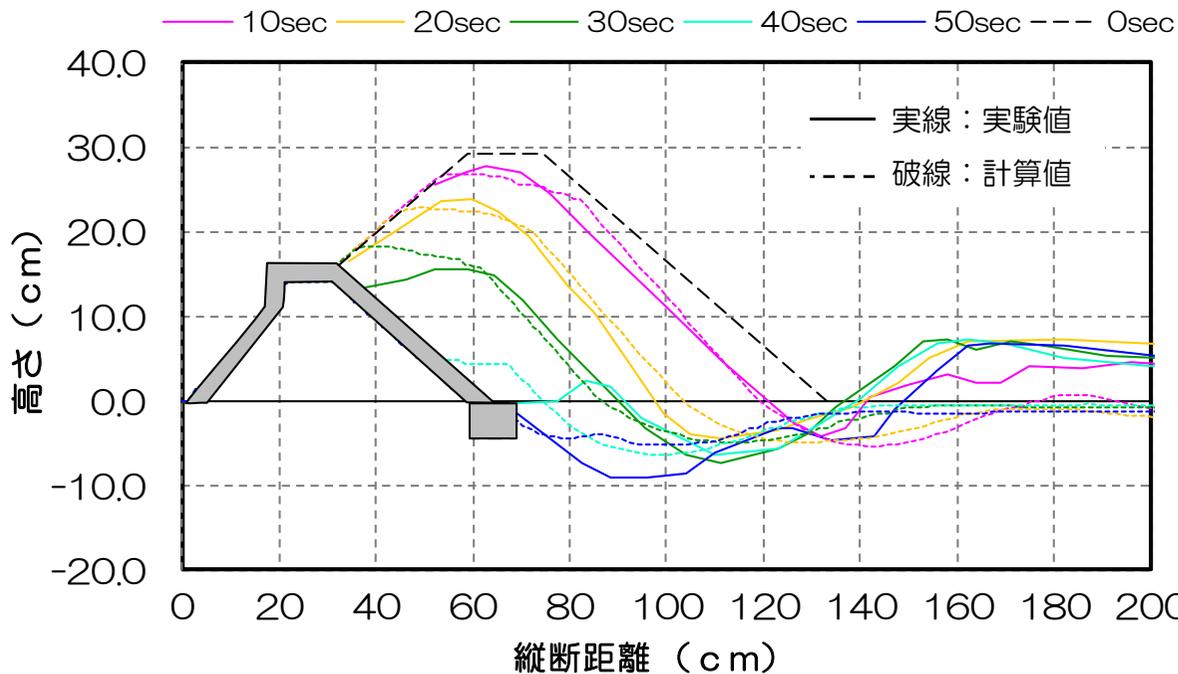
▶ 盛土の天端及び裏法の侵食形状・侵食速度について概ね再現できた。

【本実験①-2-1】

【堤防+L1以上盛土】



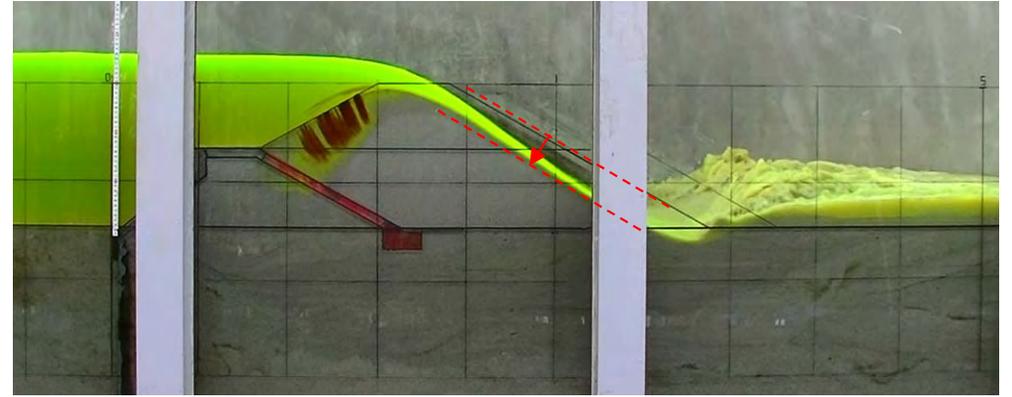
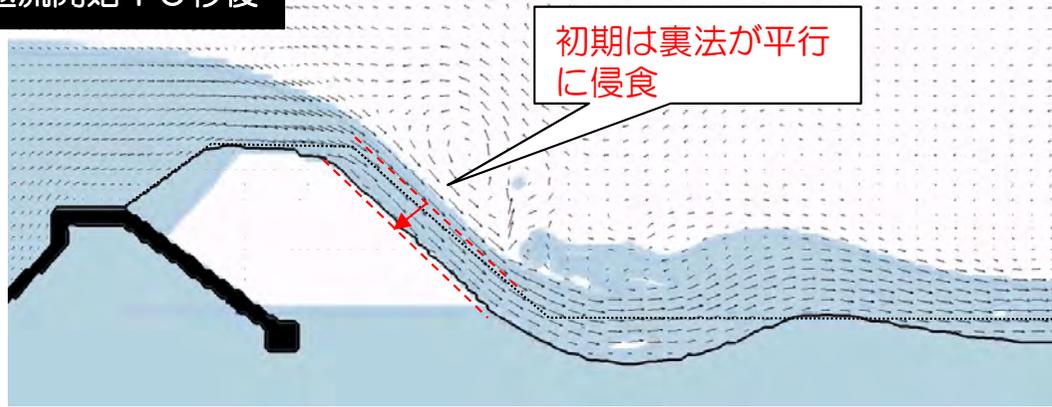
※表記は実験スケール値



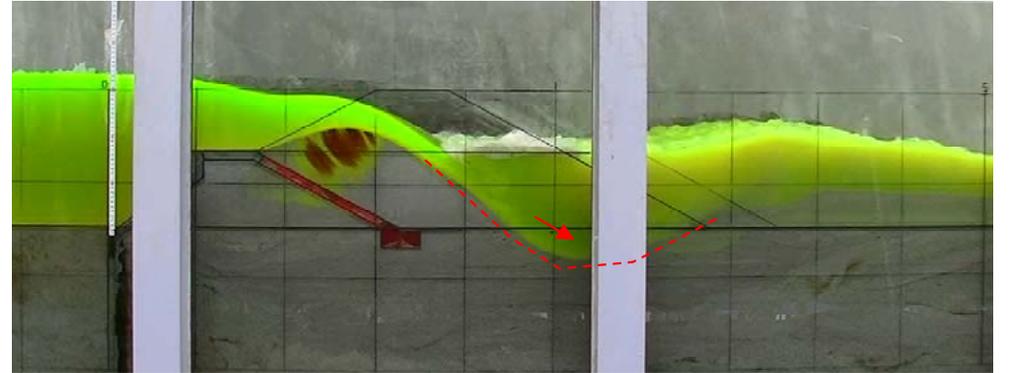
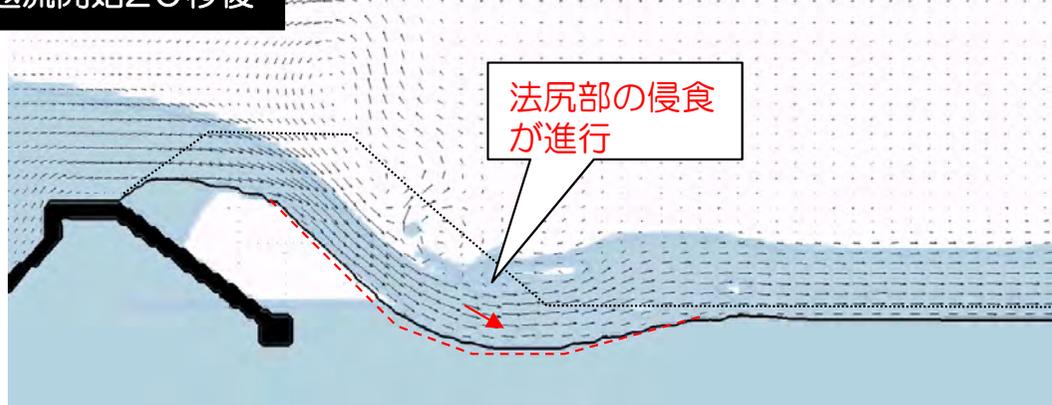
（盛土天端高は初期盛土の範囲で計測）

## 1. 模型実験の再現計算②

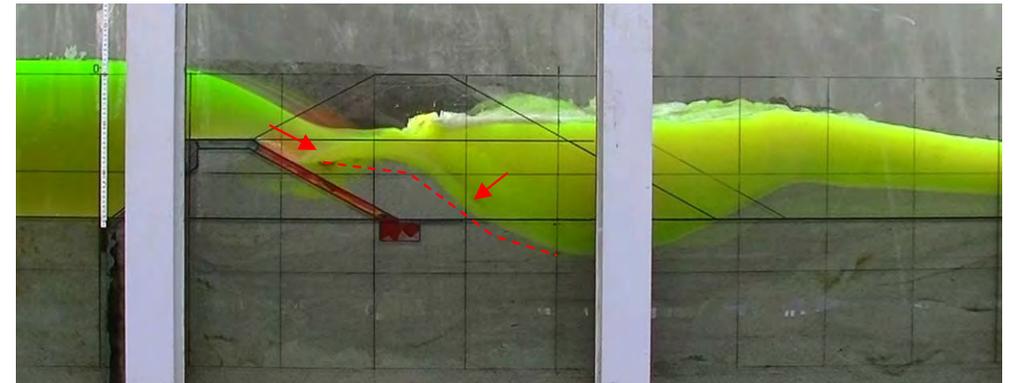
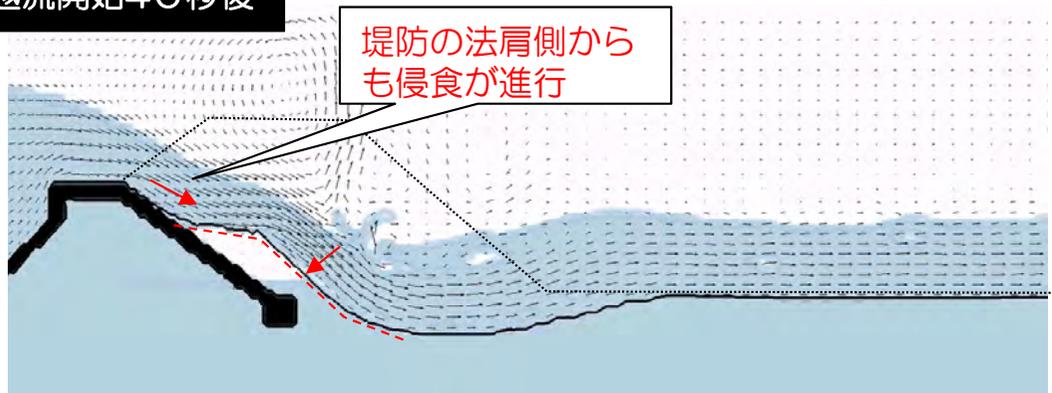
越流開始10秒後



越流開始20秒後

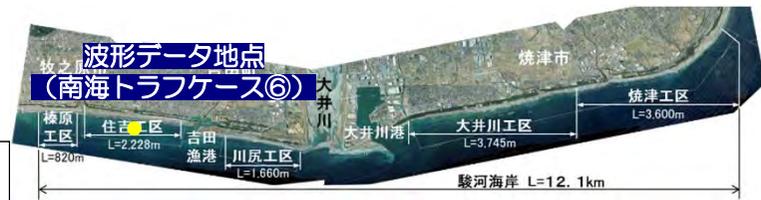


越流開始40秒後

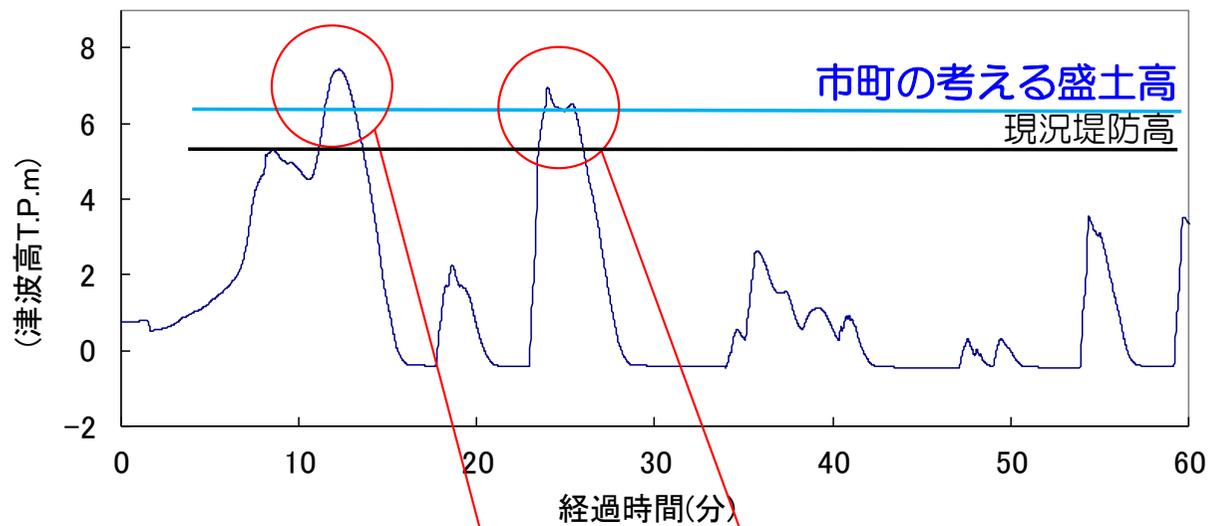


# 2. 現地スケール・平面二次元計算による津波波形での検証①

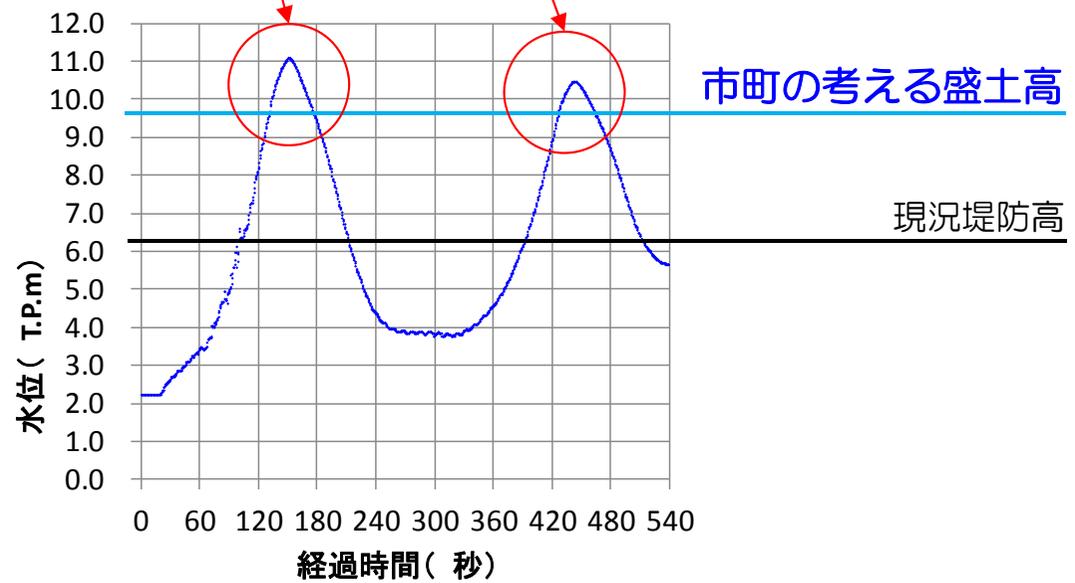
## (1) 現地スケールの計算条件



平面二次元計算による津波波形



洗掘シミュレーションの入力波形



### ①入力波形

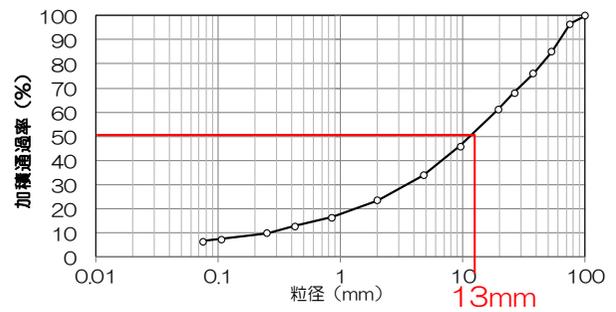
- ①平面二次元計算による津波波形（堤防前面）で検証
- ②市町の考える盛土高を超える越流継続時間が概ね80秒となるように調整
- ③最大水位がT.P.+11.0mとなるように調整
- ④計算時間短縮のため、現況堤防高以上の波形を再現。

### ②堤防・盛土形状

- 堤防形状 基本構造
- 盛土形状 榛原・（住吉・川尻工区）：盛土天端幅4m

### ③盛土材の代表粒径

現地材料の粒度試験結果より $d_{50}=13\text{mm}$ とする



## 2. 現地スケール・平面二次元計算による津波波形での検証②

### (2) 盛土天端高さの時間変化

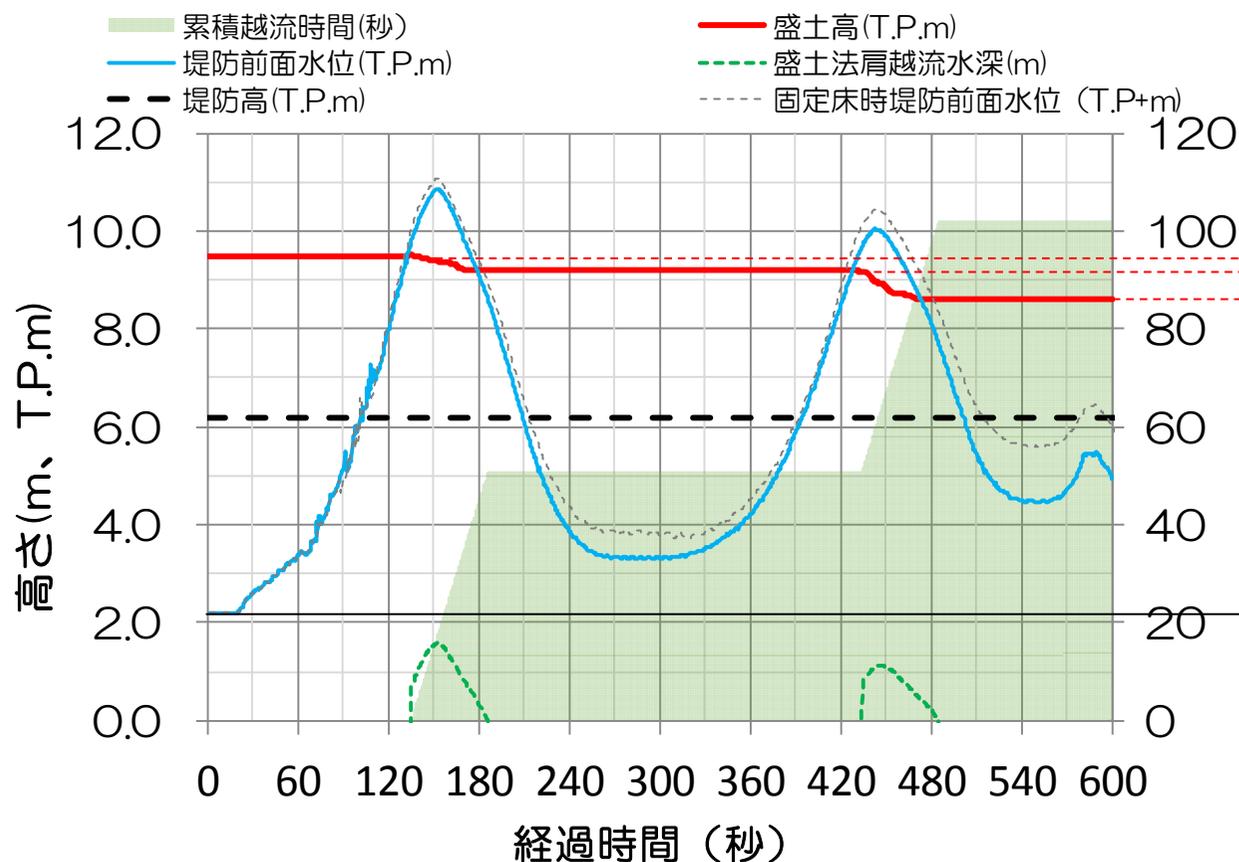
#### 【検証結果】

- 津波の越流時間は盛土天端高が下がったことにより、平面二次元計算による最大越流時間を上回る結果となった。

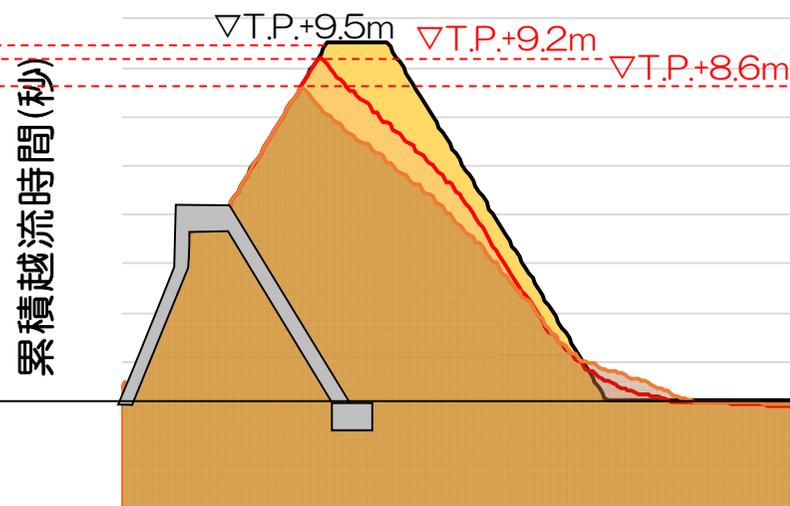
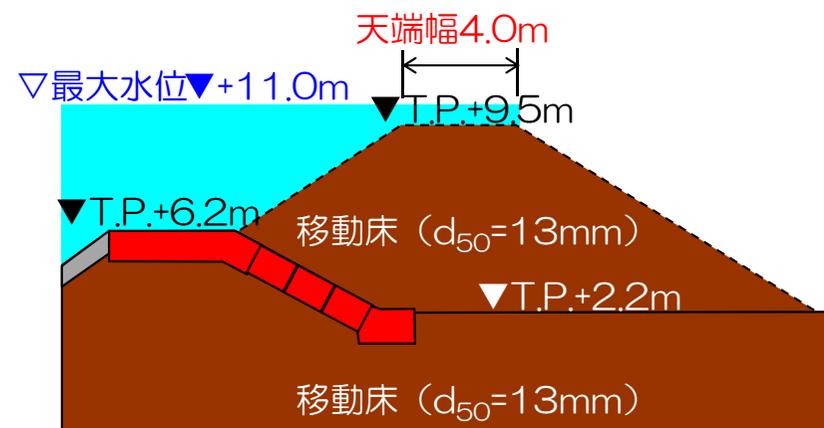
第1波：約50秒 + 第2波：約50秒 = 約100秒（約1.7分）

- 津波越流後の盛土天端高は初期T.P.+9.5mに対して、第2波到達後もT.P.+8.6mの高さが確保されている結果となった。

第1波：T.P.+9.2m 第2波：T.P.+8.6m



榛原・(住吉・川尻工区)：盛土天端幅4m



(参考)

～洗掘シミュレーションの流速を用いた  
植生により期待される侵食抑制効果の試算～

# 【参考】 植生により期待される侵食抑制効果の試算

## 【植生による侵食速度低減の可能性】

・ 海岸砂丘上の樹林などの植生には以下のような効果が期待できる。

### ①地盤の侵食抑制効果

➤ 盛土高を維持できる効果

### ②海岸林による津波エネルギーの減衰機能

### ③漂流物の捕捉機能

➤ 洗掘シミュレーションによる盛土周辺の流速を用いて、①侵食抑制効果について試算を行った。

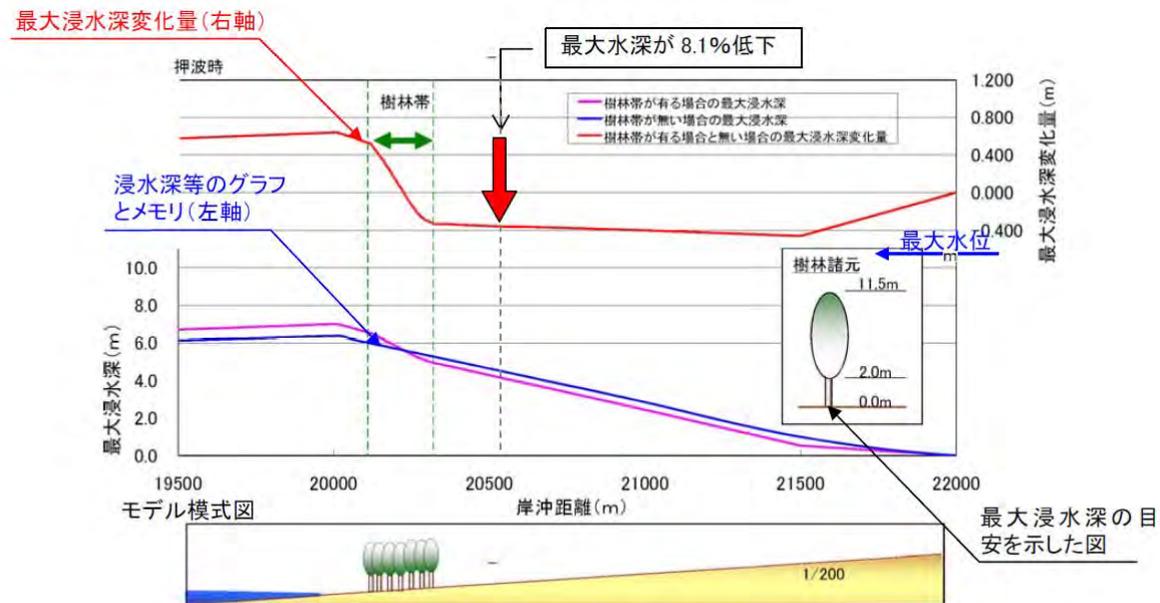
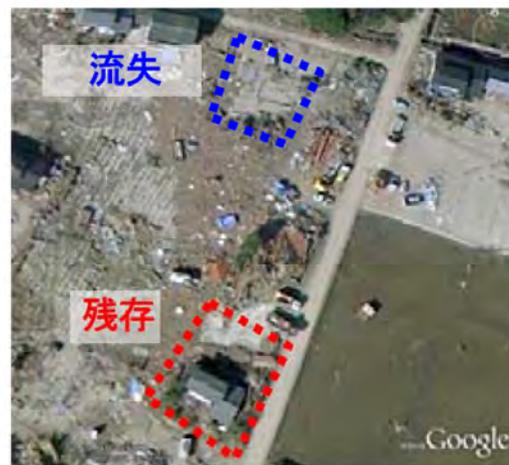


図 I-16 検討 3 (沿岸到達高 7m) での最大浸水深と変化量

図-1 浸水深の低減効果※



被災前 (平成 21 年 3 月撮影)



被災後 (平成 23 年 4 月撮影)

図-2 津波エネルギーの低減効果※



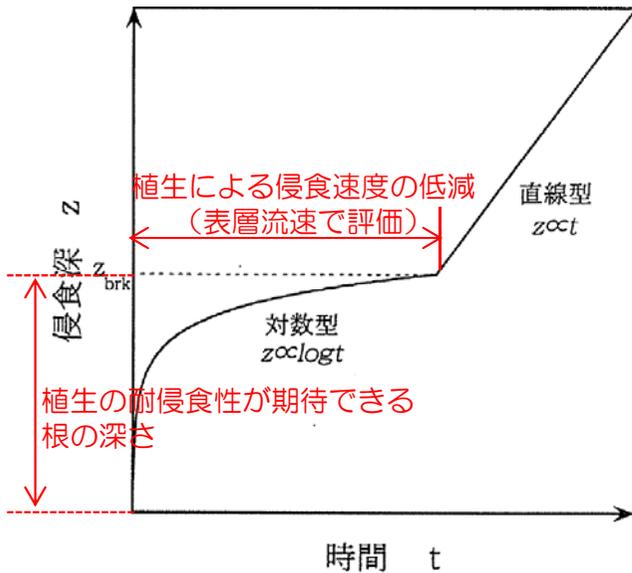
図-3 漂流物の捕捉※

※ 出典：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 (H24.3 国土交通省)

## 【試算】(1) 盛土上に【芝】を想定した場合

### 【侵食抑制効果の試算】

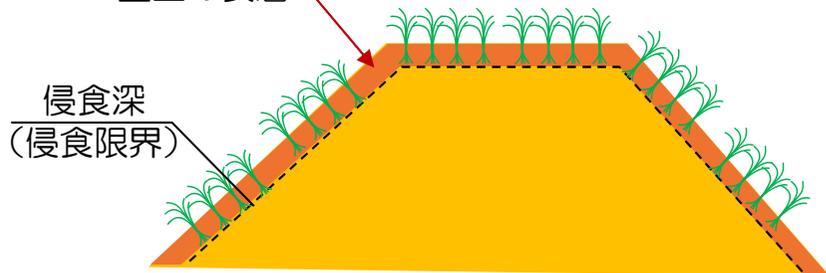
- 盛土上に植生がある場合には侵食抑制効果が期待できるとされている。
- 土木研究所資料（H9.1）において侵食速度を予測する式が示されており、洗掘シミュレーションによる盛土越流時の流速を用いて、植生による侵食低減効果を試算した。



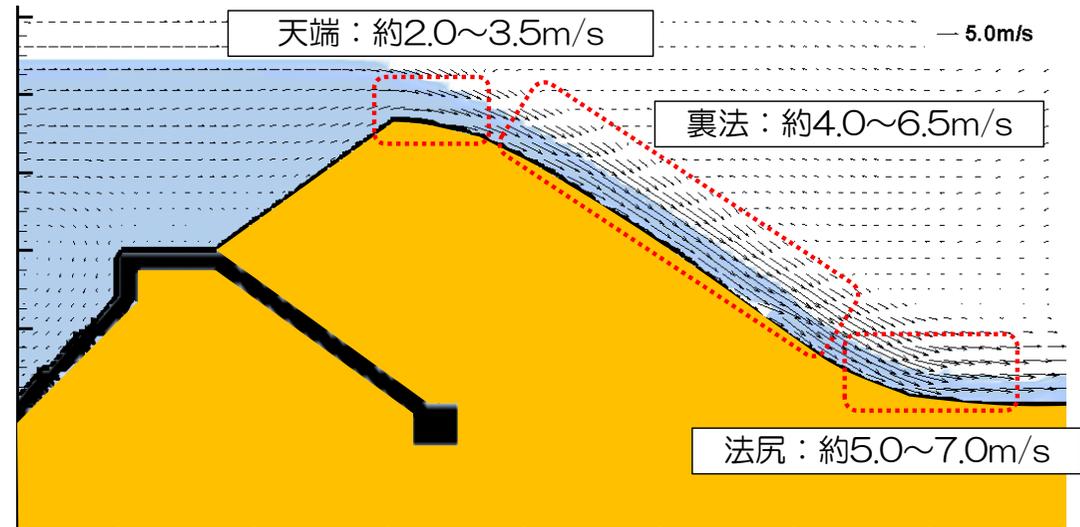
植生がある場合の侵食深の経時変化

(土木研究所資料に加筆)

耐侵食性が期待できる  
盛土の表層



盛土上の芝のイメージ



盛土表層の流速分布図 (洗掘シミュレーションより)

$$\text{侵食深 } Z = A \cdot \log t + B$$

$$A = \alpha (u_* + \beta)$$

$Z$ : 侵食深 (cm)、 $t$ : 時間 (分)、  
 $\alpha$ : 平均根毛量によって変化する変数、  
 $u_*$ : 摩擦速度 (m/s)、 $\beta$ : 限界摩擦速度

### 【検証に用いた定数条件】

$\alpha$ : 9.0 土研資料より

$B, \beta$ : 既往検討より0とする

Manningの粗度係数: 0.05 水理公式集より

侵食深 (侵食限界): 2cmと想定 土研資料より

(条件設定の詳細はP57~P61を参照)

## 【試算】(1) 盛土上に【芝】を想定した場合

【榛原・(住吉・川尻工区)】

➤ 現地スケールの洗掘シミュレーション結果より、盛土越流時の流速は最小で2m/s（天端）、最大で7m/s（法尻）となっている。

➤ 天端、裏法、法尻で発生している下記の流速を設定し、侵食抑制効果を試算した。

天端：3m/s    裏法：5m/s    法尻：7m/s

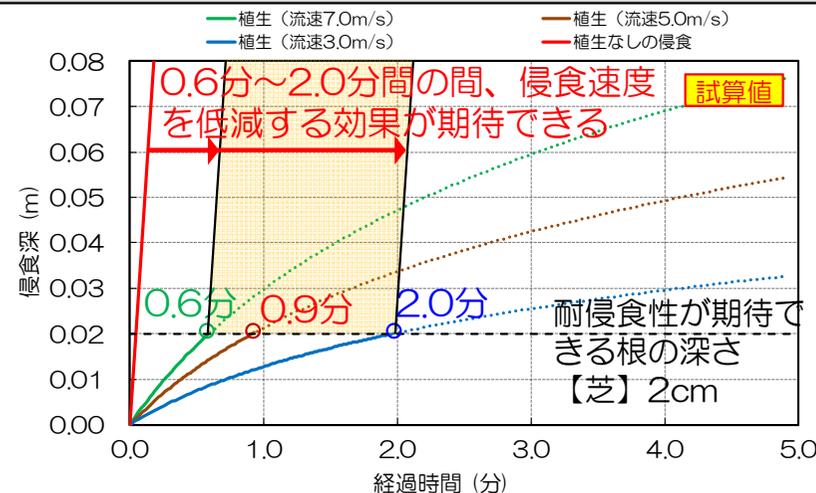
➤ 芝による耐侵食性が期待できる根の深さを2cmと仮定した場合、植生により0.6～2.0分間、侵食速度を低減する効果が試算された。

➤ 流速が5m/sの場合（0.9分の侵食抑制効果）で試算すると、実波形で第2波通過後には、植生を考慮しない場合と比較して約0.6mの侵食深の低減効果が試算された。

### 【侵食抑制効果（芝）の試算について】

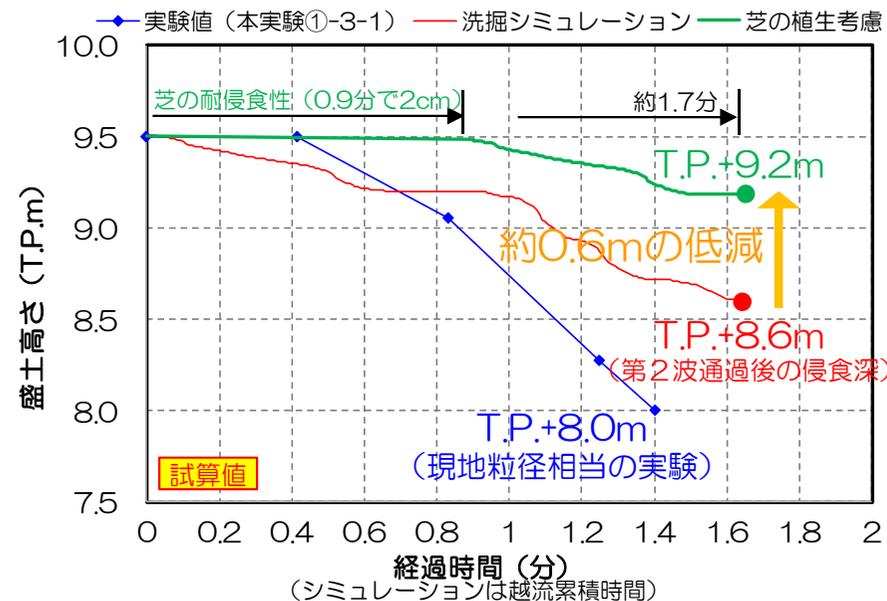
- 既往資料より定数等を設定して試算したものであり、現地状況により結果が異なることがある。
- 定数は河川における芝の実験に基づくものであり、今回対象とする沿岸部の植生状況を反映したものではない。
- 洗掘シミュレーション結果による流速は、植生の影響を考慮していないため、植生がある場合の流速は異なる可能性がある。

### 耐侵食性を考慮した侵食深の時間変化



### 盛土の侵食深の試算（5m/sの条件）

実波形で第2波通過後の盛土侵食深は、芝がある場合には約0.6mの低減が期待できる。



## 【試算】(1) 盛土上に【芝】を想定した場合

【大井川・焼津工区】

➤ 現地スケールの洗掘シミュレーション結果より、盛土越流時の流速は最小で2m/s（天端）、最大で7m/s（法尻）となっている。

➤ 天端、裏法、法尻で発生している下記の流速を設定し、侵食抑制効果を試算した。

天端：3m/s    裏法：5m/s    法尻：7m/s

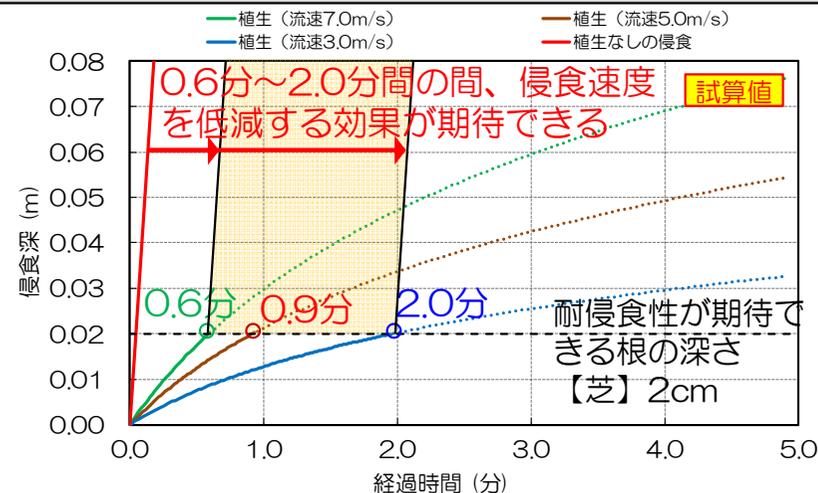
➤ 芝による耐侵食性が期待できる根の深さを2cmとした場合、植生により0.6～2.0分間の間、侵食速度を低減する効果が試算された。

➤ 流速が5m/sの場合（0.9分の侵食抑制効果）で試算すると、実波形で第2波通過後には、植生を考慮しない場合と比較して約0.6mの侵食深の低減効果が試算された。

### 【侵食抑制効果（芝）の試算について】

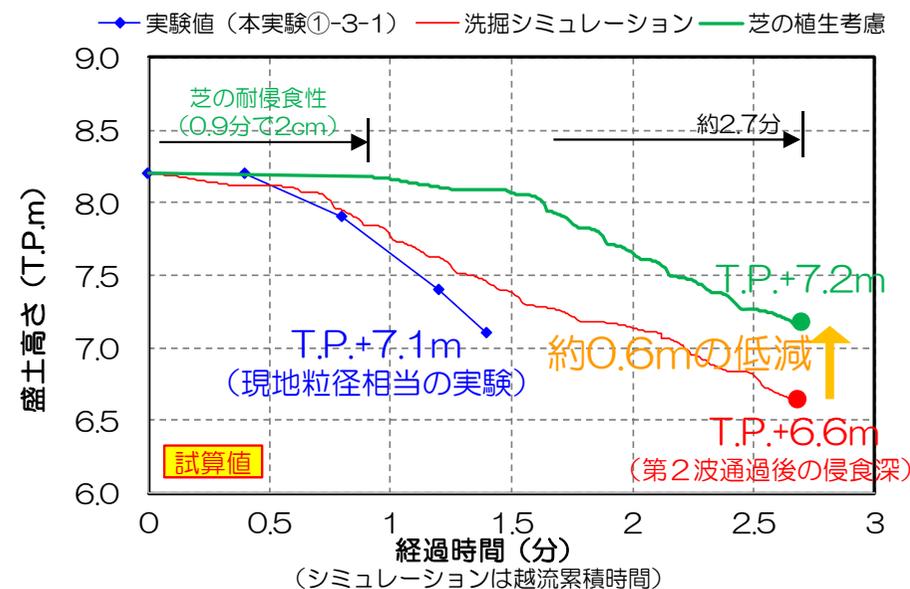
- 既往資料より定数等を設定して試算したものであり、現地状況により結果が異なることがある。
- 定数は河川における芝の実験に基づくものであり、今回対象とする沿岸部の植生状況を反映したものではない。
- 洗掘シミュレーション結果による流速は、植生の影響を考慮していないため、植生がある場合の流速は異なる可能性がある。

### 耐侵食性を考慮した侵食深の時間変化



### 盛土の侵食深の試算（5m/sの条件）

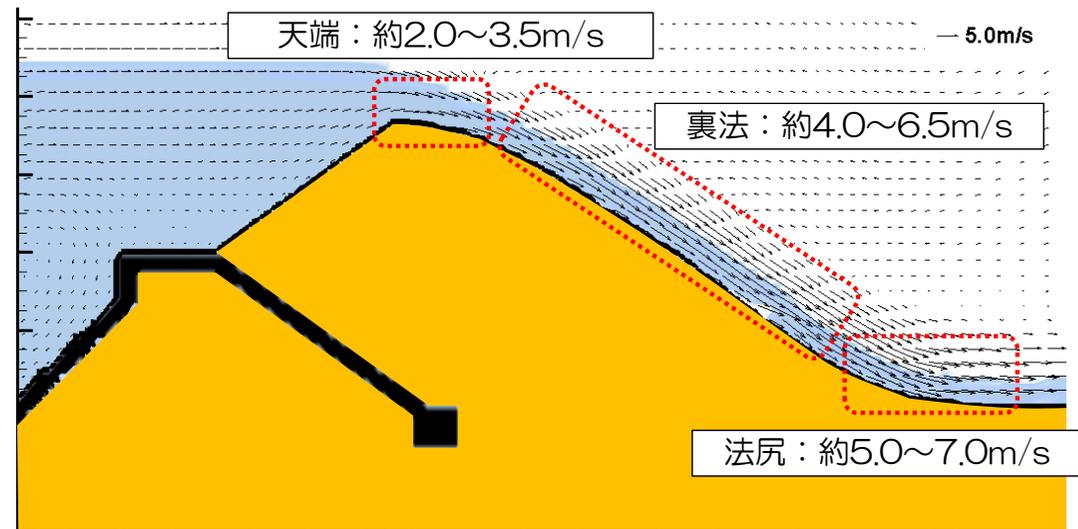
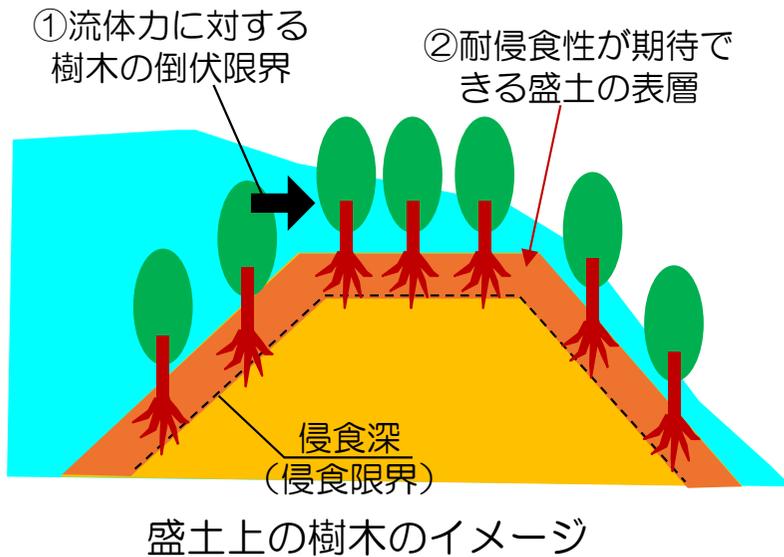
実波形で第2波通過後の盛土侵食深は、芝がある場合には約0.6mの低減が期待できる。



## 【試算】(2) 盛土上に【樹木】を想定した場合

### 【侵食抑制効果の検証】

- ・ 芝と同様に、樹木の根毛による侵食抑制効果を検証した。



盛土表層の流速分布図 (洗掘シミュレーションより)

$$\text{侵食深 } Z = A \cdot \log t + B$$

$$A = \alpha (u_* + \beta)$$

$Z$ : 侵食深 (cm)、 $t$ : 時間 (分)、

$\alpha$ : 平均根毛量によって変化する変数、

$u_*$ : 摩擦速度 (m/s)、 $\beta$ : 限界摩擦速度

### 【検証に用いた定数条件】

$\alpha$ : 36.0 原野らより

$B, \beta$ : 既往検討より0とする

Manningの粗度係数: 0.08 水理公式集より

侵食深 (侵食限界): 10cmと想定 原野らより

(条件設定の詳細はP57~P61を参照)

【試算】 (2) 盛土上に【樹木】を想定した場合

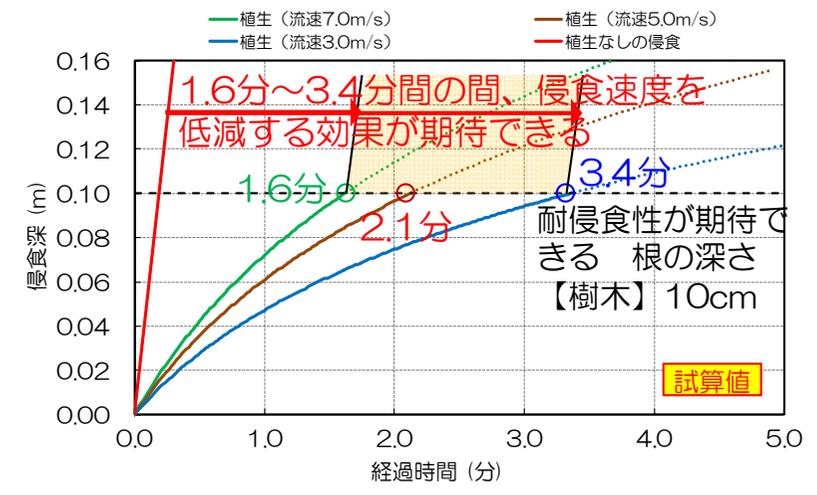
【榛原・(住吉・川尻工区)】

➤ 芝と同様に天端、裏法、法尻で発生している下記の流速を設定し、侵食抑制効果を試算した。

天端：3m/s      裏法：5m/s      法尻：7m/s

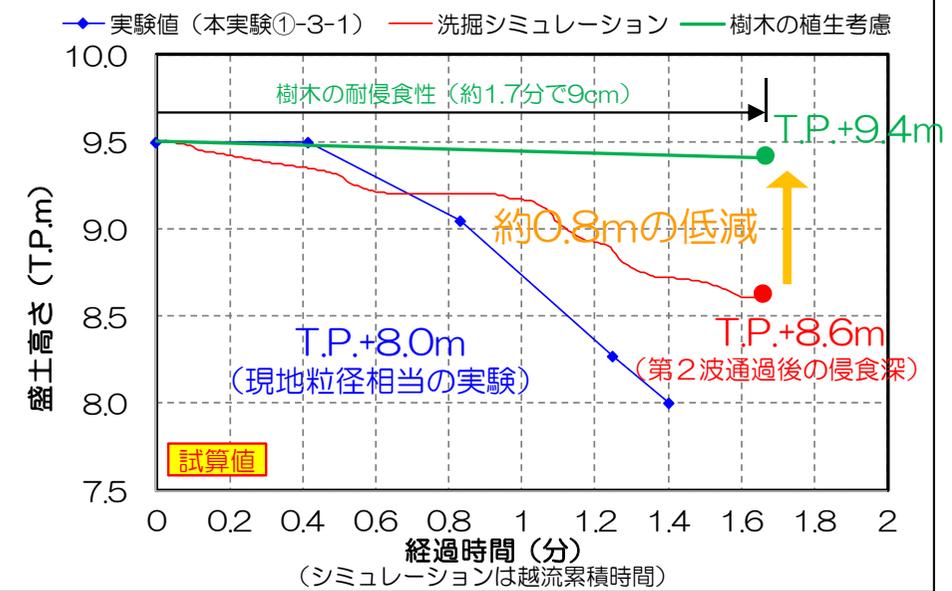
- 樹木による耐侵食性が期待できる根の深さを10cmとした場合、植生により1.6～3.4分間の間、侵食速度を低減する効果が試算された。
- 流速が5m/s (2.1分の侵食抑制効果)とした場合、植生を考慮しない場合と比較して約0.8mの侵食深の低減効果が試算され、10cm未満の侵食深となる。

## 耐侵食性を考慮した侵食深の時間変化



## 盛土の侵食深の試算 (5m/sの条件)

実波形で第2波通過後の盛土侵食深は、樹木がある場合には約0.8mの低減が期待できる。



【侵食抑制効果 (樹木) の試算について】

- 既往資料より定数等を設定して試算したものであり、現地状況により結果が異なることがある。
- 定数は他地域の実験結果に基づくものであり、今回対象とする沿岸部の植生状況を反映したものではない。
- 洗掘シミュレーション結果による流速は、植生の影響を考慮していないため、植生がある場合の流速は異なる可能性がある。

## 【試算】(2) 盛土上に【樹木】を想定した場合

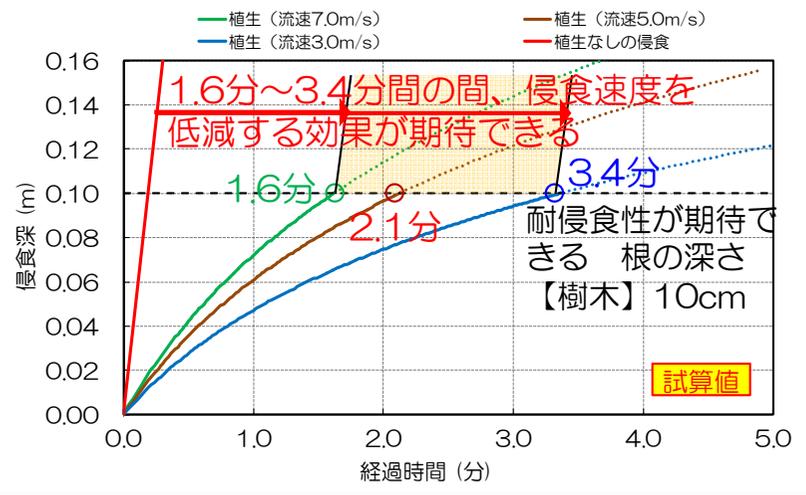
## 【大井川・焼津工区】

▶ 芝と同様に天端、裏法、法尻で発生している下記の流速を設定し、侵食抑制効果を試算した。

天端：3m/s      裏法：5m/s      法尻：7m/s

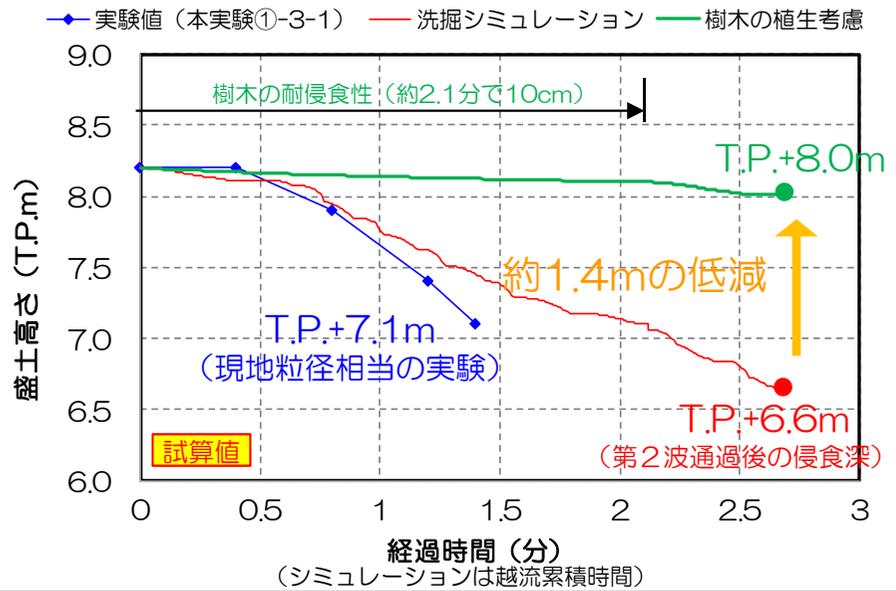
- ▶ 樹木による耐侵食性が期待できる根の深さを10cmとした場合、植生により1.6～3.4分間の間、侵食速度を低減する効果が試算された。
- ▶ 流速が5m/s (2.1分の侵食抑制効果) とした場合、植生を考慮しない場合と比較して約1.4mの侵食深の低減効果が試算された。

耐侵食性を考慮した侵食深の時間変化



盛土の侵食深の試算 (5m/sの条件)

実波形で第2波通過後の盛土侵食深は、樹木がある場合には約1.4mの低減が期待できる。



### 【侵食抑制効果(樹木)の試算について】

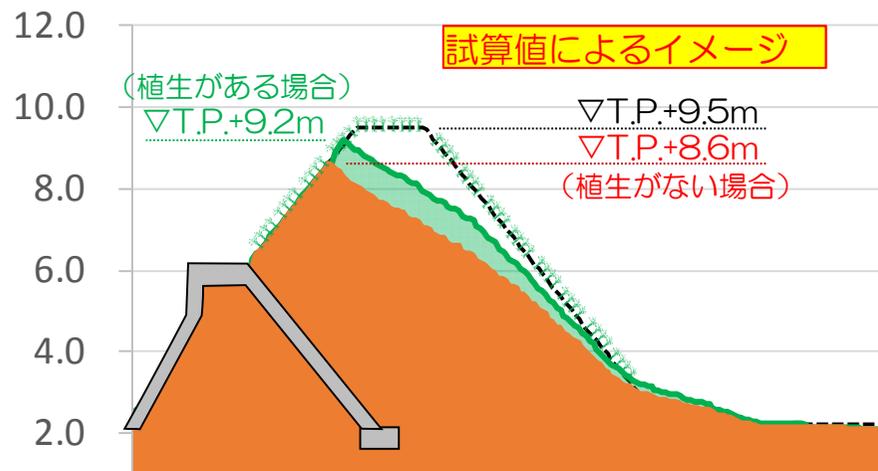
- 既往資料より定数等を設定して試算したものであり、現地状況により結果が異なることがある。
- 定数は他地域の実験結果に基づくものであり、今回対象とする沿岸部の植生状況を反映したものではない。
- 洗掘シミュレーション結果による流速は、植生の影響を考慮していないため、植生がある場合の流速は異なる可能性がある。

【試算】 (第2波通過後の盛土形状イメージ (流速値5m/s とした場合))

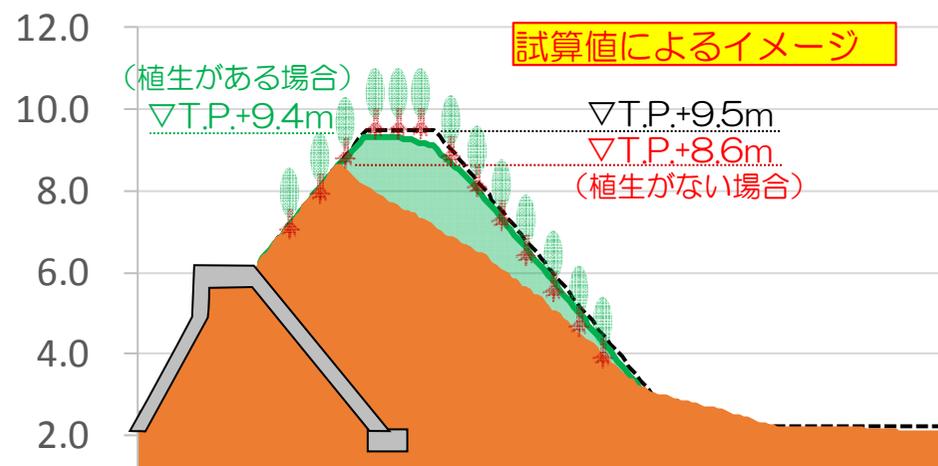
➤現時点で定量的な評価は困難であるため、今回は参考として試算値を掲載しているが、一定の効果は期待される。

【試算】 榛原・(住吉・川尻工区)

盛土上に【芝】を想定

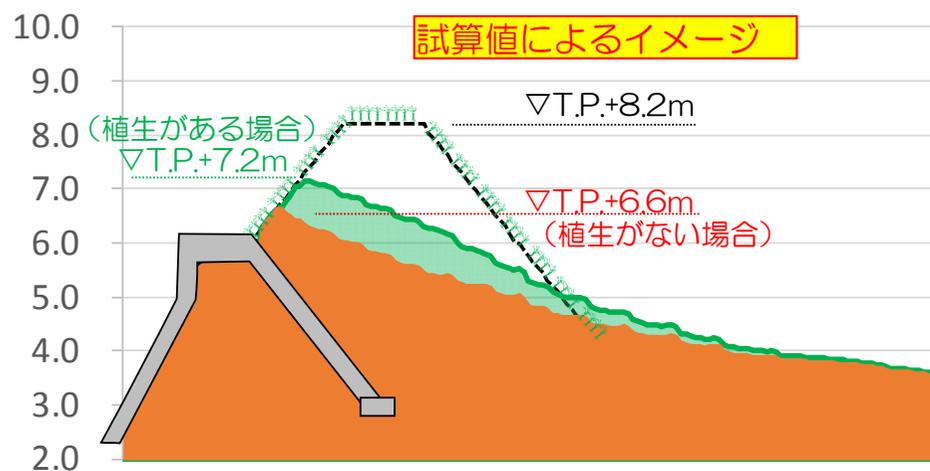


盛土上に【樹木】を想定

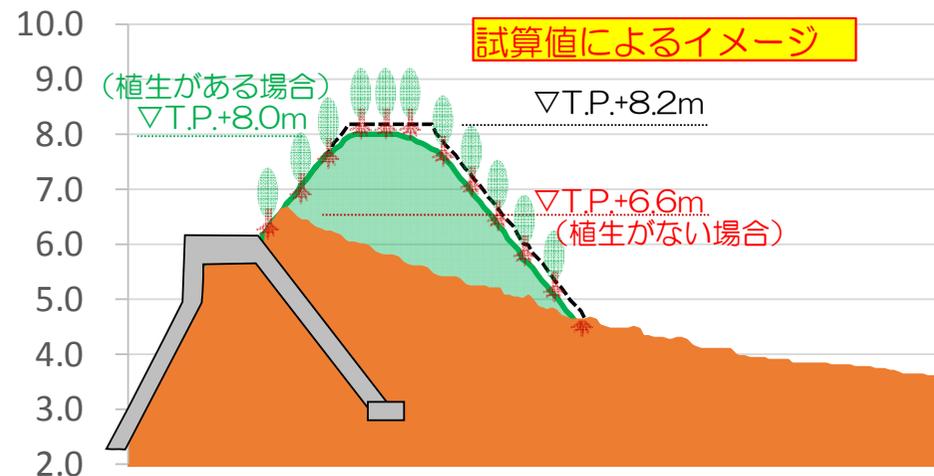


【試算】 大井川・焼津工区

盛土上に【芝】を想定



盛土上に【樹木】を想定



# 【参考】 樹木の倒伏限界の試算

## 【参考】 樹木の倒伏限界

### 【倒伏限界の検証】

- 津波の流体力により樹木が倒伏すると侵食抑制効果や浸水深及び津波エネルギーの低減効果が得られなくなる。
- 平成26年度に駿河海岸において、クロマツの引き倒し試験を実施しており、洗掘シミュレーションの流速値を用いて樹木の倒伏限界を検証した。

- 天端、裏法、法尻で発生している下記の流速を設定した。

天端：3m/s    裏法：5m/s    法尻：7m/s

- 引き倒し試験結果に対し、市町盛土の形状で発生する流体力は小さな値となっており、ほとんどの樹木が残存することが期待できる。

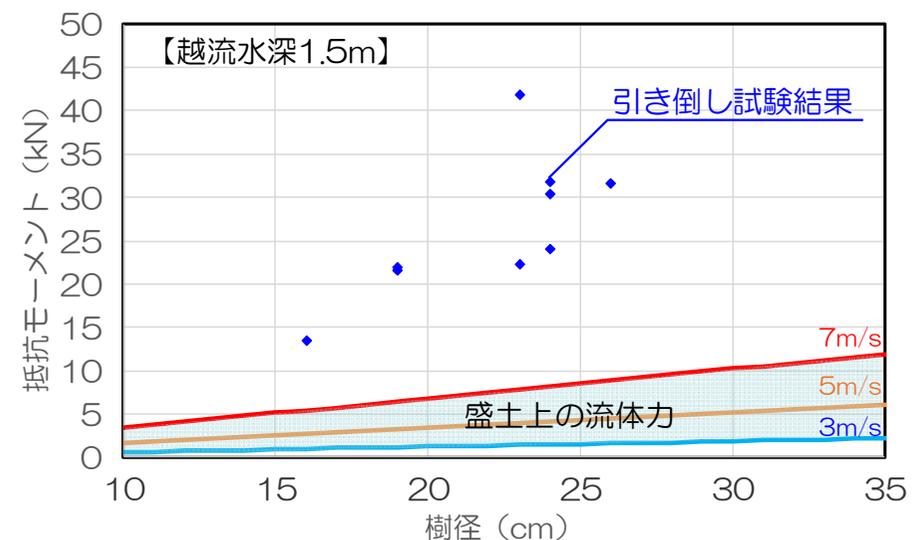
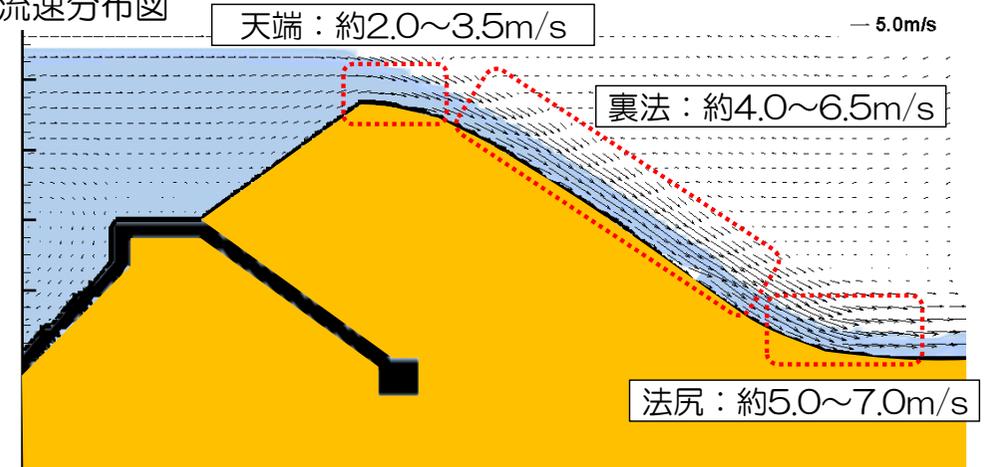


図-1 樹木の引き倒し試験  
(平成26年度駿河海岸焼津工区養浜工事で実施)

流体力モーメント  $M = 1/2 \rho C_D D_m h u^2 L$   
 $\rho$  : 水の密度、 $C_D$  : 抗力係数、 $D_m$  : 胸高直径、  
 $h$  : 水深、 $u$  : 流速値、 $L$  : モーメント作用点

## 市町の考えるL1以上盛土

### ◆ 流速分布図



～L1以上盛土を含めた最終的な形状～  
とりまとめ（案）

【これまでの模型実験及び洗掘シミュレーションによって得られた結果】

## ■模型実験

- ◇海岸保全施設として国が実施する粘り強い堤防の基本構造について、L1以下盛土を含む模型実験により、「天端保護工+裏法被覆工+裏法尻部保護工」によって、目標とする東北モデルと同等の機能(3~4.5分程度)を有することが確認された。
- ◇市町の考える盛土のうちL2津波が「越流する形状の盛土」について、盛土天端高の経時変化を確認した模型実験により、L1以上盛土によって最大越流時間1.4分後でも現況堤防高以上の盛土高を確保し、駿河海岸における浸水被害が大きく軽減される可能性が高いことが確認された。
- ◇市町の考える盛土のうちL2津波が「越流しない形状の盛土」について、「引き波」を想定した堤防及び盛土機能を確認した模型実験により、「堤防の損壊及び盛土機能への影響が生じる可能性は低い」ことが確認された。
- ◇盛土機能を検証する不等沈下実験のうち「越流する形状の盛土」については、「切欠き部からの洗掘が先行」し、最大越流時間1.4分後において裏法被覆工の一部が露出することが確認された。
- ◇盛土機能を検証する不等沈下実験のうち「越流しない形状の盛土」については、「切欠き部から越流」し、最大越流時間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いことが確認された。

## ■洗掘シミュレーション

- ◇盛土の天端及び裏法の侵食形状・侵食速度について、「概ね再現性」が確認された。
- ◇現地スケール・平面二次元計算による津波波形による洗掘シミュレーションにおいて、「第2波到達後も現況堤防高以上の盛土高を確保」していることが確認された。
- ◇植生による侵食の抑制効果については、「現時点で定量的な評価は困難」であるため、今回は参考として試算値を掲載しているが、「一定の効果は期待」されるところ。

【駿河海岸における粘り強い海岸堤防の整備の考え方】

- ◇市町の考える盛土形状が「越流する形状の盛土」の場合の粘り強い海岸堤防の構造については、模型実験でL2津波による最大越流時間1.4分後でも現況堤防高以上の盛土高を確保している可能性が高いことが確認された。  
しかし、本委員会では越流に伴う洗掘現象を評価したものであるが、このような模型実験の場合、『洗掘現象を扱う実験の相似則が確立していないこと』など不確実性が内在していることから、基本構造（天端保護工＋裏法被覆工＋裏法尻部保護工）での整備として事業を進める。
- ◇市町の考える盛土形状が「越流しない形状の盛土」区間での粘り強い海岸堤防の構造については、堤防の損壊、また、盛土機能への影響が生じる可能性は低いことが確認された。  
このため、基本構造のうち、裏法被覆工・裏法尻部保護工は減災効果を発現する事象が想定されないため、粘り強い構造は津波が乗り上げる天端保護工のみとする。  
ただし、背後の盛土が天端保護工の施工に引き続き施工され、その形状が一定の安定度を持っている場合が条件となる。これを満たさない場合は、基本構造（天端保護工＋裏法被覆工＋裏法尻部保護工）での整備として事業を進める。
- ◇本委員会では、市町の考える盛土形状のタイプ（L2津波が「越流する」or「越流しない」）毎に、海岸保全施設として国が実施する粘り強い堤防の構造について検討を行ったもので、各工区別の盛土形状の検討を行ったものではない。  
今後、市町で実施する盛土形状が、今回、模型実験で想定した盛土形状と大きく異なり、粘り強い堤防の構造及び減災効果に影響することが想定される場合には、必要に応じ、本委員会で検討することとする。
- ◇植生による侵食の抑制効果については、今後、全国の検証状況を踏まえ、駿河海岸における効果について検証していく。

【今後、事業を進める上での留意点】

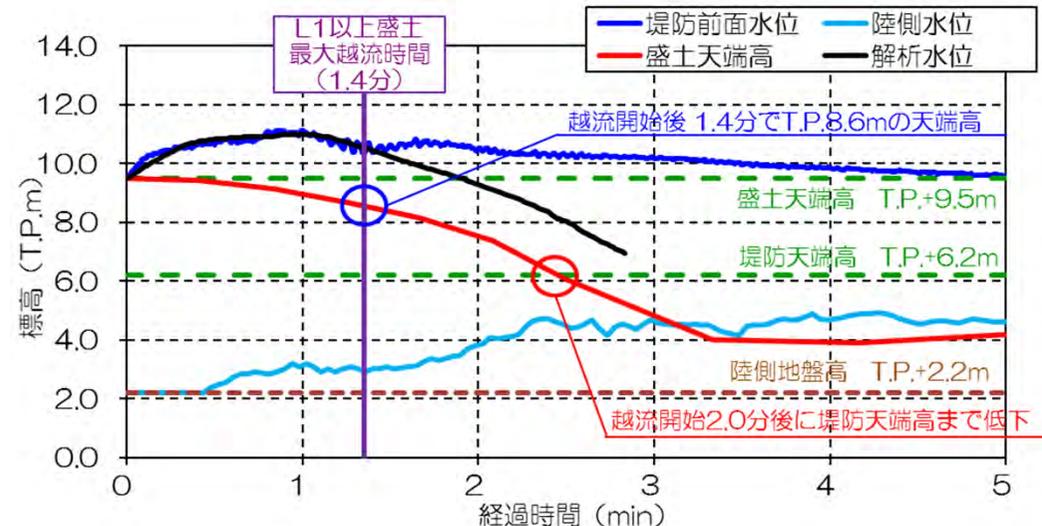
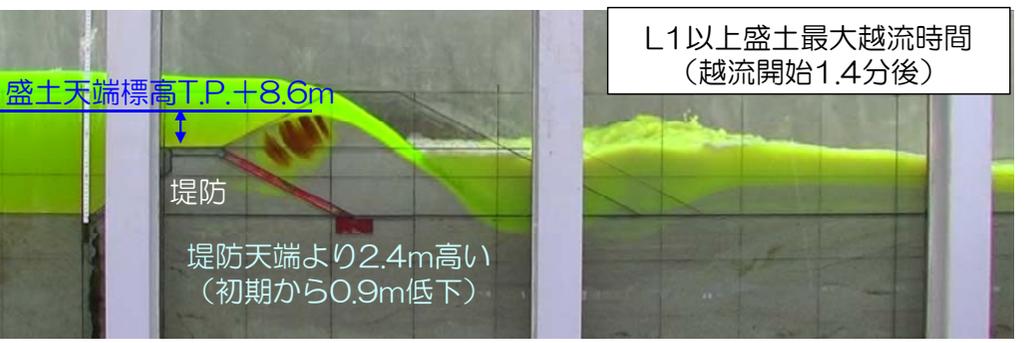
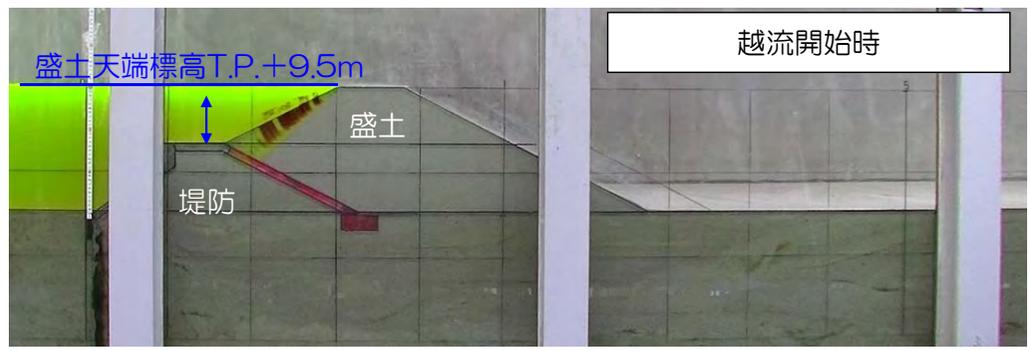
- ◇今後、事業を進める上で、地域住民等に危機管理を意識してもらう事業説明を心掛けることが重要。
- ◇その際、「海岸保全施設として整備する粘り強い堤防」及び「市町の考える盛土」双方の模型実験で確認された減災効果は不確実性が内在したものであり、当海岸にL2津波を引き起こすとされている南海トラフ巨大地震が実際に発生した際に、必ずしも模型実験と同等の効果を発揮するものではないことを地域住民等に説明することが重要。
- ◇東日本大震災の反省として中央防災会議の報告では「海岸保全施設等に過度に依存した防災対策には限界があった」とされていることから、当地域の減災のためには今回検討したハード対策のみならず住民避難を柱とした総合防災対策を確実に実施していくことが重要。

## ～実験結果の詳細一覧～

- 1.L1以上盛土の検討（本実験①-2,①-3,②）
- 2.引き波に対する安全性の確認（重ね実験・長期湛水）
- 3.バラツキの把握（反復実験）

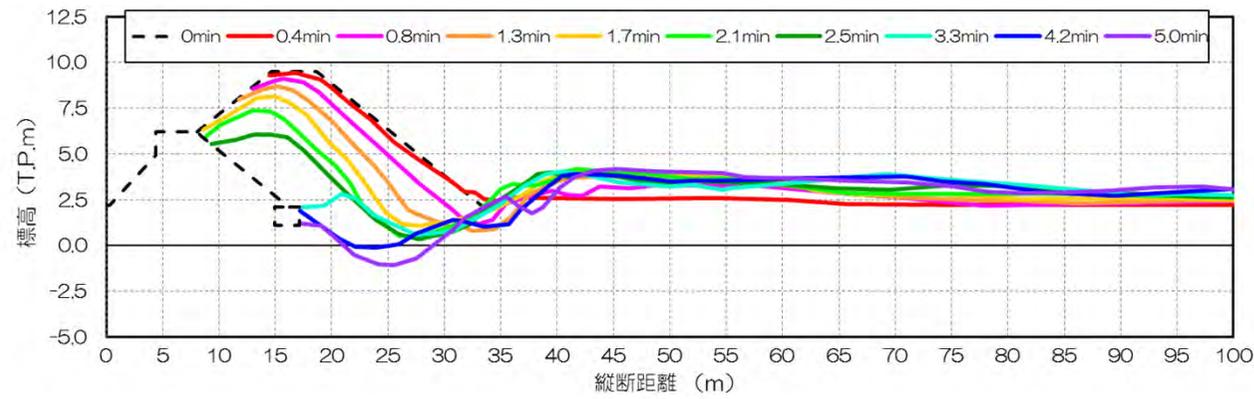
# 1.L1以上盛土の検討(本実験①-2-1)[L1以上盛土(締固め無し:4m):榛原・住吉・川尻工区]

- L1以上盛土により初期洗掘が軽減され、越流開始から約2.0分まで堤防天端高以上の盛土高が維持される。
  - L1以上盛土により、最大越流時間1.4分後でも盛土天端高はT.P.+8.6m（堤防天端高より約2.4m高い）を保持している。
- 最大越流時間1.4分後においても堤防以上の盛土高が保持されており、破堤遅延効果が十分に発揮されている。

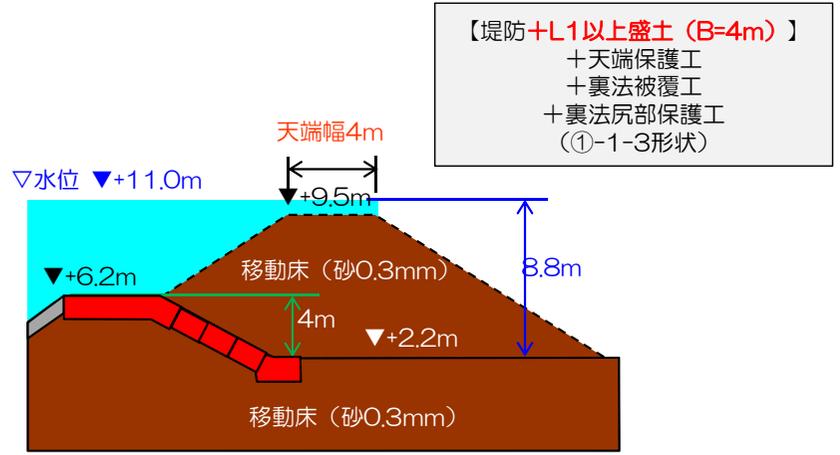


堤防前面水位・陸側水位・盛土天端高の経時変化

初期状態と越流開始1.4分後の盛土形状

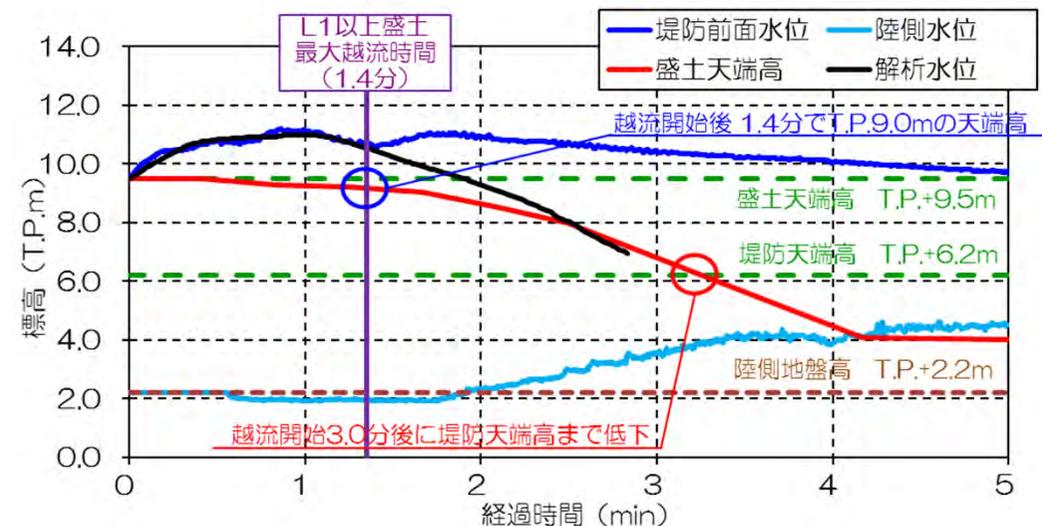


盛土形状の経時変化

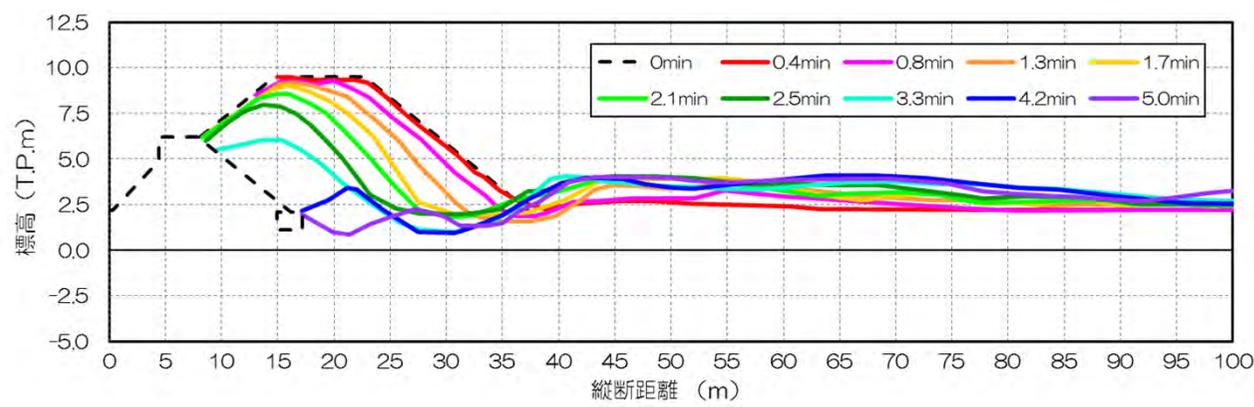


# 1.L1以上盛土の検討(本実験①-2-2)[L1以上盛土(締固め無し:8m):榛原・住吉・川尻工区]

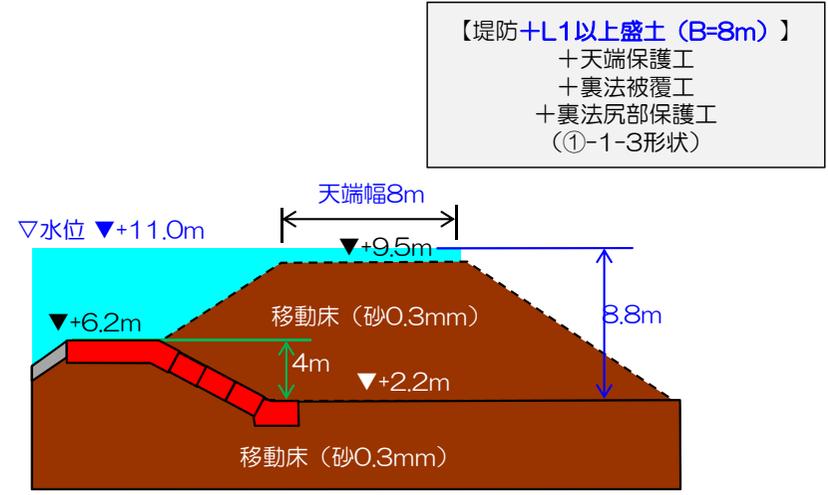
- L1以上盛土の天端幅4.0mと同様に、越流開始から約3.0分まで堤防天端高以上の盛土高が維持される。
  - L1以上盛土により、最大越流時間1.4分後でも盛土天端高はT.P.+9.0m（堤防天端高より約2.8m高い）を保持している。
- 最大越流時間1.4分後においても堤防以上の盛土高が保持されており、破堤遅延効果が十分に発揮されている。



堤防前面水位・陸側水位・盛土天端高の経時変化

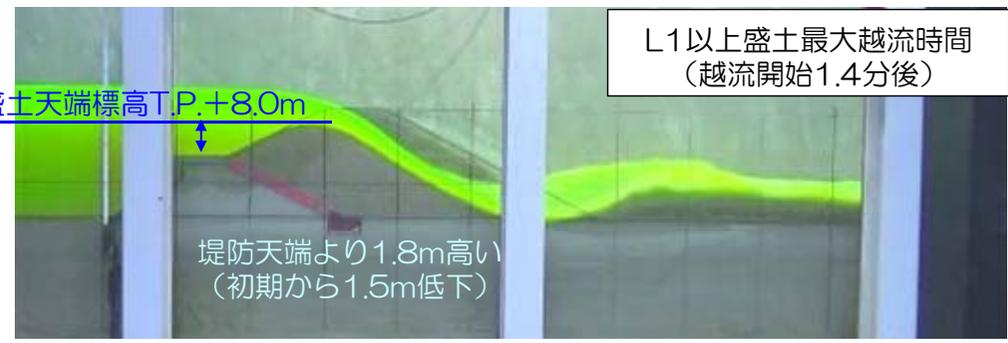


盛土形状の経時変化

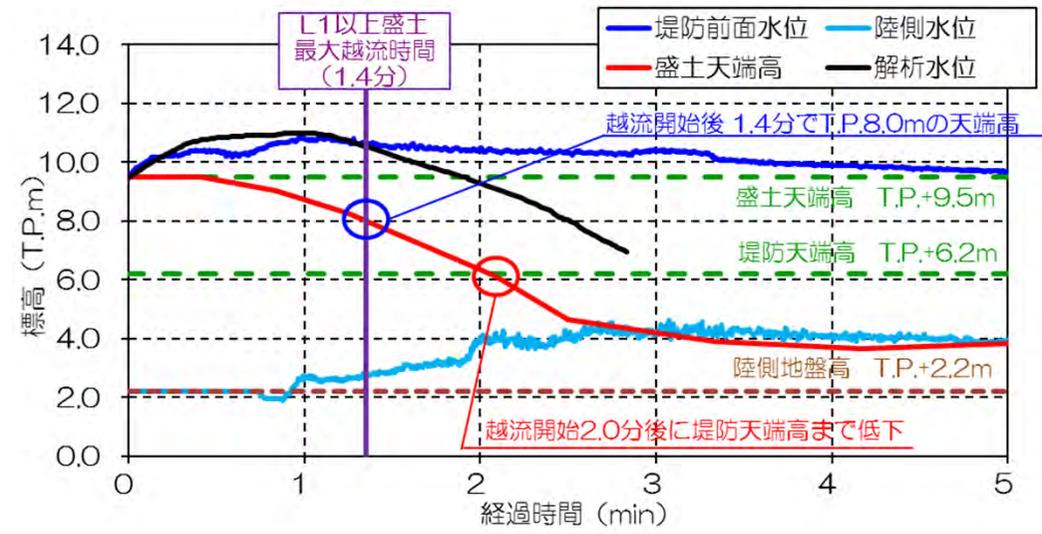


# 1.L1以上盛土の検討(本実験①-3-1)[L1以上盛土(締固め有:4m):榛原・住吉・川尻工区]

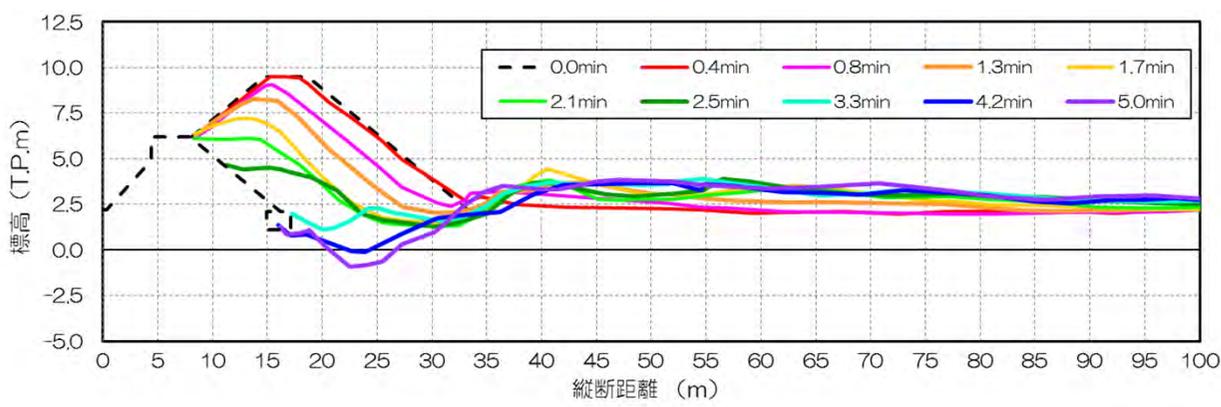
- ・越流開始から約2.0分まで堤防天端高以上の盛土高が維持される。
  - ・L1以上盛土により、最大越流時間1.4分後でも盛土天端高はT.P.+8.0m（堤防天端高より約1.8m高い）を保持している。
- 最大越流時間1.4分後においても堤防以上の盛土高が保持されており、破堤遅延効果が十分に発揮されている。



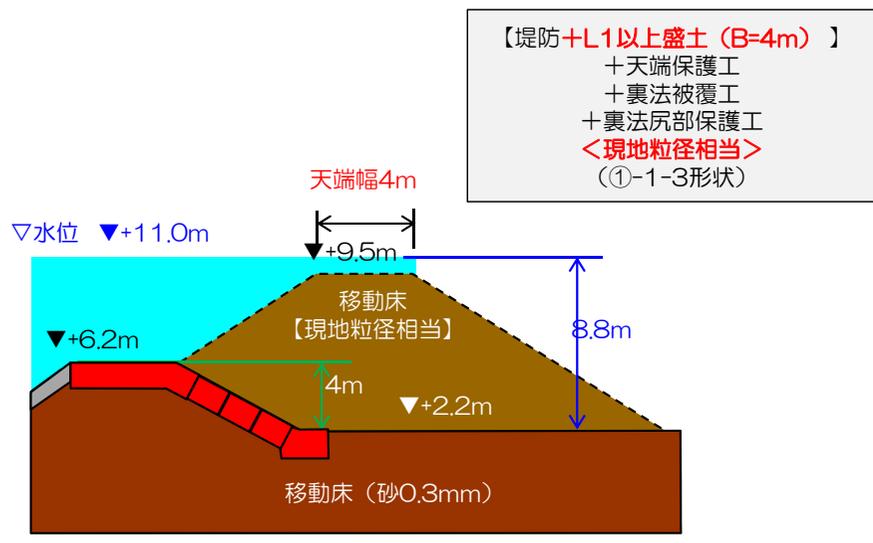
初期状態と越流開始1.4分後の盛土形状



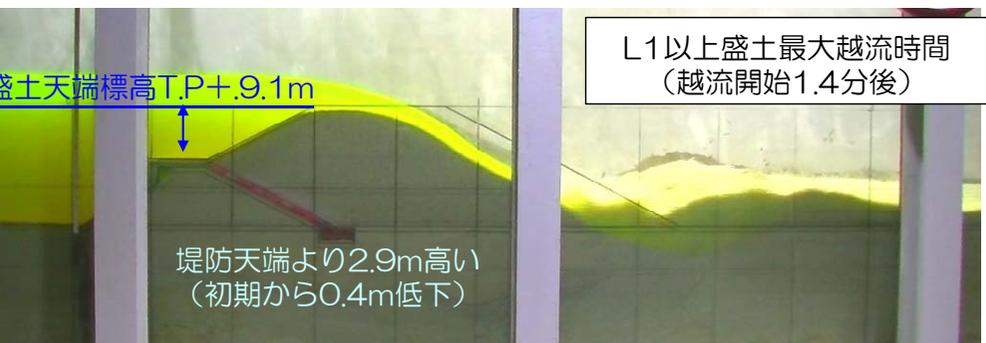
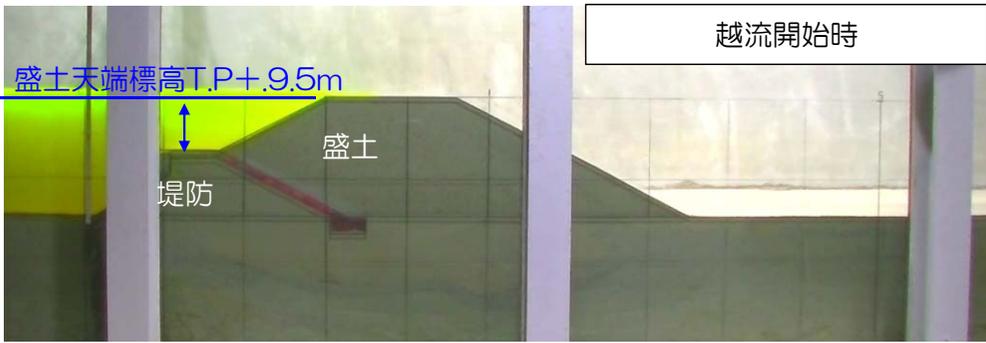
堤防前面水位・陸側水位・盛土天端高の経時変化



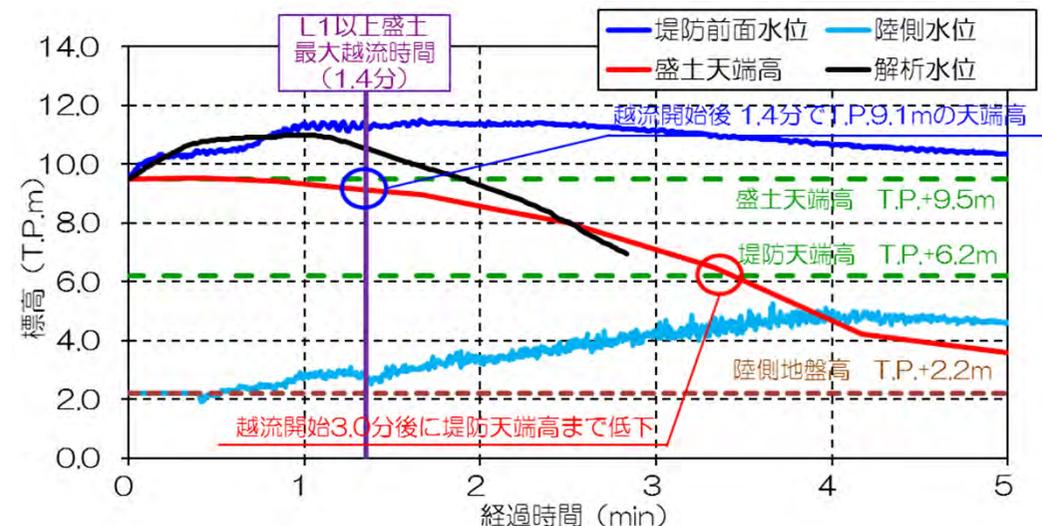
盛土形状の経時変化



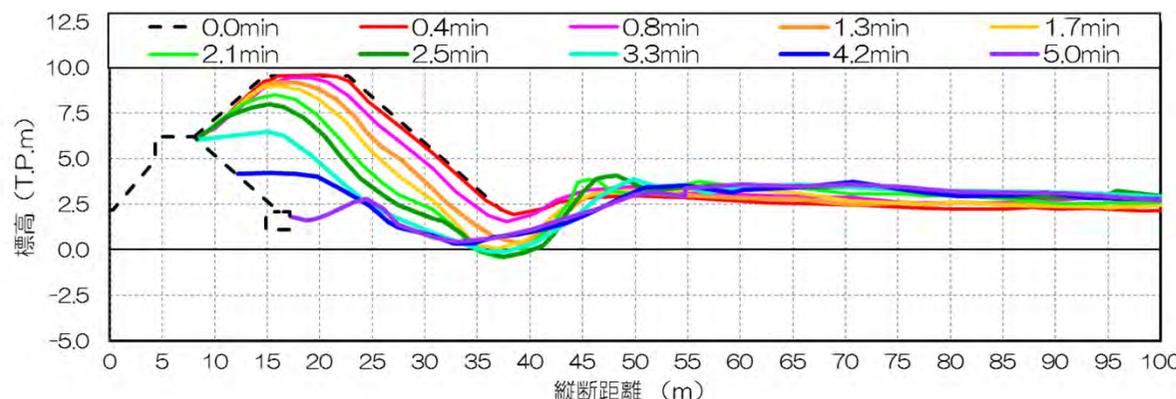
- ・越流開始から約3.0分まで堤防天端高以上の盛土高が維持される。
- ・L1以上盛土により、最大越流時間1.4分後でも盛土天端高はT.P.+9.1m（堤防天端高より約2.9m高い）を保持している。
- 最大越流時間1.4分後においても堤防以上の盛土高が保持されており、破堤遅延効果が十分に発揮されている。



初期状態と越流開始1.4分後の盛土形状

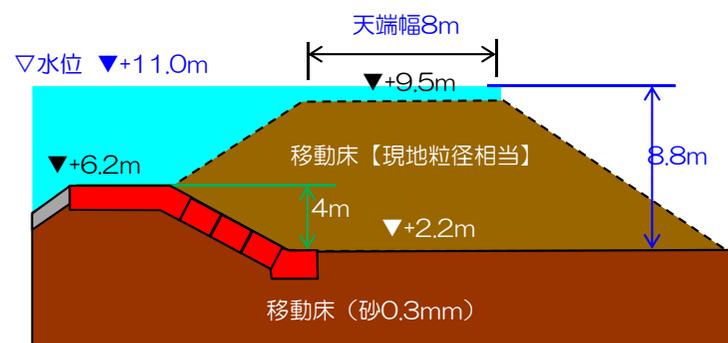


堤防前面水位・陸側水位・盛土天端高の経時変化

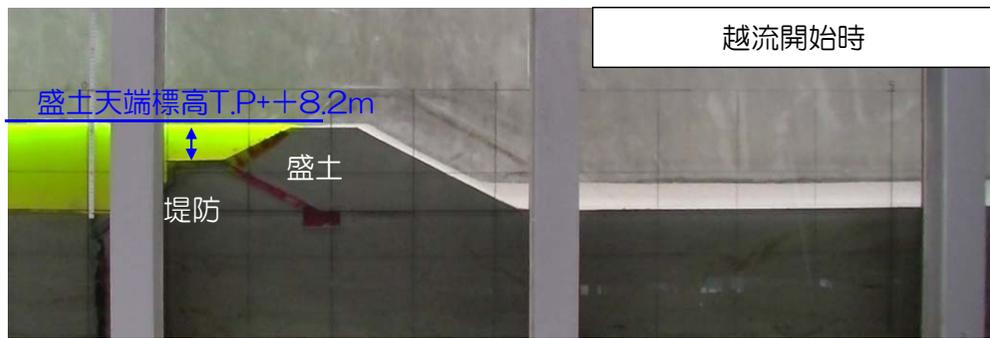


盛土形状の経時変化

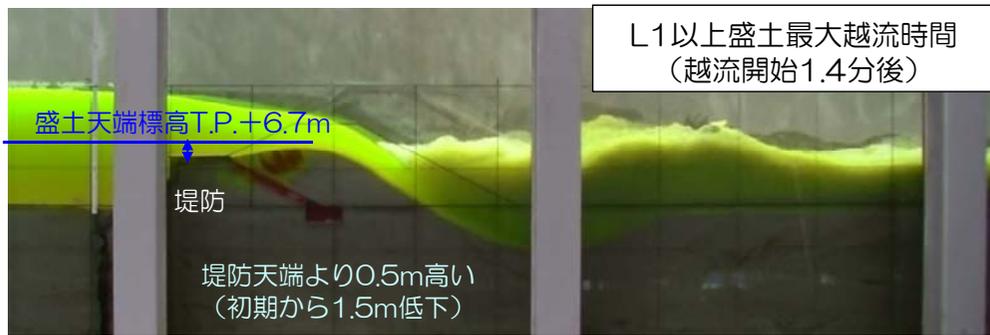
【堤防+L1以上盛土 (B=8m)】  
 +天端保護工  
 +裏法被覆工  
 +裏法尻部保護工  
 <現地粒径相当>  
 (①-1-3形状)



- 越流開始から約1.5分まで堤防天端高以上の盛土高が維持される。
  - L1以上盛土により、最大越流時間1.4分後でも盛土天端高はT.P.+6.7m (堤防天端高より約0.5m高い) を保持している。
- 最大越流時間1.4分後においても堤防以上の盛土高が保持されており、破堤遅延効果が十分に発揮されている。

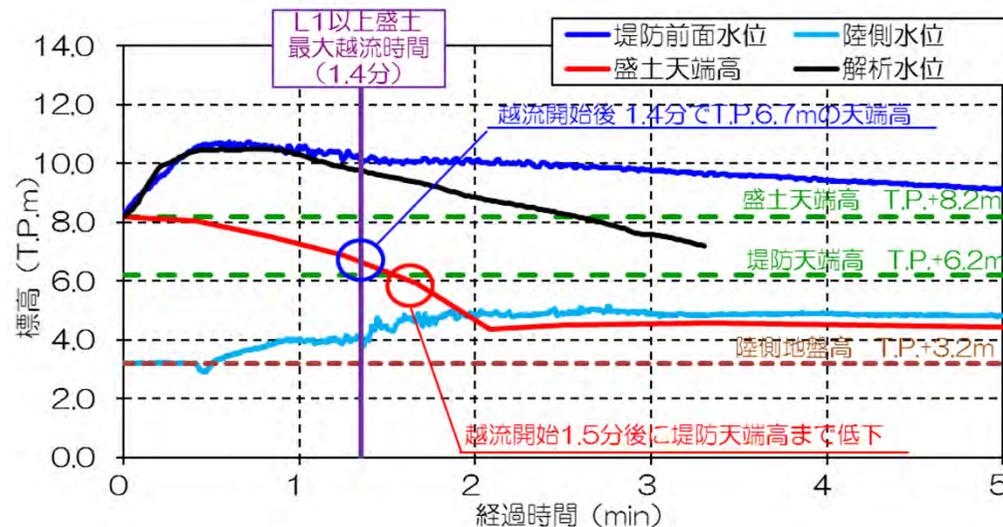


越流開始時

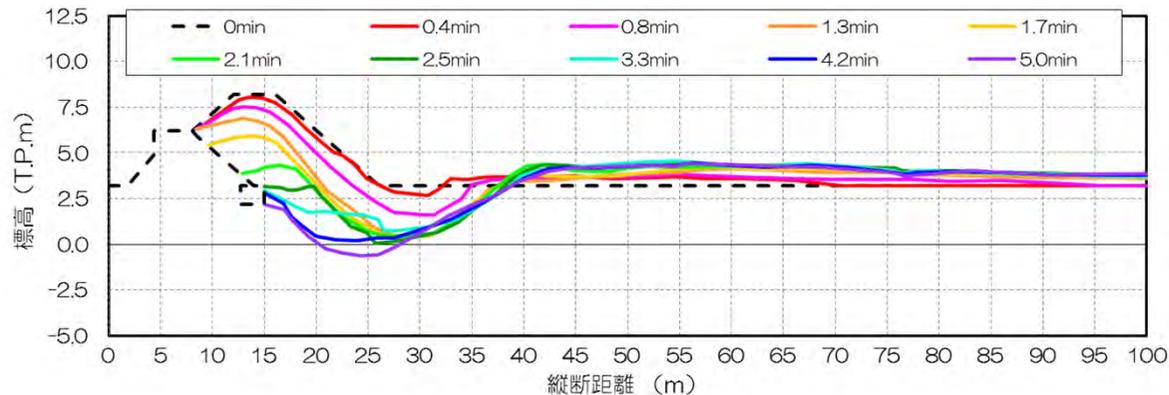


L1以上盛土最大越流時間 (越流開始1.4分後)

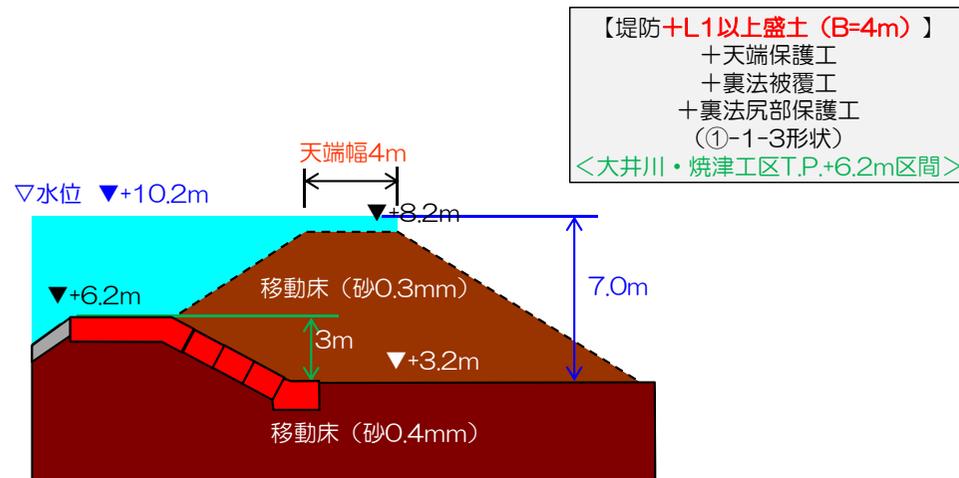
初期状態と越流開始1.4分後の盛土形状



堤防前面水位・陸側水位・盛土天端高の経時変化

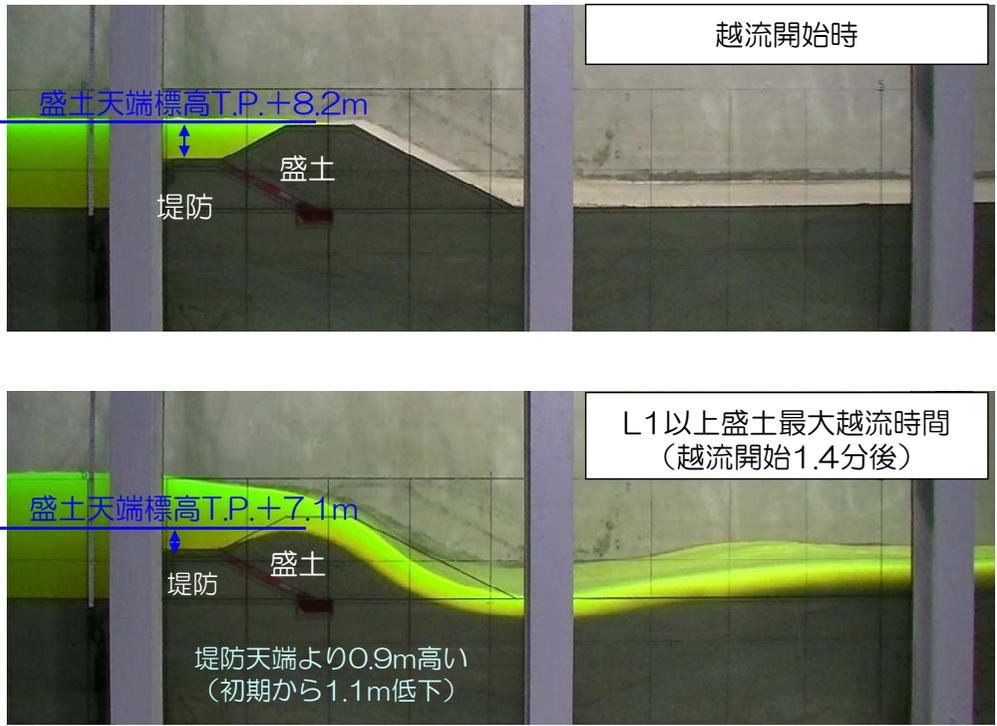


盛土形状の経時変化

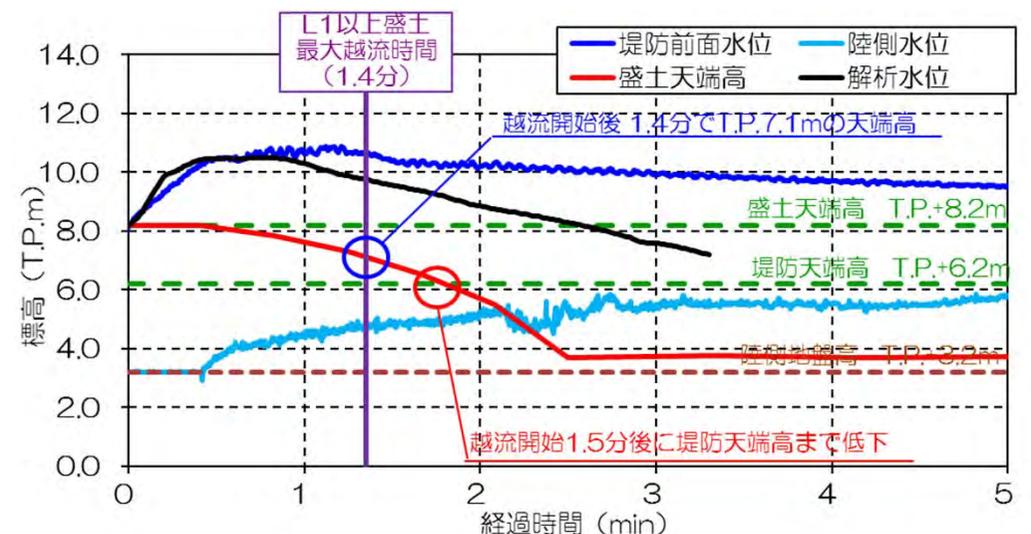


# 1.L1以上盛土の検討(本実験②-2) [L1以上盛土(締固め無し:4m):大井川・焼津工区]

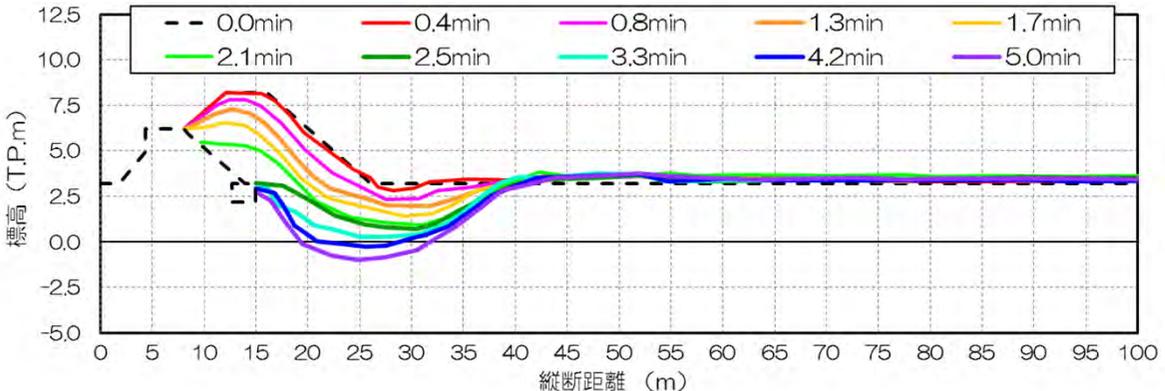
- 越流開始から約1.5分まで堤防天端高以上の盛土高が維持される。
  - L1以上盛土により、最大越流時間1.4分後でも盛土天端高はT.P.+7.1m (堤防天端高より約0.9m高い) を保持している。
- 最大越流時間1.4分後においても堤防以上の盛土高が保持されており、破堤遅延効果が十分に発揮されている。



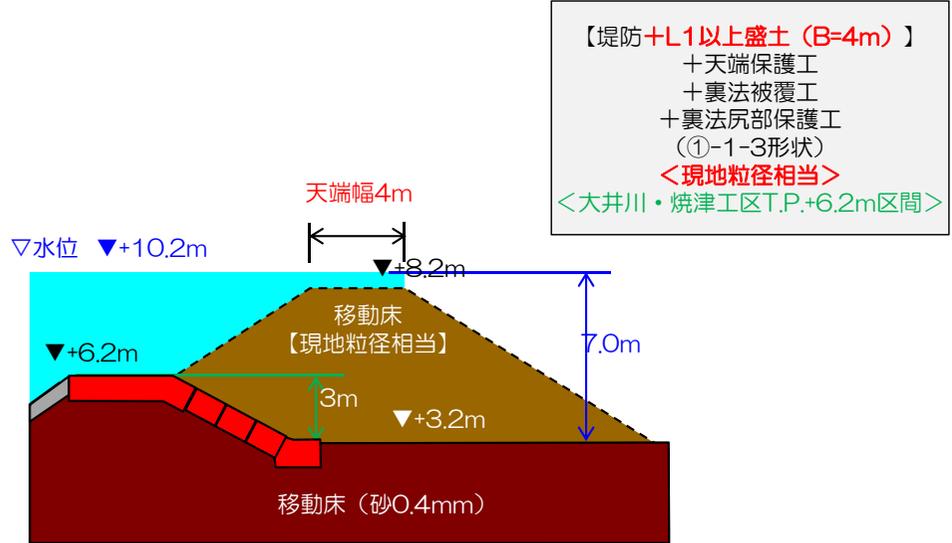
初期状態と越流開始1.4分後の盛土形状



堤防前面水位・陸側水位・盛土天端高の経時変化



盛土形状の経時変化

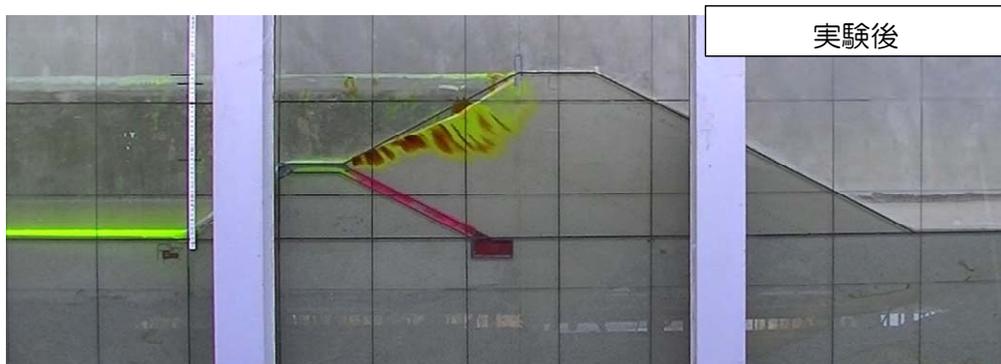
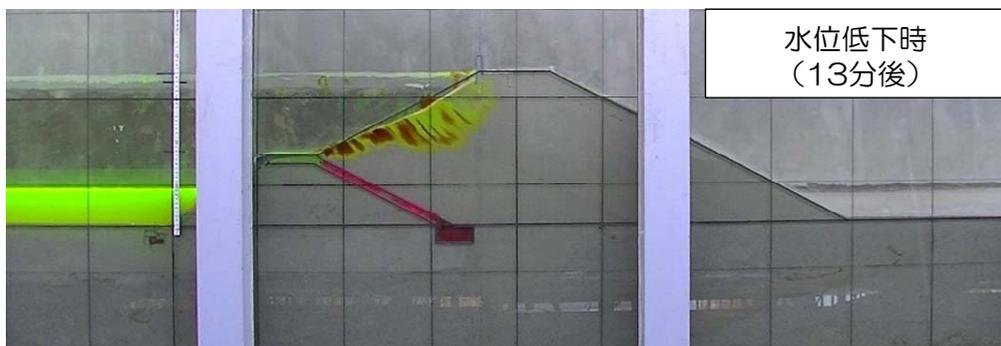
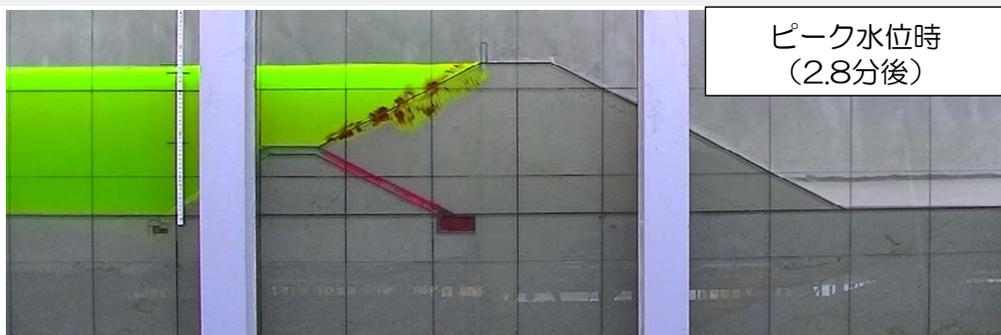


## 2. 引き波に対する安全性の確認(重ね実験・長期湛水)

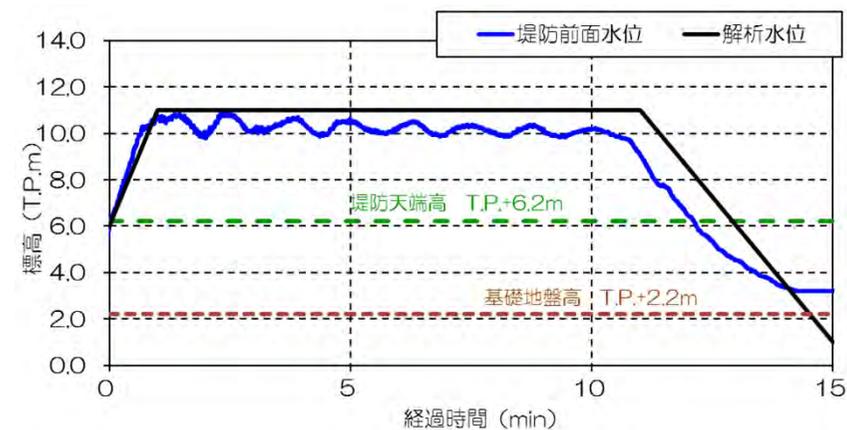
1回目の実験後の堤防・盛土に更に湛水時間を10分間に引き延ばした波形で引き波の安全性を確認した。

- 水路内の長周期振動により盛土上部にクラックや小規模な崩壊が確認されたが、盛土形状は保持される。
- 堤防内からの土砂の吸出しは全くなく、海側ブロックの被災もない。

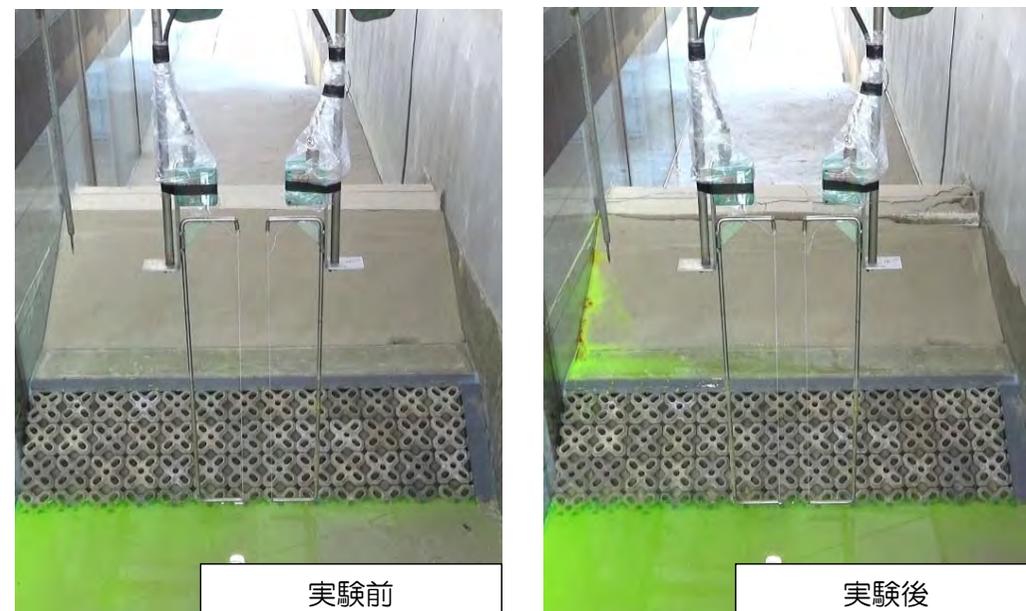
➤実験スケールによる確認では、L2以上津波対応盛土が引き波により被災する可能性は限りなく低いと考えられる。



盛土形状の経時変化



堤防前面水位の経時変化

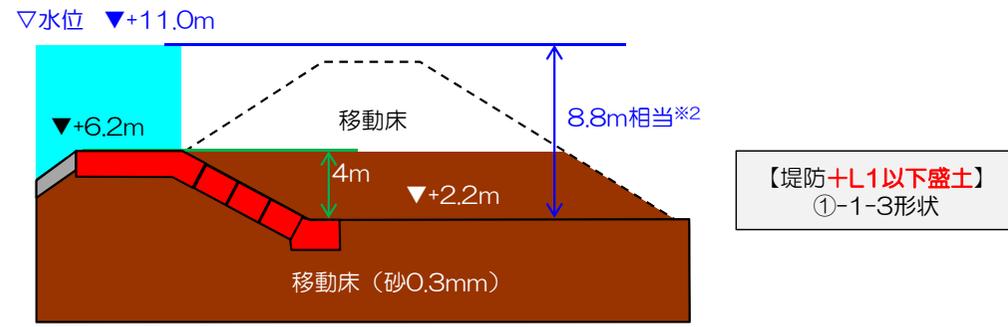
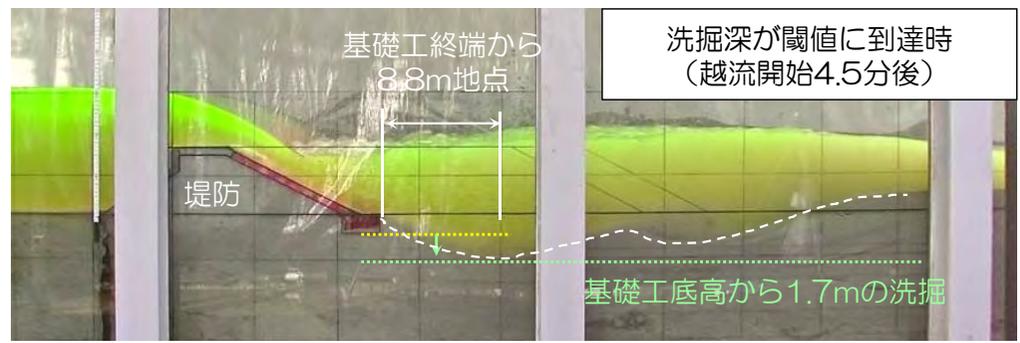


実験前後の海側堤防状況

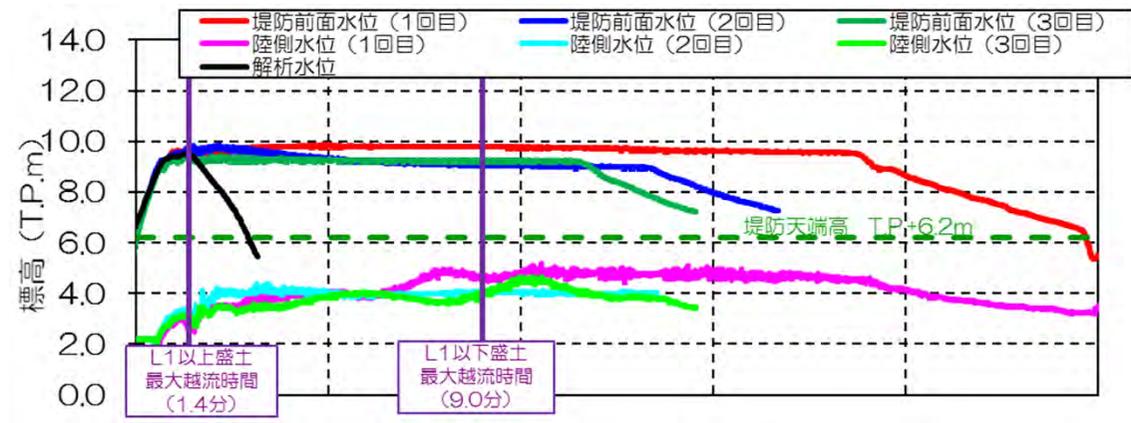
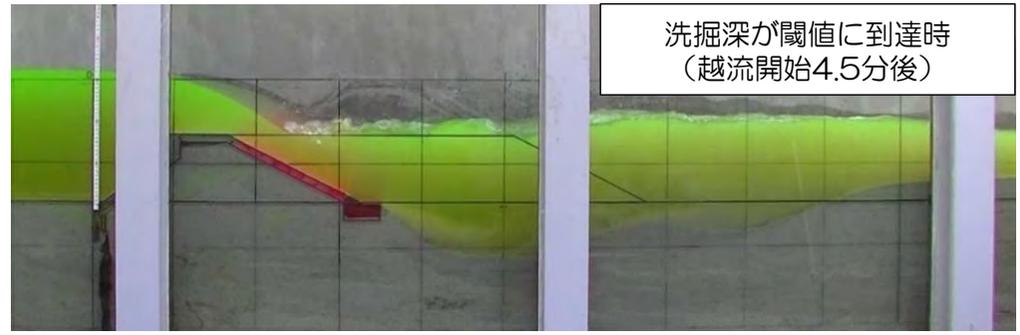
# 3.バラツキの把握(反復実験①) [L1以下盛土(締固め無:4m):榛原・住吉・川尻工区]

- ・洗掘の過程や洗掘深がある程度進行した後の洗掘形状にバラツキが生じるが、概ね洗掘深の進行速度は一定となる。
  - ・洗掘深を用いた破堤時間の評価結果は、全てのケースで3.0分~4.5分となる。
- 越流による洗掘が急激に進行する期間の洗掘現象のバラツキは、評価単位である0.5分以下程度となる。

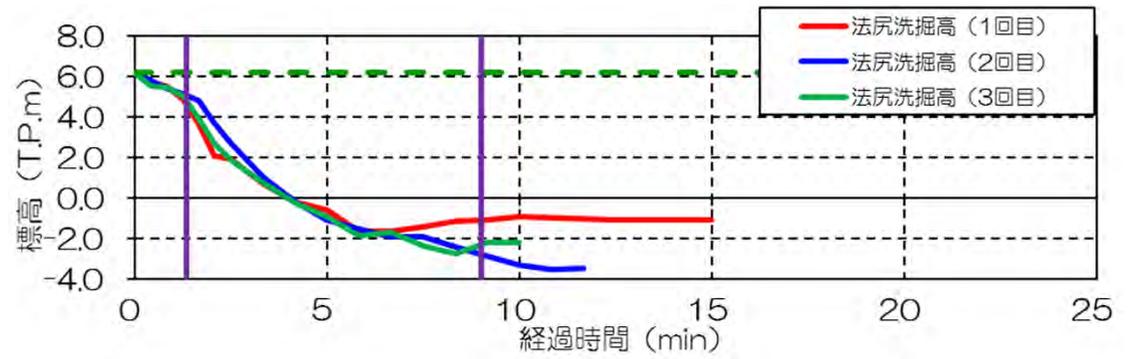
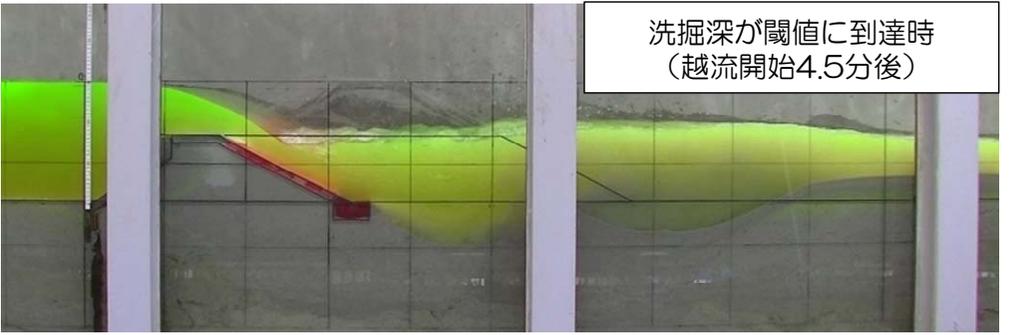
【ケース①-1-3 (1回目)】



【ケース反復①-1 (2回目)】



【ケース反復①-2 (3回目)】



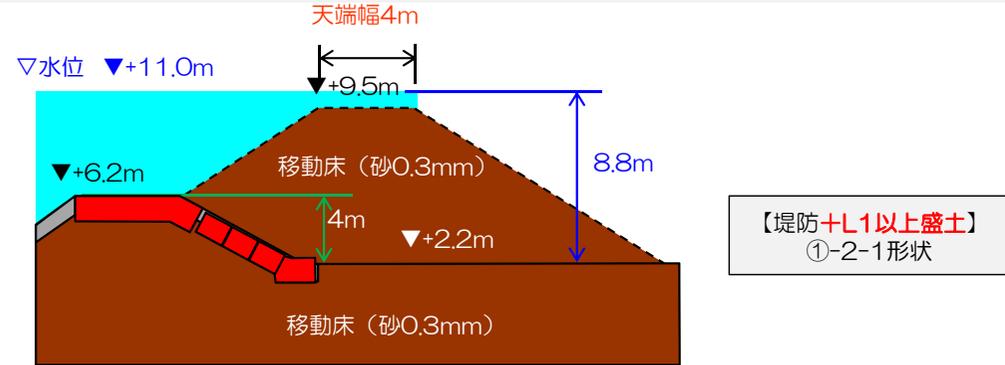
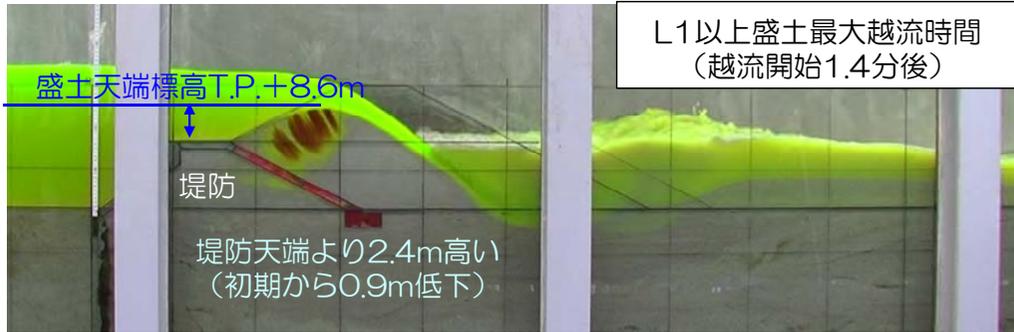
洗掘深が閾値に到達した時点の堤防背後の断面形状

堤防前面水位・陸側水位・法尻洗掘標高の経時変化

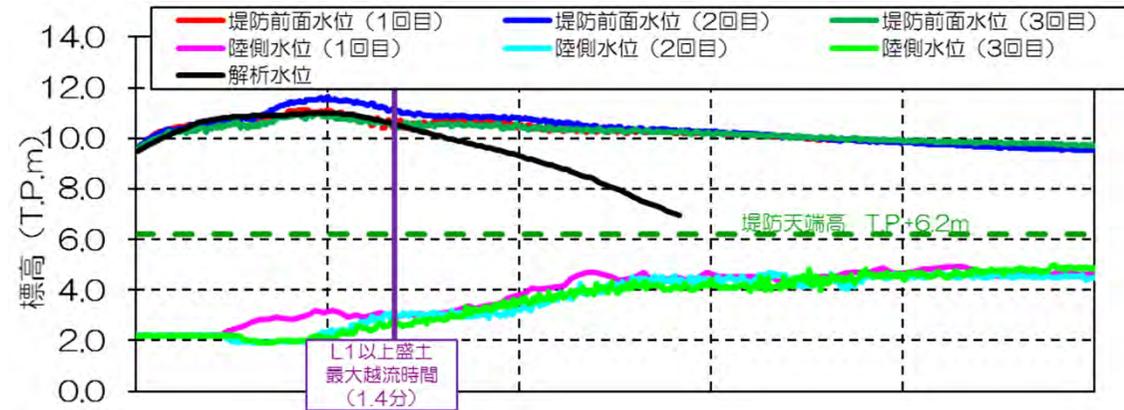
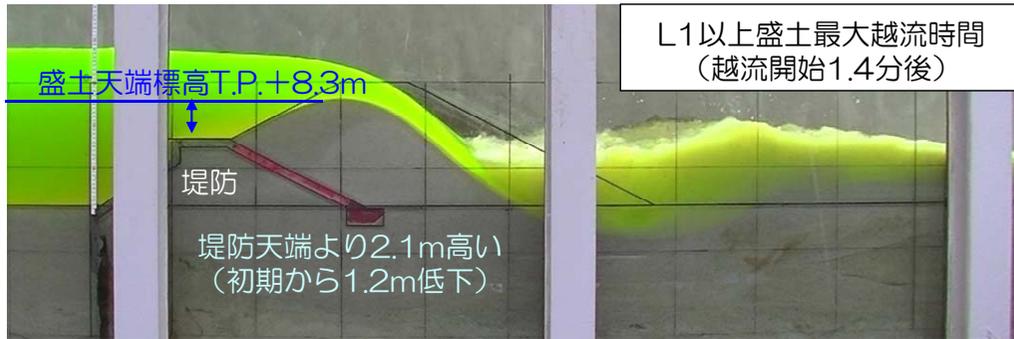
# 3. バラツキの把握(反復実験②) [L1以上盛土(締固め無:4m): 榛原・住吉・川尻工区]

- ・越流開始から1.4分後の盛土高は全てのケースで8.3~8.6m程度となっており、殆ど差異は生じない。
  - ・越流開始から5分後までの天端高の経時変化においても、明確な差異は確認できない。
- 越流による盛土侵食の進行のバラツキは、最大で0.3m程度となる。

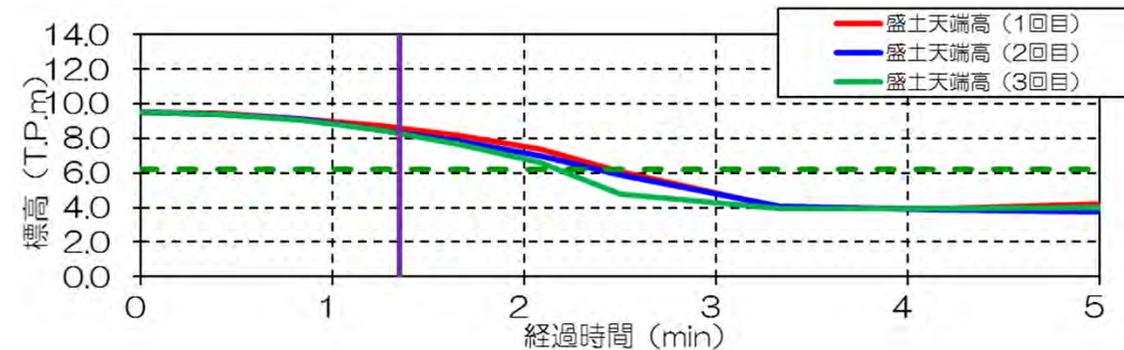
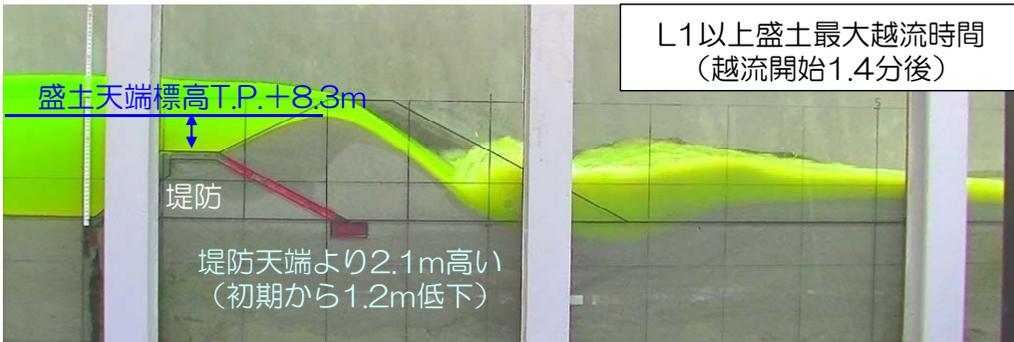
【ケース①-2-1 (1回目)】



【ケース反復②-1 (2回目)】



【ケース反復②-2 (3回目)】



越流開始1.4分後の盛土形状

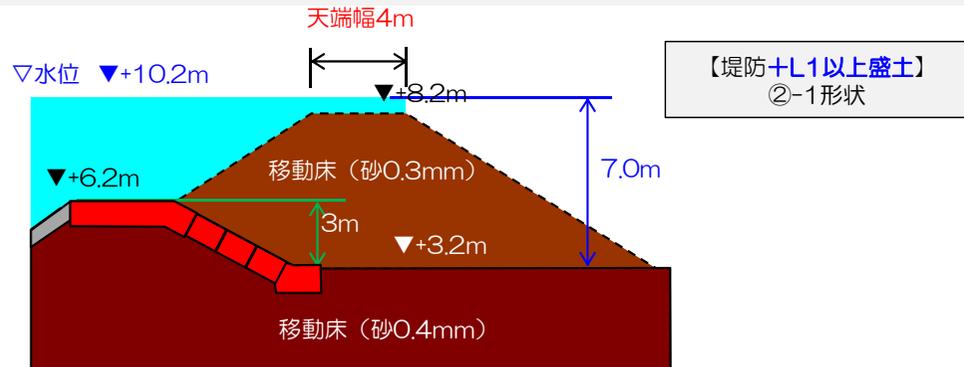
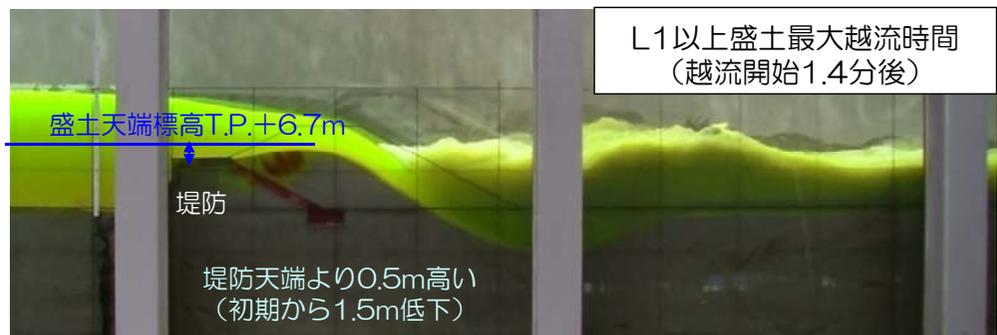
堤防前面水位・陸側水位・盛土天端高の経時変化

# 3.バラツキの把握(反復実験③)[L1以上盛土(締固め無:4m):大井川・焼津工区]

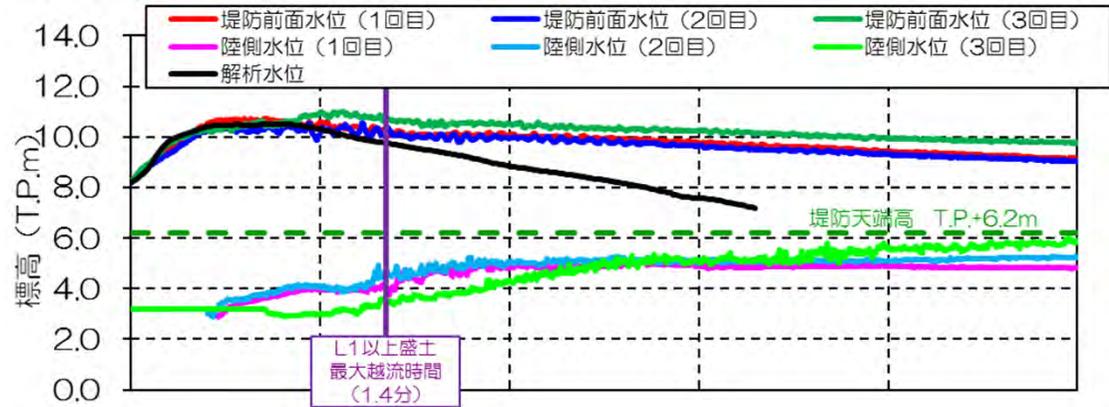
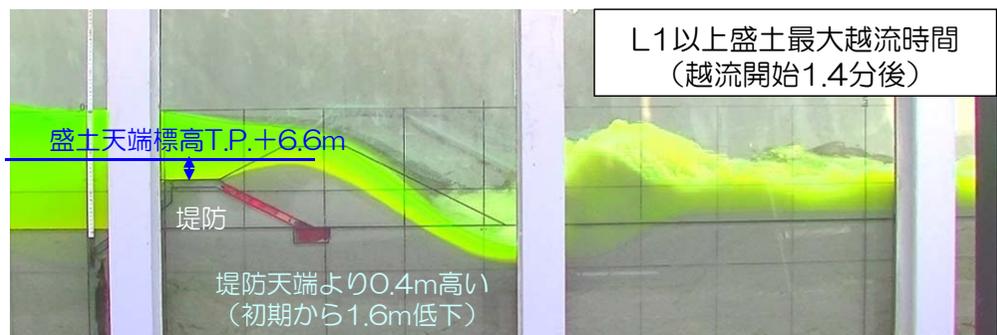
- ・越流開始から1.4分後の盛土高は全てのケースで6.5~6.7m程度となっており、殆ど差異は生じない。
- ・越流開始から5分後までの天端高の経時変化においても、明確な差異は確認できない。

➤越流による盛土侵食の進行バラツキは、最大で0.2m程度となる。

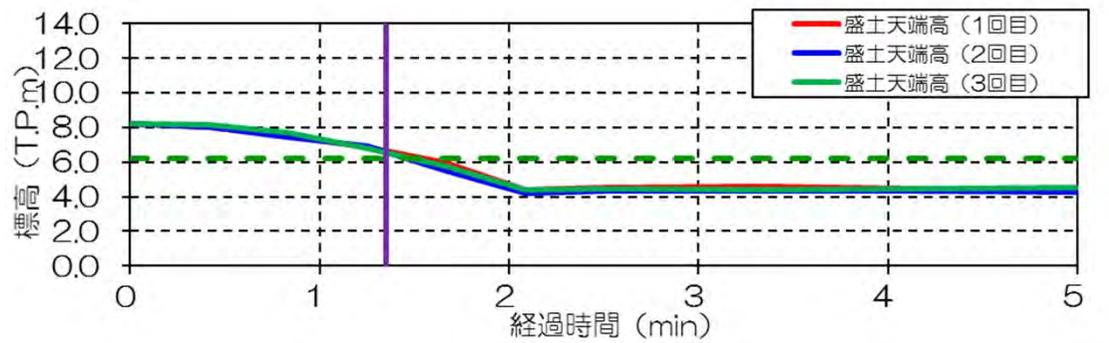
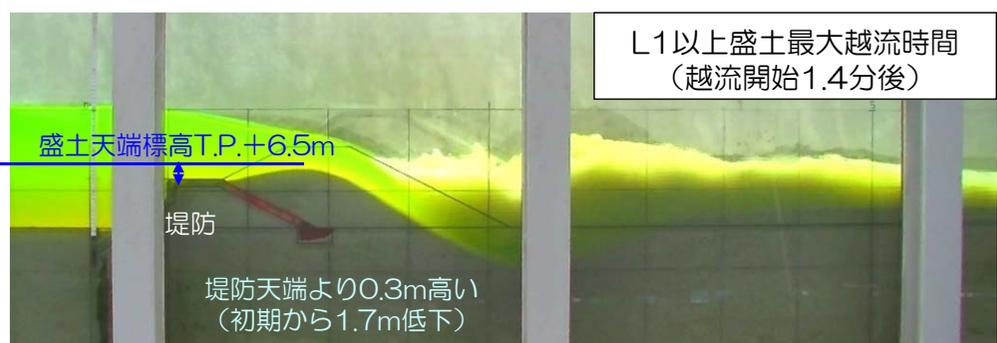
【ケース②-1 (1回目)】



【ケース反復③-1 (2回目)】



【ケース反復③-2 (3回目)】



越流開始1.4分後の盛土形状

堤防前面水位・陸側水位・盛土天端高の経時変化

# ～その他の洗掘シミュレーションの結果～

## 1. 模型実験の再現計算結果

- (1) L1以上盛土 本実験②-1 (大井川・焼津工区)
- (2) L1以下盛土 本実験①-1-3
- (3) 東北モデル 検証実験②-1

## 2. 現地スケールの計算結果

- (1) 榛原・住吉・川尻工区 (天端8m)
- (2) 大井川・焼津工区

## 3. 植生による期待される侵食抑制効果試算の条件設定

## 4. 樹木の倒伏限界試算の条件設定

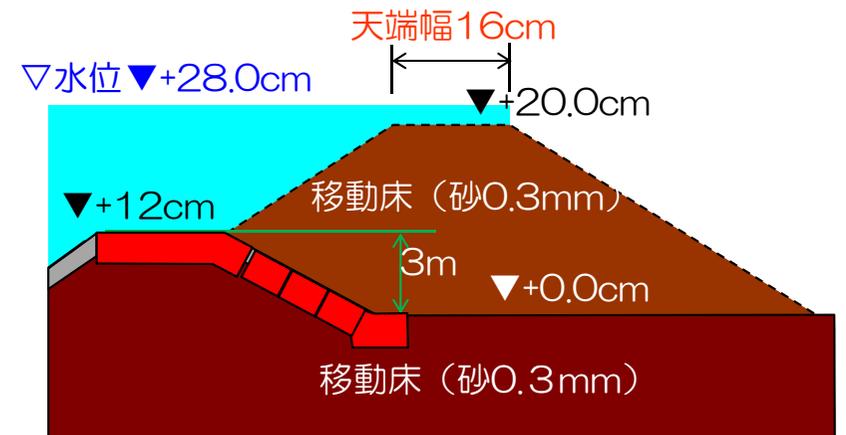
# 1. 模型実験の再現計算結果

## (1) L1以上盛土（本実験②-1）

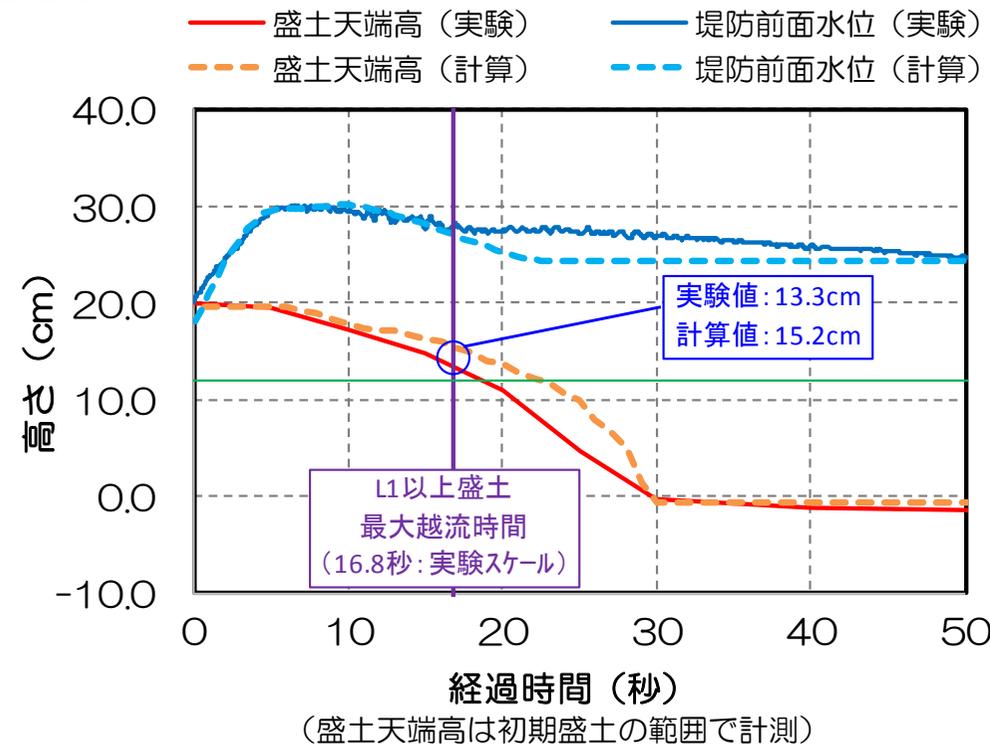
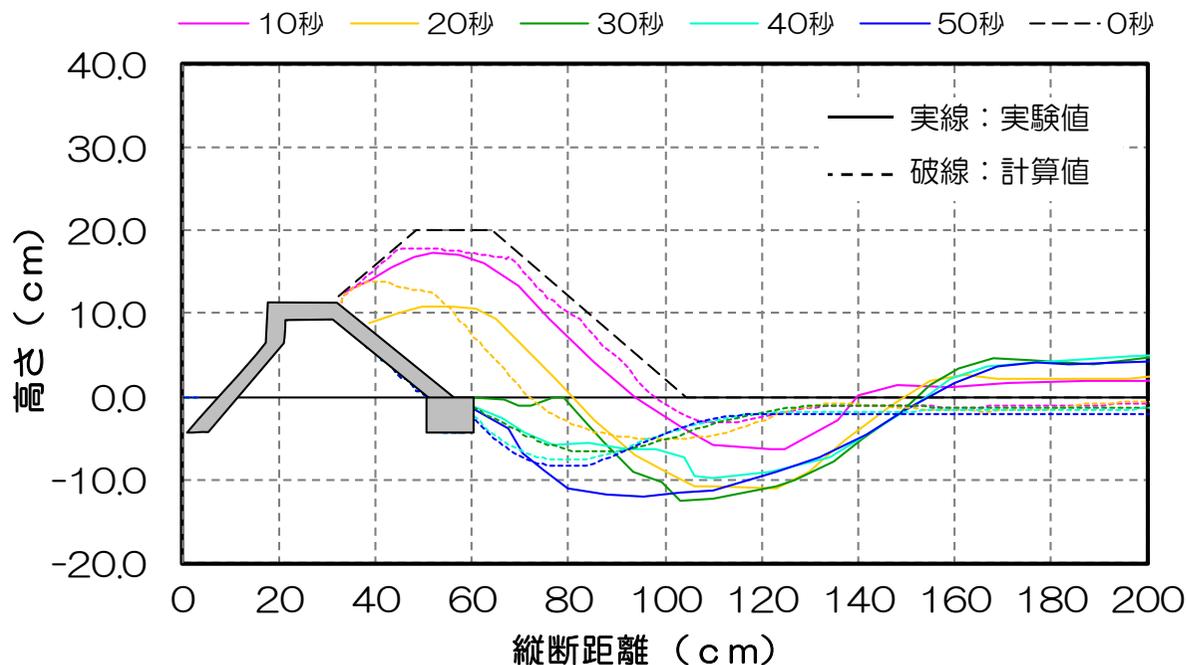
L1以上盛土（締固め無し：4m）：大井川・焼津工区

- ▶ 盛土天端及び裏法の侵食形状と侵食速度の再現ができた
- ▶ L1以上盛土最大越流時間16.8秒（現地換算1.4分）後の盛土天端高は、実験値13.3～14.0cmに対し計算値15.2cmと概ね再現できた
- ▶ 盛土天端高が堤防天端高まで侵食される時間は、実験値約18秒に対し計算値約22秒と概ね再現できた
- ▶ 堤防前面水位は、越流初期段階（0秒～約10秒）は概ね一致しているものの、以降は計算値が若干低くなっている。

【本実験②-1】



※表記は実験スケール値



# 1. 模型実験の再現計算結果

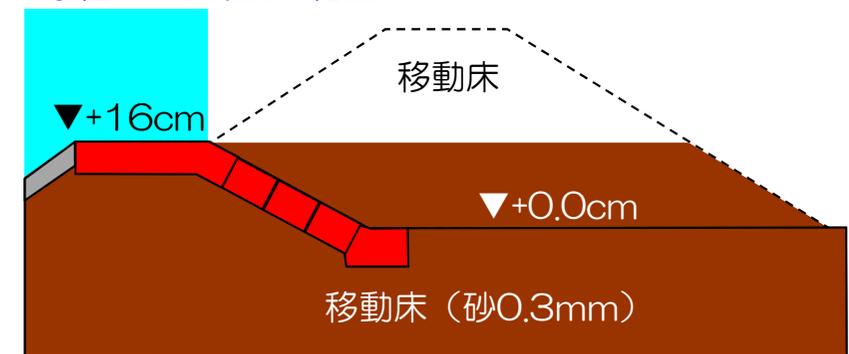
## (2) L1以下盛土 (本実験①-1-3)

L1以下盛土 (締固め無し: 4m) : 榛原・住吉・川尻工区

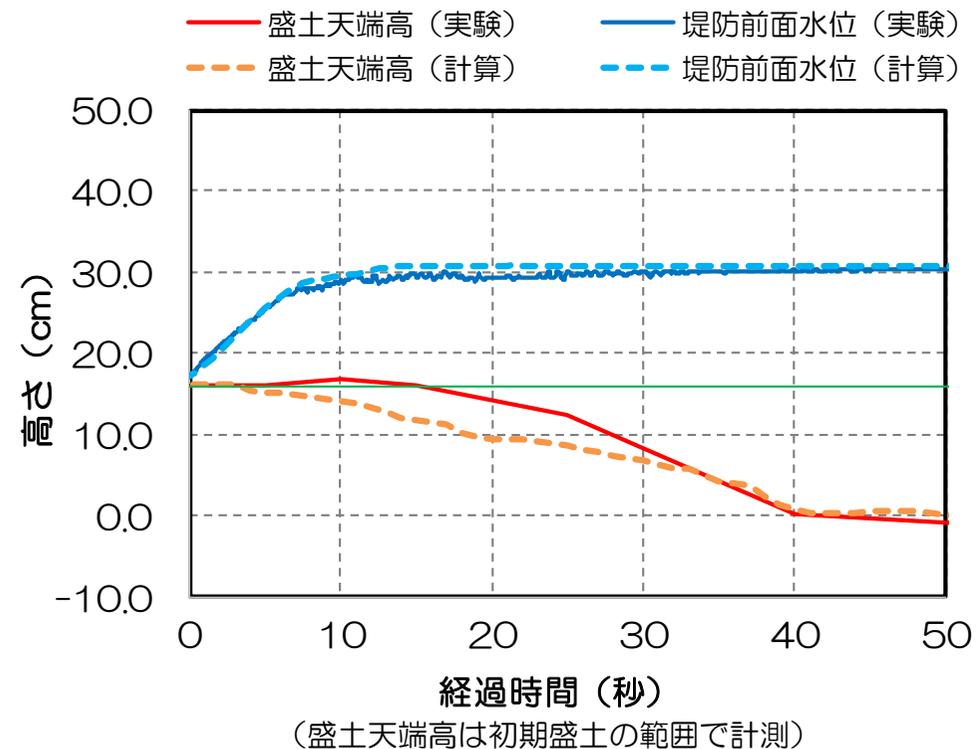
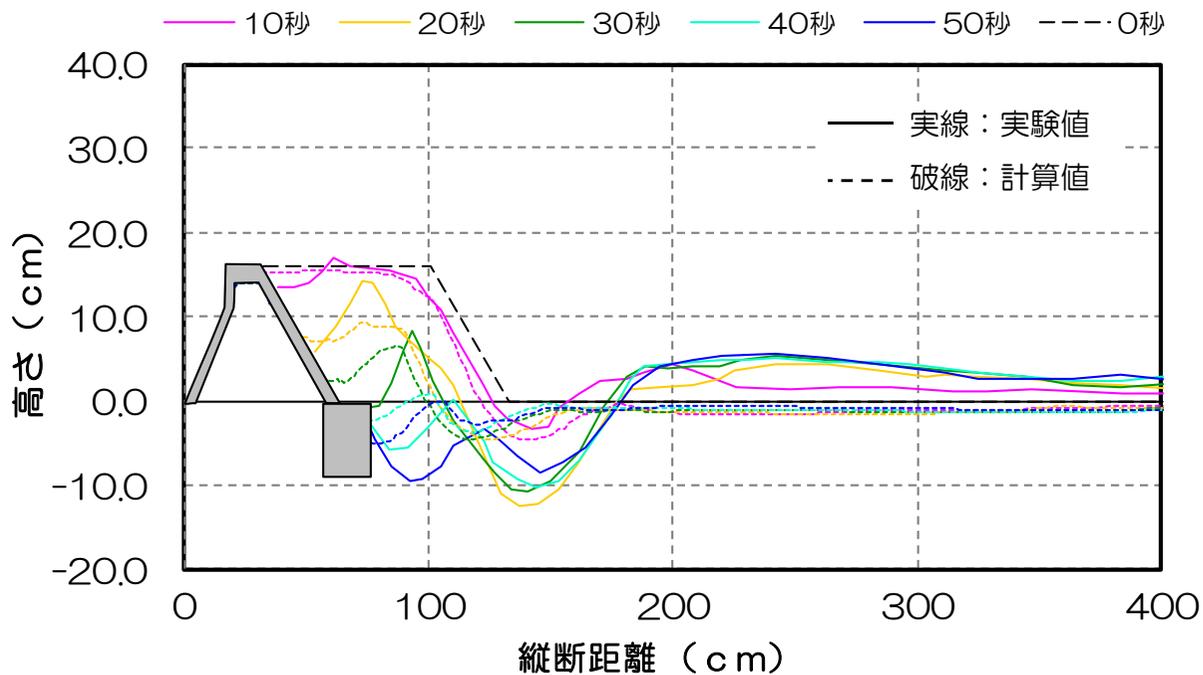
- ▶ 盛土天端及び裏法の侵食形状と侵食速度の再現ができた
- ▶ 盛土の侵食形状は概ね再現できているものの、盛土の天端高さは計算値の方が早く低下している
- ▶ 盛土が消失し、盛土天端高が法尻基礎部まで侵食される時間は、実験値約40秒に対し計算値約40秒と概ね再現できた
- ▶ 堤防前面水位は概ね一致している。

【本実験①-1-3】

▽水位 ▼+35.2cm相当



※表記は実験スケール値



# 1. 模型実験の再現計算結果

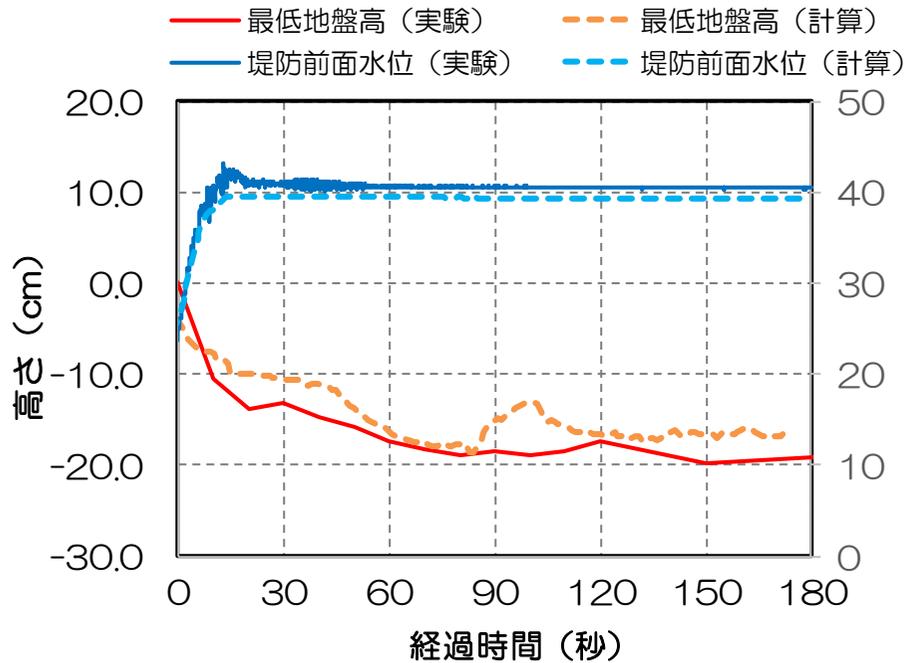
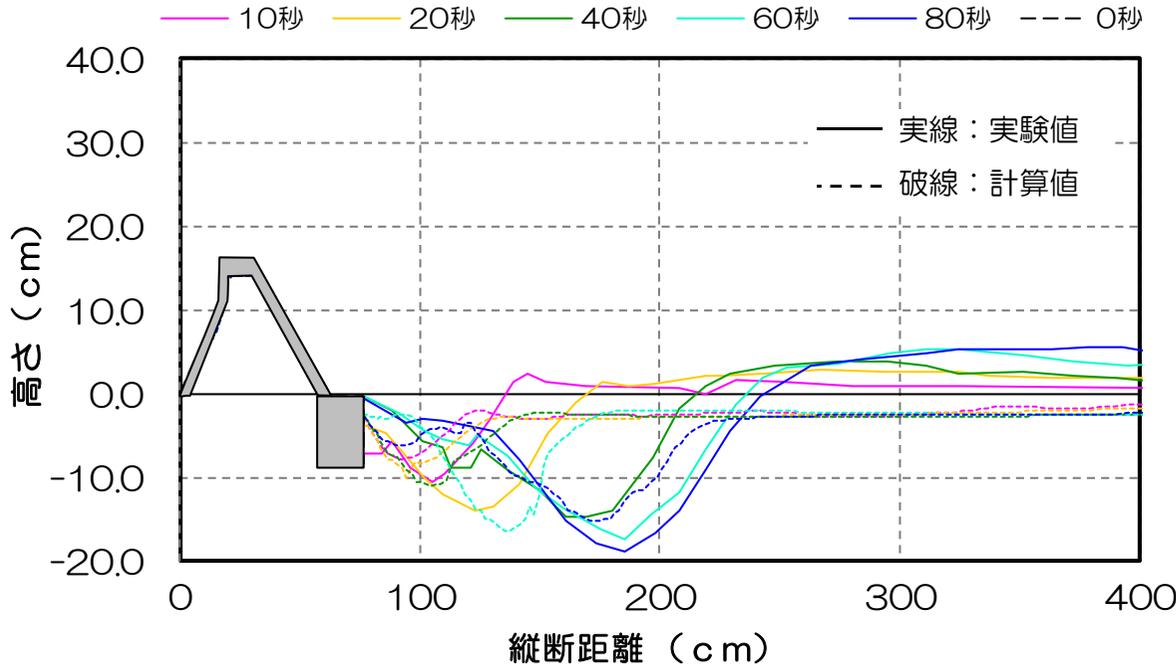
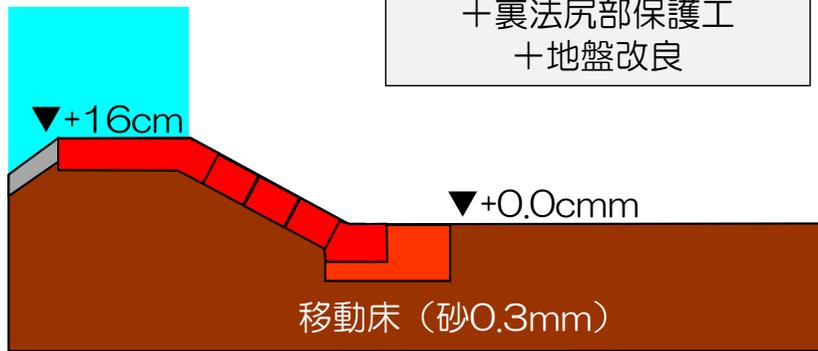
## (3) 粘り強い構造 (仙台モデル: 検証実験②-1)

- ▶ 法尻の洗掘過程は概ね再現できているものの、洗掘速度は計算値が若干遅く、洗掘幅も計算値が若干小さくなっている。
- ▶ 最大洗掘深の時系列変化は概ね再現できている
- ▶ 堤防前面水位は概ね一致している。

【検証実験②-1】

▽水位 ▼+35.2cm相当

【堤防】  
 +天端保護工  
 +裏法被覆工  
 +裏法尻部保護工  
 +地盤改良



## 2. 現地スケールへの適用と盛土効果の評価

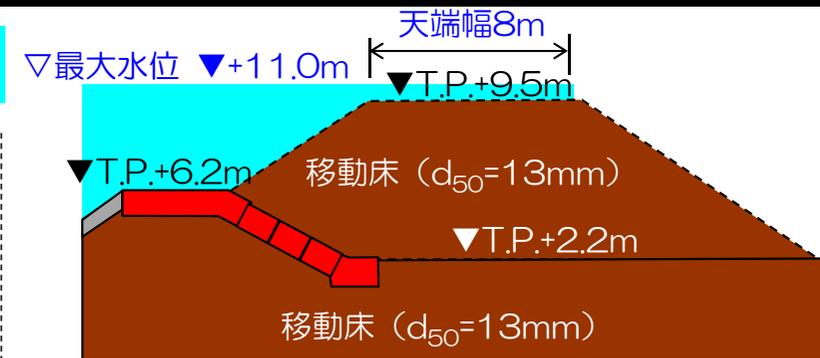
### (1) 榛原・住吉・川尻工区（盛土天端幅8m）

▶ 津波の越流時間は盛土天端高が下がったことにより、平面二次元計算による最大越流時間を上回る結果となった。

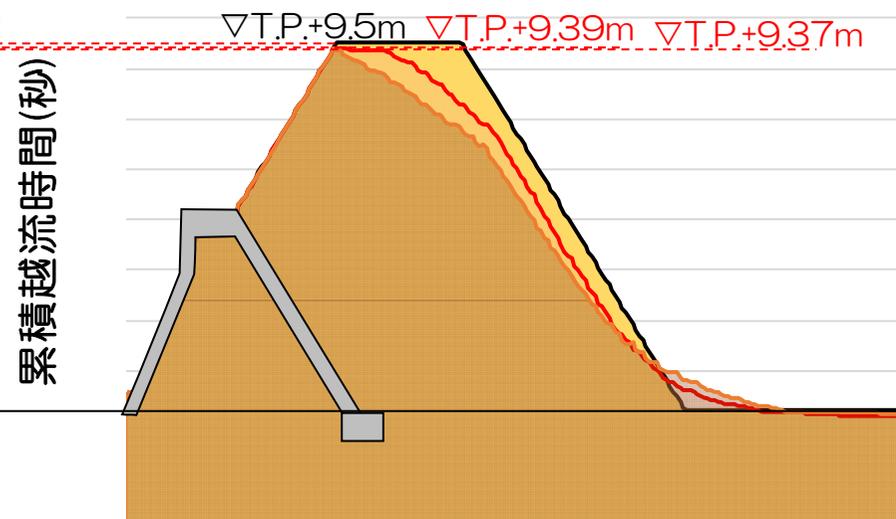
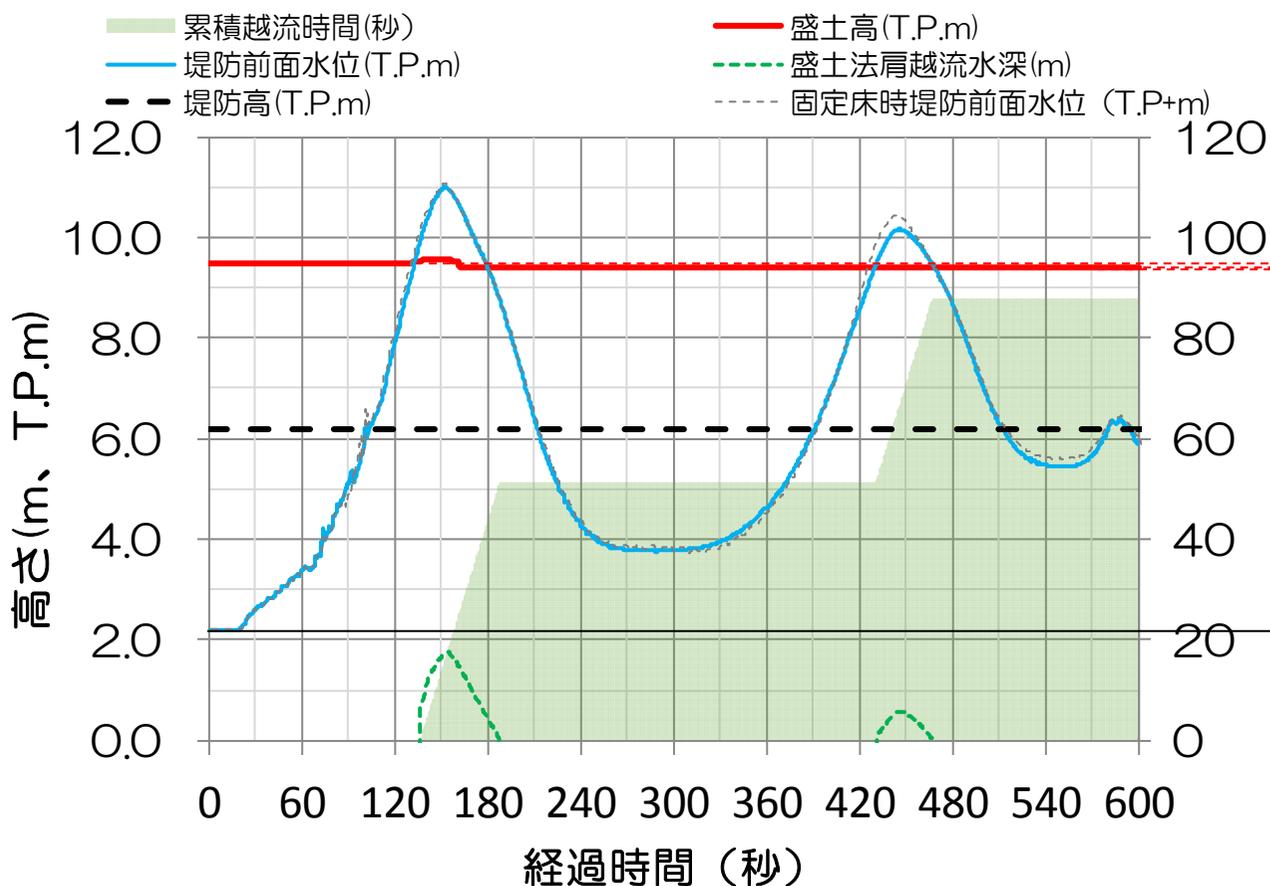
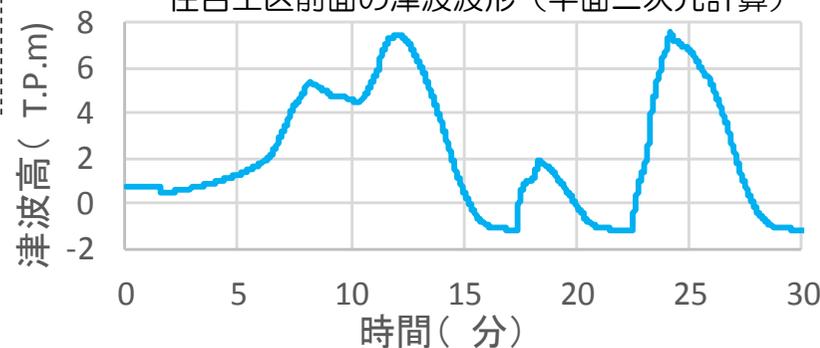
第1波：約50秒 + 第2波：約37秒 = 約87秒（約1.5分）

▶ 津波襲来後の盛土天端高は以下のとおりとなった。初期T.P.+9.5mに対して、第2波到達後もT.P.+9.4mの高さを維持できる結果となった。

第1波：T.P.+9.39m 第2波：T.P.+9.37m



住吉工区前面の津波波形（平面二次元計算）



## 2. 現地スケールへの適用と盛土効果の評価

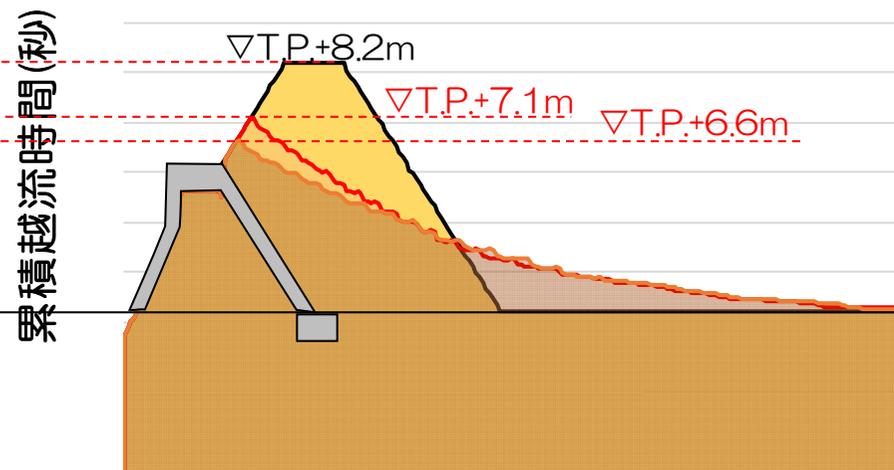
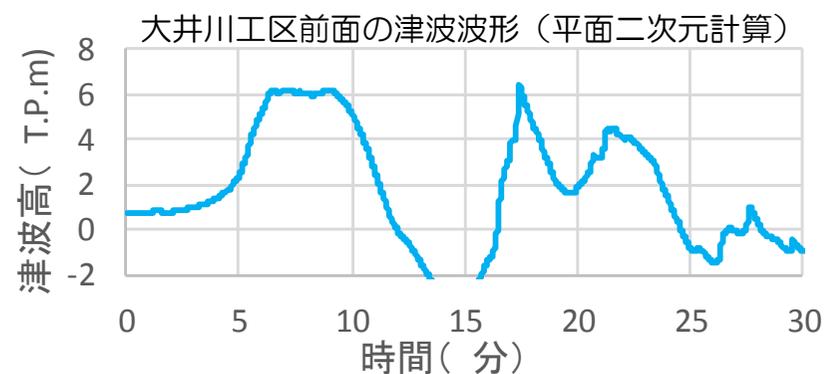
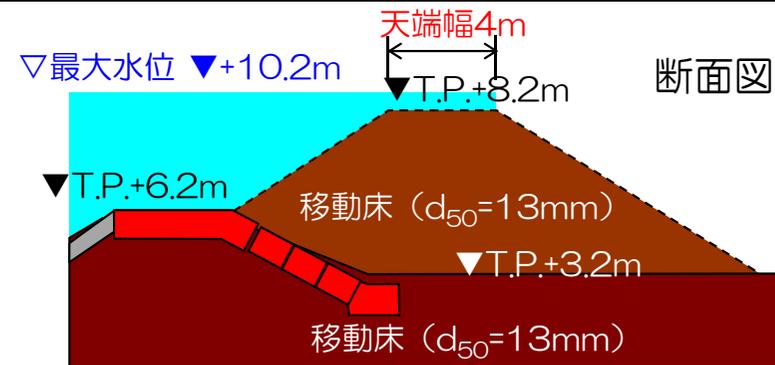
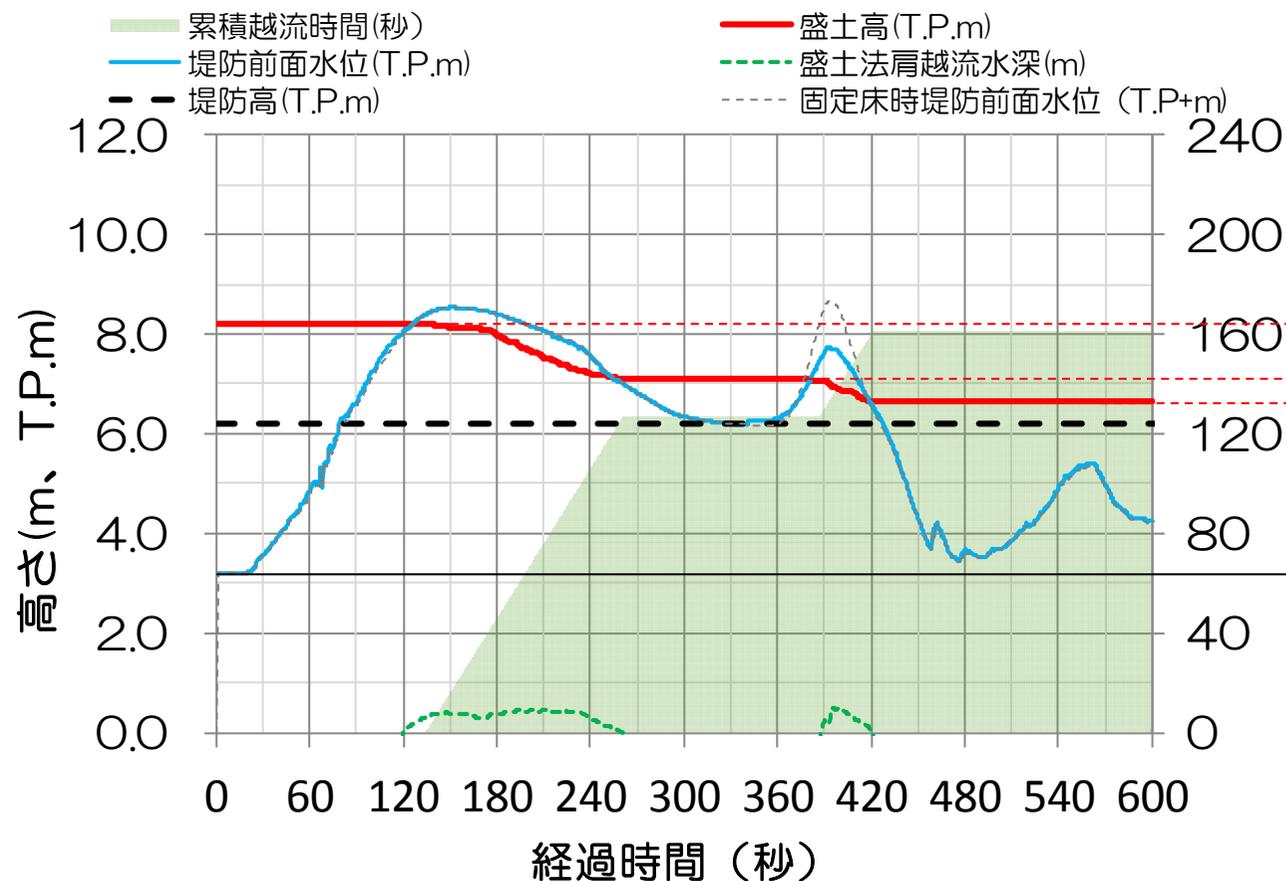
### (2) 大井川・焼津工区（盛土天端幅4m）

▶ 盛土の越流時間は盛土天端高が下がったことにより、平面二次元計算による最大越流時間を上回る結果となった。

第1波：約127秒 + 第2波：約35秒 = 約162秒（約2.7分）

▶ 津波襲来後の盛土天端高は以下のとおりとなった。初期T.P.+8.2mに対して、第2波到達後もT.P.+6.6mの高さを維持できる結果となった。

第1波：T.P.+7.1m 第2波：T.P.+6.6m



## 引用文献

- 文献① 『土木研究所資料 洪水流を受けた時の多自然型河岸防工・粘性土・植生の挙動-流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために- 平成9年1月』
- 文献② 『現地の樹木等を含む地盤供試体を用いた水理実験 原野ら 土木学会論文集B2（海岸工学）Vol.72, No. 2, 1687-1692, 2016.』
- 文献③ 『水理公式集 平成11年度版.』

## 侵食抑制効果試算の条件設定

### （1）侵食深の予測式

文献① P100～101より抜粋

その手始めとして、植生のどの部位が耐侵食性を発揮するのかを調べる必要がある。佐々木ほか<sup>9)</sup> および福岡ほか<sup>9)</sup> は、a) 葉や茎がある状況、b) それらを刈り取った状況、c) さらに地中の根が密生して存在する地層を取り除いた状況において侵食実験を行い、a) と b) では侵食深の経時変化に大差がなく、また c) では a)、b) に比較して侵食の進行が速いことを明らかにしている。これらの実験結果から、シバの耐侵食性を発揮する主要な部分は根であるとしている。侵食特性に関する研究としては福岡ほか<sup>10)</sup> の報告があり、シバが繁茂する地表面の侵食深の経時変化を測定し、一定流速が作用する状況での侵食深の経時変化が式(1)で近似的に表せることを示している。

$$z = A \log t + B$$

(1)

ここで、 $z$  は侵食深 (cm)、 $t$  は通水時間 (min)、 $A$ 、 $B$  は実験定数である。 $A$  は流速の線形関数になること、 $B$  は流速に無関係なある一定値とすることを提案している。

### 3. 植生による期待される侵食抑制効果試算の条件設定

#### (2) 実験定数Aの設定

文献① P151より抜粋

本研究では、線形近似を採用して、式(42)によって A と  $u_*$  の関係を表す。

$$A = \alpha(u_* - \beta)$$

(42)

ここで、 $u_*$  は単位を (m/s) とした摩擦速度である。また式(42)を式(37)と比較すると、 $\alpha$  は実験定数  $C_v$  を含み平均根毛量の大きさに伴って変化する変数であり、 $\beta$  は侵食面の限界掃流力  $\tau_c$  を摩擦速度に換算した値  $(\tau_c/\rho)^{0.5}$  (以下、限界摩擦速度と呼ぶ) である考えられる。

#### (3) 実験定数Bの設定

文献① P145～146より抜粋

したがって、 $B=0$  としても「許容侵食深まで侵食が進行する時間と掃流力（摩擦速度）の関係」の予測精度を著しく低減させ、かつ極端に安全側の評価に偏るものではないと判断される。以上より、式(38)において  $B=0$  とした式(40)によって、侵食深の経時変化を表すこととする。

#### (4) $\beta$ の設定

文献① P154より抜粋

信頼性

のある評価方法とするためには、現状では未知な現象によって大きく変動するパラメータに係する  $\beta$  を、現段階で考える安全側と判断できる値になるように設定しなければならない。 $\beta$  については、非粘性土で構成される地面で草刈りが行われた状態とするが安全側と判断できる状態である。そのような状態では  $\beta$  の値が非常に小さくなると思われる。したがって、粘性土の限界掃流力および上部層の掃流力低減効果を全く考慮しないとする場合に相当する  $\beta=0$  としても、植生の耐侵食性の評価方法としては適切であると判断される。

### 3. 植生による期待される侵食抑制効果試算の条件設定

#### (5) 摩擦速度 $u_*$ の設定 文献②より

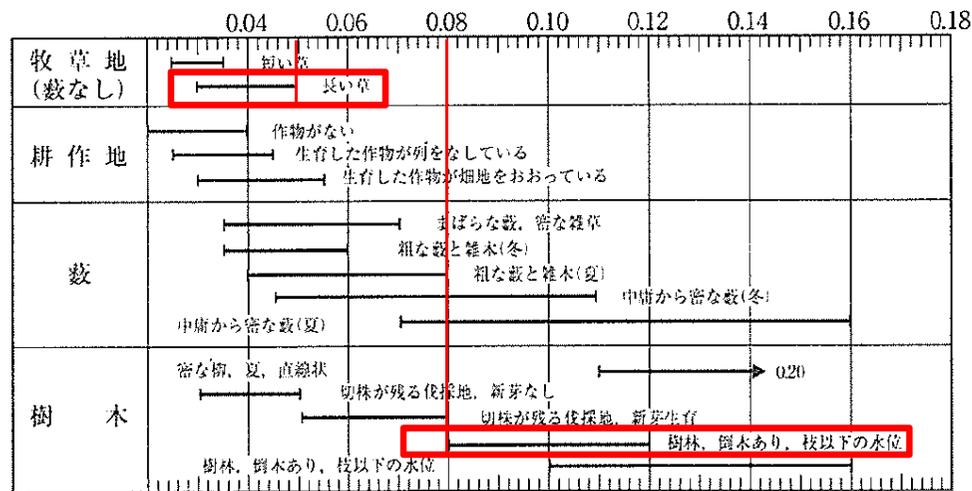
つぎに摩擦速度を求める。摩擦速度 $u_*$ は式(3)を用いて、水深 $D$ 、流速 $U$ 、粗度係数 $n$ 、重力加速度 $g$ から算出する。このとき、流速及び水深は、ピーク時の値を用いた。ピーク時の流速、全水深は各供試体同じであるため、摩擦速度はすべて同じであるとした。

$$u_* = \sqrt{gn^2U^2/D^{1/3}} \quad (3)$$

#### (6) 粗度係数 $n$ の設定 文献③ P89より

Manningの粗度係数の概略値のうち、高水敷の値を引用する

- 盛土上に【芝】を想定した場合・・・0.05 牧草地（長い草）
- 盛土上に【樹木】を想定した場合・・・0.08 樹木、枝以下の水位



(e) 高水敷

#### (7) 水深 $D$ 及び流速 $U$ の設定

洗掘シミュレーションより得られた数値を用いる

### 3. 植生による期待される侵食抑制効果試算の条件設定

#### (8) $\alpha$ (根毛量の大きさに伴って変化する変数)

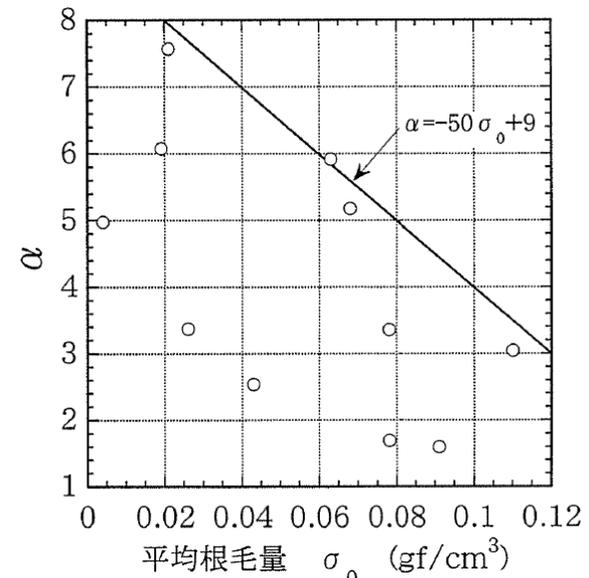
##### ▶ 盛土上に【芝】を想定した場合・・・9.0

文献①で提案されている式において、根毛量が非常に少なく最も侵食速度が危険側となる係数として設定した。

文献① P154より抜粋

意味するものである。耐侵食性の評価方法が安全側になるように、図-35に示した  $\alpha$  の上限値を表す直線から、 $\alpha$  と  $\sigma_0$  の関係を式(44)のように提案する。

$$\alpha = -50\sigma_0 + 9 \quad (44)$$



##### ▶ 盛土上に【樹木】を想定した場合・・・36.0

文献②の調査結果より、根毛量が非常に少なく最も侵食速度が危険側となる係数として設定した。

木の根の侵食の抑制効果を、 $\alpha$  と根毛量( $g/cm^3$ )の散布図の包絡線を用いて評価する。包絡線は、出雲(1)と出雲(2)を用いる場合と出雲(2)と出雲(3)を用いる場合の2通り引くことができる。本稿においては、実験の供試体数が限られていることなどを考慮し、暫定的な包絡線として2通りの包絡線を引くこととした。なお根毛量は、侵食限界までの重量を体積 ( $50cm \times 50cm \times 20cm$ ) で除して求めた。表-2に関係式を求めるために用いた値を記す。

根毛量調査の結果から求めた侵食限界を用いると、 $\alpha$  は最大で26程度から、36程度となった(図-6)。一方、水理実験から求めた侵食限界を用いると $\alpha$  は最大24程度から34程度となることがわかった(図-7)。

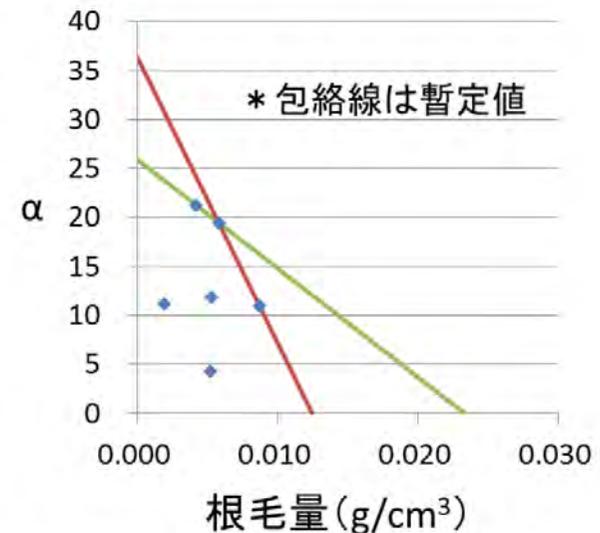


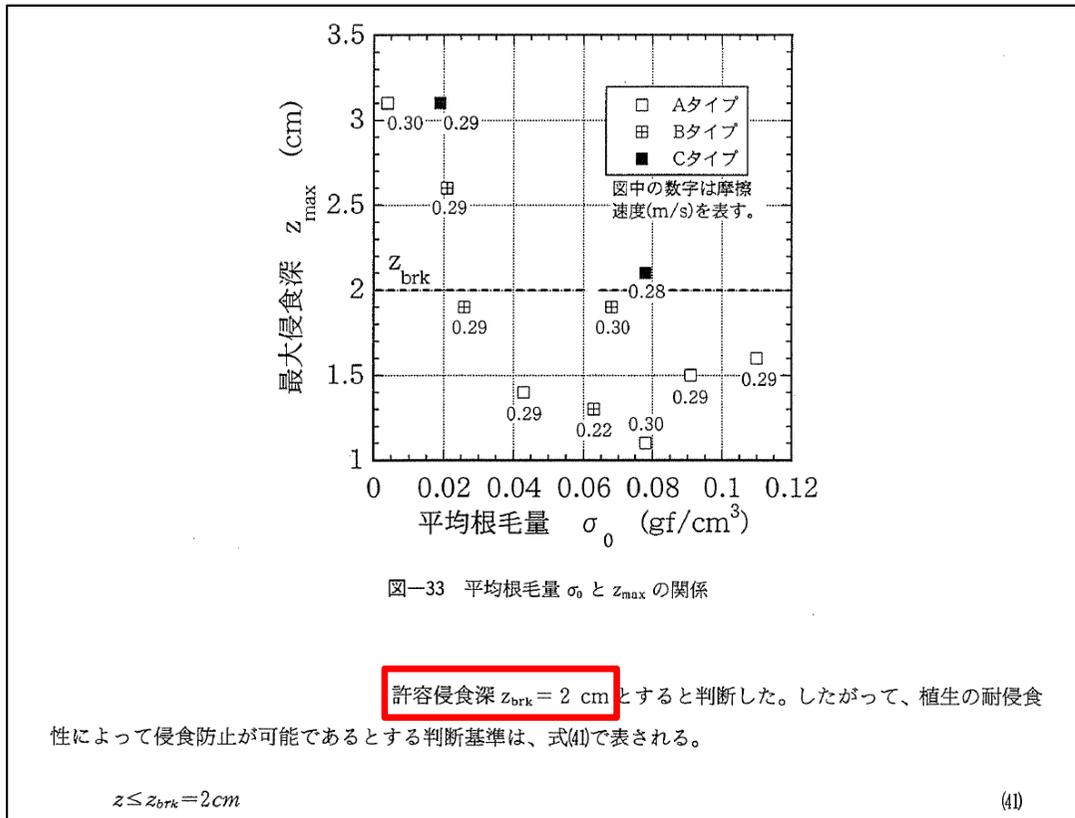
図-6  $\alpha$  と根毛量の関係 (根毛量調査の結果より算出)

文献②より抜粋

# 3. 植生による期待される侵食抑制効果試算の条件設定

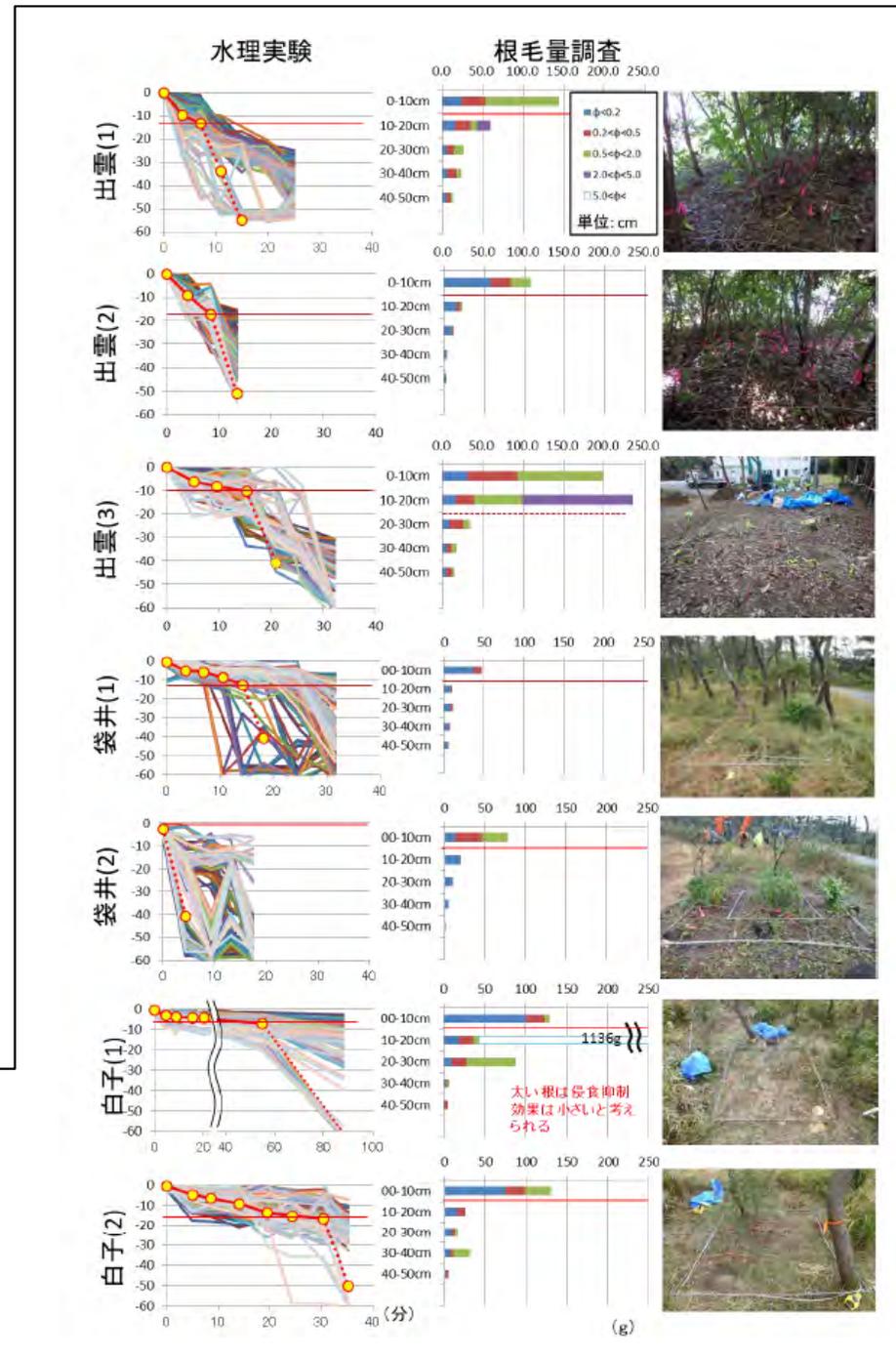
## (9) 限界侵食深の設定

➤ 盛土上に【芝】を想定した場合・・・2cm  
 文献①P150による調査結果より設定した。



➤ 盛土上に【樹木】を想定した場合・・・10cm  
 文献②の調査結果より、許容量が少なく危険側となる数値を設定した。

水理実験の結果と根毛量調査の結果から、侵食限界を推定する(図-5 図中赤線)。なお、侵食深を測定した時間を黄色い丸で表している。侵食限界は、各格子の侵食限界から判断し定めた。各供試体の侵食限界についてはおおむね10cm~20cmだと考えられた。



# 4. 樹木の倒伏限界試算の条件設定

## 引用文献

文献① 『森林保全・管理技術研究会：津波と海岸林に関する調査研究事業（平成22年度調査報告書）.』

## 樹木の倒伏限界試算の条件設定

### (1) 樹木の倒伏限界

樹木の倒伏限界は文献①より以下の式で判定する。

『 流体力モーメント > 倒伏限界 』 のとき倒伏

$$\text{流体力モーメント } M = 1/2 \rho C_D D_m h u^2 L$$

$\rho$  : 水の密度 (1.03g/cm<sup>3</sup>)、 $C_D$  : 抗力係数 (1.2)、 $D_m$  : 胸高直径 (cm)、

$h$  : 水深 (m)、 $u$  : 流速値 (m/s)、 $L$  : モーメント作用点 ( $h/2m$ )

( $h$ 、 $u$ については洗掘シミュレーションの結果を用いた)

### (2) 倒伏限界

倒伏限界は『平成26年度駿河海岸焼津工区養浜工事』において実施された引き倒し試験結果とする。

なお、参考として文献①で提案されている以下の式による曲線を右図に追記した。

$$\text{倒伏限界 } M_c = 0.0039 D_m^3$$

$D_m$  : 胸高直径 (cm)

