

# 河川堤防の液状化対策の効果の検証と 高度化に向けた取り組み

---

独立行政法人土木研究所  
地質・地盤研究グループ  
佐々木哲也

# 内容

---

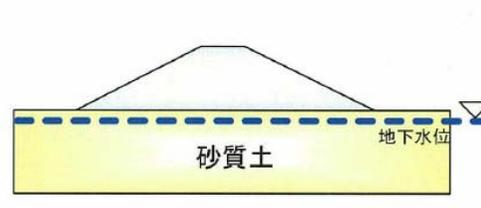
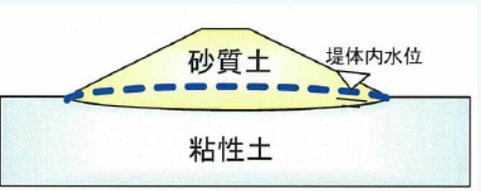
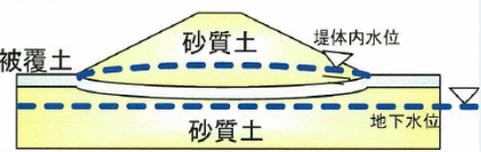
1. 東日本大震災における河川堤防被害の概要
2. 東日本大震災における液状化対策工の効果
3. 堤体液状化の評価と対策工法の検討
4. 河川堤防の耐震性照査手法の高度化
5. まとめと今後の課題

# 1. 東日本大震災における河川堤防被害の概要

---

# 河川堤防の被災パターン

東北地整管内, 関東地整管内で広域にわたって2,000箇所以上で被害が発生  
地震動による堤防の大規模な被害の原因は液状化

被災要因	堤体土構成	被災メカニズム
基礎地盤の液状化	 <p>砂質土 地下水位</p>	基礎地盤の液状化
堤体の部分液状化	 <p>砂質土 粘性土 堤体内水位</p>	基礎地盤の圧密沈下により地下水位以下の堤体が液状化
上記の複合	 <p>被覆土 砂質土 粘性土 砂質土 堤体内水位 地下水位</p>	堤体, 基礎地盤とも砂質土で両者が液状化

- ・基礎地盤の液状化による被災に加え, 堤体の液状化による被災も多発
- ・堤体の液状化による被災は, これまで堤防被災として主眼が置かれていなかった被災

# 堤体の液状化による被害事例－阿武隈川・枝野－



天端の状況



川裏側のり尻付近



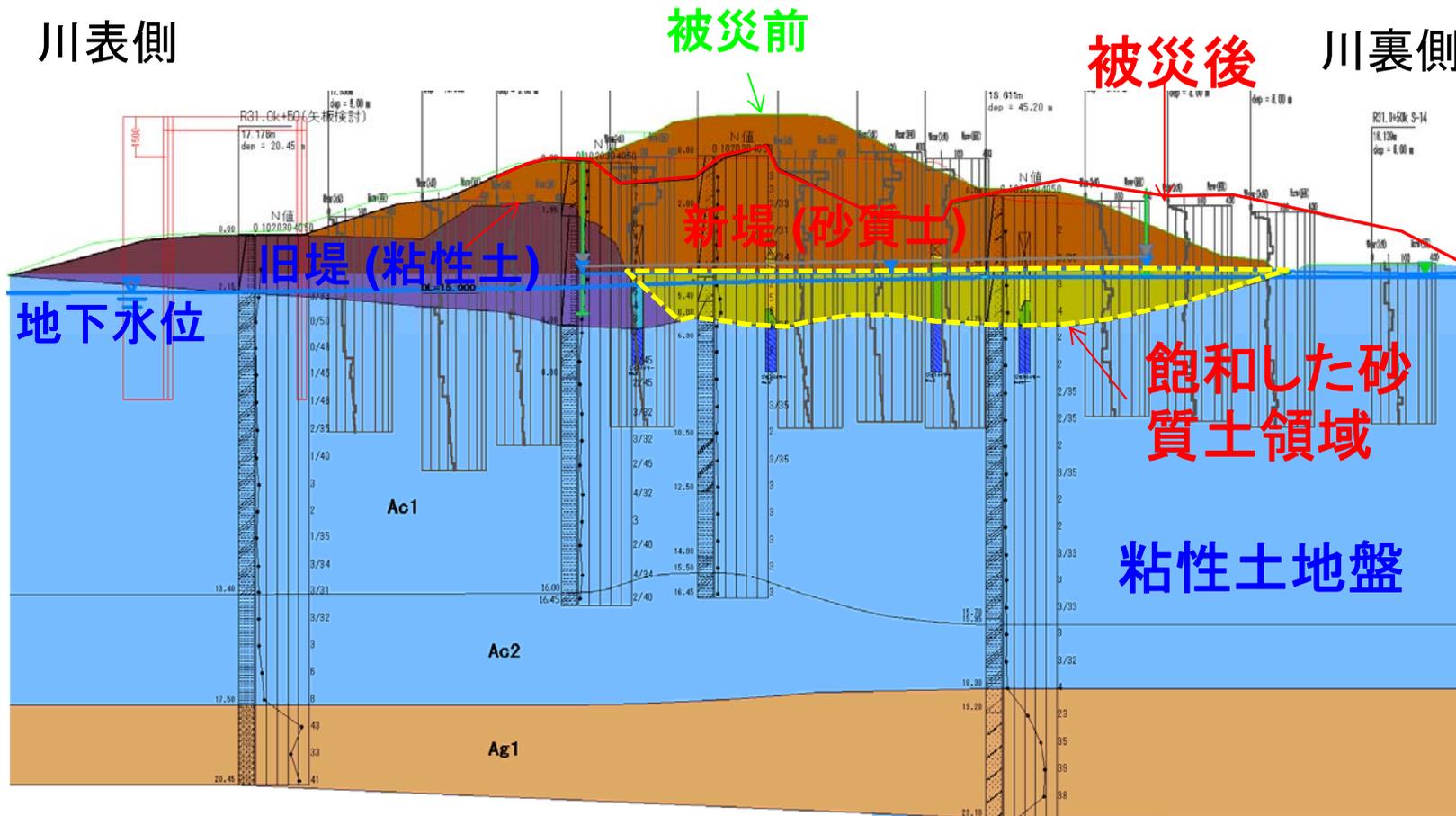
堤体の亀裂内の  
の噴砂

- 約800mにわたって天端が陥没. 沈下量は最大で2m程度.
- 川裏側の耕作地を崩壊した堤体土が覆う
- 堤体の亀裂内, 川裏側崩土先端に噴砂痕

# 堤体の液状化による被害事例－阿武隈川・枝野－

図：東北地方整備局

ボーリング・サウンディング結果

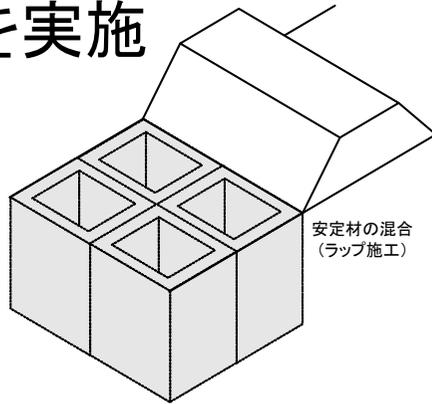


## 2. 東日本大震災における 液状化対策工の効果

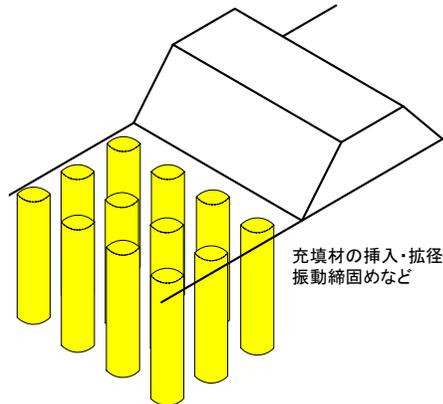
---

# 基礎地盤を対象とした主な液状化対策工

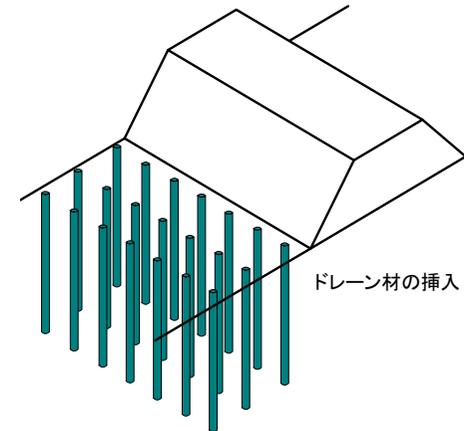
・1995年兵庫県南部地震以降、基礎地盤を対象とした液状化対策を実施



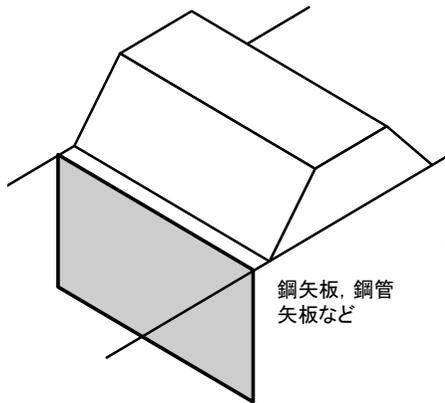
a) 固結工法



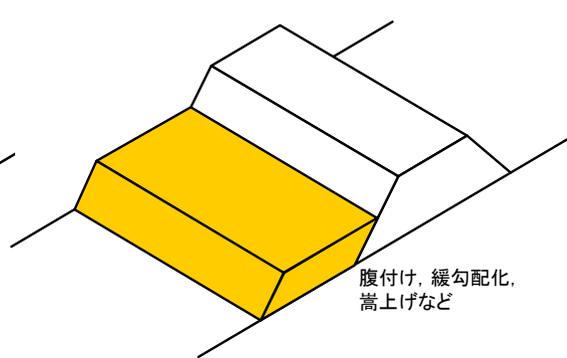
b) 締固め工法



c) ドレーン工法



d) 鋼材を用いた工法



e) 押え盛土、のり面の緩勾配化等

「河川堤防の液状化対策工設計施工マニュアル(案)」

(土木研究所1997)

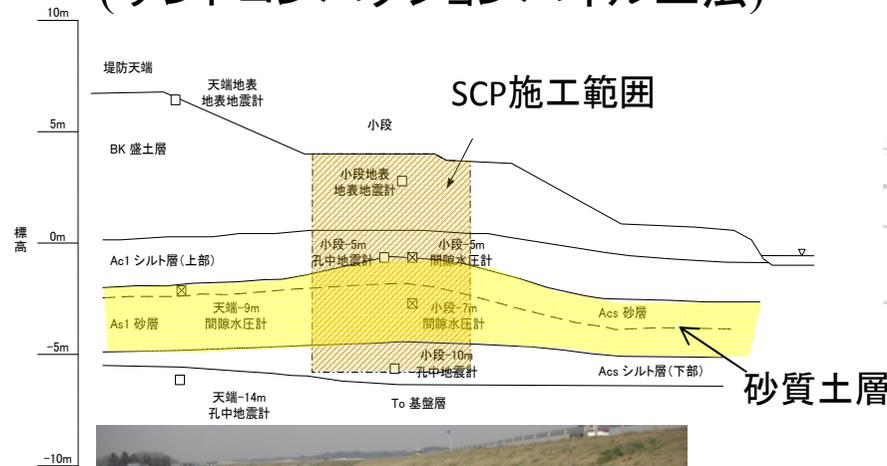
・地震動: レベル1地震動  
・照査手法: 震度法等により以下を照査

- ①円弧すべり安全率
- ②改良体内の液状化の抑止
- ③改良範囲の安定性

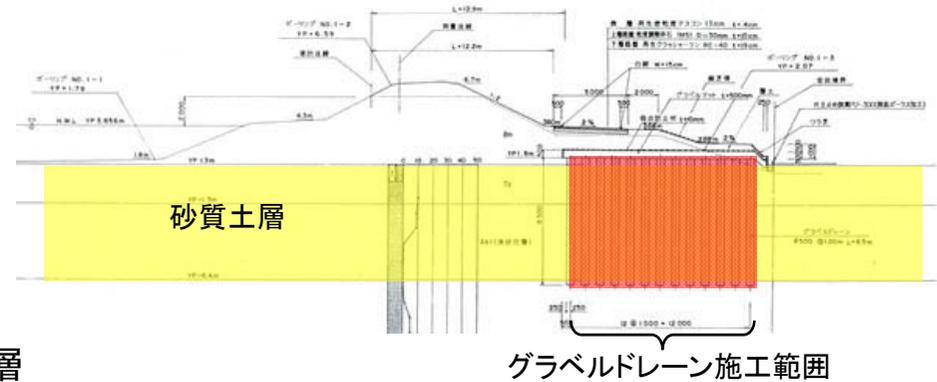
etc...

# 東日本大震災における耐震対策区間の状況

事例① 鳴瀬川右岸0.0k付近  
(サンドコンパクションパイル工法)

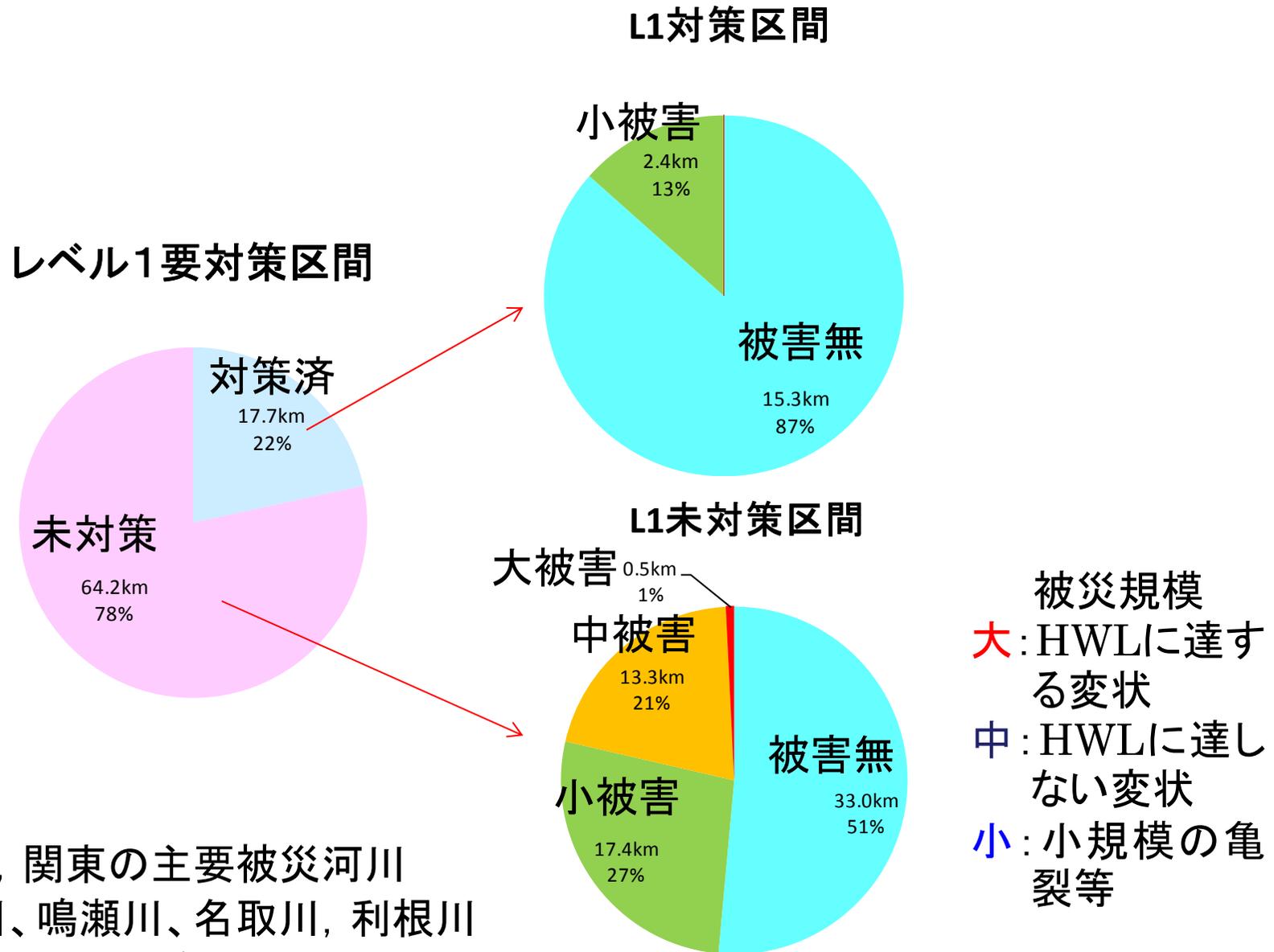


事例② 利根川右岸27.8k付近  
(グラベルドレーン工法)



- ・ L1地震動を考慮して設計された耐震対策区間には、地震動による沈下・変形の痕跡は認められず。

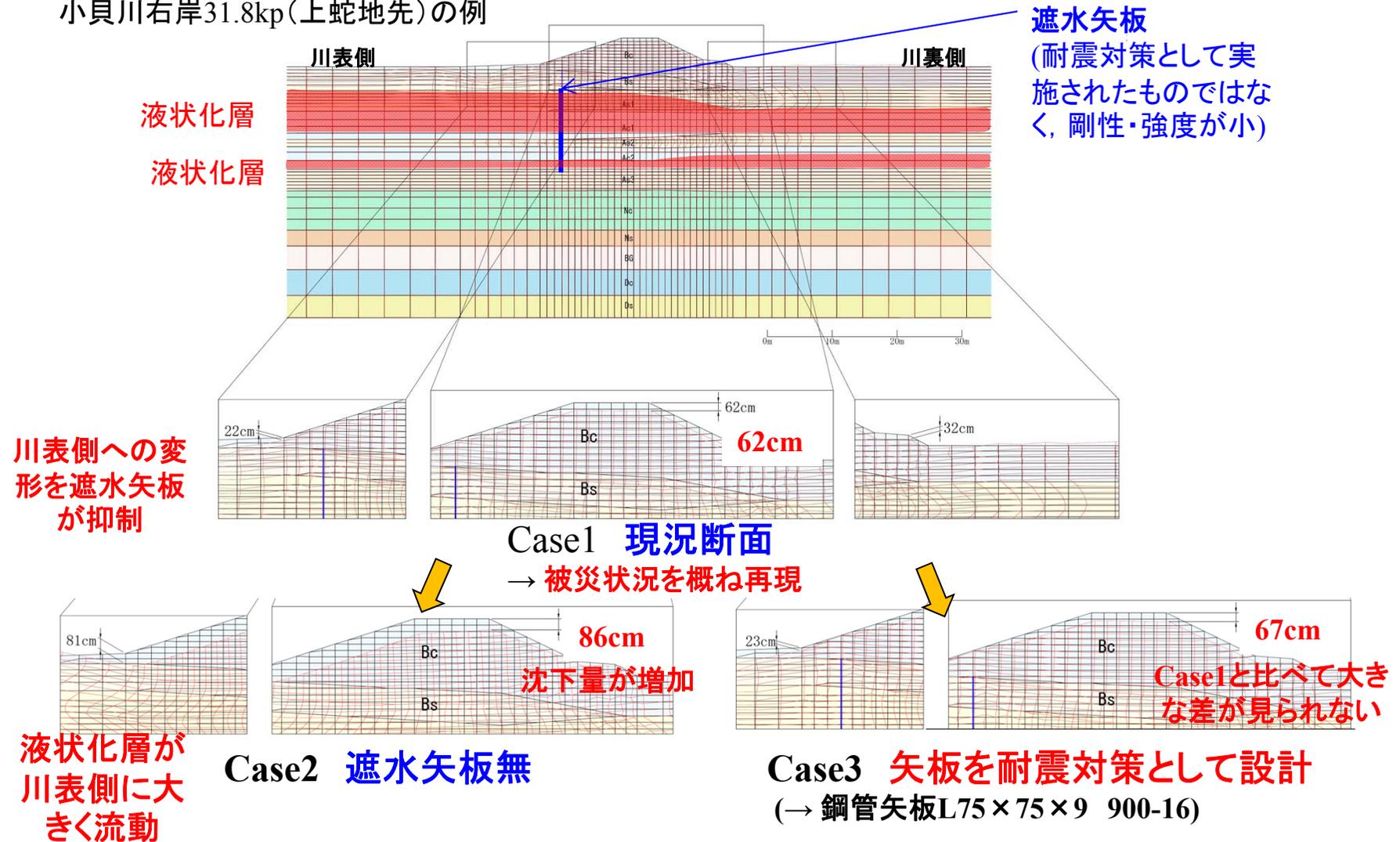
# 基礎地盤に対する液状化対策工の効果



対象: 東北, 関東の主要被災河川  
(北上川、鳴瀬川、名取川、利根川  
下流、江戸川、那珂川、小貝川、  
霞ヶ浦)

# 動的有効応力解析による検証

小貝川右岸31.8kp(上蛇地先)の例

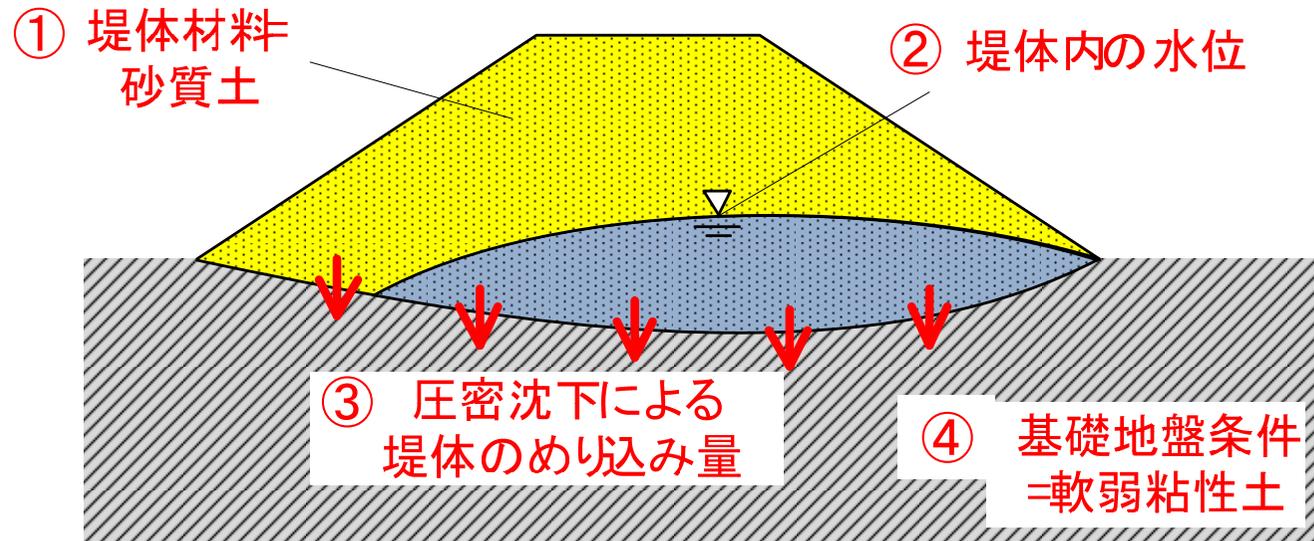


- ・ 遮水矢板やL1対策であっても堤防の変形を抑制する効果が認められた。

河川堤防の耐震対策マニュアル(暫定版)(2012年2月)への反映

### 3. 堤体液状化の評価と対策工法の検討

# 堤体の液状化による被害の主要要因



## ①堤体材料＝砂質土

堤体の液状化が原因と推定される大規模被災箇所での堤体材料としては、細粒分が少なく低塑性のものが多い傾向にある。

## ②堤体内の水位

堤体内の水位が高く、飽和した堤体の範囲が広いほど大きな変形が生じやすいと考えられる。

被災区間と隣接する無被災区間で堤体内水位の顕著な差が認められた箇所も存在した。

## ③圧密沈下による堤体のめり込み量

めり込みにより、飽和しやすい堤体の領域が増える。また、めり込みに伴う堤体の側方伸張変形により、密度の低下や拘束力の低下(ゆるみ)が生じ、より液状化しやすく変形しやすい状態となっている可能性もある。

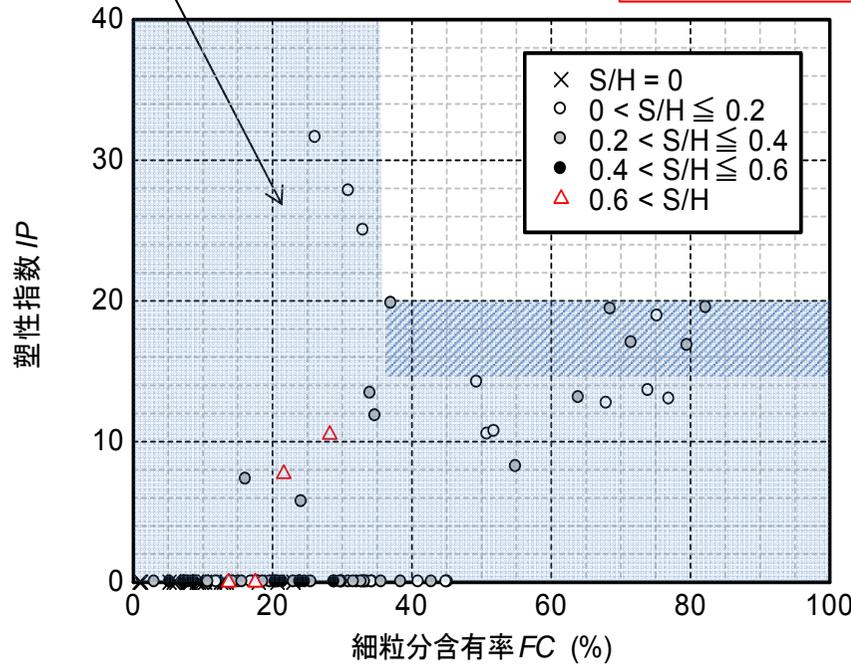
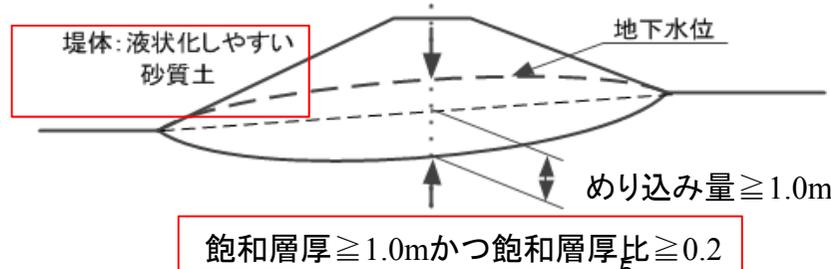
## ④基礎地盤条件＝軟弱粘性土

雨水等による浸透水が滞留しやすい。また、圧密沈下による堤体のめり込み量が大きくなりやすい地盤条件。

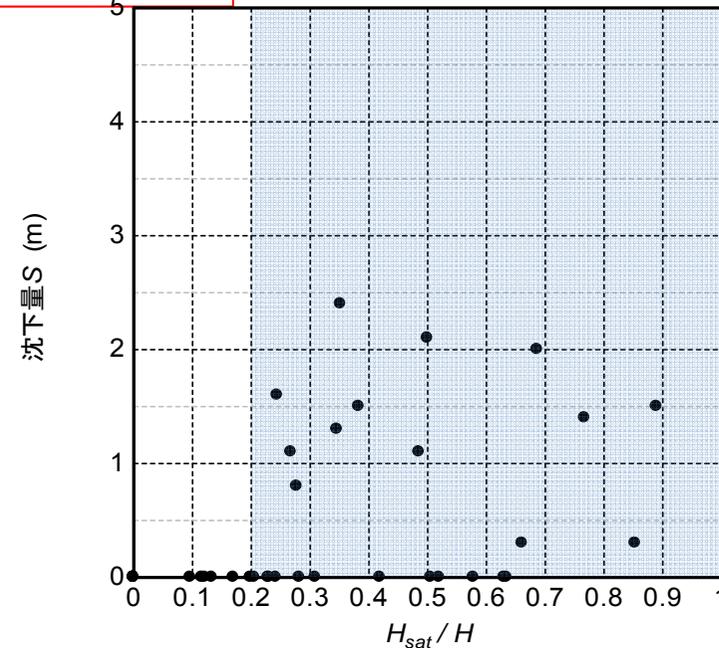
# 堤体の液状化の可能性の判定(盛土材料とめり込み量)

東北地方太平洋沖地震による河川堤防の大規模被災箇所のうち、堤体の液状化が一因と考えられる直轄河川堤防とその近傍の無被災箇所について整理

液状化判定の対象となる  
 $FC < 35\%$   
 あるいは  $FC > 35\%$ かつ  
 $I_p < 15$ の範囲



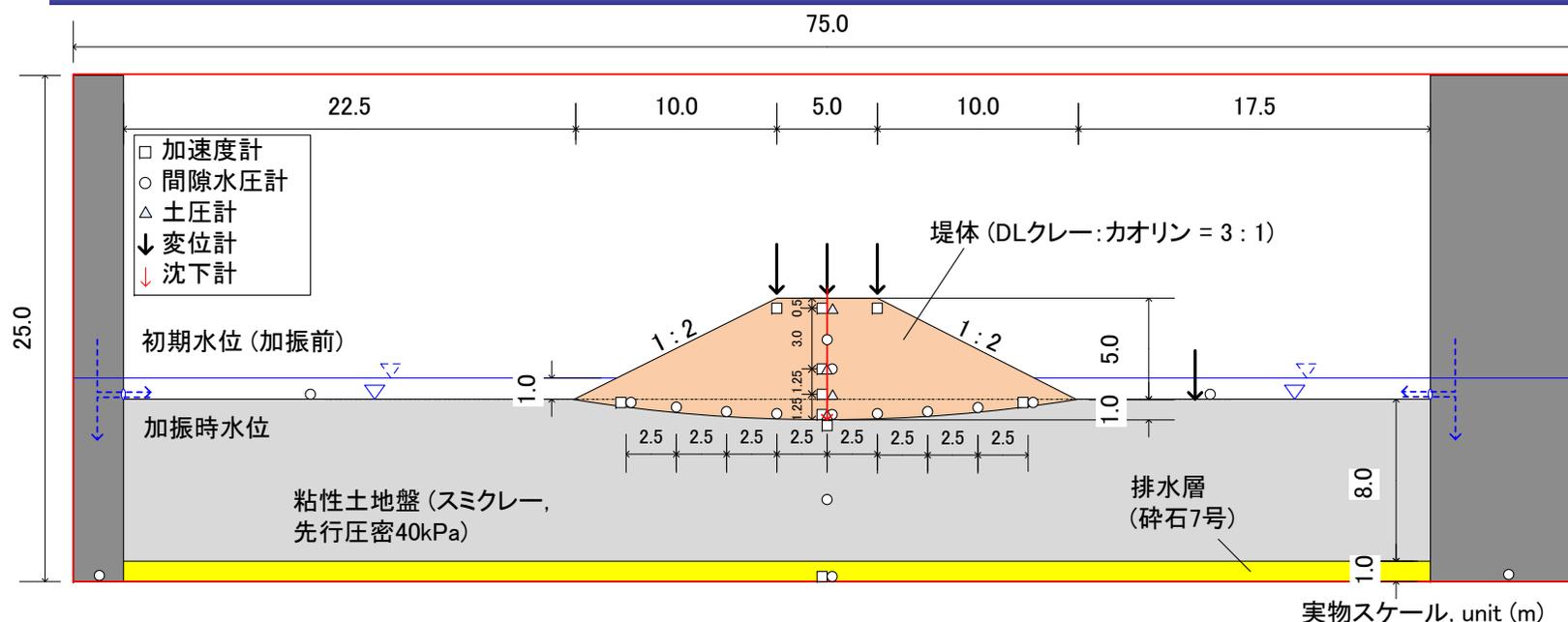
堤体土の土質



堤体内の飽和層厚比 ( $H_{sat}/H$ )

「レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル」, 2012年2月に反映

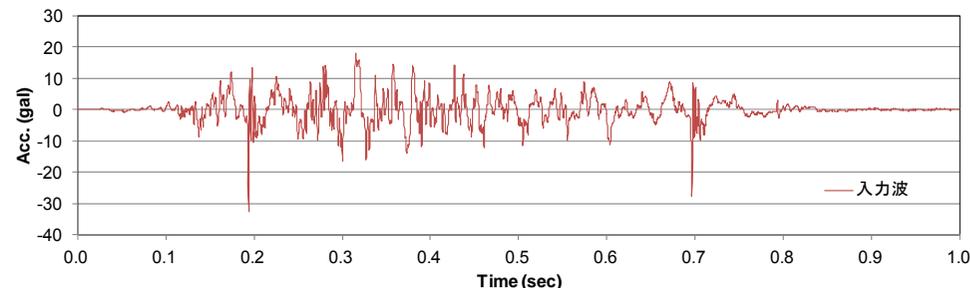
# 堤体内液状化に関する実験



- 堤体の密度やのり尻の安定化に着目した検討を実施.
- 遠心加速度: 50G
- 入力波: 道路橋示方書標準波形 (タイプI, II種地盤, 板島橋TR)
- 40kPaで圧密した粘性土地盤 (スミクレー粘土) を凹状に1.0m掘り込み, その上に堤体模型を設置.
- 堤体密度の影響に関する検討では, DLクレーとカオリンを3:1の割合で混合した材料を用い, Dcを85, 90%に設定.

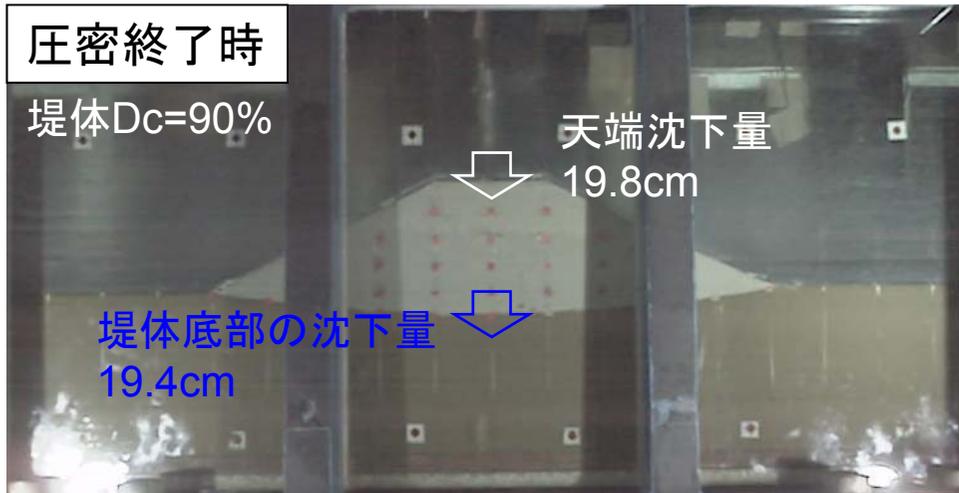
堤体材料の材料特性 (密度検討)

	Dc=85%	Dc=90%
IP	7.5	
液状化強度比RL ( $\sigma'_c=50$ kPa)	0.136	0.141



入力波

# 軟弱粘性土層の圧密に伴う堤体密度の変化

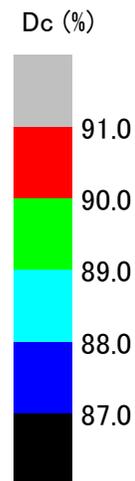
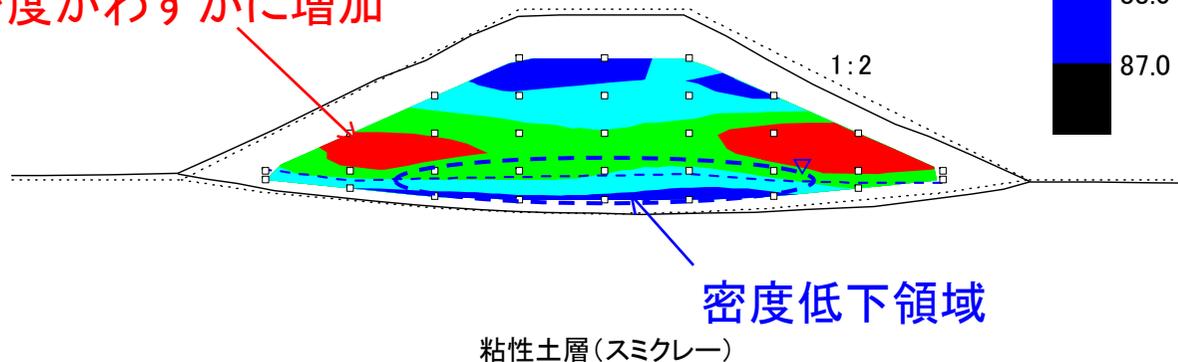


- 軟弱粘性土層(スミクレー)先行圧密:  
40kPa
- 堤体荷重による有効上載荷圧:90kPa  
→堤体下部の粘土地盤では圧密進行

## 圧密終了時の堤体内の密度分布

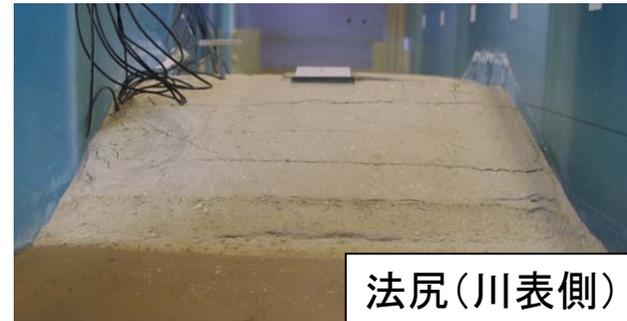
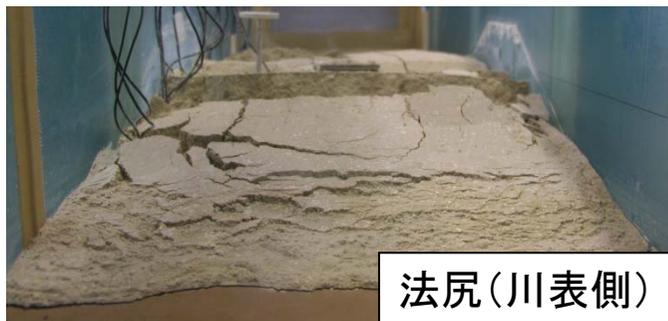
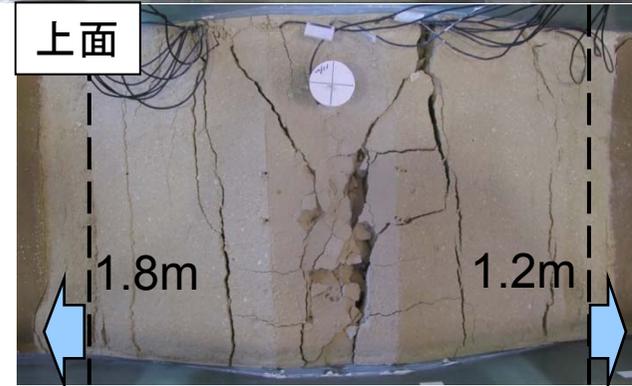
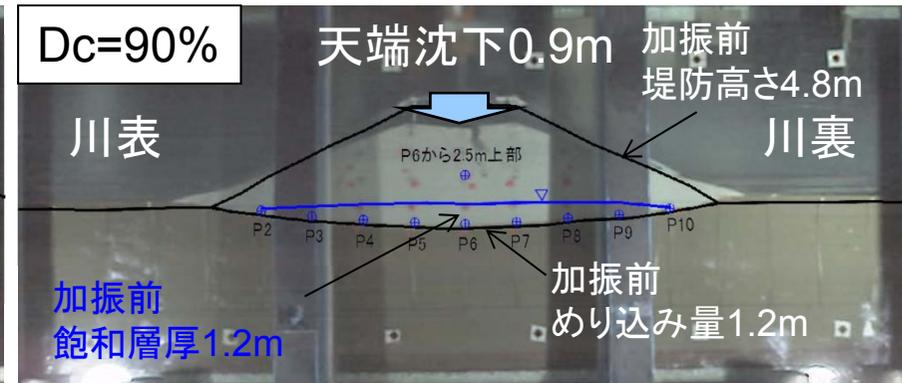
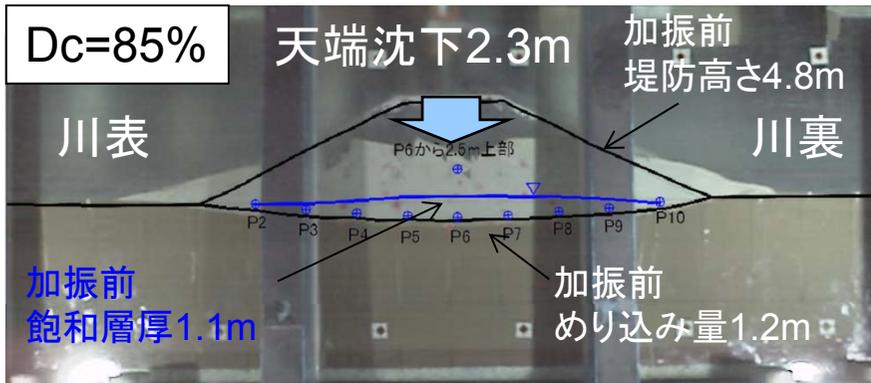
初期密度Dc=90%

密度がわずかに増加



- 加振を行わずに堤体内の密度分布を確認.
- 堤体下部粘土地盤の圧密進行に伴って, 堤体底部ではDcが2%程度低下  
→圧密沈下に伴う堤体底部のゆるみを確認

# 地震時変形に対する堤体密度の影響



•堤体の締固め度Dcを上昇させることで、天端沈下、法尻水平変位は半分以下に低減→土木工事共通仕様書の改定(2013年3月)に反映。

# 土木工事共通仕様書 品質管理基準(案)(2013年3月改定)への反映

品質管理基準(案)を以下の通り変更

## 【変更前】

工 種: 18 河川・海岸土工

種 別: 施工

試験区分: 必須

試験項目: 現場密度の測定

規格値:

最大乾燥密度の85%以上。又は設計図書に示された値。

試験基準:

築堤は、1,000m<sup>3</sup>に1回の割合、または堤体延長20mに3回の割合の内、測定頻度の高い方で実施する。



## 【変更後】

工 種: 18 河川土工

種 別: 施工

試験区分: 必須

試験項目: 現場密度の測定

規格値:

最大乾燥密度の90%以上。

ただし、上記により難しい場合は、飽和度または空気間隙率の規定によることができる。

【砂質土[SF]( $25\% \leq 75 \mu\text{m}$ ふるい通過分 $< 50\%$ )】

空気間隙率 $V_a$ が $V_a \leq 15\%$

【粘性土F】

飽和度 $S_r$ が $85\% \leq S_r \leq 95\%$ または空気間隙率 $V_a$ が $2\% \leq V_a \leq 10\%$

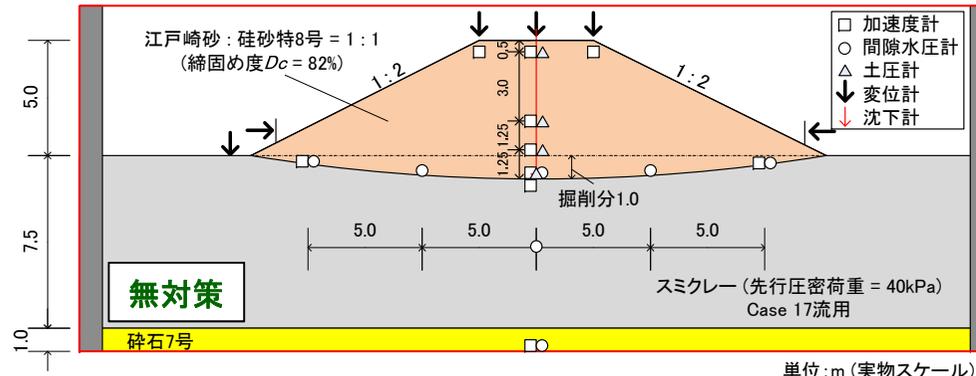
または、設計図書による。

試験基準:

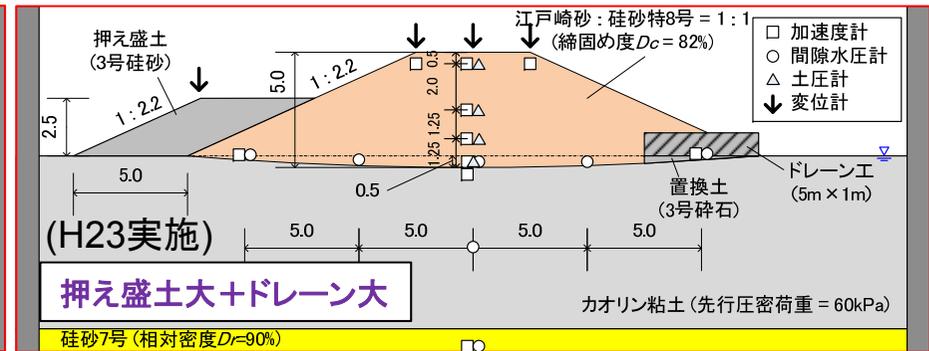
築堤は、1,000m<sup>3</sup>につき1回の割合、または堤体延長20mに3回の割合の内、測定頻度の高い方で実施する。

1回の試験につき3孔で測定し、3孔の平均値で判定を行う。

# 押え盛土・ドレーンの効果の検証



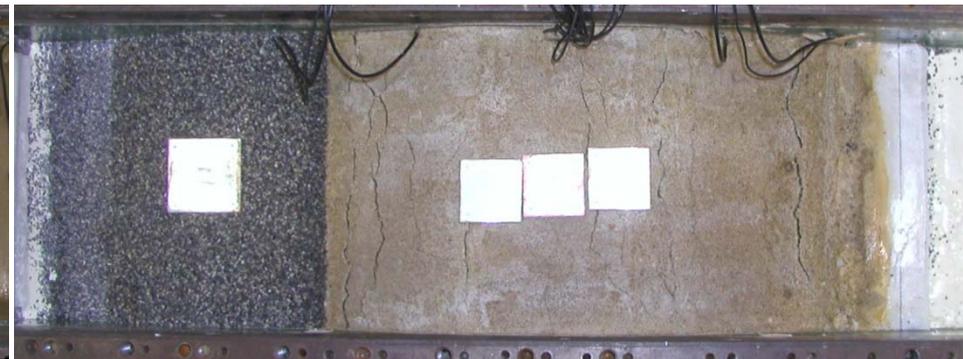
単位:m (実物スケール)



単位:m (実物スケール)



天端沈下0.75m



天端沈下0.50m

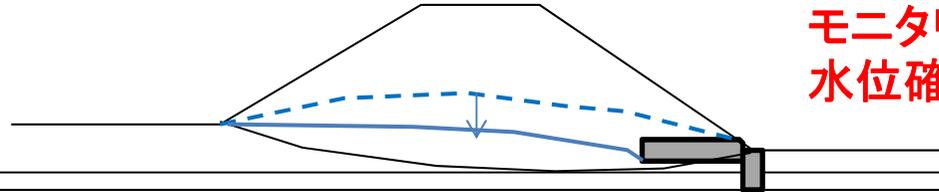
- 規模の大きいドレーン工や押え盛土を施すと、沈下量を抑えることが可能。
- 縦断亀裂の発生も大幅に抑制。

# 堤体液状化の対策の当面の考え方

## 地下水位低下工法(裏のり尻にドレーン工を設置)

堤体内水位を低下させ堤体内の液状化する範囲を減じる。  
浸透流解析等により目標とする地下水位となる形状寸法等を設定

モニタリングによる  
水位確認が必要

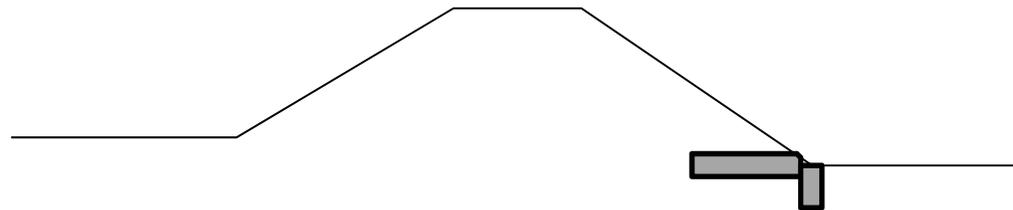


## のり尻安定化工法

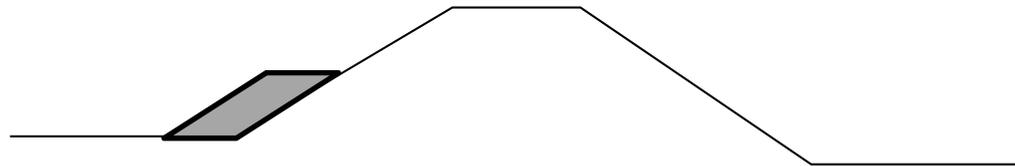
のり尻付近の堤体の液状化に伴う強度低下をきっかけとして堤防が変状し始めるため、のり尻付近の安定化を図る工法。

模型実験の結果等を踏まえて形状寸法を規定

その1(裏のり尻にドレーン工を設置)



その2(主に表のり尻に、押え盛土工を設置)



河川堤防の耐震対策マニュアル(暫定版)(2012年2月)  
に反映

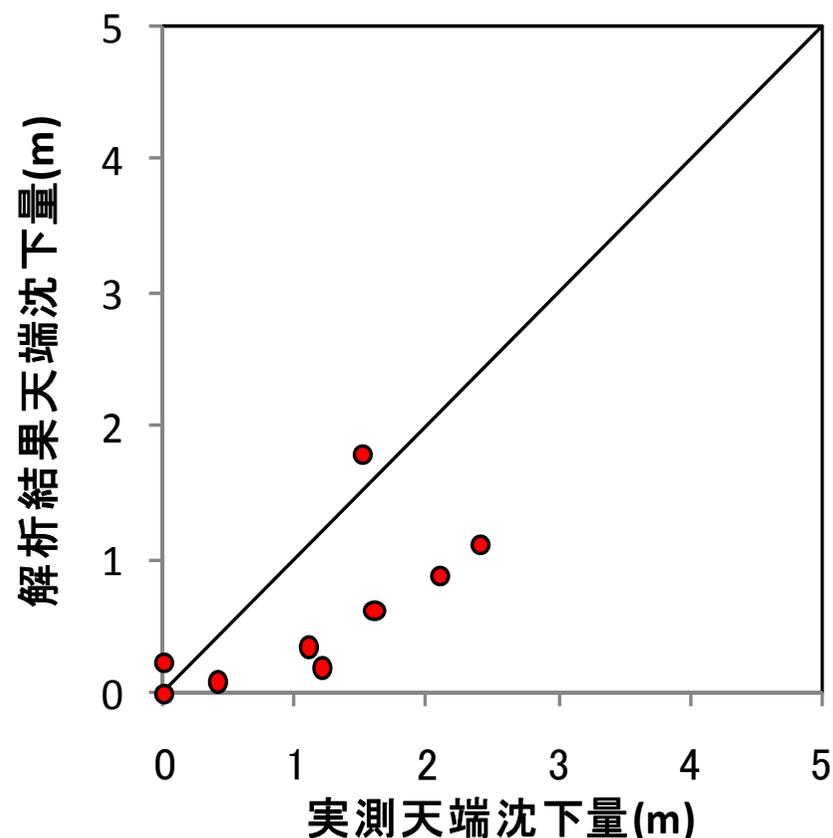
## 4. 河川堤防の耐震性照査手法の高度化

---

# 堤体液状化に対する解析(ALID)の適用性の検証

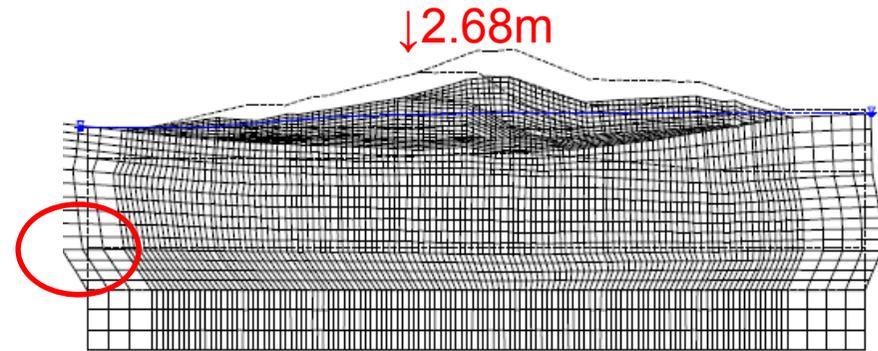
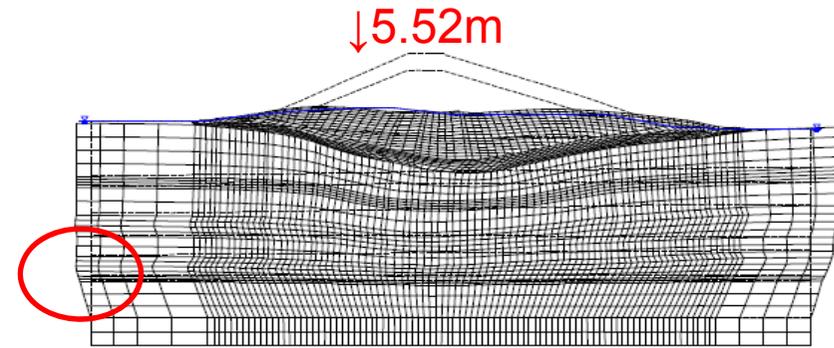
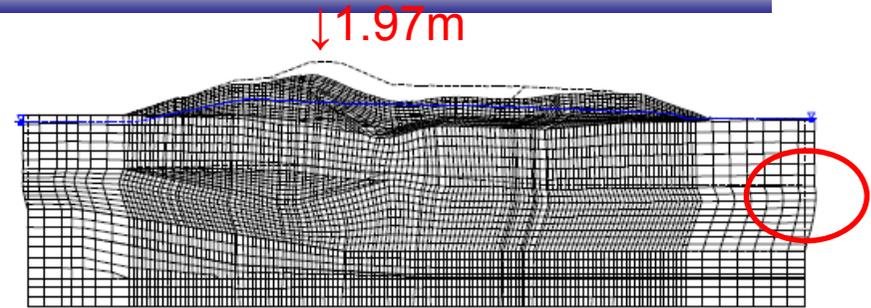
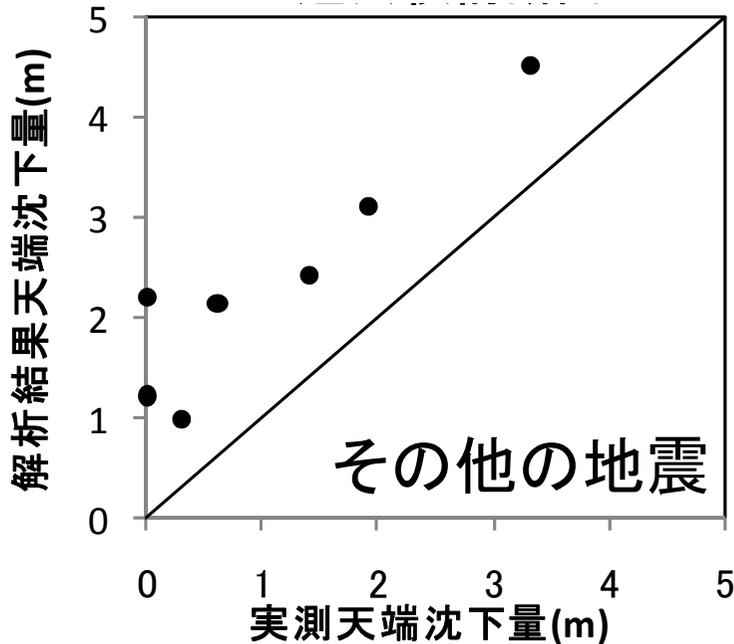
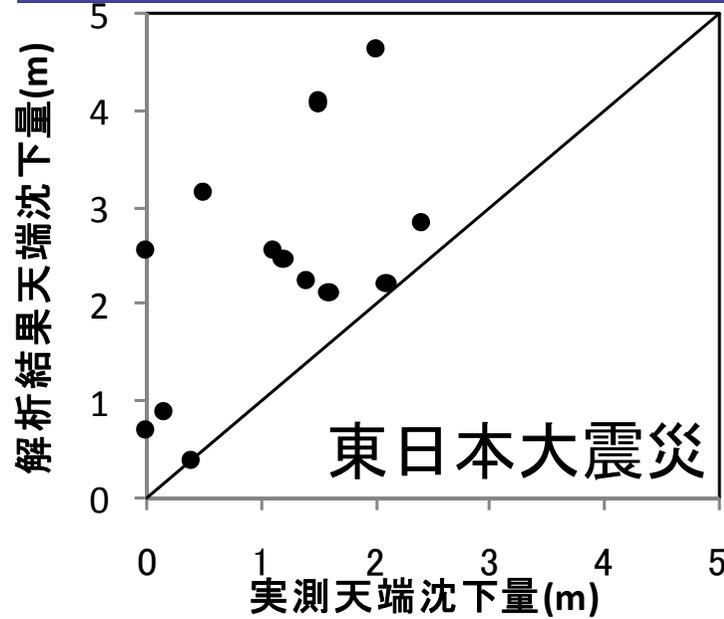
東日本大震災において堤体の液状化により被災したと考えられる以下の9断面について解析

No.	河川名	地先名	距離標	堤防高さ (m)	沈下量 (m)	PGA (gal)
No.1	阿武隈川	坂津田	R22.5k+70	4.8	2.4	460
No.2	阿武隈川	枝野	R31.0k+50	5.6	2.1	532
No.3	久慈	本米崎	R7.0k+140	4.5	1.6	795
No.4	江合川	上谷地	L14.4k	3.5	1.2	439
No.5	阿武隈川	小斉	R32.9k+70	4.7	1.1	575
No.6	久慈	本米崎	R7.0k+100	4.7	0.4	795
No.7	新江合川	楡木	R2.84k	5.9	1.5	503
No.8	阿武隈川	小斉	R32.8k	5.4	0	593
No.9	江戸	西関宿	R57.7k+15	9.8	0	221



堤体液状化については危険側に評価

# 基礎地盤の液状化に対する解析(ALID)の適用性の検証

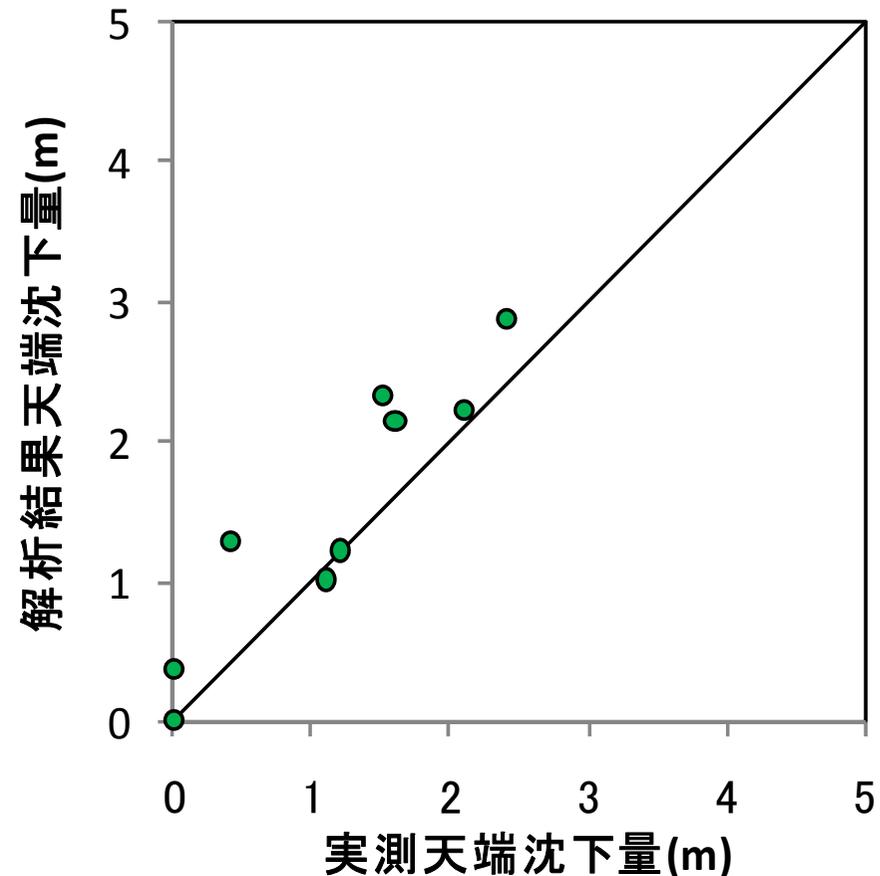


堤体の液状化が原因で沈下したと考えられる箇所の解析結果

深い液状化層の変形が大きく影響  
安全側すぎる評価

# 堤体液状化に対する解析手法の改善

- ・地下水位は地震後のボーリング調査で確認された水位であり、地震時の水位と一致するとは限らない。
  - ・堤体内水位は天候や季節変動の影響を受ける。
  - ・地下水位より上の一定範囲の堤体土はサクションにより地震前から飽和度が高い状態にあったと考えられる。
- 地下水位を全て50cm上げる

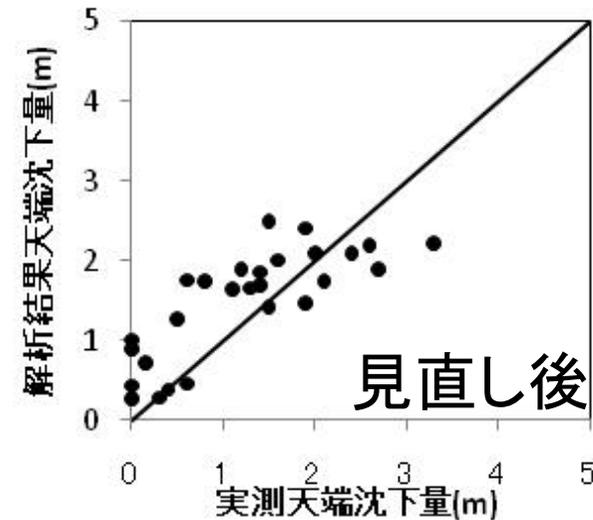
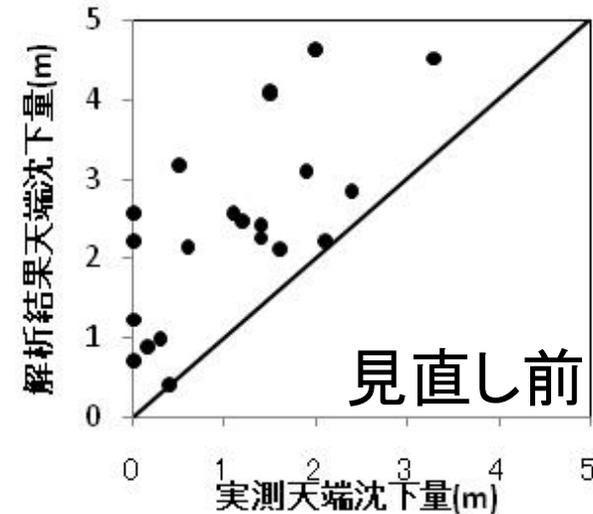
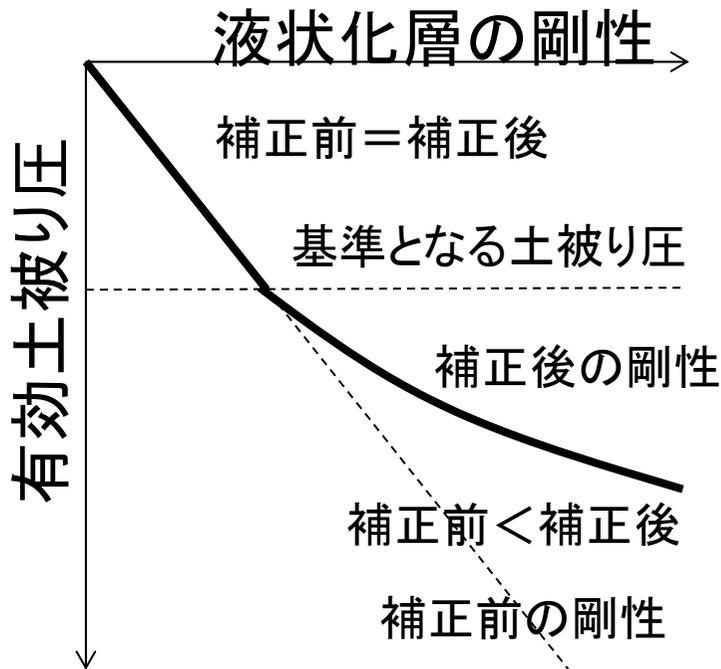


概ね沈下量が一致

→ 堤体液状化による堤防沈下は地下水位の設定が大きく影響  
調査法を含め、堤体内水位の把握が重要

# 基礎地盤の液状化に対する解析手法の改善

- ・液状化強度の見直し  
(細粒分に応じた液状化強度を最新の試験結果から推定)
- ・液状化層の中でも深い位置の液状化層の影響を低減するために、液状化時の剛性を以下の関数で補正

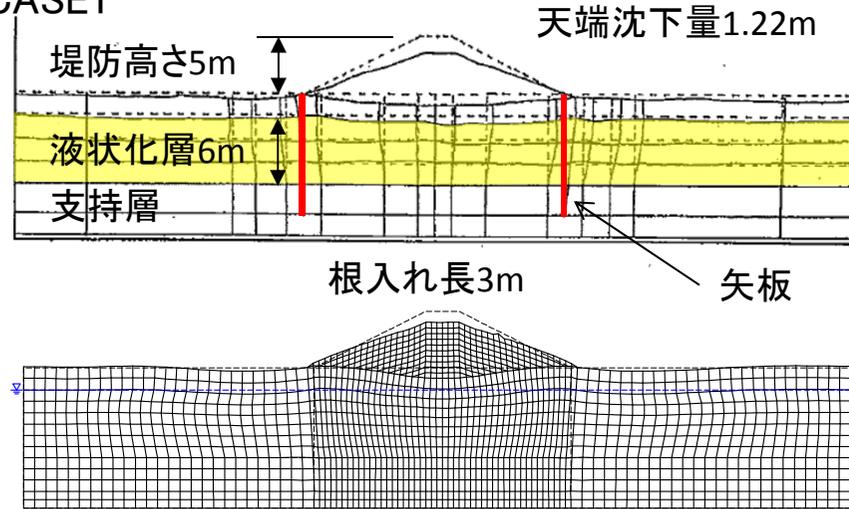


概ね沈下量が一致

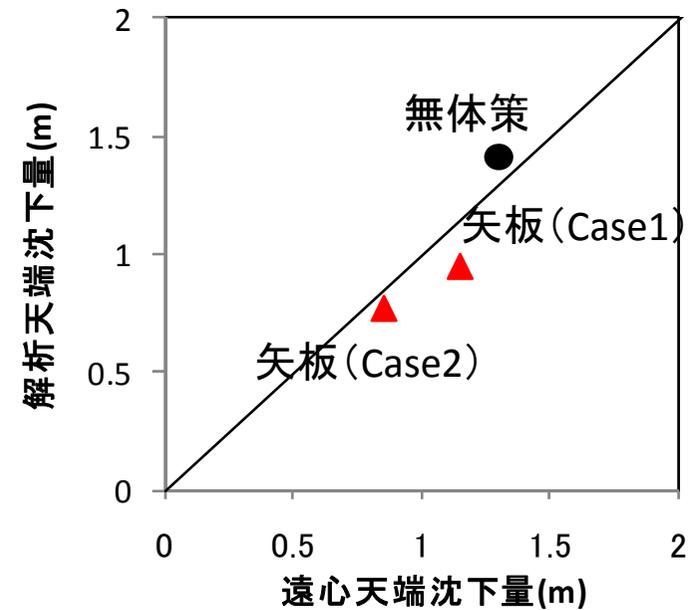
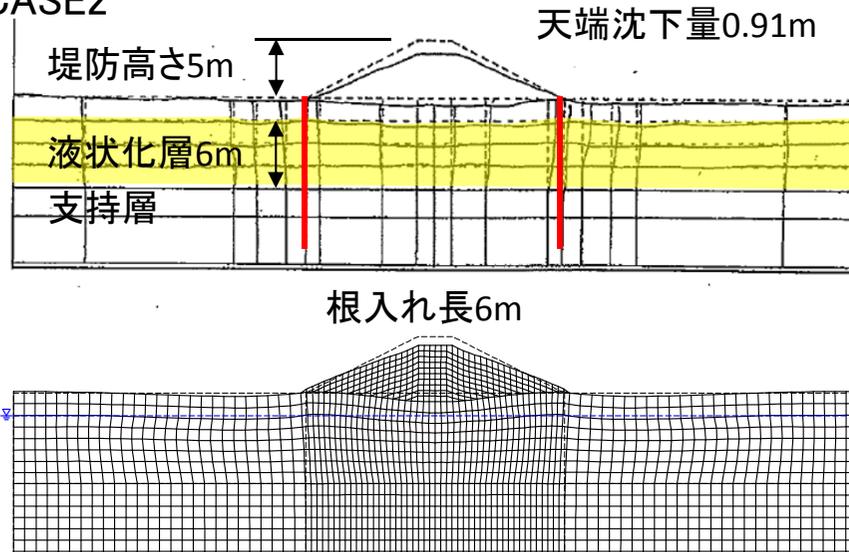
# 基礎地盤の液状化対策への適用性の検証

遠心場: 50g, 堤防高さ: 5m, 地下水位: GL-2m, 液状化層厚: 6m,

CASE1



CASE2



- 順次、再現性の確認、改善方法の提案
- ・のり尻対策 (締固め、固結、矢板、etc.)
  - ・直下改良 (締固め、固結、etc.)
  - ・堤体液状化対策 (ドレーン工、etc.)

## 耐震対策工の設計法

【現状】中規模地震動に対する安定性

【将来】L2地震動に対する変位量 +  $\alpha$

(沈下抑制効果を直接評価)

## 5. まとめと今後の課題(指針類, 地震対策事業等への反映)

### ①河川構造物の耐震性能照査指針・解説, 2012年2月改定

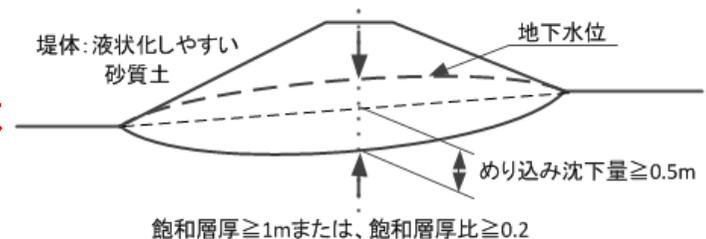
#### ☆改訂のポイント

- ①堤体液状化, ②施設計画上の津波, ③地殻変動に伴う広域な地盤沈降の考慮

### ②レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル, 2012年2月策定

#### ☆ポイント

- ・地形区分, 液状化層厚等によるスクリーニング
- ・堤体の液状化に関する点検①堤体土質, ②堤体内水位等による堤体液状化被害の可能性を判定
- ・基礎地盤の液状化については従来手法を適用



### ③河川堤防の震災復旧, 地震対策事業等への反映

#### ☆ポイント

- ・「河川堤防の耐震対策マニュアル(暫定版)」(2012年2月)への反映
  - ①堤体液状化に対する対策工法(地下水位低下, のり尻安定化)
  - ②基礎地盤の液状化対策工法(土研マニュアルの適用)
- ・「土木工事共通仕様書」(2013年3月改定)への反映(締固め管理の強化)

# 今後の課題

## ①河川堤防の耐震性照査手法の高度化

- ・被災事例を対象とした検証の結果，堤体内水位の設定，深い液状化層の評価に課題
- ・深い液状化層（沖積層）の評価については，地震動の増幅特性，年代効果，細粒分の影響等について，液状化判定法の高度化と併せて引き続き検討が必要
- ・堤防の耐震性には，基礎地盤の条件，築堤材料，堤体内の地下水位が大きく影響。弱点箇所抽出，解析モデルでの設定等について調査法と併せた検討が必要

## ②液状化対策工法の高度化の検討

- ・押え盛土とドレーン工を組み合わせた対策の効果を確認。設計法の提案に向けた検討が必要
- ・レベル1地震動に対して設計された対策や浸透対策として実施した対策が一定の効果を発揮。これらを踏まえ，レベル2地震動に対する合理的な対策工法・設計法の開発が必要
- ・耐震対策工が洪水時の浸透安全性や常時の地下水流動等に及ぼす影響の評価，さらには浸透対策を兼ねた耐震対策工の開発が必要