

# 地盤(実務向け) 解析事例

蔡 飛(さい ひ)

技術士(建設部門、総合技術監理部門)

群馬大学大学院 理工学府環境創生部門 准教授

# 解析事例

- 岸壁
- タンク基礎
- パイプの浮き上がり
- 東竹沢地すべり(中越地震)
- 刈羽村宅地解析(中越沖地震)
- 文献中の解析事例

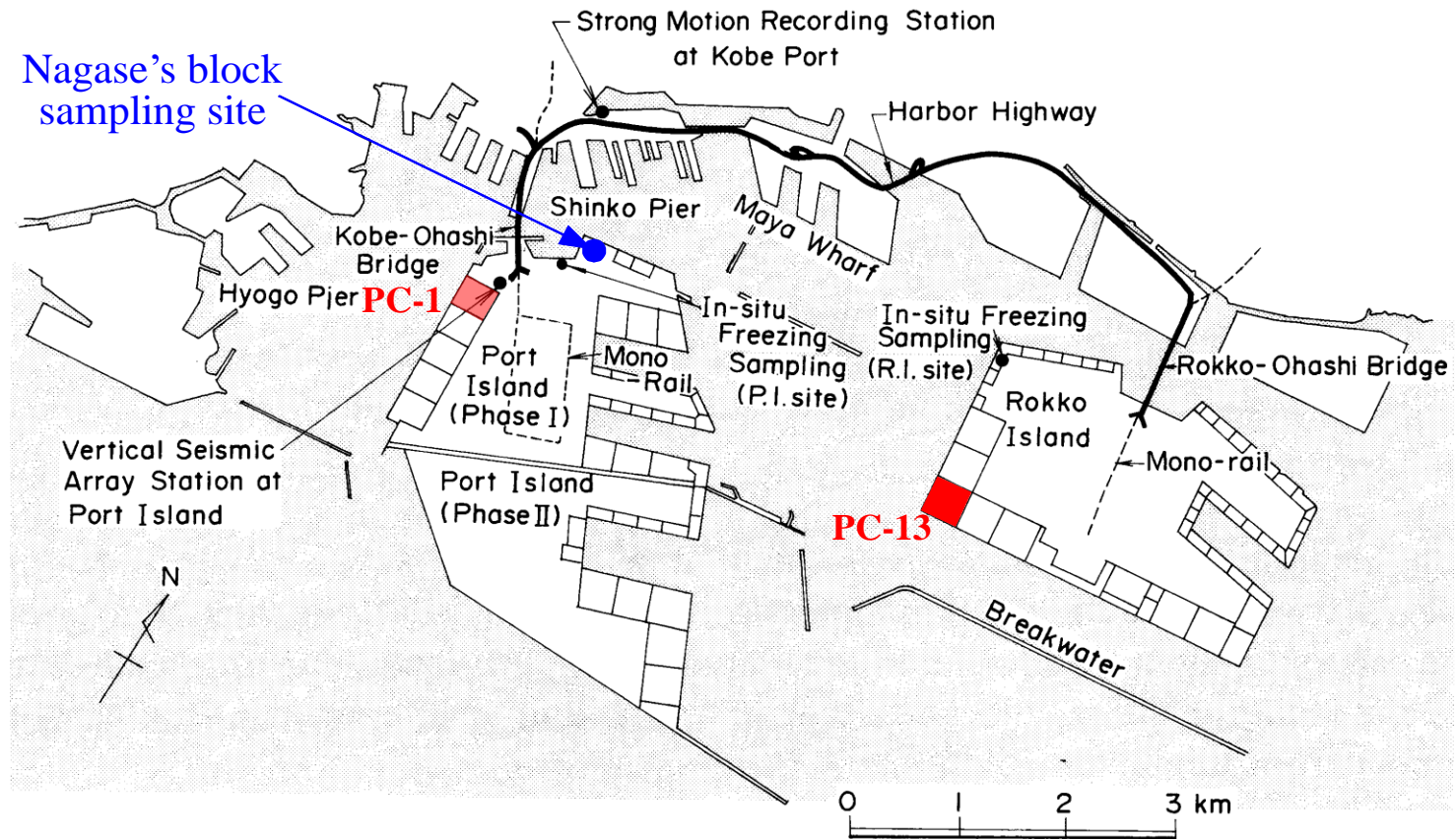
# 兵庫県南部地震時ケーソン式 岸壁被災の解析

群馬大学大学院・社会環境デザイン工学専攻  
地盤工学研究室

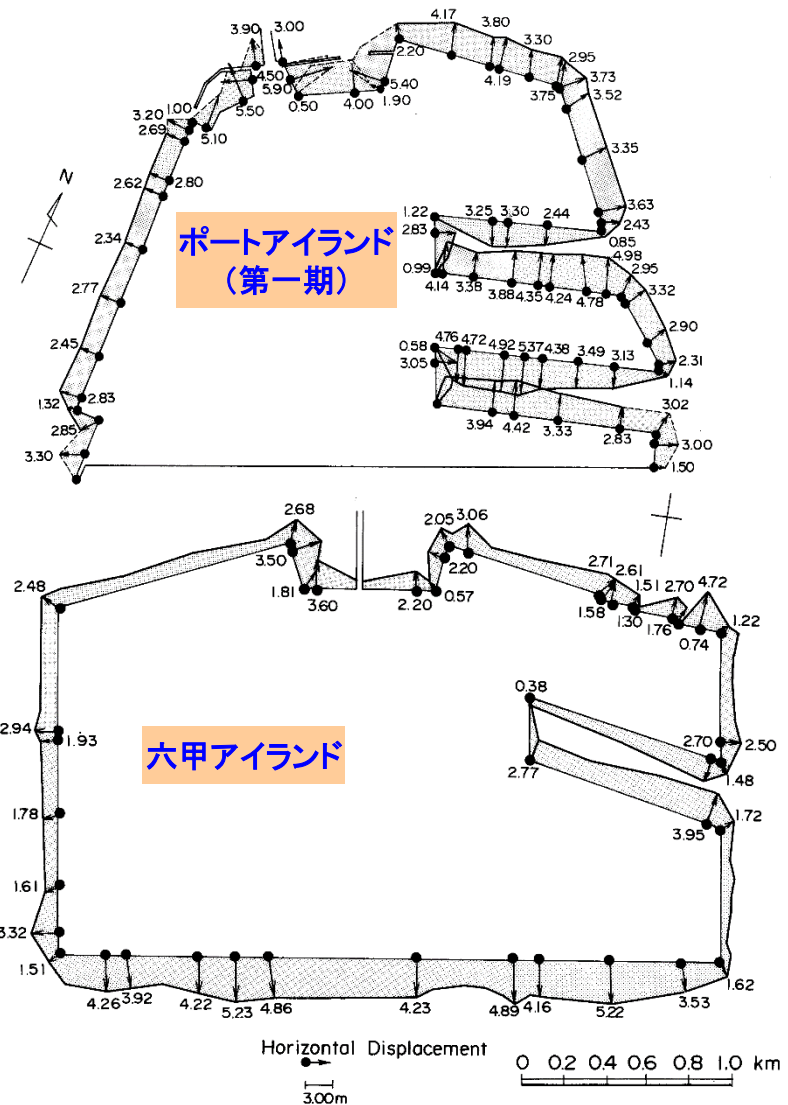
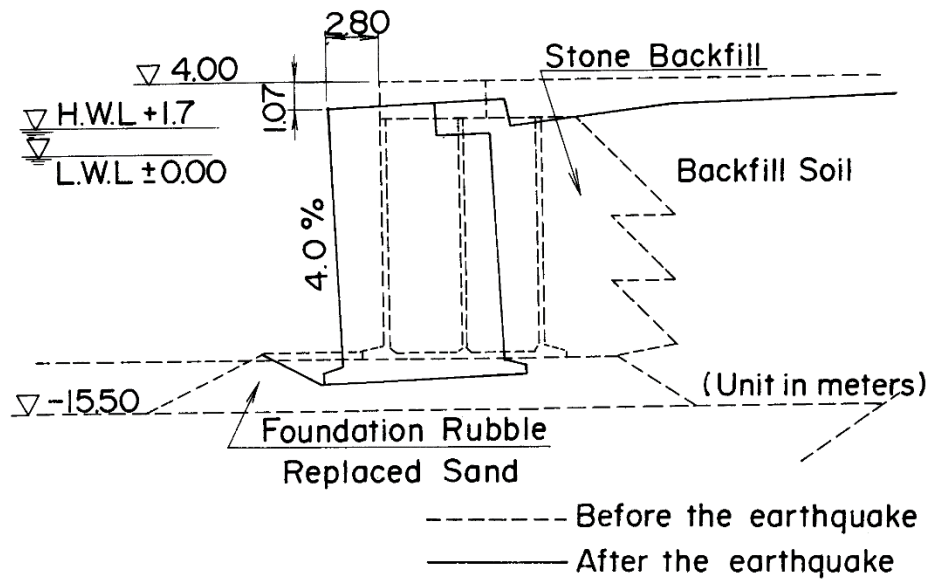
蔡 飛

2007年7月5日

# 兵庫県南部地震時ケーソン式岸壁被災

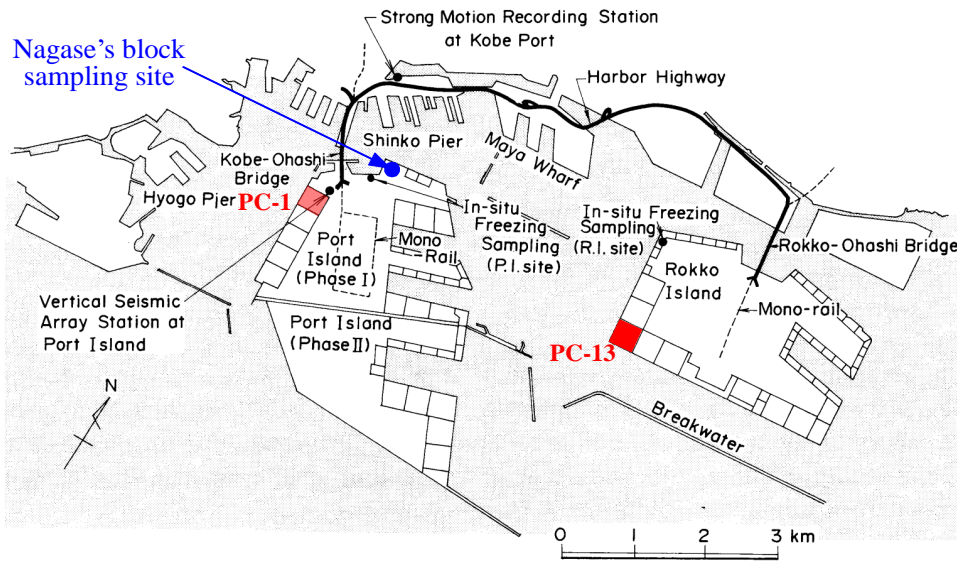


# 兵庫県南部地震時ケーソン式岸壁被災

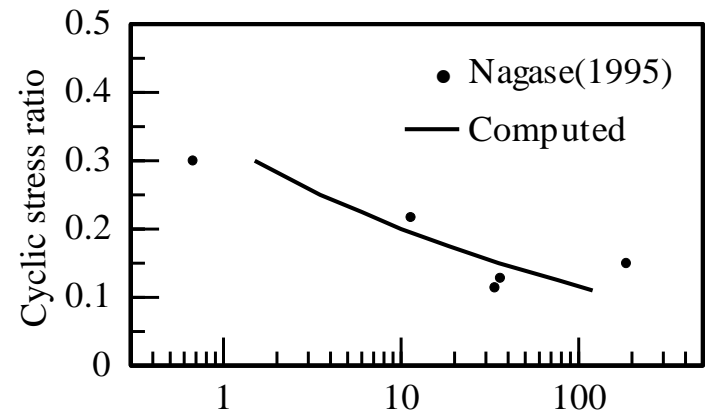
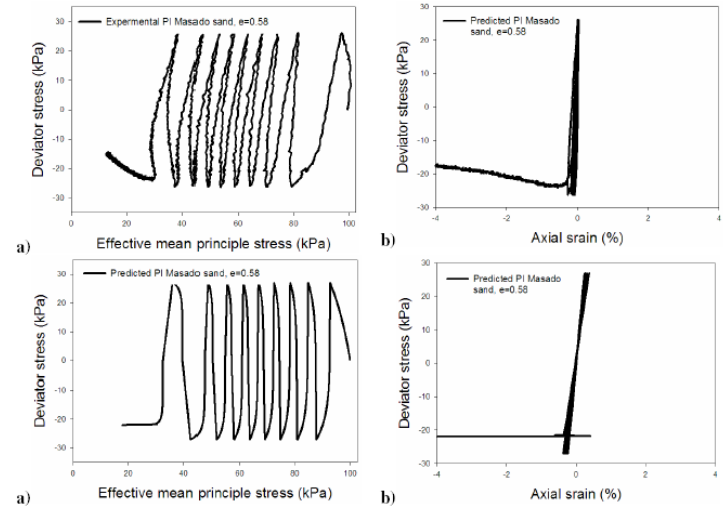


残留水平変位 (Inagaki et al., 1996)

# まさ土の液状化強度



ポートアイランド

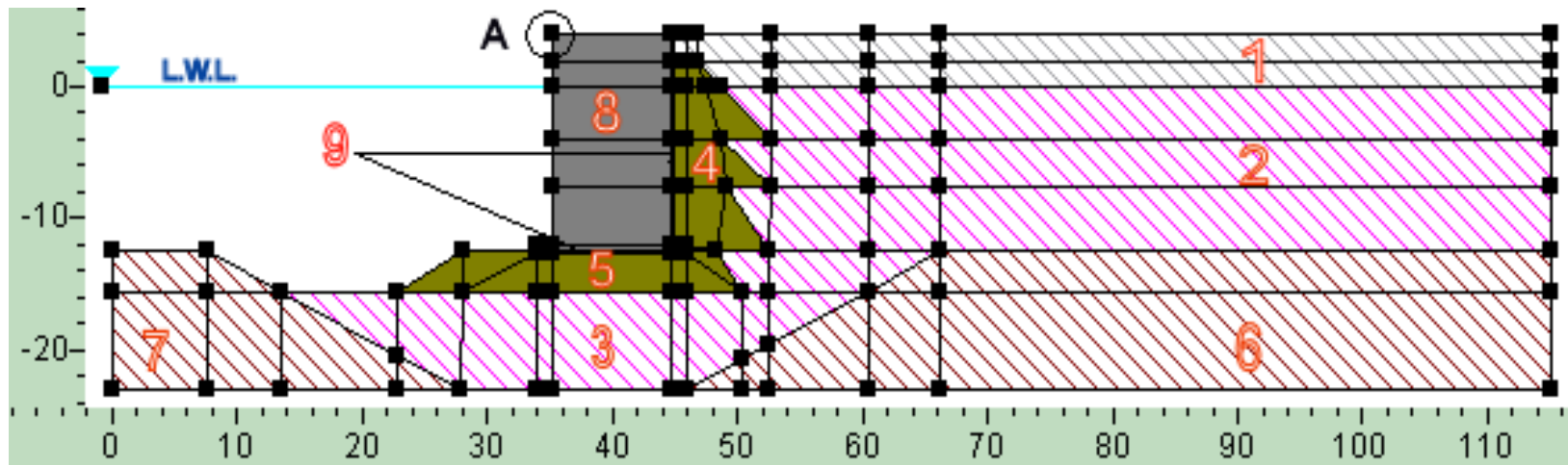


Number of cycles to 5% DA axial strain

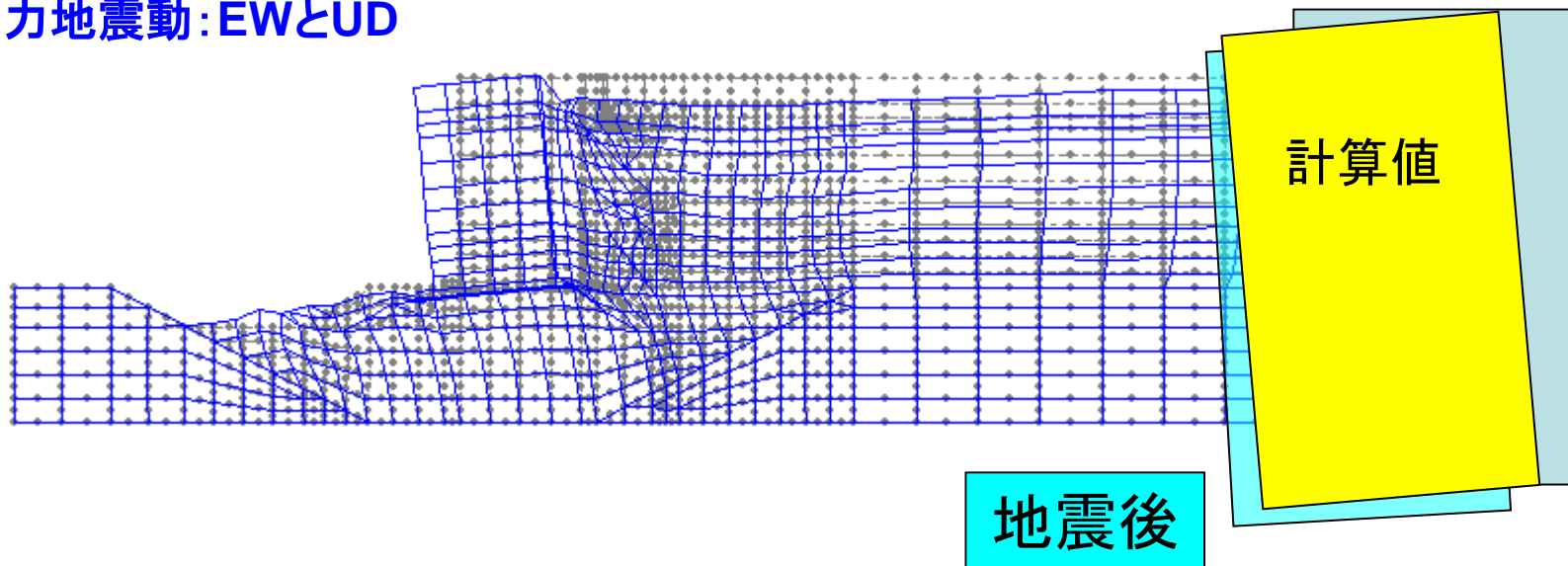
液状化強度



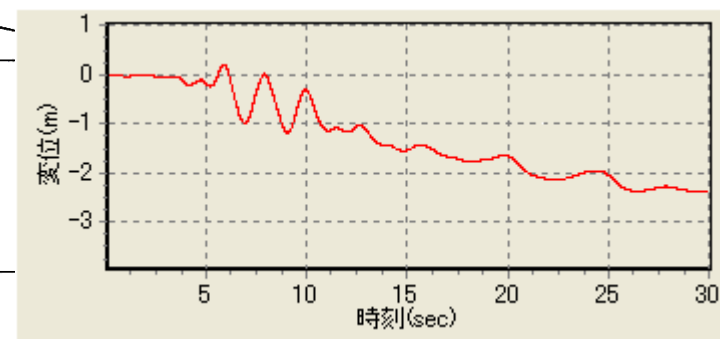
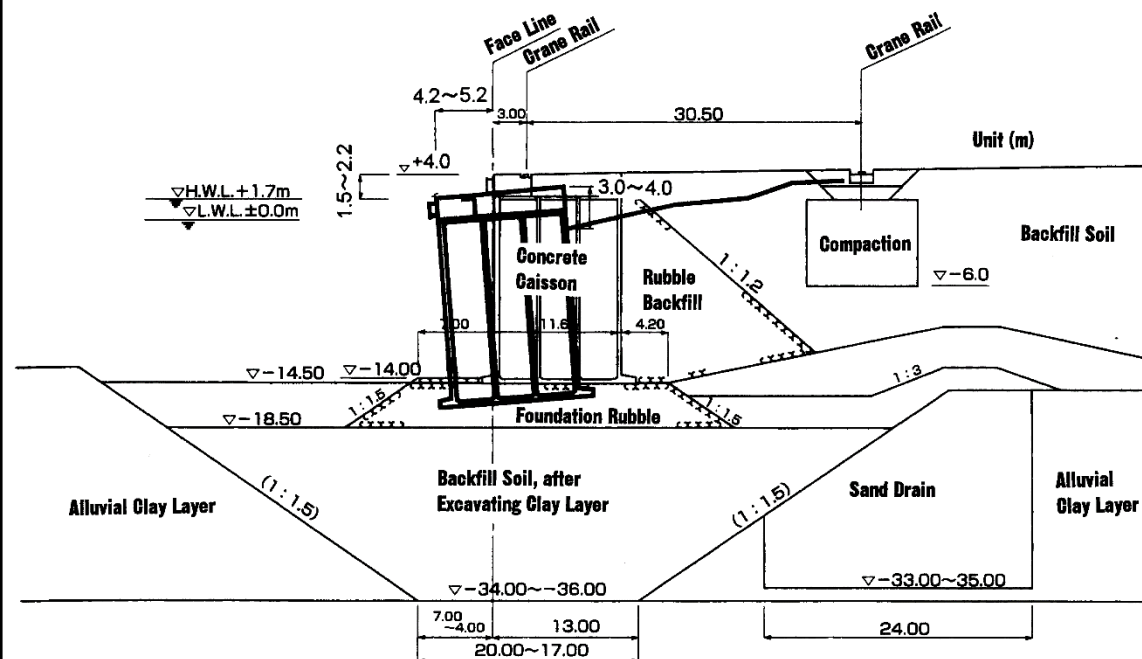
# PC-1ケーソン式岸壁（ポートアイランド）



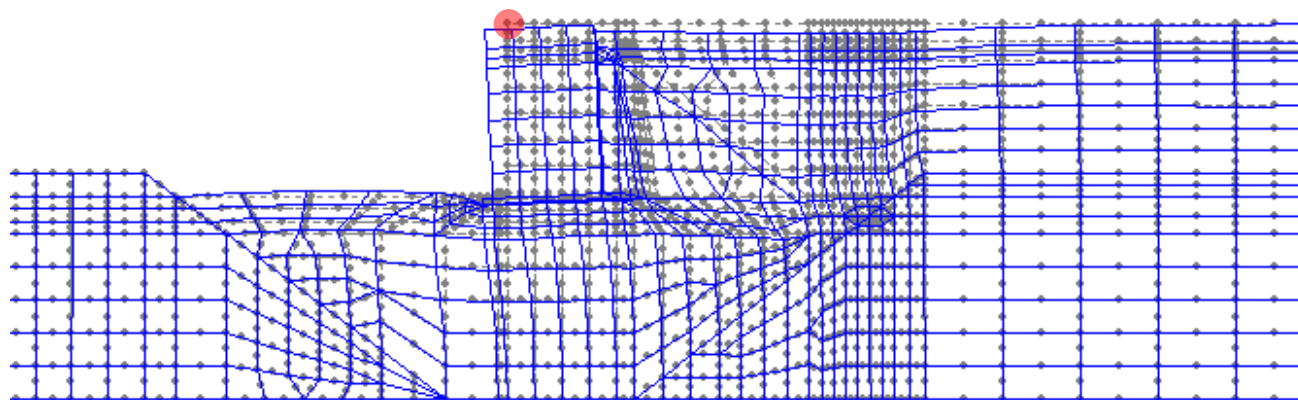
入力地震動:EWとUD



# PC-13ケーソン式岸壁(六甲アイランド)



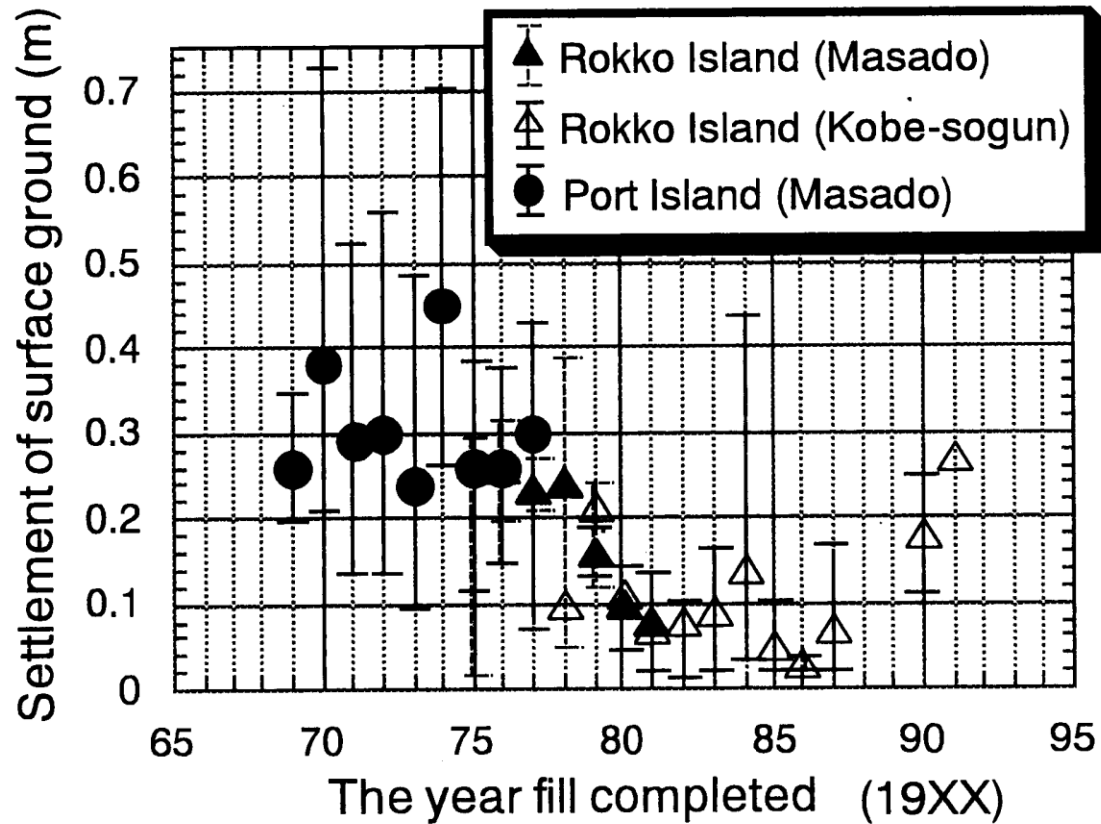
●の水平変位の時刻歴



入力地震動: NSとUD



# 埋立地表面の沈下

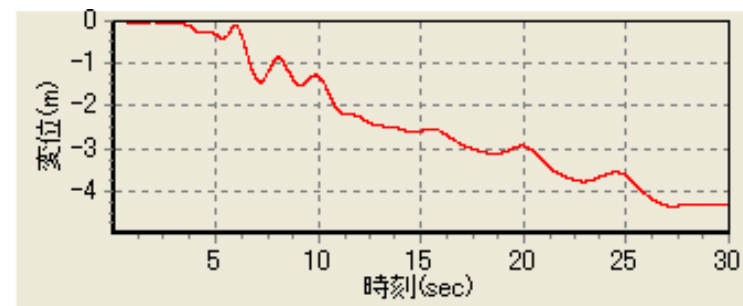
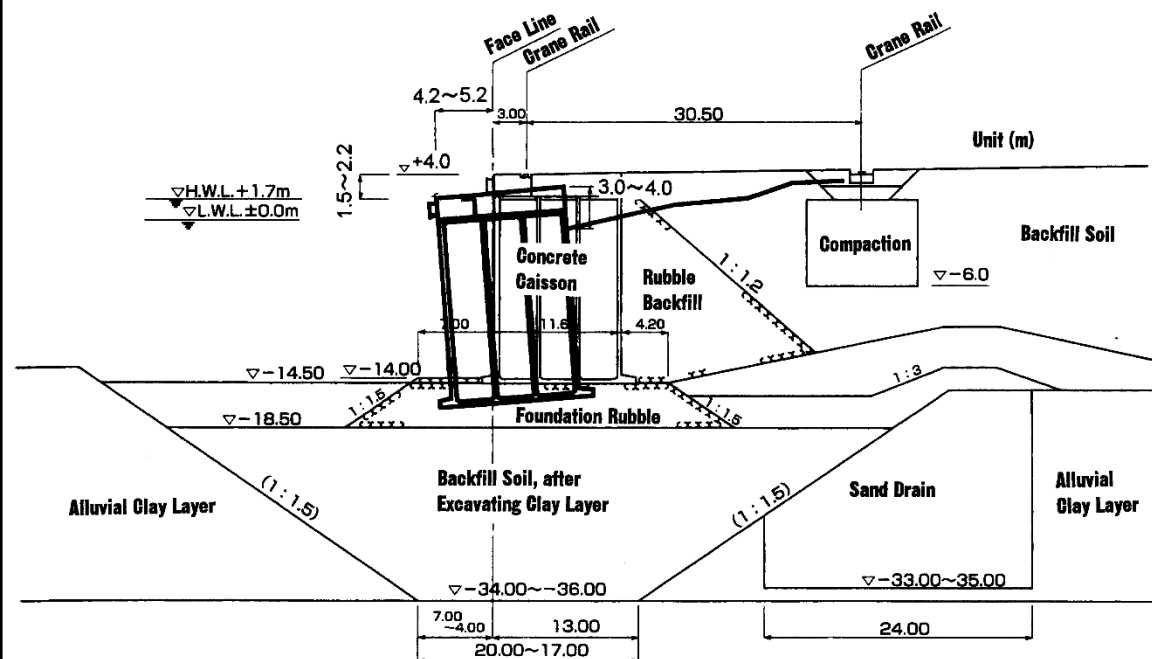


Kazama et al. (1998)

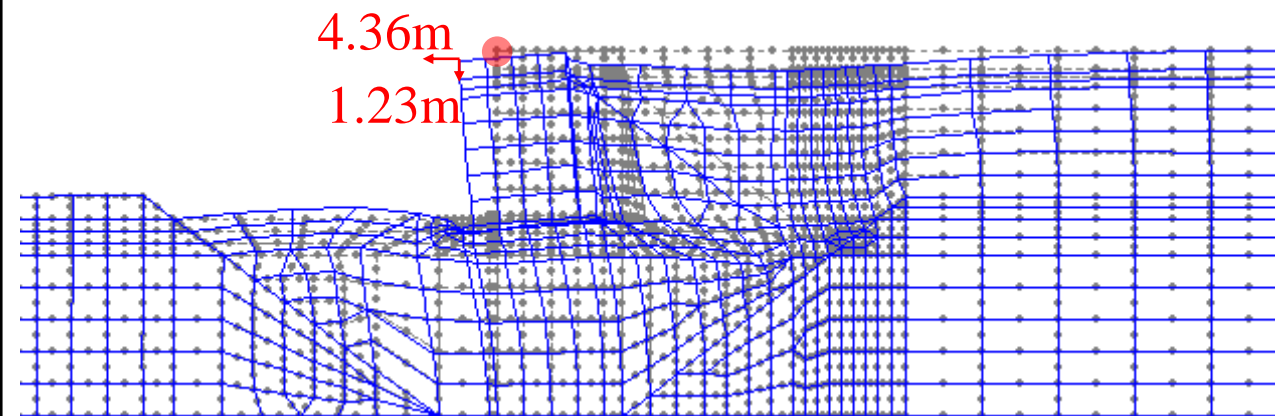
# PC-13ケーソン式岸壁(六甲アイランド)

PZ-Sandのパラ  
メータの調整:

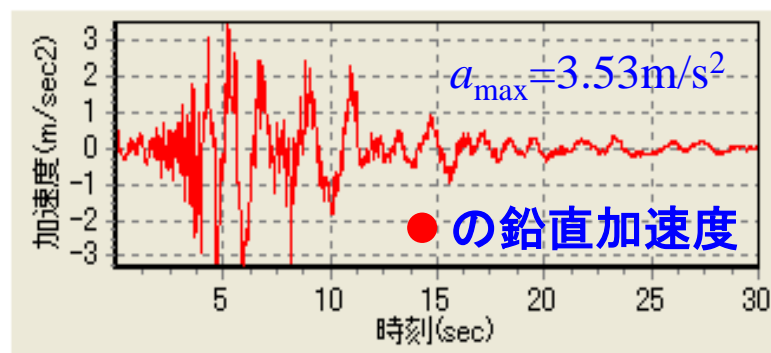
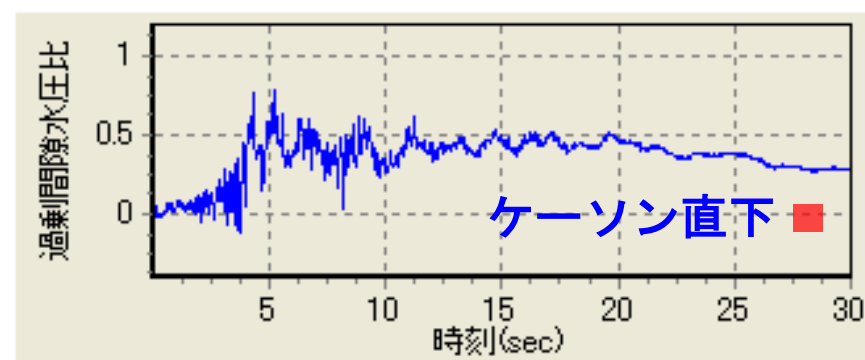
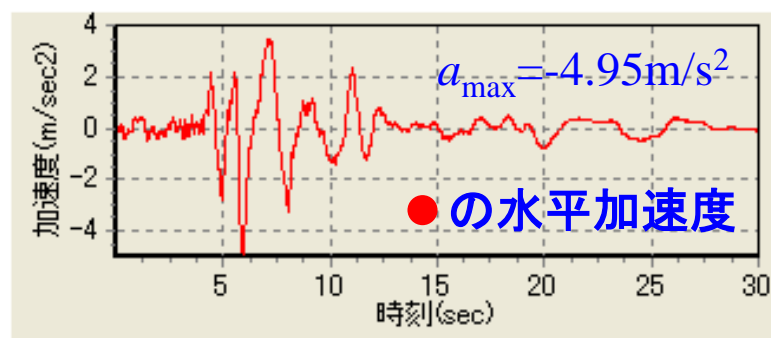
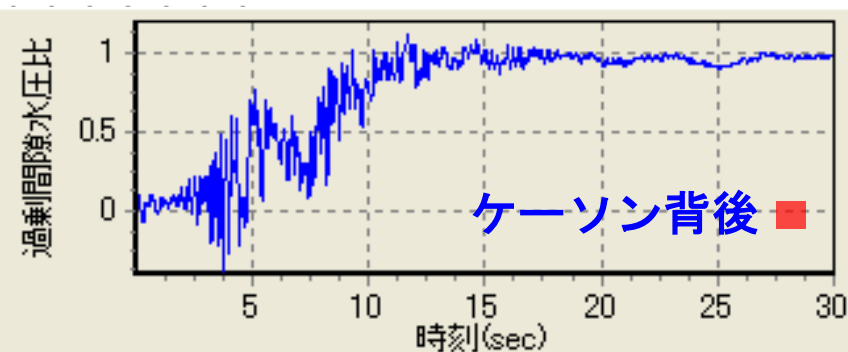
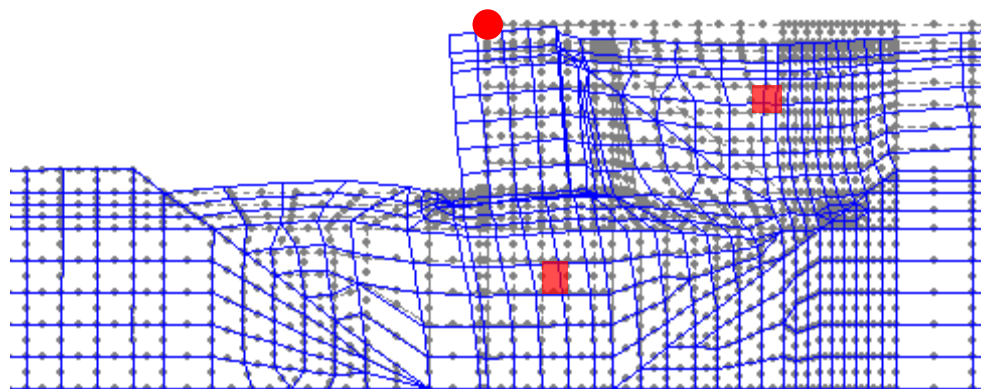
$$M_f = 0.58 \rightarrow 0.55$$



●の水平変位の時刻歴

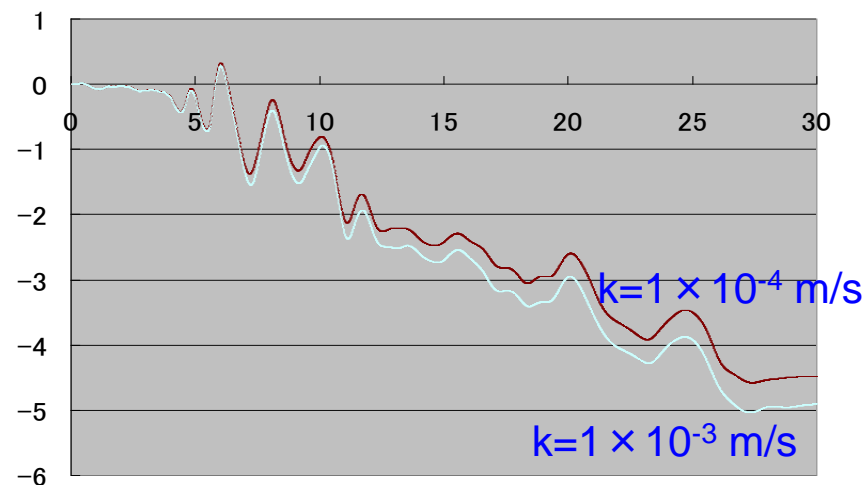
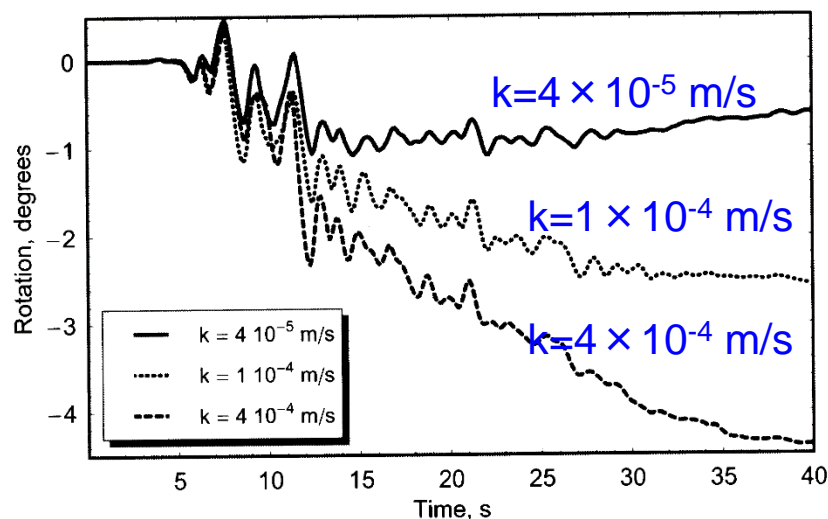


# PC-13ケーソン式岸壁(六甲アイランド)



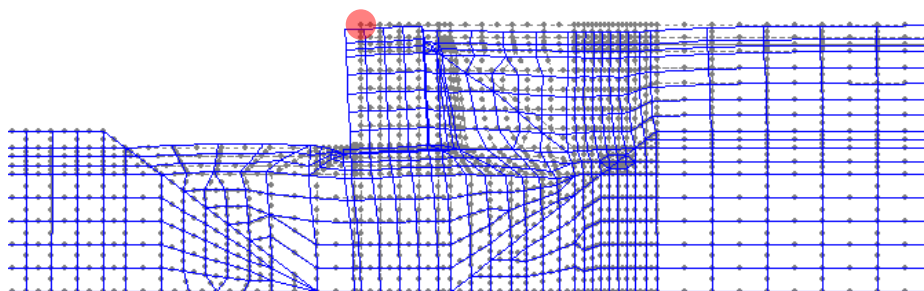
過剰間隙水圧比の時刻歴

# 基礎および背面材料の透水係数の影響



基礎及び背面材料の透水係数が  
ケーソン回転角に及ぼす影響

(Dakoulas & Gazetas, 2005)



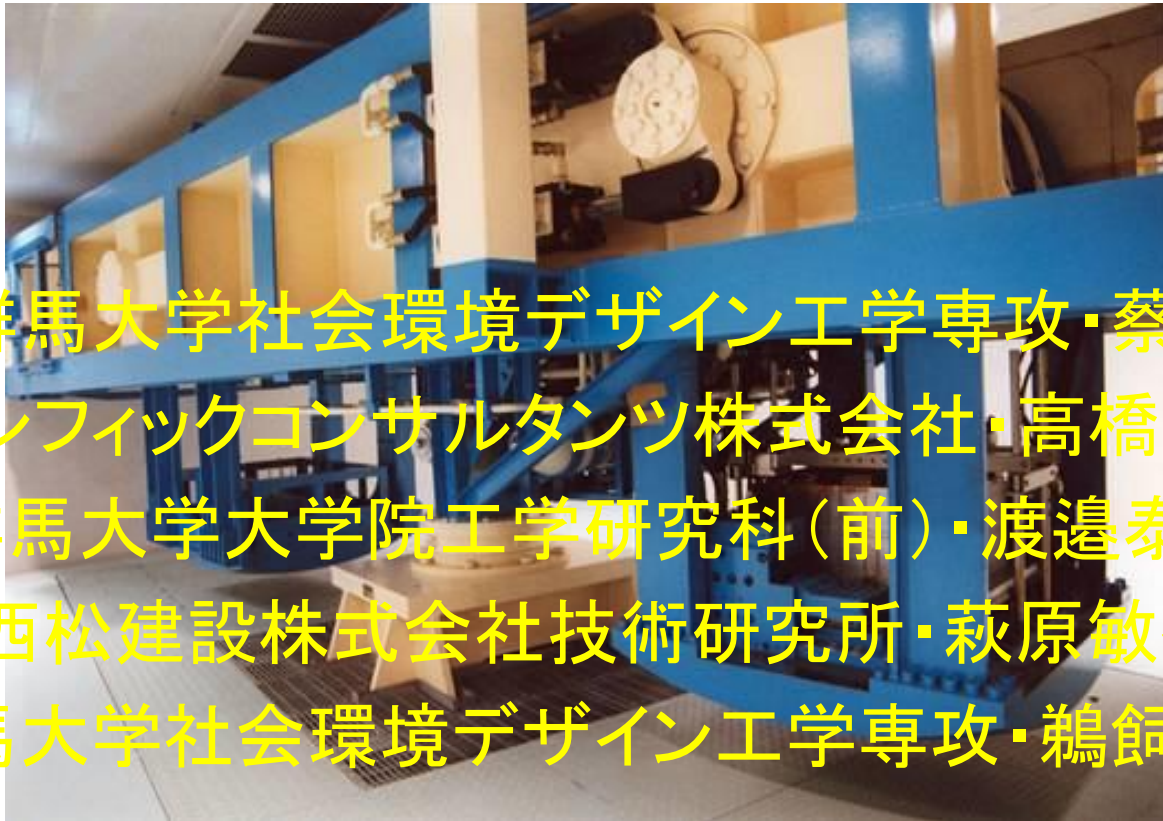
透水係数 ( $10^{-3} \text{ m/s}$ )	水平変位 (m)	鉛直変位 (m)
1.0	4.36	1.23
0.1	4.29	1.17
0.01	4.06	1.13

# おわりに

---

- 動的有効応力解析プログラム **UWLC** を用いた解析結果は、兵庫県南部地震時におけるケーソン式岸壁の被災と概ね一致する結果が得られる。
- 埋立地の沈下(エージング効果)によって地盤が強くなり、地震時におけるケーソン式岸壁の残留変位量が小さくなる。
- 基礎及び背面材料の透水係数がケーソンの回転角に及ぼす影響はほとんどない。これは、Dakoulas & Gazetas (Soils Founds, 2005)の結果とかなり異なる。

# 薬液注入固化されたタンク基礎砂 地盤の地震時挙動に関する 2次元有効応力液状化解析



群馬大学社会環境デザイン工学専攻・蔡飛  
パシフィックコンサルタンツ株式会社・高橋千明  
群馬大学大学院工学研究科(前)・渡邊泰介  
西松建設株式会社技術研究所・萩原敏行  
群馬大学社会環境デザイン工学専攻・鵜飼恵三



# 背景



危険物屋外貯蔵タンクの  
液状化に対する早急な  
安全対策の確保が義務  
付けられた。



# 安全対策(消防庁通達4工法)

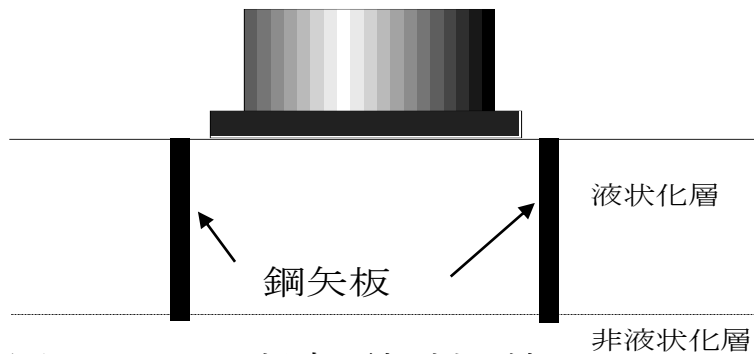


図 1-1 せん断変形抑制工法

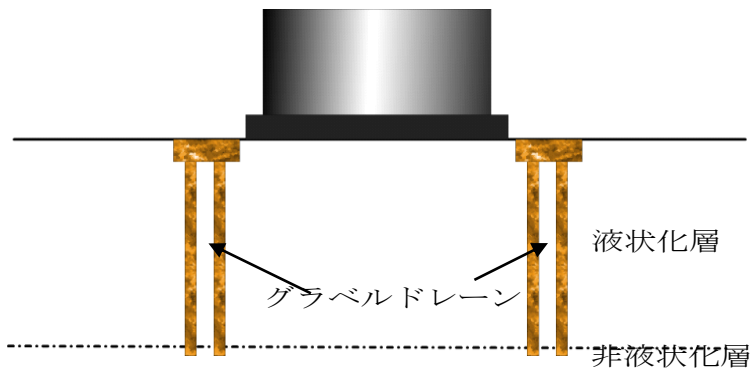


図 1-2 間隙水圧消散工法

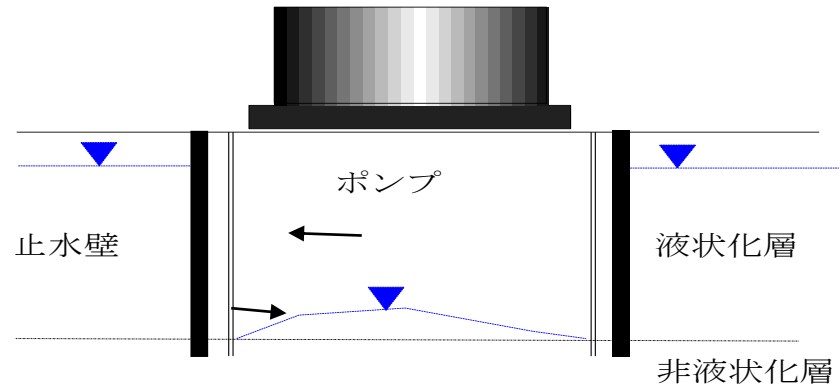


図 1-3 地下水位低下工法

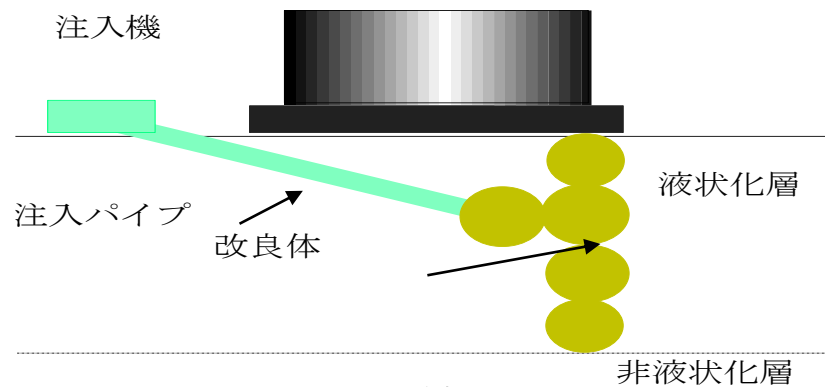


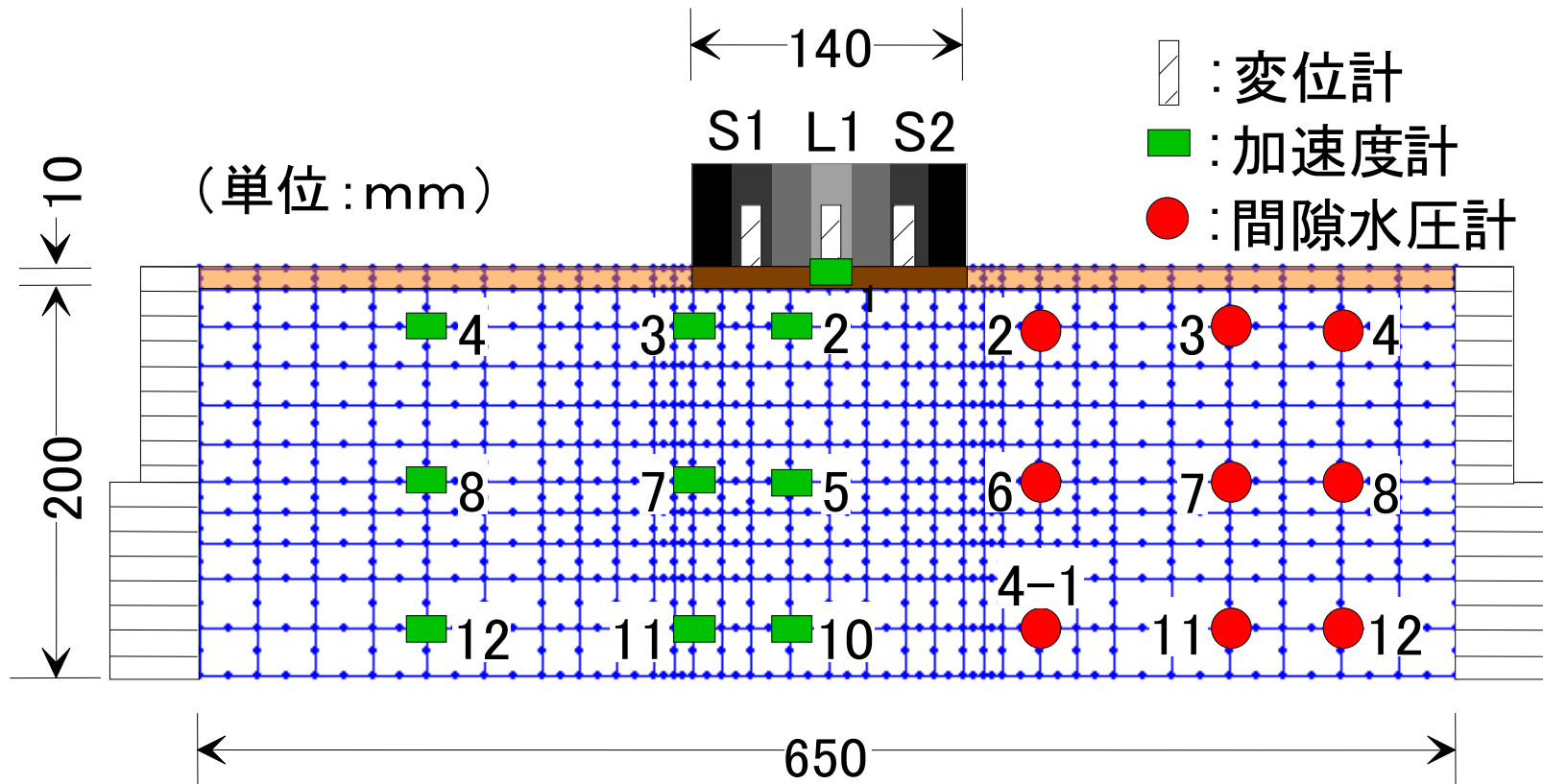
図 1-4 注入固化工法

消防庁の通達により、液状化対策工法として以上4工法が示されている。

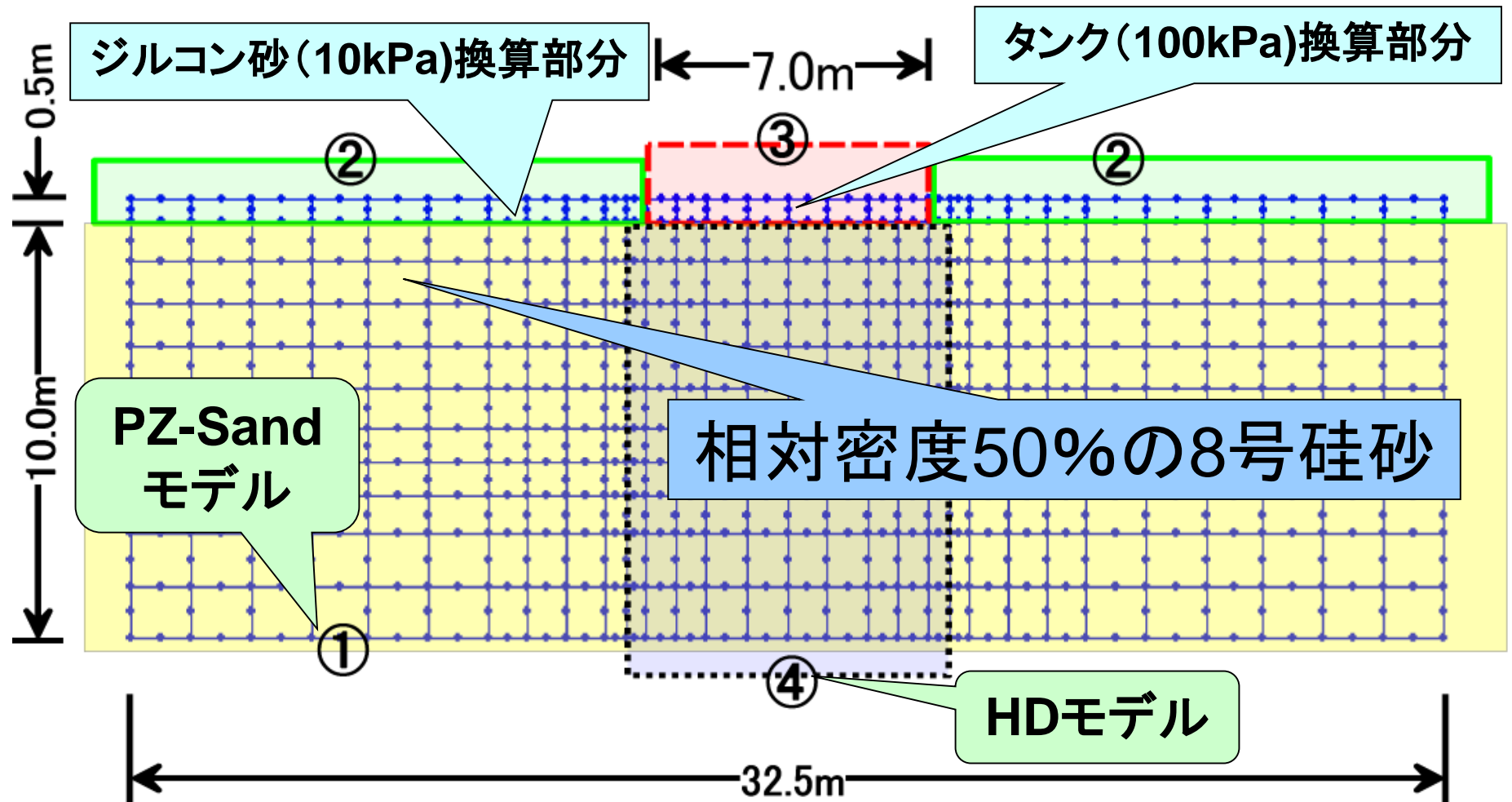
# 研究目的

- ①タンク基礎砂地盤の地震時の挙動を、2次元有効応力液状化解析プログラムによって、すでに実施されている動的遠心試験の結果から有効性を検討し、**2次元有効応力液状化解析による手法の確立**をすること.
- ② 2次元有効応力液状化解析プログラムを用いて、**薬液注入固化工法の改良効果**を確認すること.

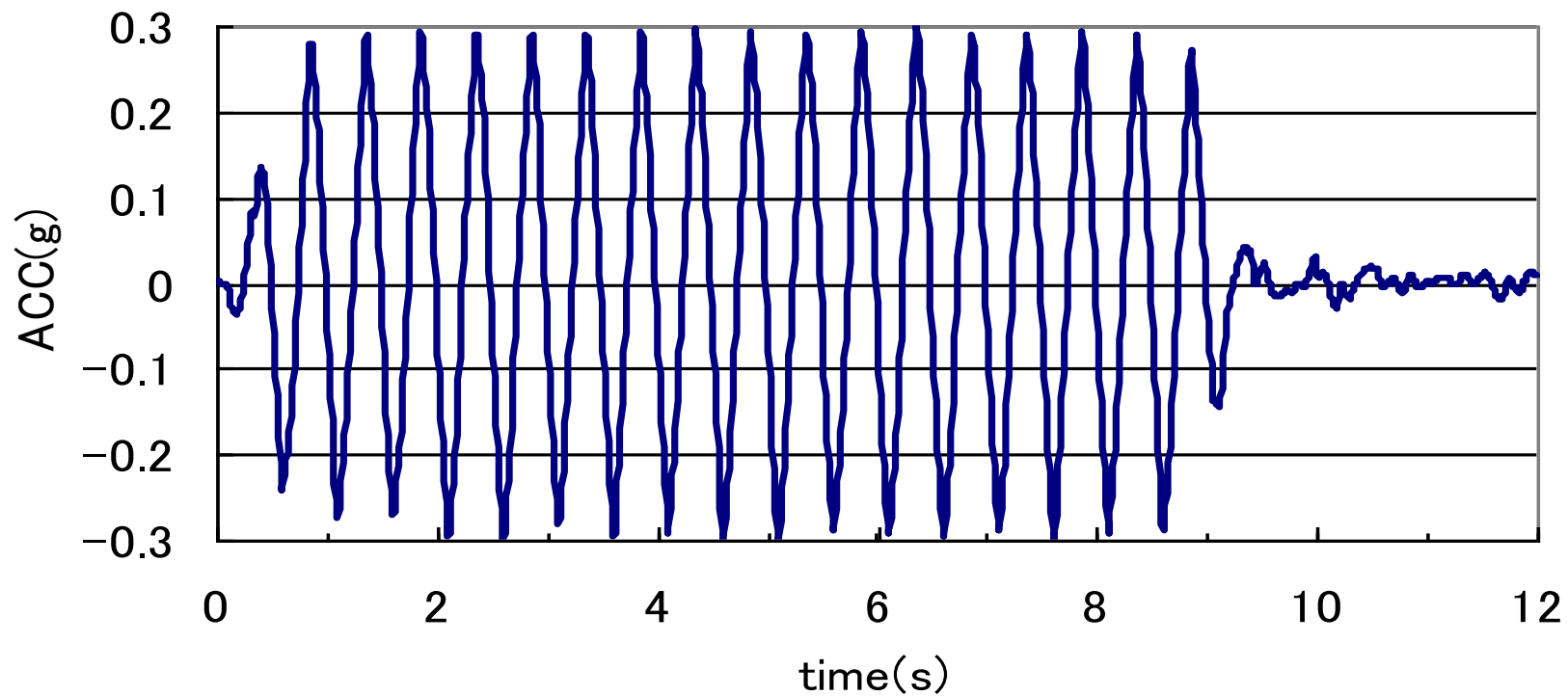
# 動的遠心実験システム およびFEMメッシュ



# 解析方法



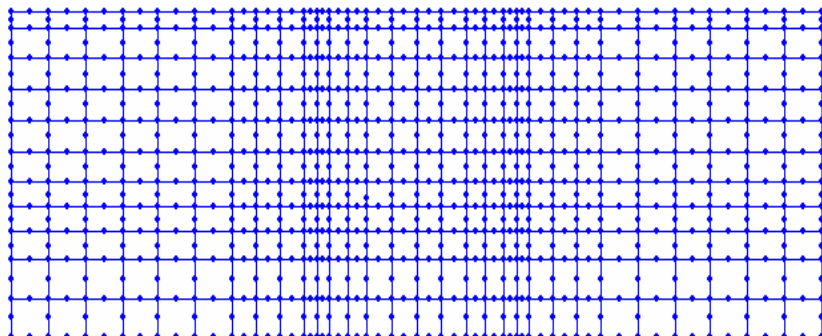
# 入力地震波



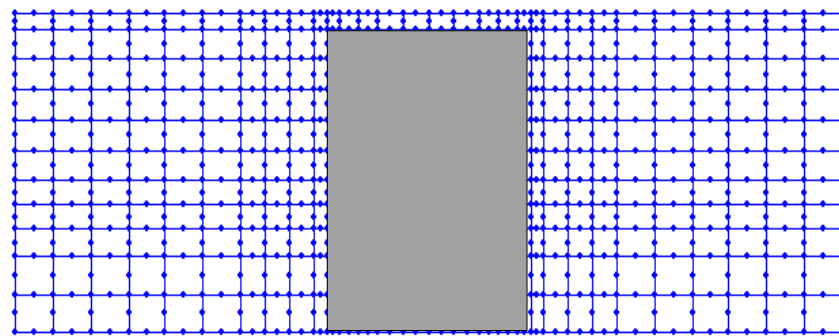
入力地震波



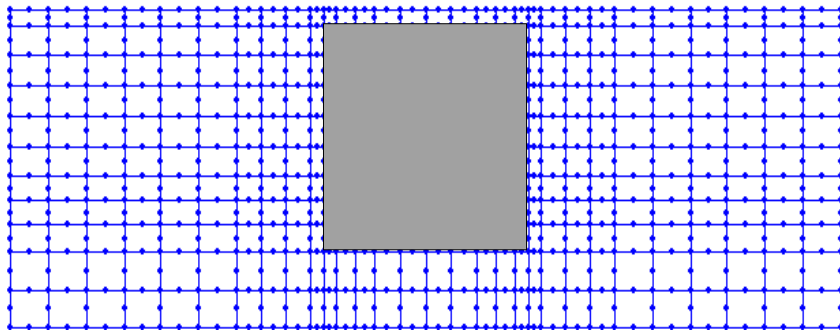
# 解析ケース



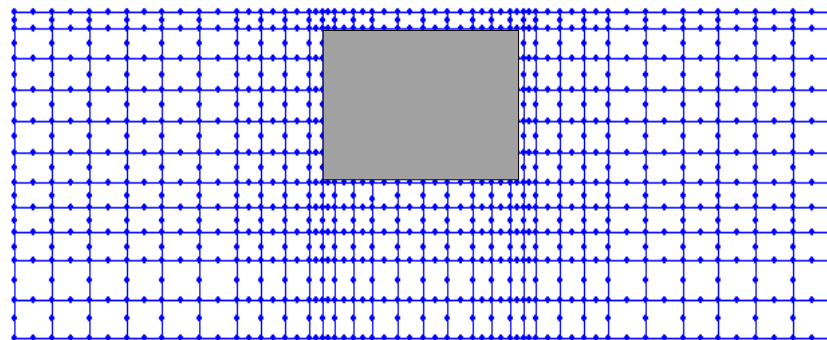
① 無改良



② タンク下全改良

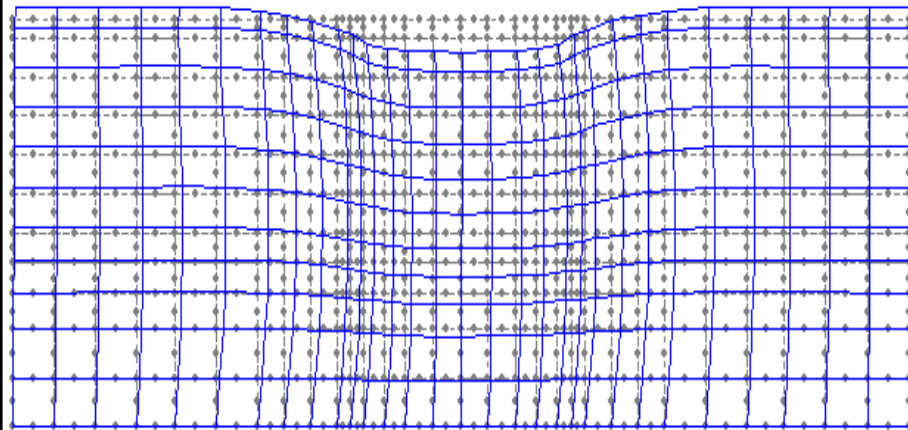


③ タンク下 3/4 改良



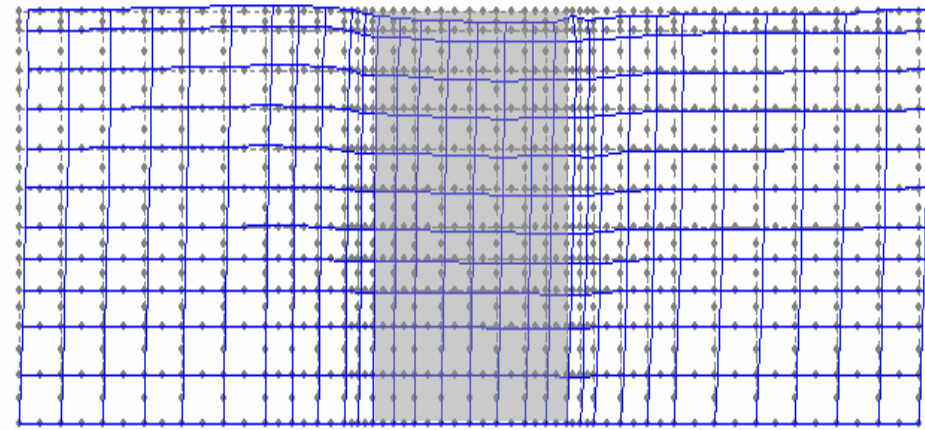
④ タンク下 1/2 改良

# 解析結果(最大変位時分布図)

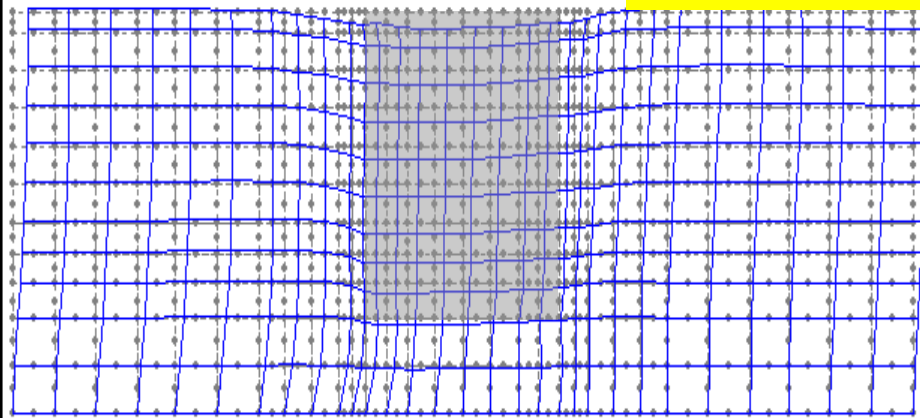


① 無改良

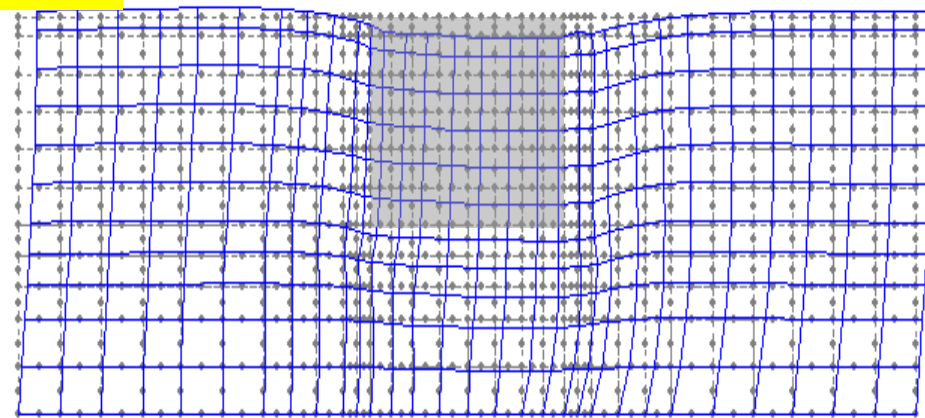
変位量倍率=3



② 直下全改良

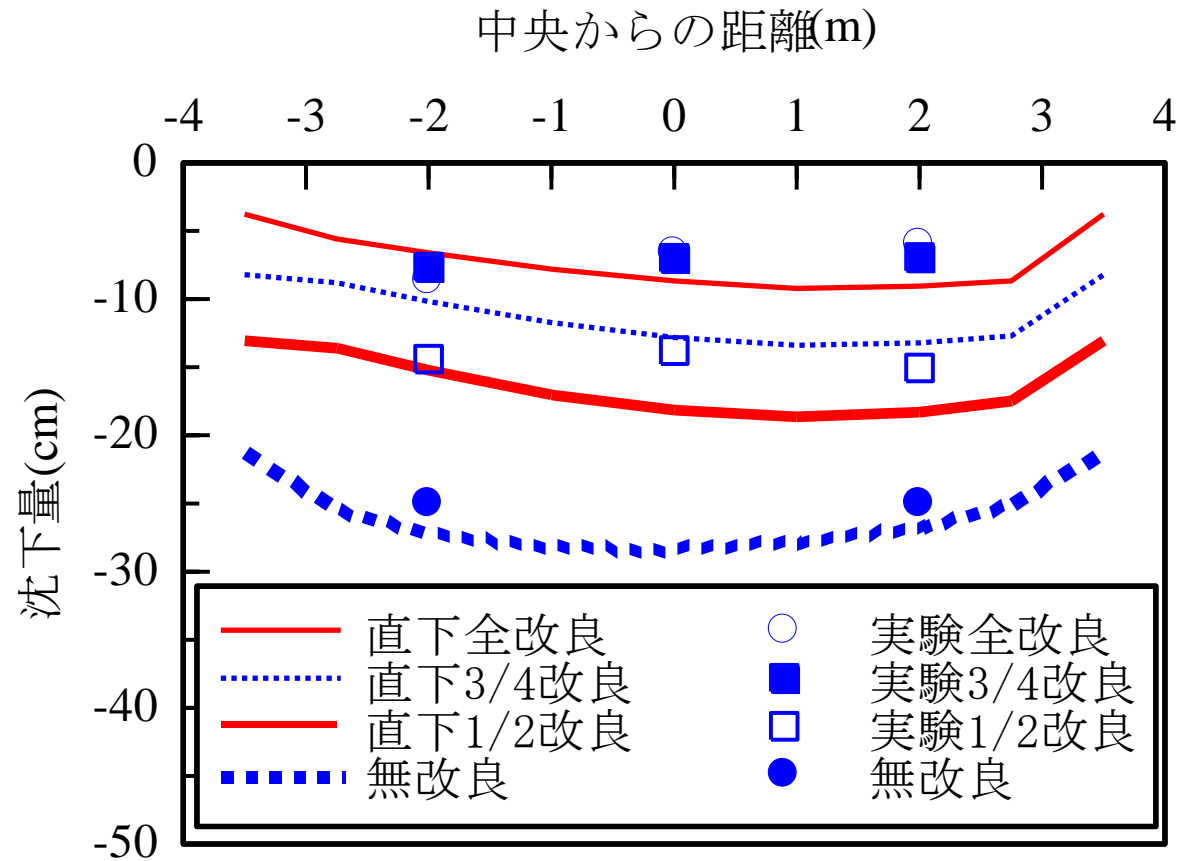


③ 直下3/4改良



④ 直下1/2改良

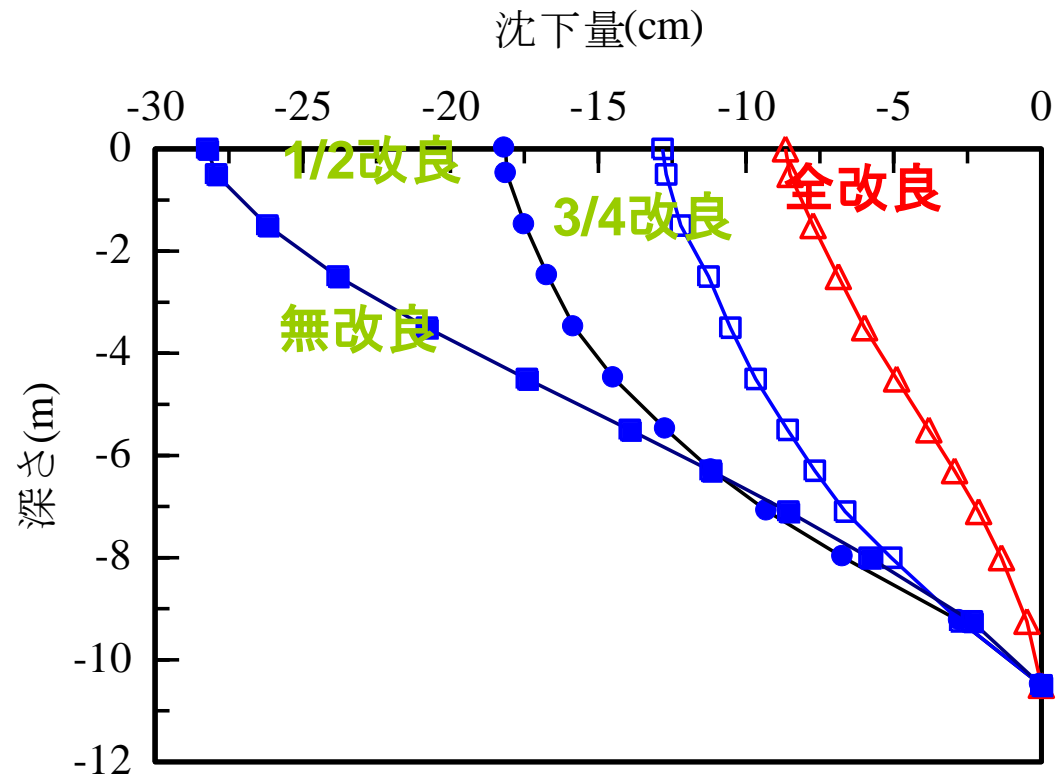
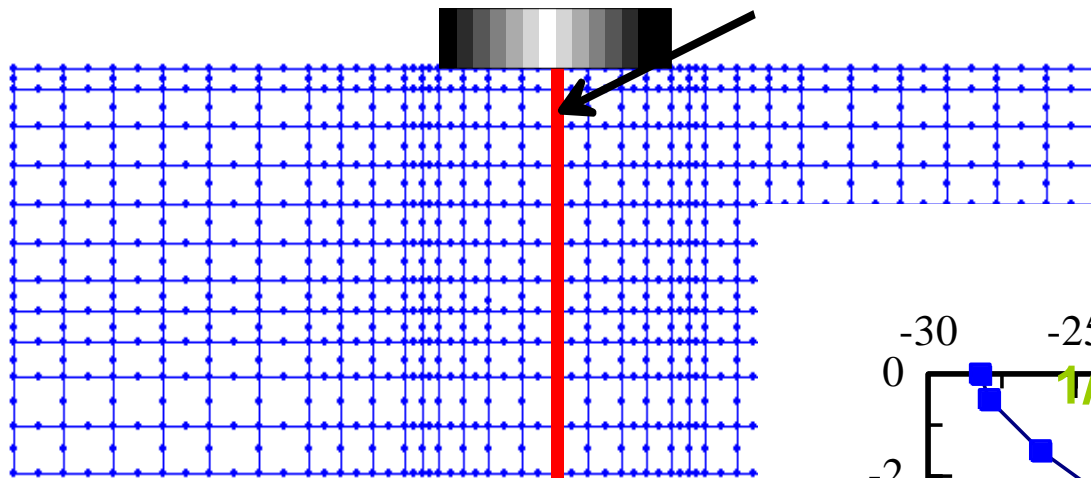
# タンク下各沈下量分布



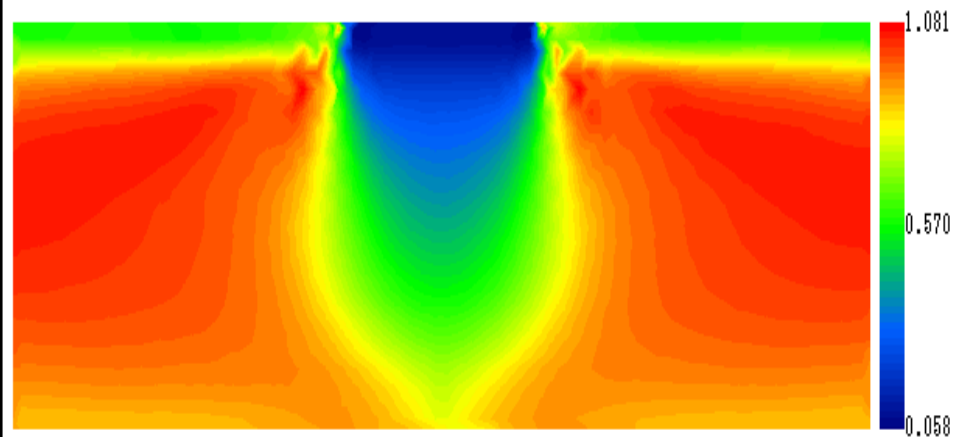
# タンク下沈下分布形状

(改良効果の確認)

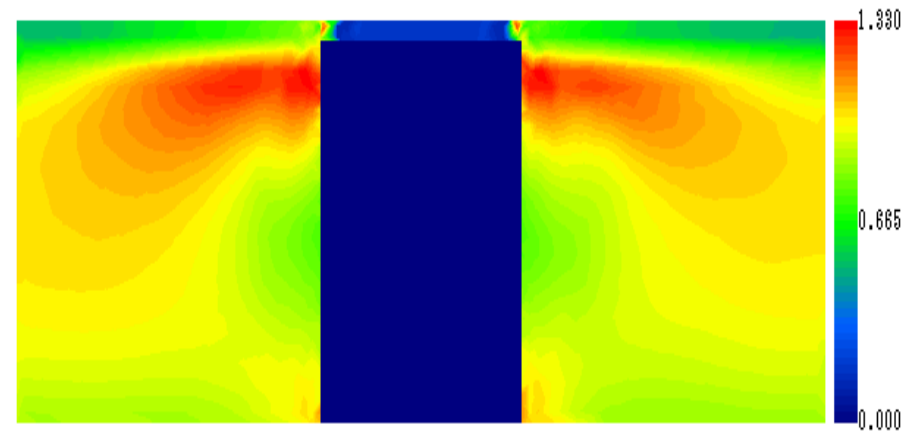
この線上の沈下分布



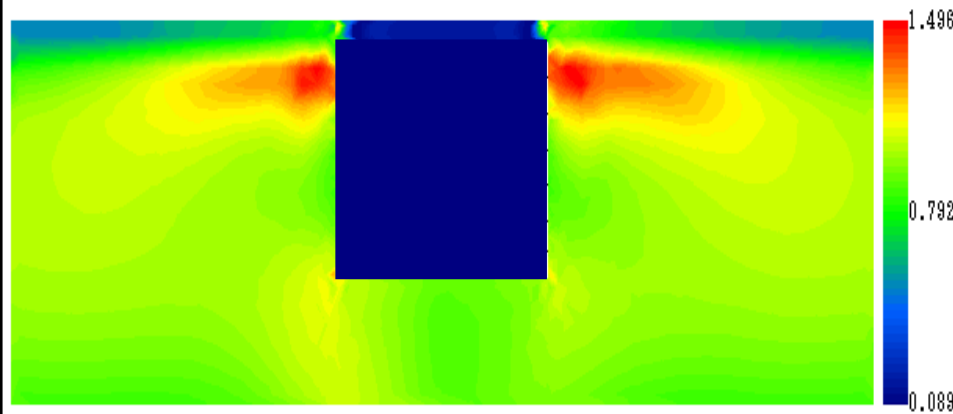
# 過剰間隙水压比全体分布図



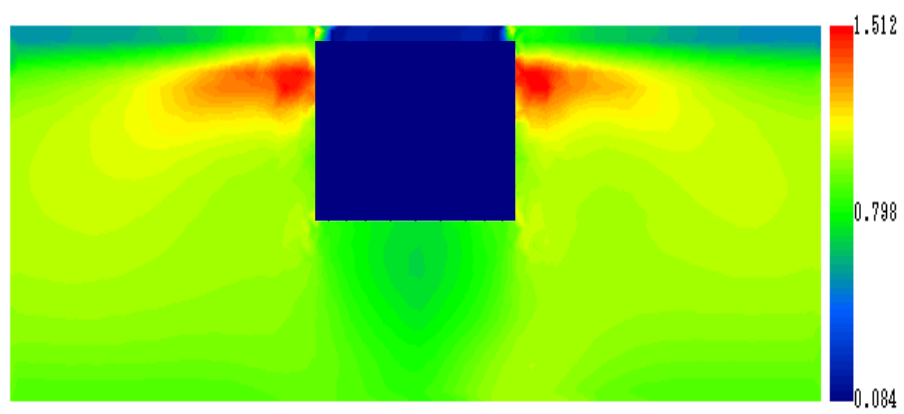
① 無改良



② 全改良



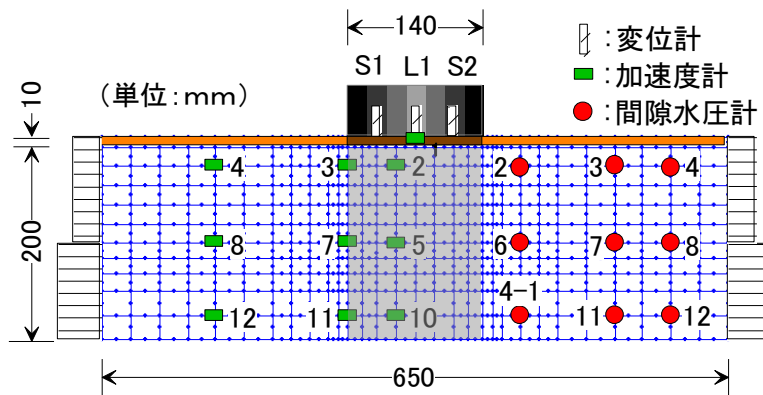
③ 直下3/4改良



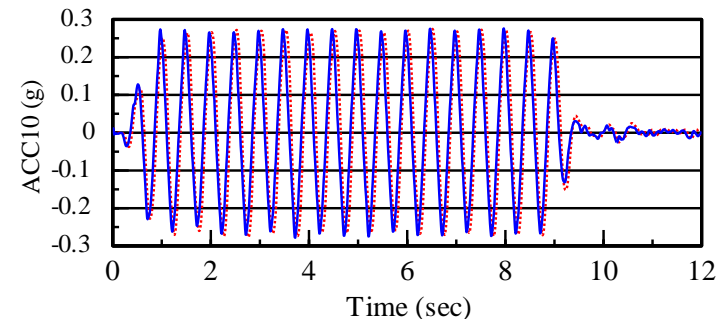
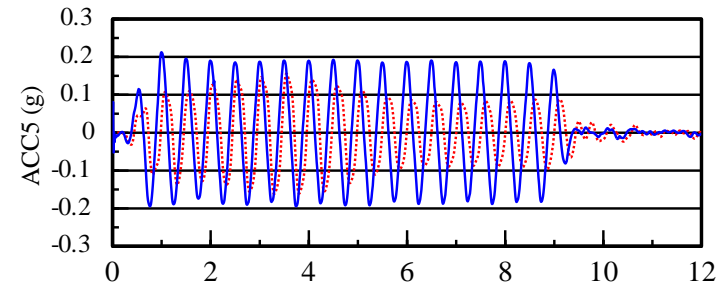
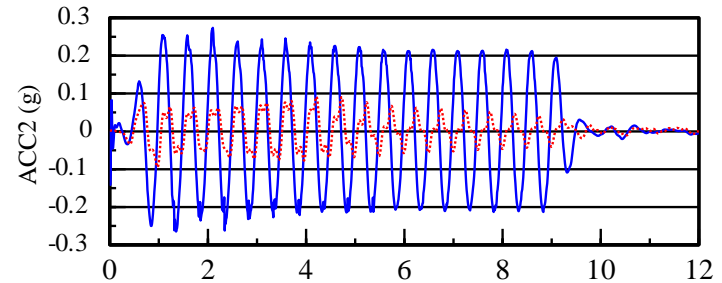
④ 直下1/2改良

# 加速度応答履歴

## (上からACC2, ACC5, ACC10)



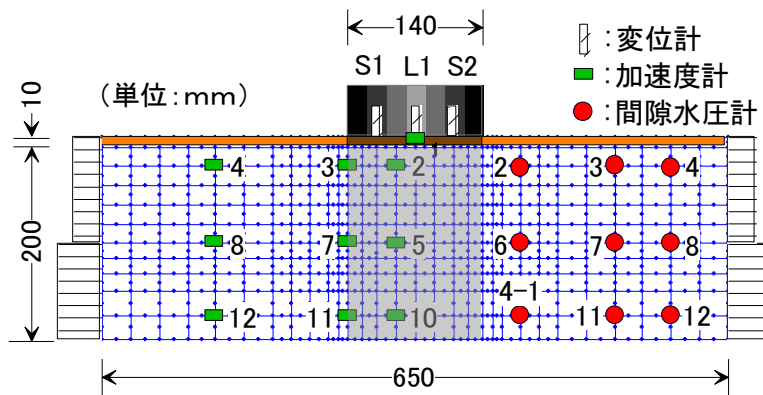
赤線:実験  
青線:解析



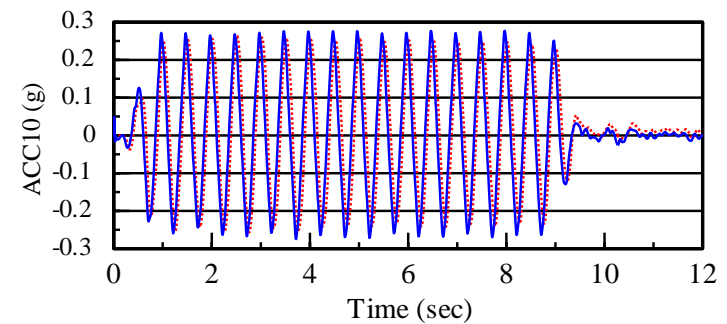
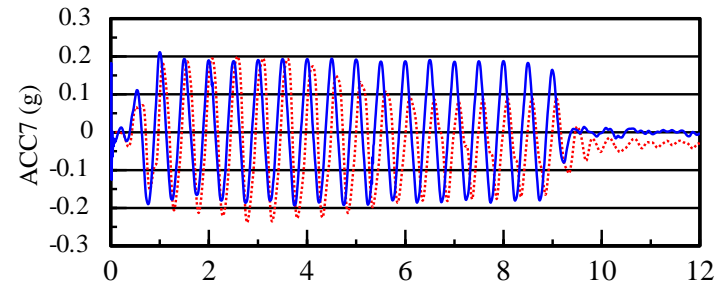
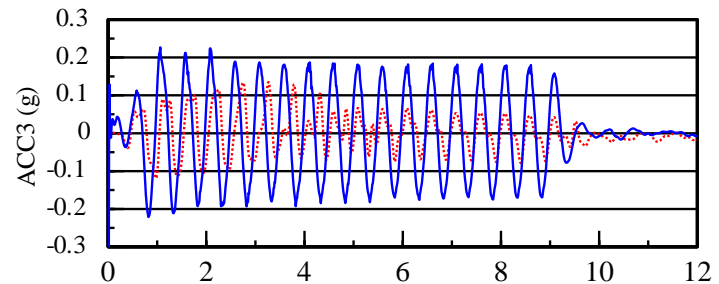


# 加速度応答履歴

(上からACC3, ACC7, ACC11)

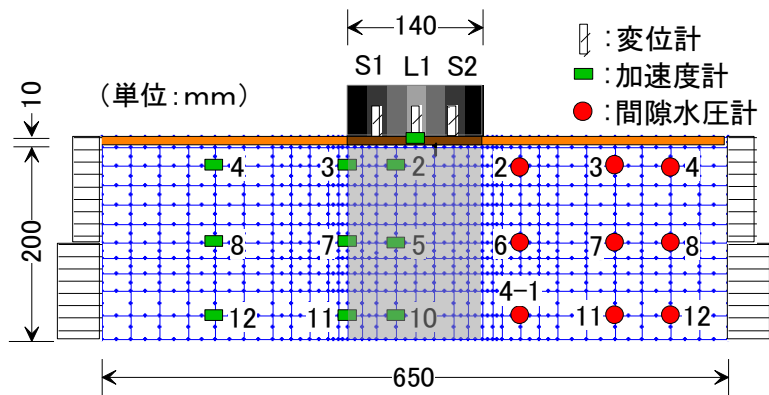


赤線:実験  
青線:解析

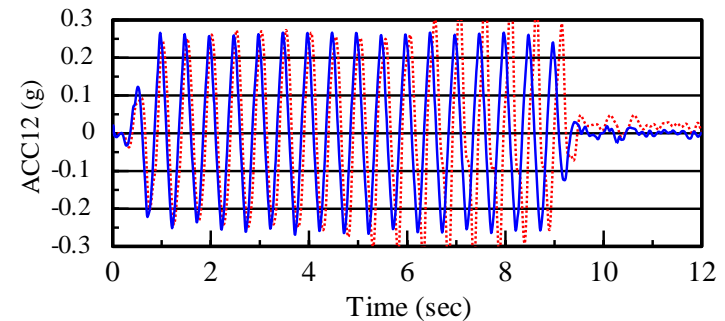
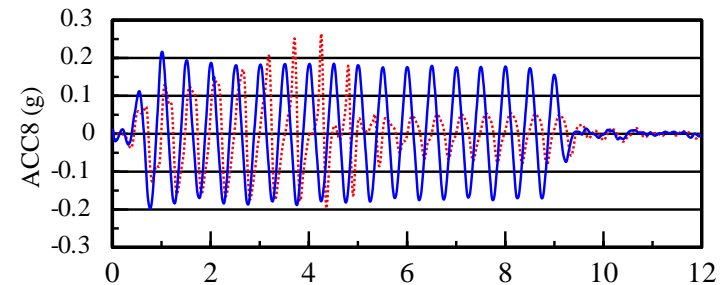
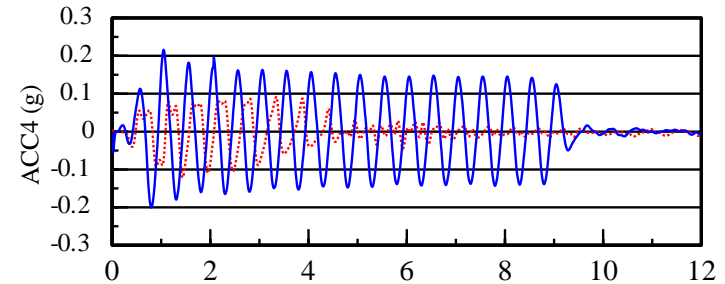


# 加速度応答履歴

(上からACC4, ACC8, ACC12)

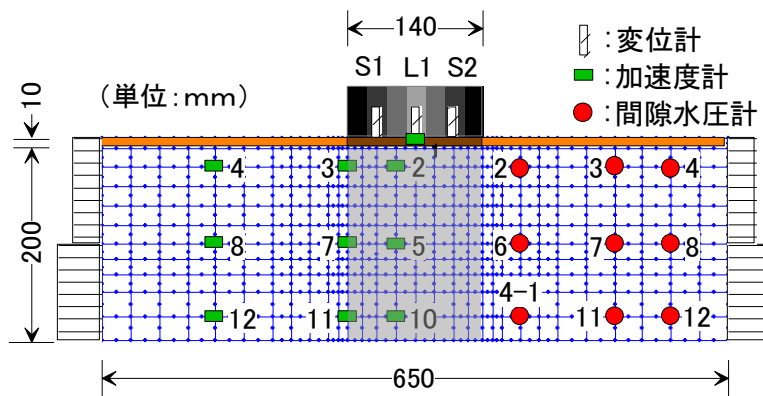


赤線:実験  
青線:解析

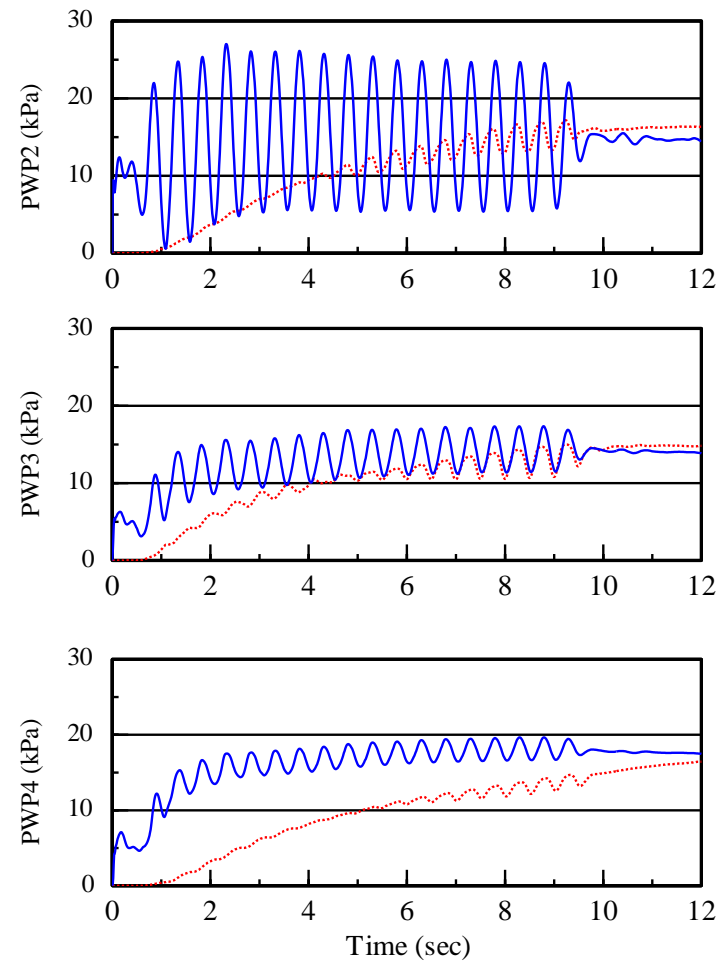


# 過剰間隙水压履歴

## (上からPWP2, PWP3, PWP4)

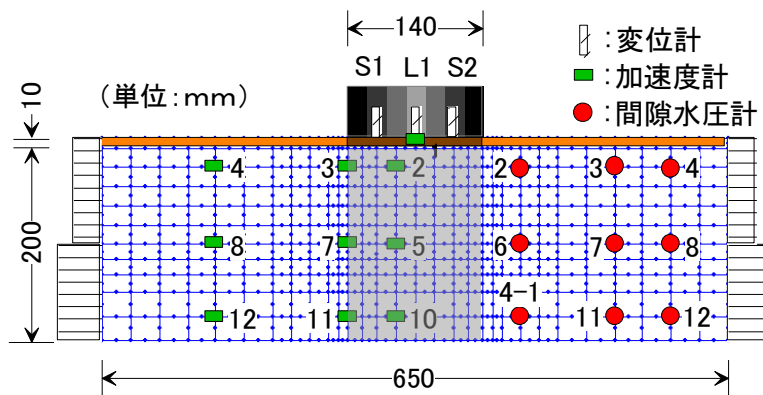


赤線: 実験  
青線: 解析

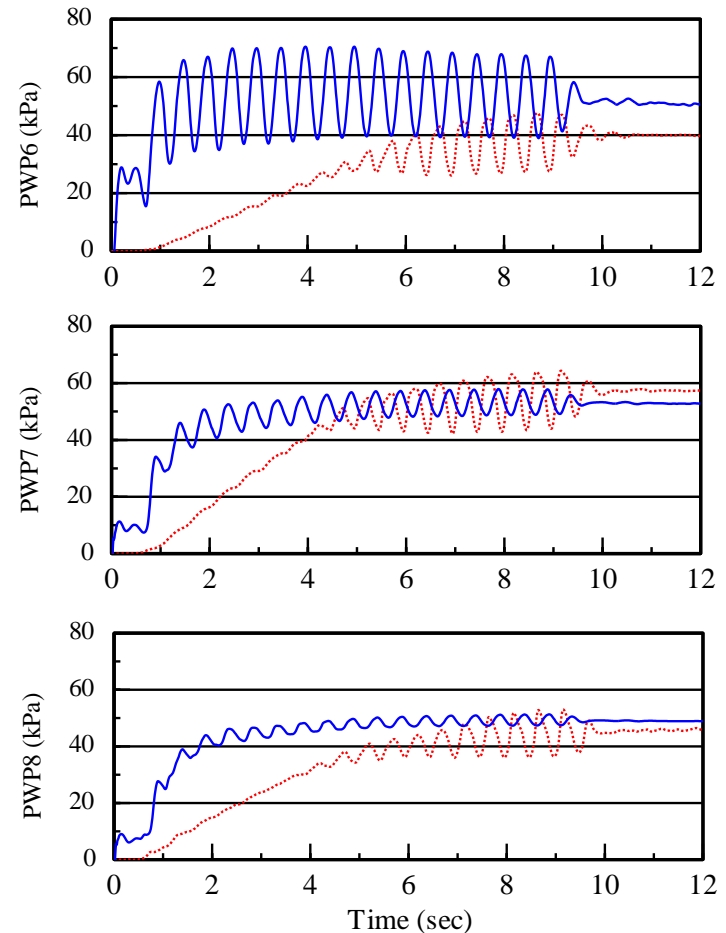


# 過剰間隙水压履歴

## (上からPWP6, PWP7, PWP8)

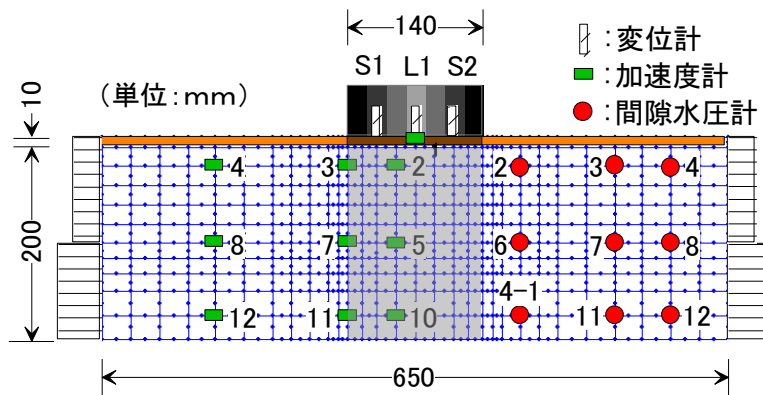


赤線: 実験  
青線: 解析

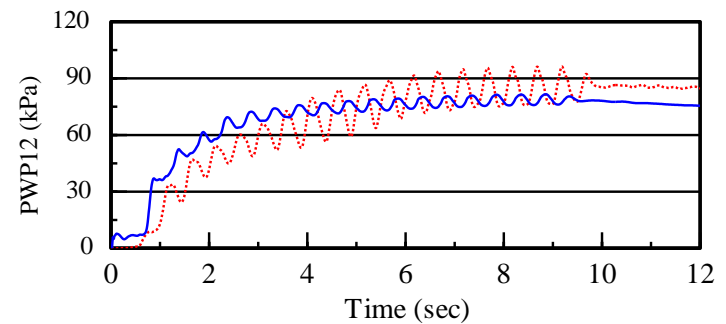
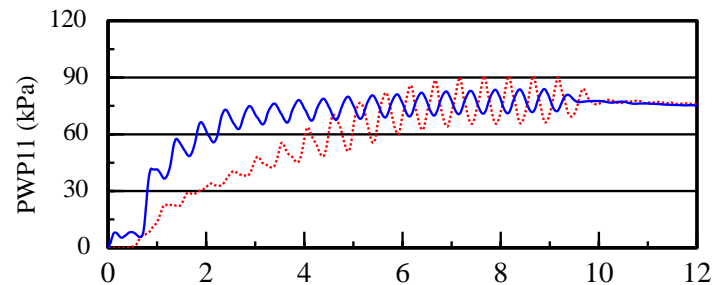
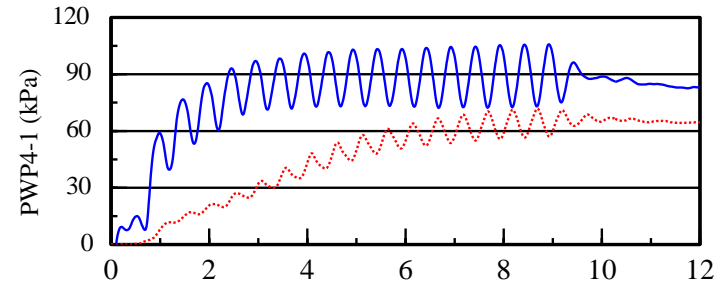


# 過剰間隙水压履歴

## (上からPWP4-1, PWP11, PWP12)

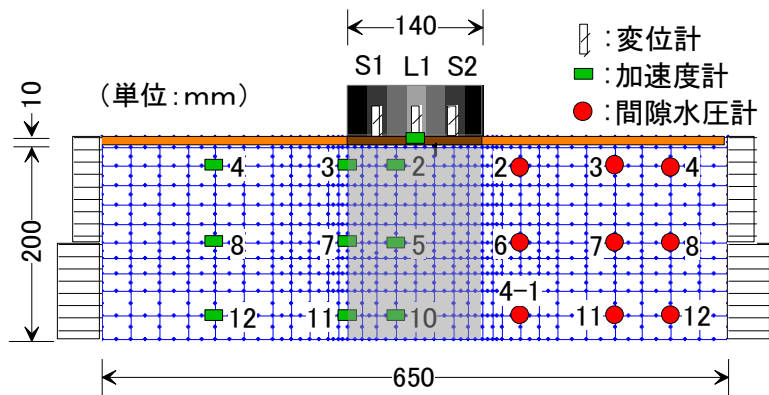


赤線: 実験  
青線: 解析

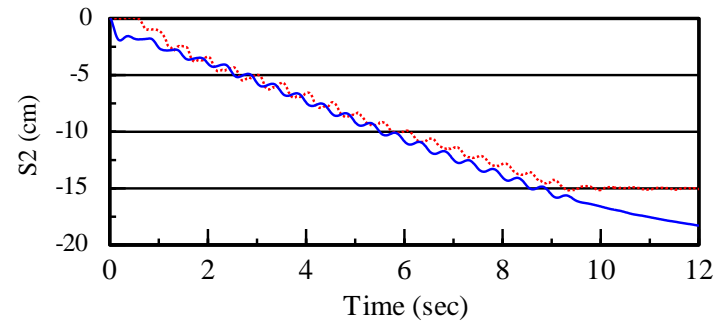
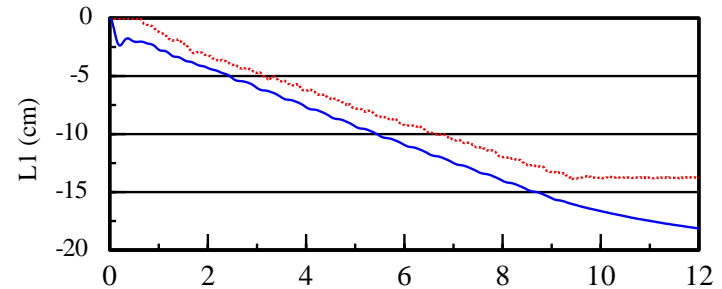
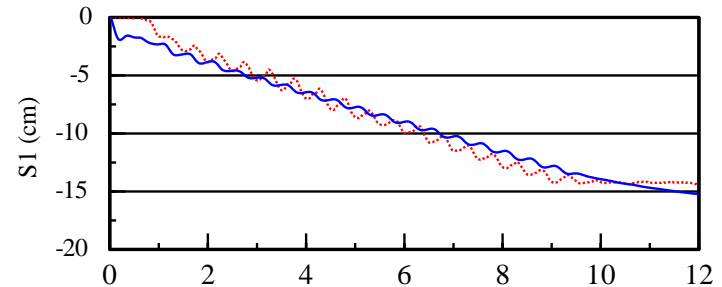


# 沈下履歴曲線

## (上からS1, L1, S2)



赤線: 実験  
青線: 解析





# 結論

- ①改良した3ケースにおいて解析と実験結果の比較より、2次元有効応力液状化解析が有効である.
- ②本研究の砂地盤に用いた薬液注入固化工法を用いた地盤改良において、その効果(沈下抑制、液状化抑制等)を確認した.
- ③本解析プログラムを用いると、改良体を有するような複雑な地盤に対しても、様々な液状化対策を検討した上で、最も効果的な工法を選定することにより、コストを削減できることが期待される.

第27回地震工学研究発表会，大阪，2003年12月10日

# 数値解析による液状化対策工の 定量的な効果判定と最適な工法選定の検討

蔡飛，群馬大学工学部建設工学科

鵜飼恵三，群馬大学工学部建設工学科

萩原敏行，西松建設株式会社技術研究所

# 研究の目的:

- ・ 数値解析による液状化対策工の定量的な効果判定と最適な工法選定の手法を提案する。
- ・ 具体例に対して、提案した手法により、最適な液状化対策工法の選定が可能であることを示す。

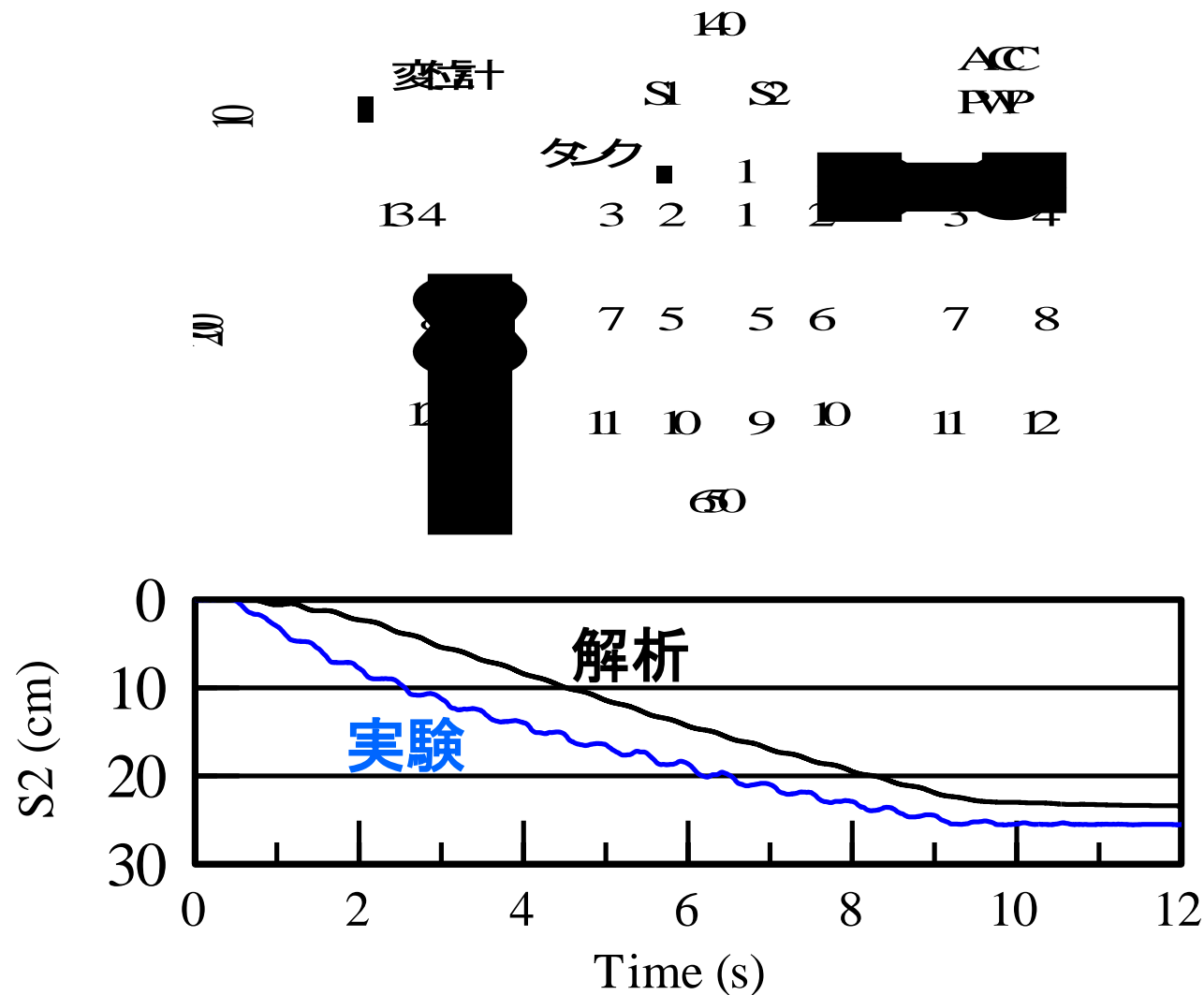
# 最適な液状化対策工法選定の手法

- ① 地震後の許容沈下量や許容不等沈下量等を設定する。
- ② 有効応力液状化解析により地震後の既設構造物の沈下量等を計算し、液状化対策工の効果を定量的に評価比較する。
- ③ 液状化による沈下量や不同沈下量をそれぞれ許容沈下量や許容不同沈下量以下に抑えることができる液状化対策工を選ぶ。
- ④ コストの比較を含めて最適な液状化対策工法を選定する。

既設タンク基礎砂地盤において最適な液状化対策工法を選定してみましょう。

- ① 地震後の許容沈下量を13cmであるとした。
- ② 液状化対策工(矢板、鋼管杭、改良土)を選び、地震時の沈下量や許容沈下量を計算する。

# 無対策時の解析結果と動的遠心模型実験結果との比較



点S2の沈下量の経時変化

## 矢板と鋼管杭の解析ケース

対策工	根入れ深さ(m)	沈下量(cm)
無対策	—	23.8
矢板	3.5	19.9
矢板	5.5	19.2
矢板	7.5	20.6
矢板	10.5	24.6
透水性矢板	5.5	19.9
鋼管杭	3.5	15.7 (24.4)*
鋼管杭	5.5	13.6 (21.0)*
鋼管杭	7.5	12.9 (19.6)*
鋼管杭	10.5	12.6 (19.5)*

注：\*括弧内の沈下量はタンク両側の鋼管杭の杭頭がタンク基礎と連結していないときの値である。

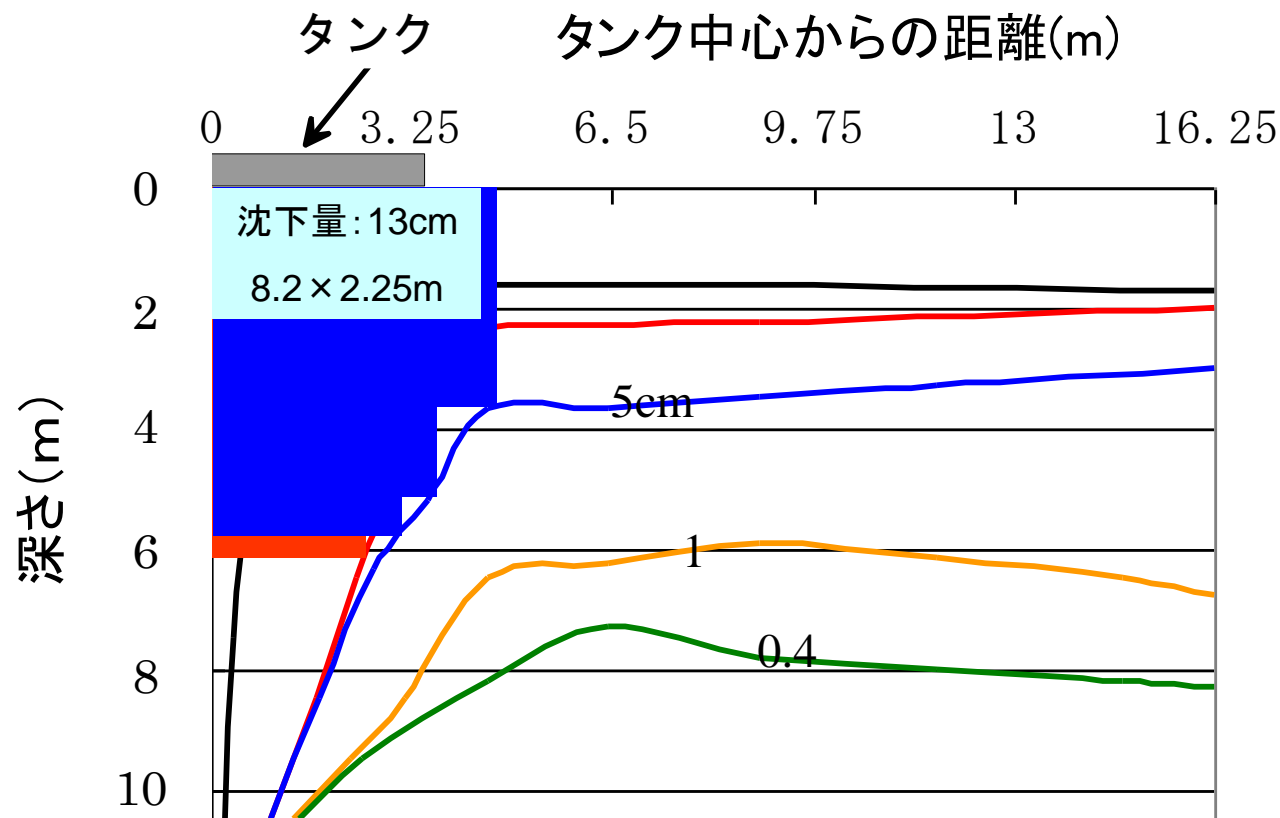
# タンク直下だけを改良の解析ケース

粘着力c(kPa)	改良深さ(m)	沈下量(cm)
4.91	5.5	4.74
4.91	10.5	0.16
9.81	3.5	11.1
9.81	5.5	4.55
9.81	10.5	0.14
19.6	3.5	10.2
19.6	5.5	4.20
19.6	10.5	0.15
39.2	3.5	9.02
39.2	5.5	3.64
39.2	10.5	0.15



# 液状化対策工の定量的な効果判定と最適な工法選定の検討

改良範囲と加振後のタンク沈下量との関係  
(改良土  $c=9.81\text{kPa}$ 、 $\phi=39^\circ$ )



既設タンク基礎砂地盤において最適な液状化対策工法を選定してみましょう。

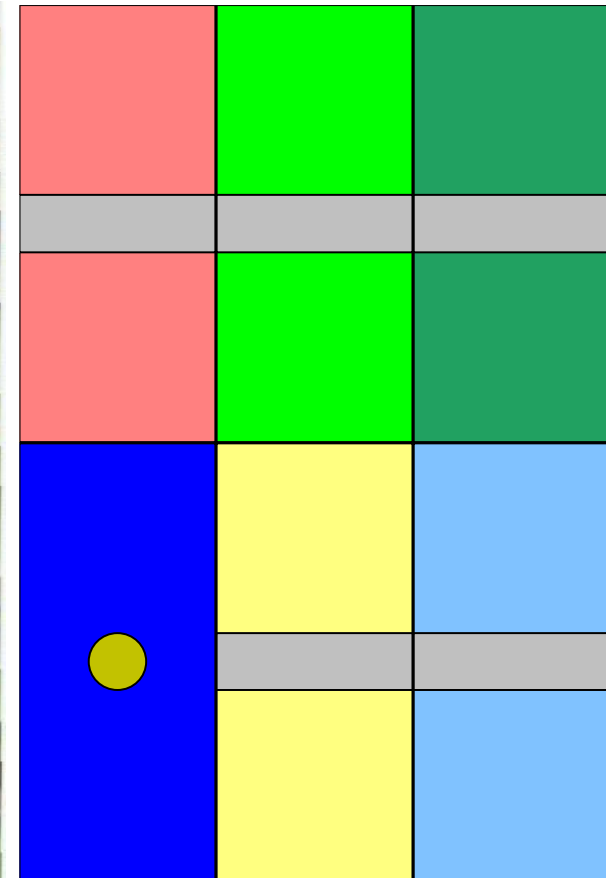
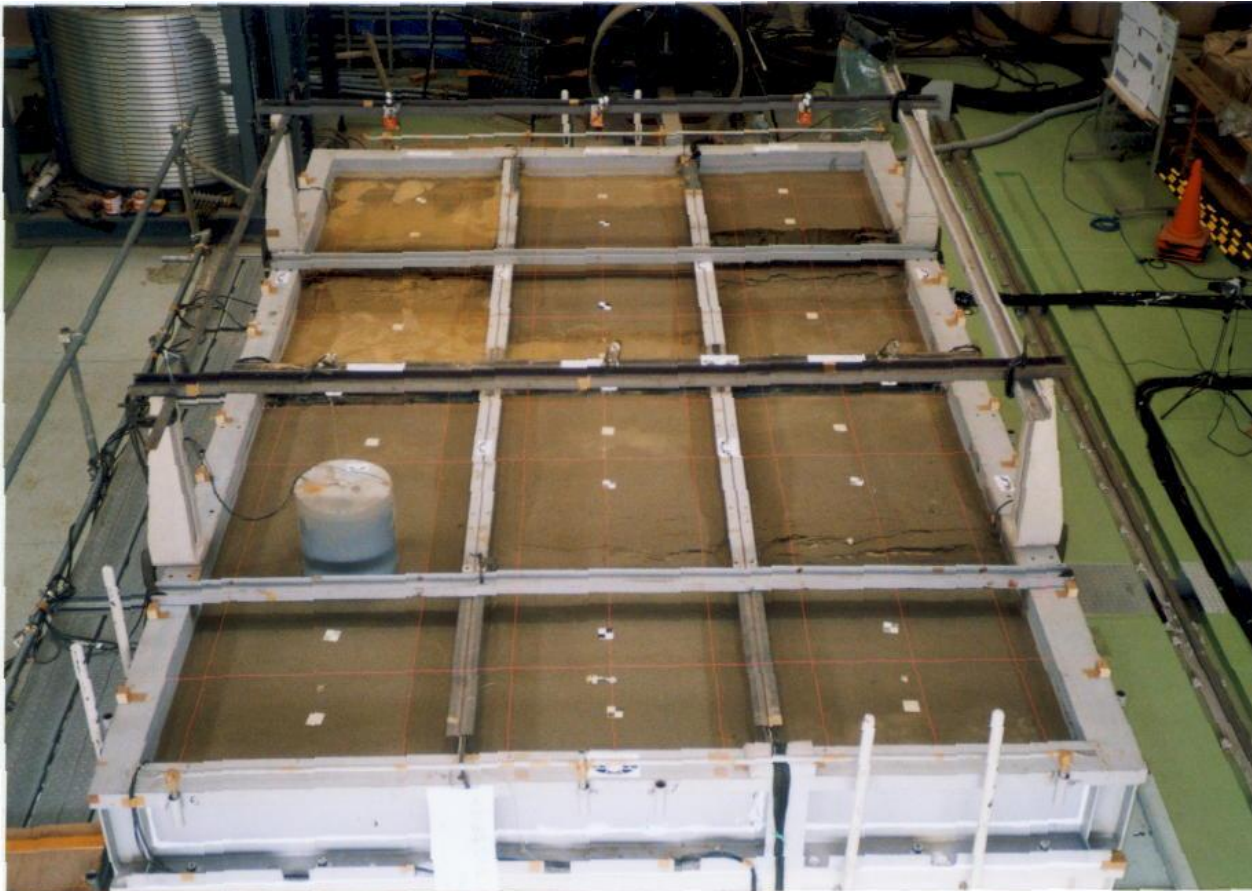
- ① 地震後の許容沈下量を13cmであるとした。
- ② 液状化対策工(矢板、鋼管杭、改良土)を選び、地震時の沈下量や許容沈下量を計算する。
- ③ 解析結果より、地震後の沈下量を許容沈下量以下に抑えることができる対策工が以下の二つである:①鋼管杭(直径 $D=0.5\text{m}$ 、打設間隔 $=2D$ 、打設深さ $=5.5\text{m}$ )、②改良土(改良深さ $2.25\text{m}$ 、幅 $8.2\text{m}$ )。
- ④ 鋼管杭と改良土の全工費を計算・比較し、最適な液状化対策工を選定できる。

## まとめ：

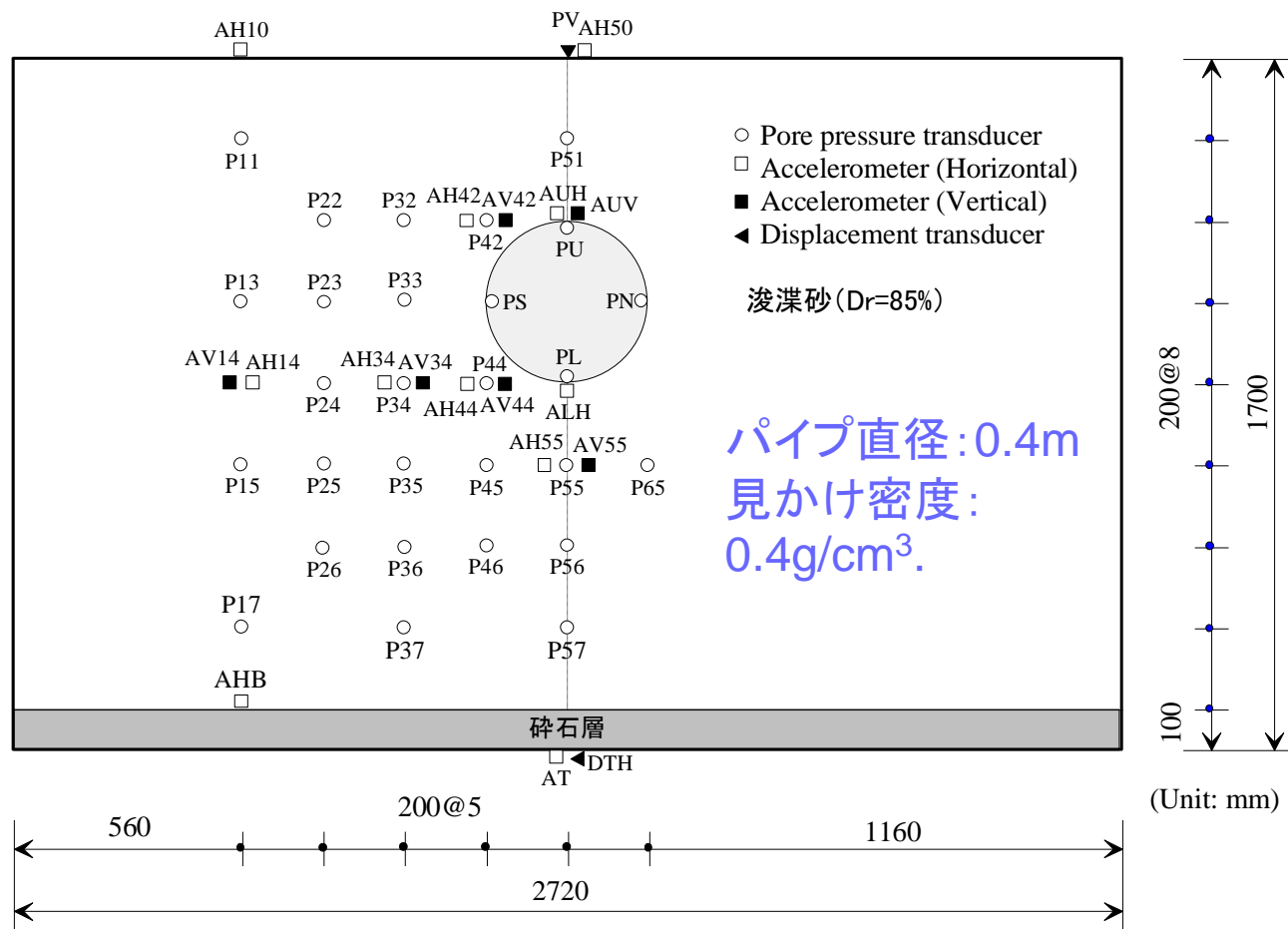
- ・ 数値解析により、各種液状化対策工の定量的な効果比較と最適な工法選定の手法について提案した。
- ・ 提案した手法を用い、既設タンクの液状化対策工法の定量的な効果判定と最適な工法選定を実施し、その有効性を示した。

# 液状化によるパイプの浮き上がり

## 大型振動台実験



# 液状化によるパイプの浮き上がり

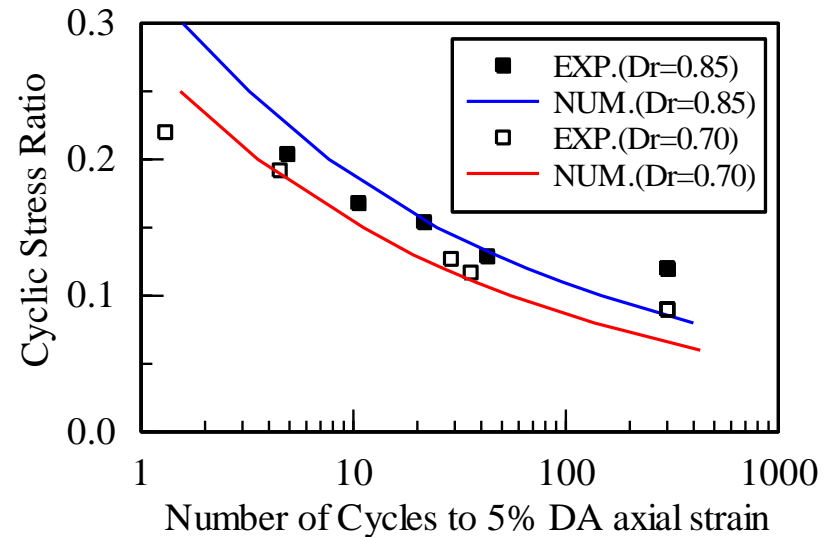
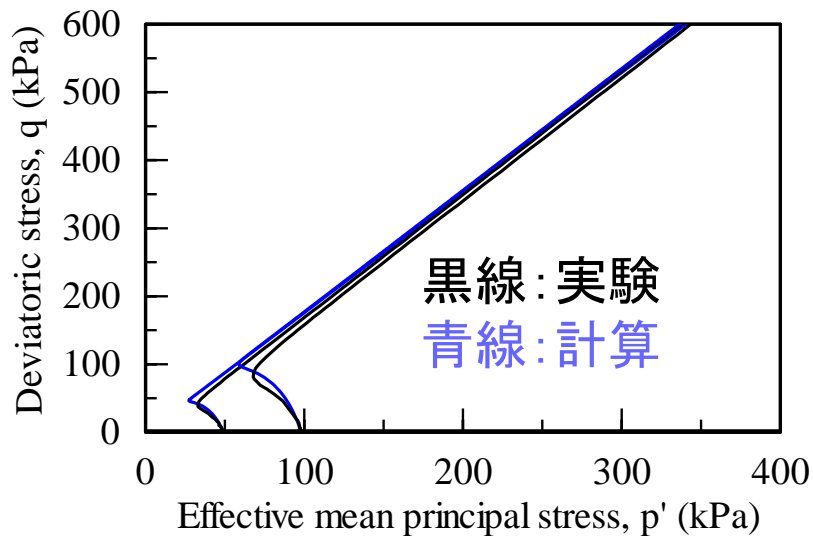


## 問題のモデル化

- 解析範囲
- 境界条件
- 解析手法
- パイプ
- 構成式
- 入力波

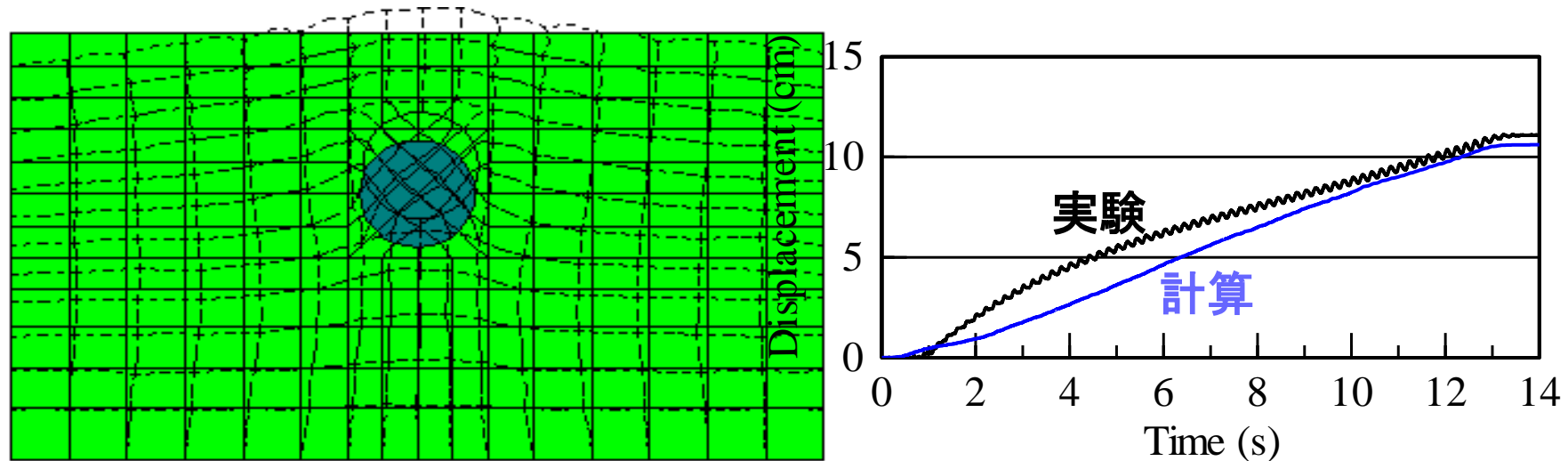
# 液状化によるパイプの浮き上がり

## 三軸試験結果よりPZ砂モデルパラメータの同定



# 液状化によるパイプの浮き上がり

## メッシュ分割、浮き上がり

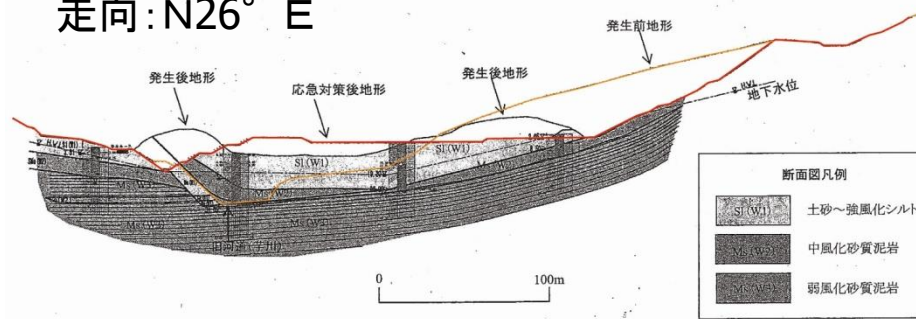




# 新潟県中越地震 東竹沢地すべり現地の写真

長さ:350m 幅:295m 移動土塊:約130万 $\text{m}^3$

走向:N26° E



断面図



崩壊直後の様子



現状の地形 2007年6月



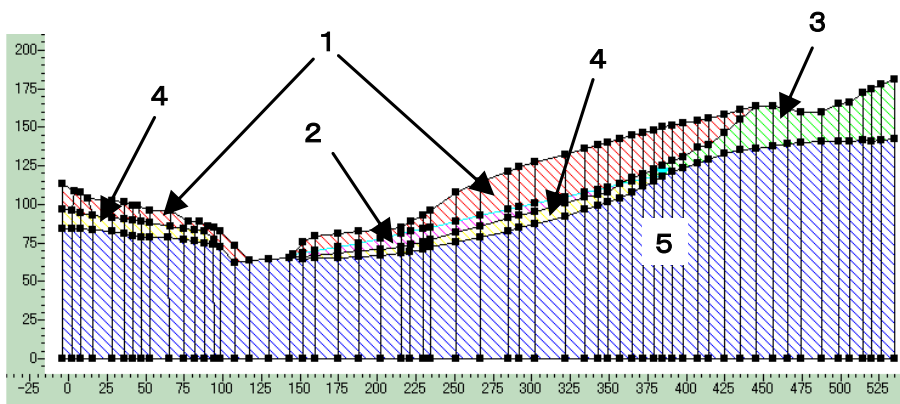
# 東竹沢の解析モデル

## 解析ケース

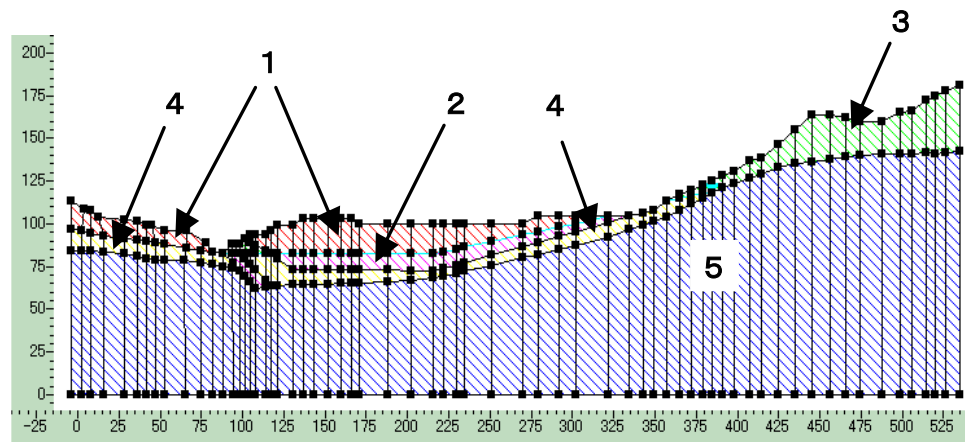
case	モデル図	解析方法
1	崩壊前	有効応力法を用いた地すべり解析
2	崩壊前	全応力法を用いた地すべり解析
3	崩壊後	通常地下水位での安全性解析
4	崩壊後	地下水位が上昇したときの安全性解析

## 構成モデル

No			動的解析
1	赤	砂質シルト層(地下水位以上)	ROモデル
2	紫	砂質シルト層(地下水位以下)	PZ-Sandモデル
3	緑	中風化砂質泥岩層(地下水位以上)	ROモデル
4	黄	中風化砂質泥岩層(地下水位以下)	ROモデル
5	青	弱風化砂質泥岩層	弾性モデル



崩壊前のモデル図



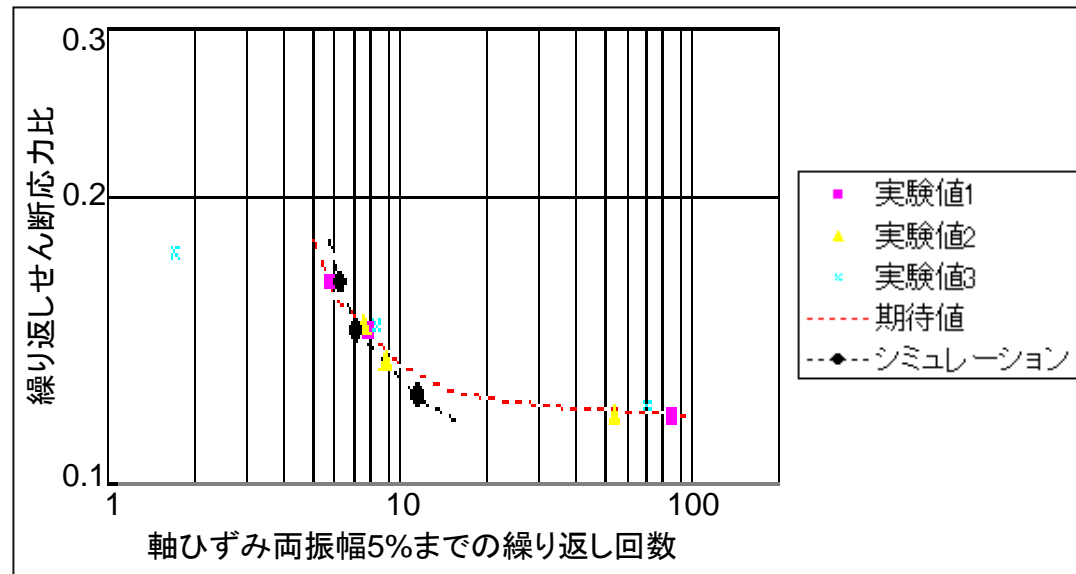
現状斜面のモデル図

# 材料パラメータの確定

## PZ-Sandモデル パラメータ

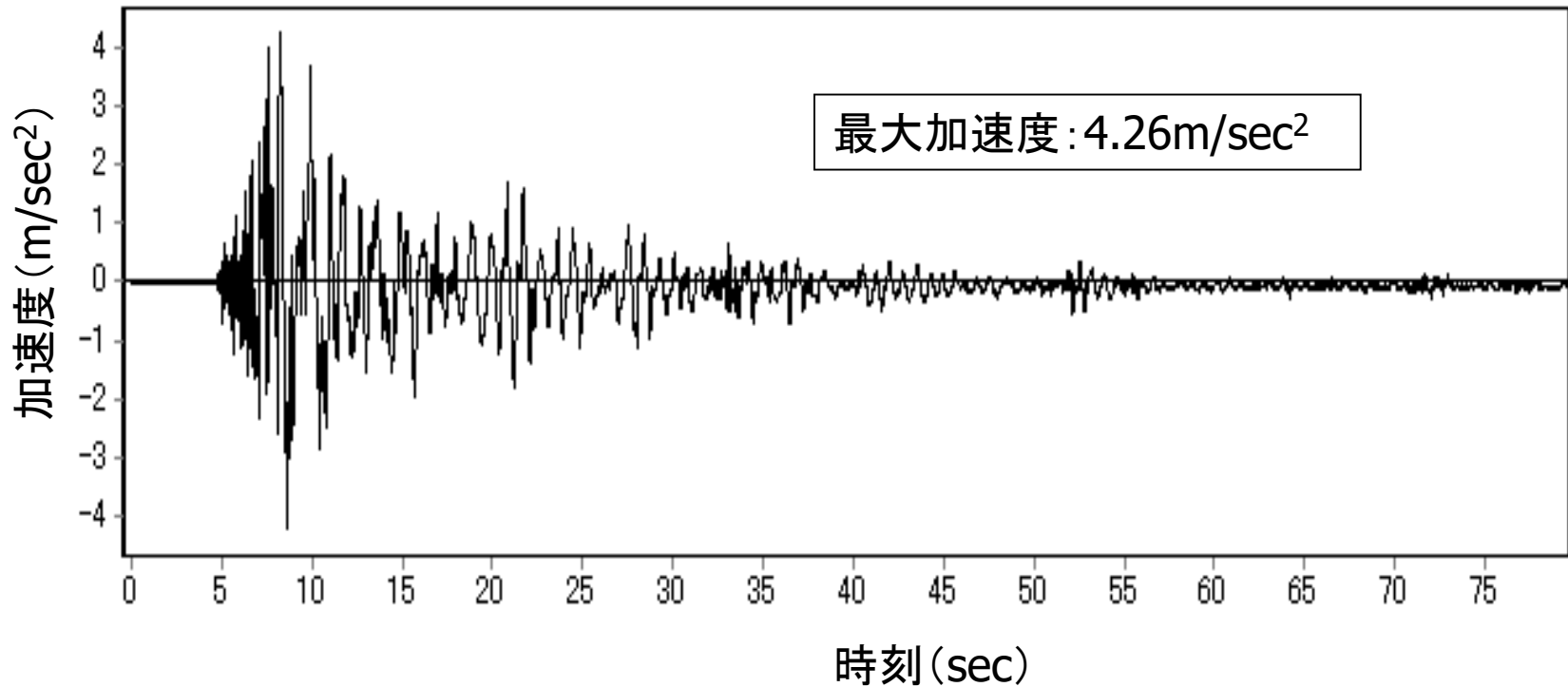
Mf	Mg	C	$\alpha_f$	$\alpha_g$	Kevo	Geso	mv	ms	$\beta_0$	$\beta_1$	Ho	Huo	$\gamma$	$\gamma_u$	Po	OCR
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	kN/m <sup>2</sup>	-	-	kN/m <sup>2</sup>	-
0.57	1.27	0.9	0.45	0.45	90	130	0.5	0.5	8	0.01	6000	8000	2.2	1.6	50	1

## 要素シミュレーションの結果（液状化強度曲線）



# 入力波形

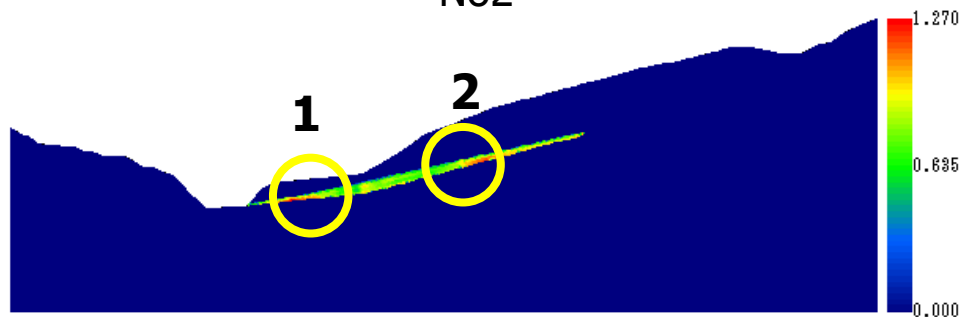
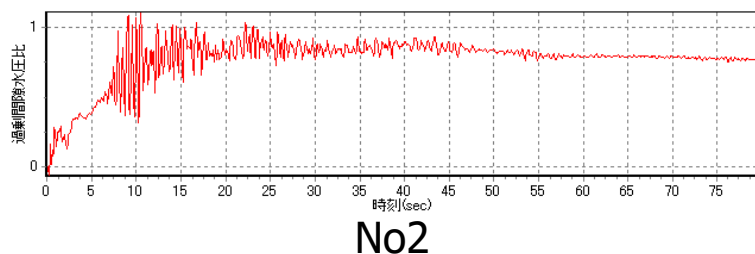
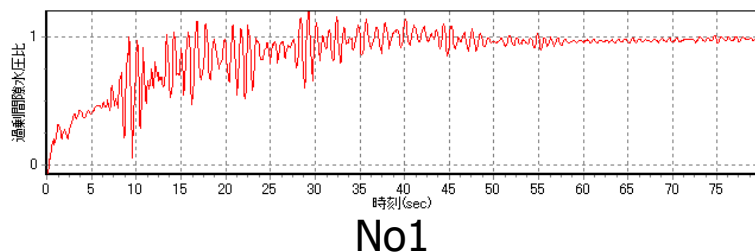
中越地震時の山古志村竹沢地震波形(気象庁HP)を  
参考に作成



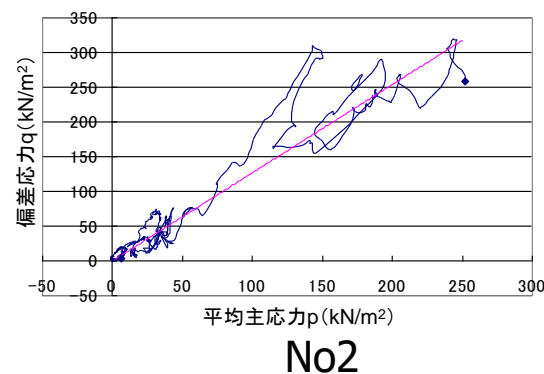
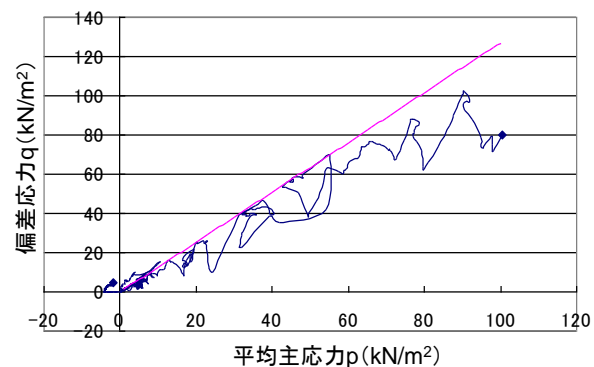
# 解析結果（液状化の判定）

## 液状化を考慮した解析（case1）

過剰間隙水圧比の時刻歴



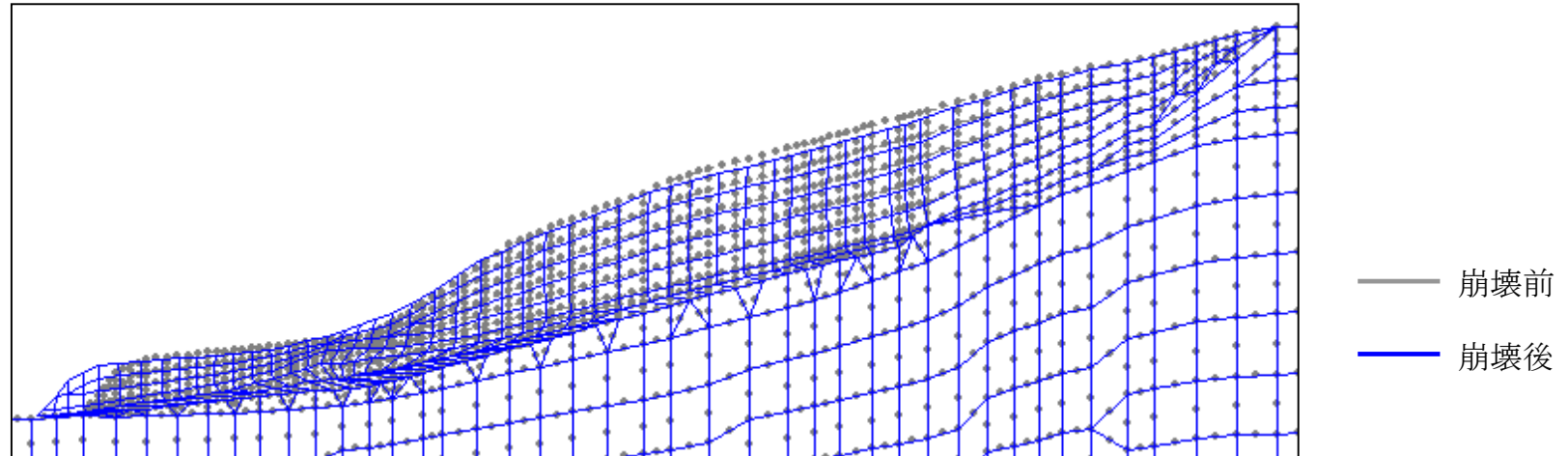
平均主応力と偏差応力の変化



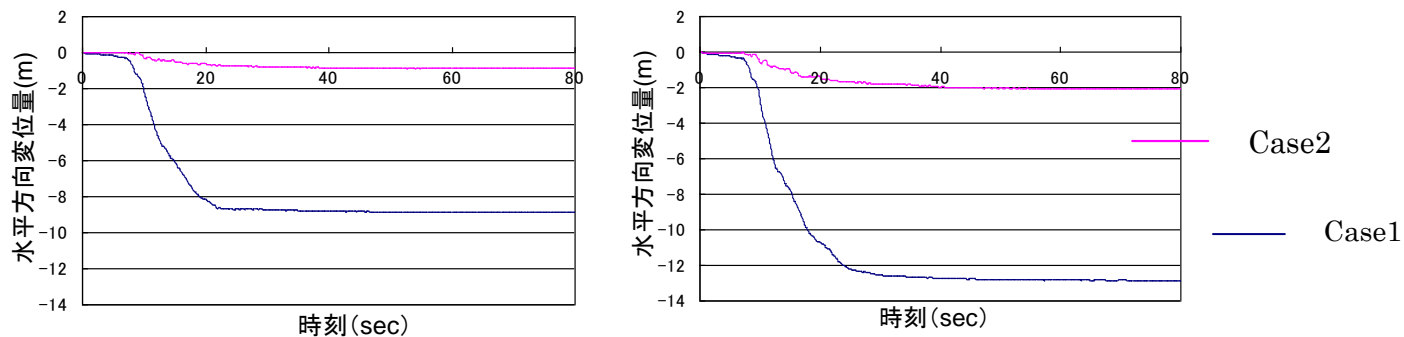
—  $p - q$  —  $M_g$   
(破壊応力比)

# 解析結果(水平方向変位)

case1の変位図

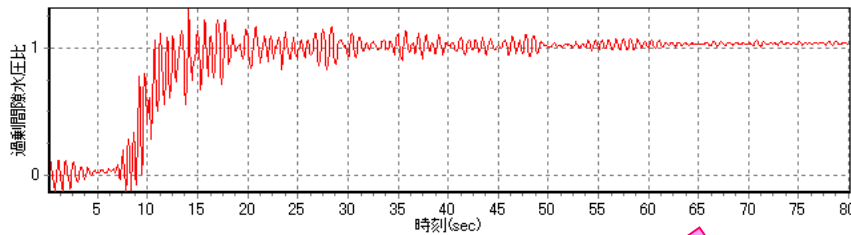


case1と、case2の水平方向変位(先端部)

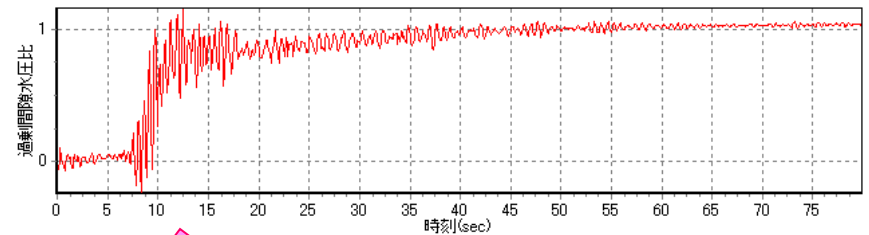


# 現状斜面での安全性解析

case3、case4での過剰間隙水圧比



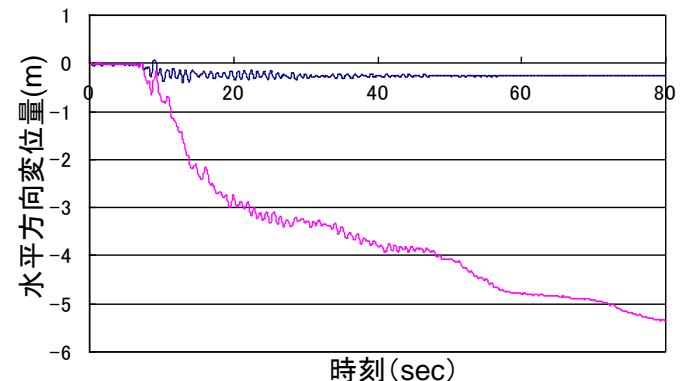
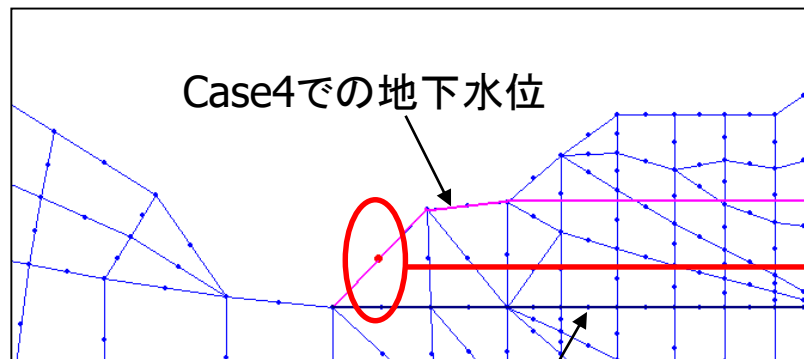
case3



case4

双方で液状化が起きている

水平方向変位の比較



— Case3 — Case4

# 結論

- case1、case2の解析結果により、液状化が起きることによって斜面崩壊に多大な影響を及ぼすことがわかった。
- case3、case4の解析結果により、地下水位が上昇した場合は崩壊の危険性がある。
- 締め固め、地盤改良等の対策を検討する必要があると考えられる。

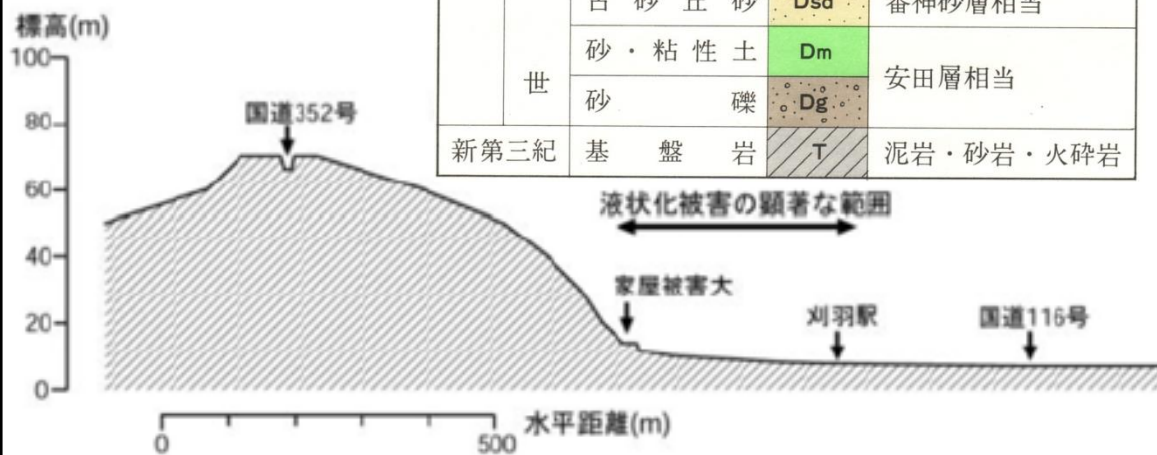
# 中越沖地震時における液状化による 家屋被害の事例解析

Xu, L.-Y., Cai, F., Wang, G.-X., Ugai, K., Wakai, A., Yang, Q.-Q., and Onoue, A.: Numerical assessment of the liquefaction mitigation effects on the residential houses: case histories of the 2007 Niigata Chuetsu-offshore earthquake, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, Vol. 53, pp. 196-209, 2013.

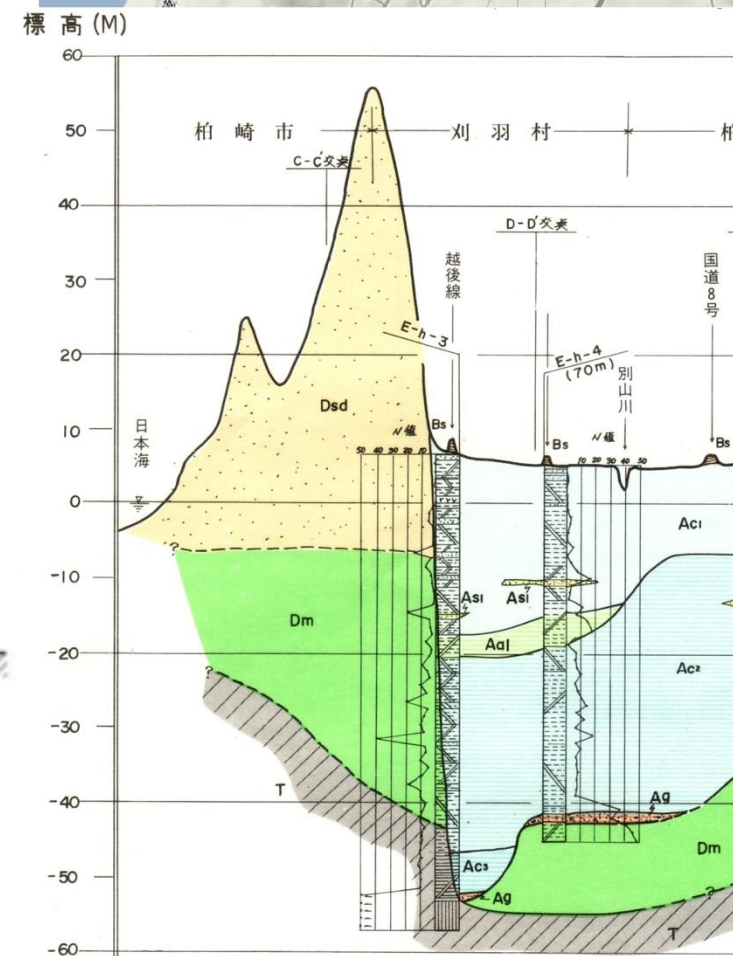


# 地層区分表

地質時代	地層区分	記号	備考
第 四 世 紀	盛土	Bs	
	新期砂丘砂	Asd	
	沖積部	腐植土	Ap
		粘性土	Ac <sub>1</sub>
		砂	As <sub>1</sub>
		砂礫	Atg
	沖積中部	粘性土	Ac <sub>2</sub>
		砂	As <sub>2</sub>
		砂・粘性土互層	Aal
	沖積下部	粘性土	Ac <sub>3</sub>
		砂	As <sub>3</sub>
		砂礫	Ag
	古砂丘砂	Dsd	番神砂層相当
	砂・粘性土	Dm	安田層相当
	砂礫	Dg	
新第三紀	基盤岩	T	泥岩・砂岩・火砕岩



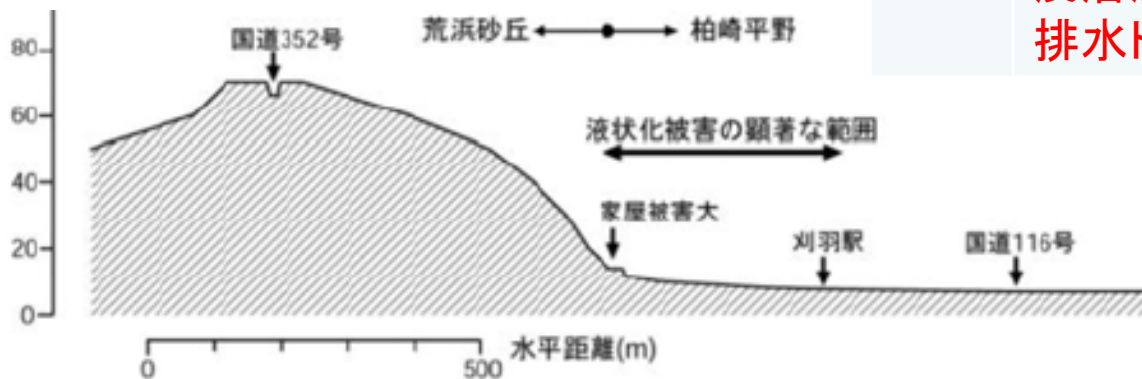
刈羽村稲場地区の概略地形(上)  
荒浜駅付近での断面図(右)



# 2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害事例

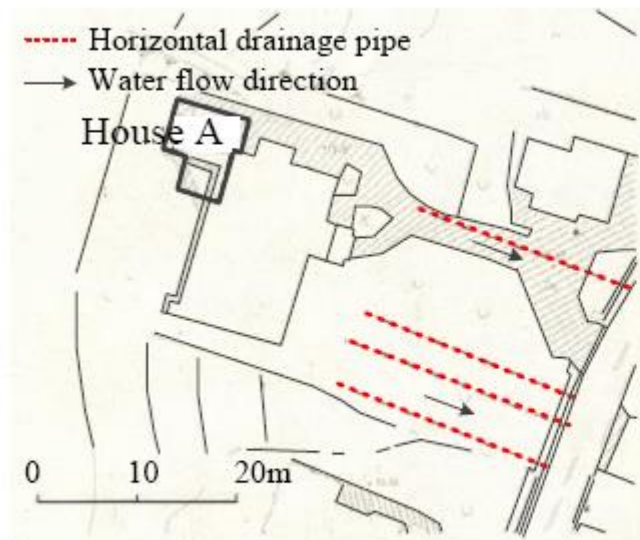


家屋	液状化対策	損傷	水平変位・沈下
A	排水パイプ	全損	水平変位130 cm 鉛直沈下120 cm
B	鋼管杭 浅層混合 排水ドレーン	軽微	水平変位は軽微 不等沈下12cm

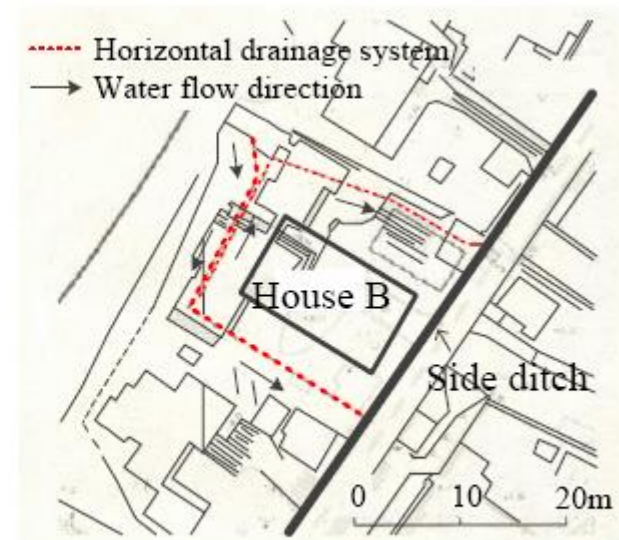




## 2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害事例

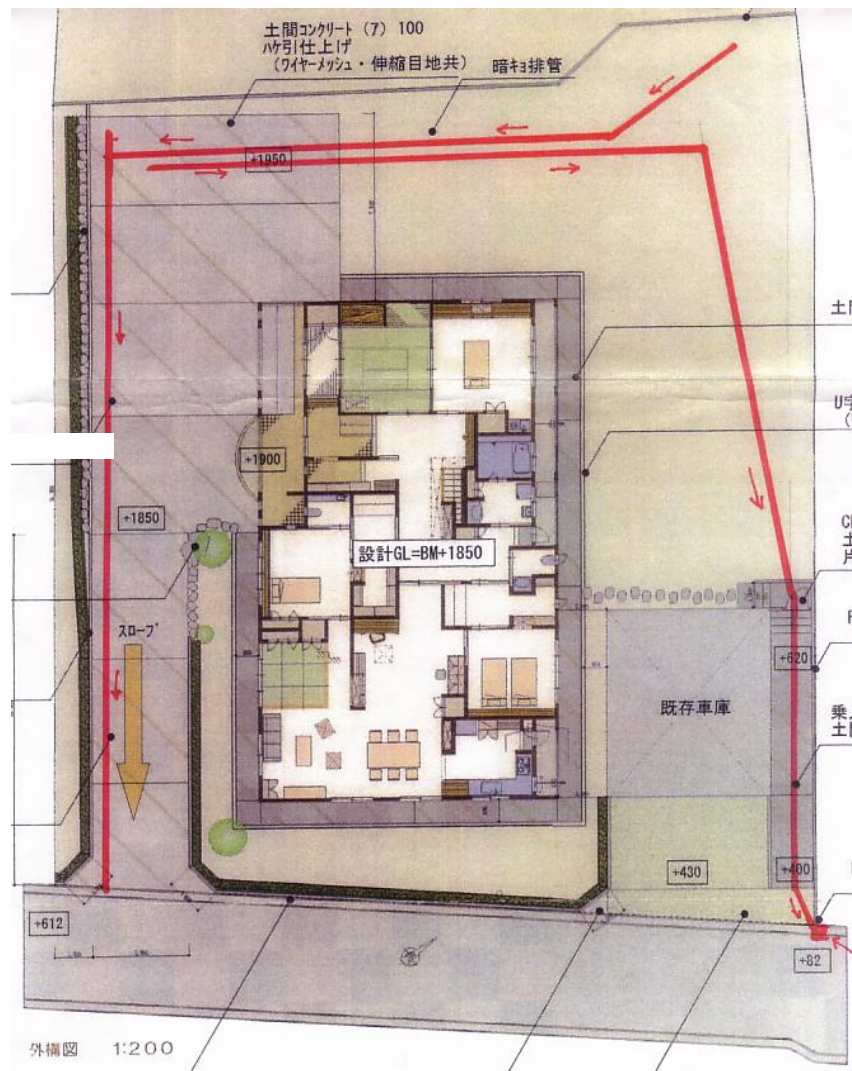


(a)



(b)

## B宅の暗渠排水工



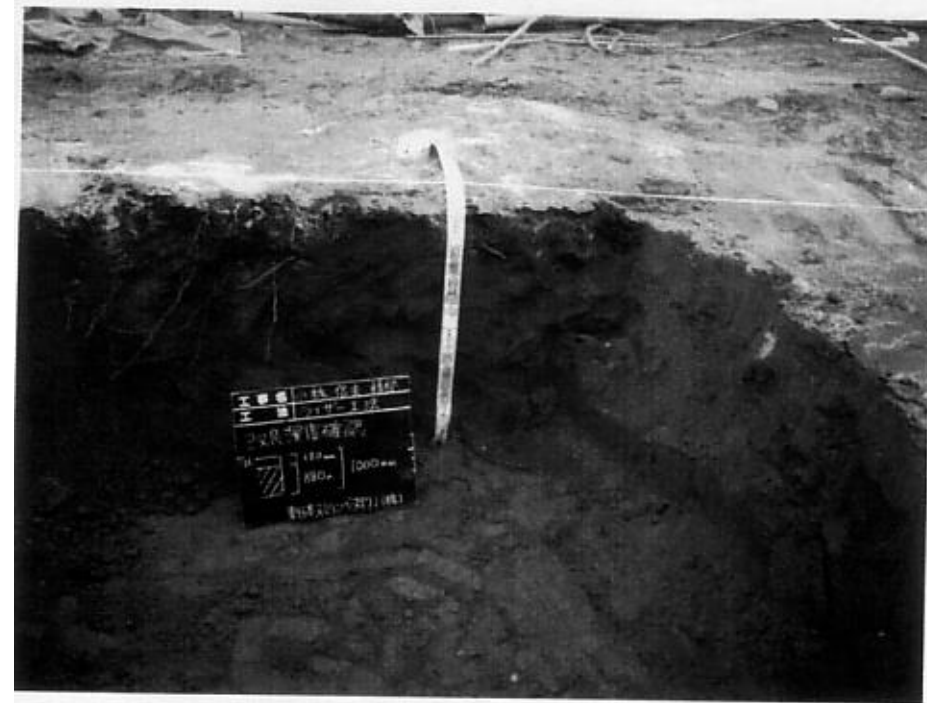
暗渠排水工(太赤線)の設置位置、  
設置状況、および排水状況



## B宅の浅層混合工法



混合攪拌状況  
全部10tのセメントを使用  
一軸圧縮強度:  $545\text{kN/m}^2$



改良深さの確認

住友林業の家

1階基礎伏図 1/80

深さ170

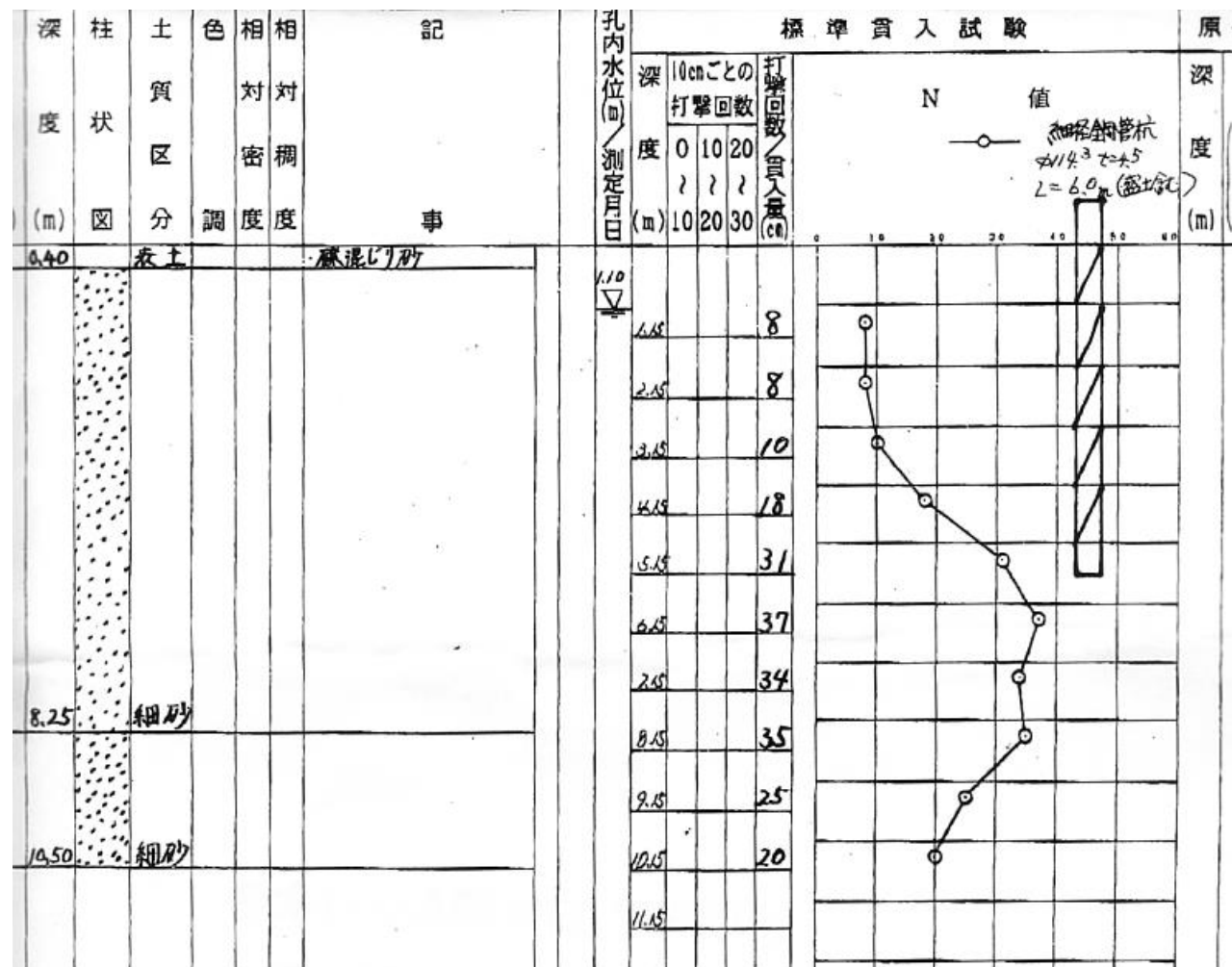
深さ120

深さ330

2023.254

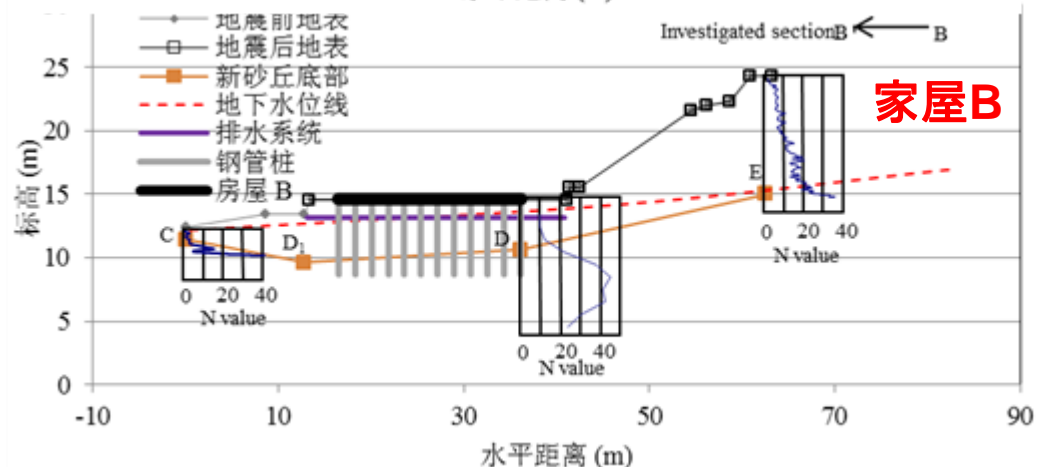
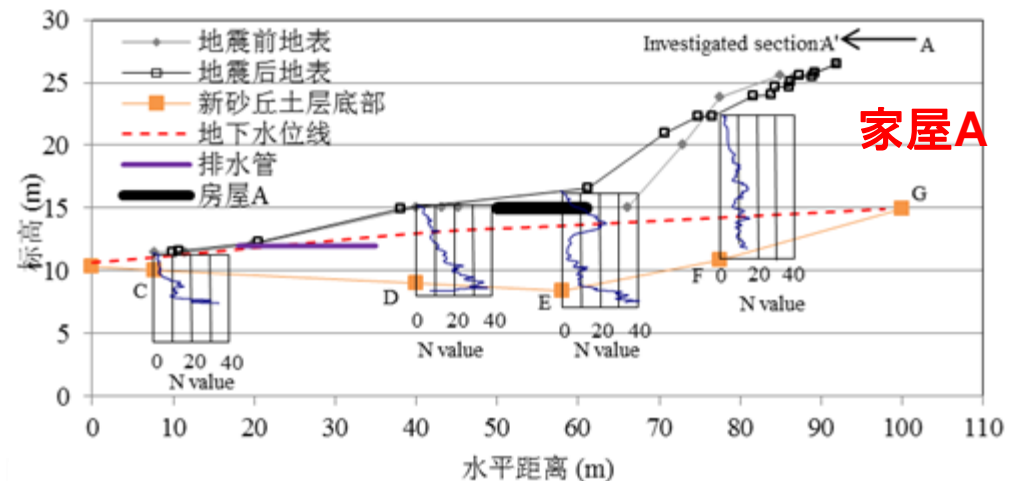
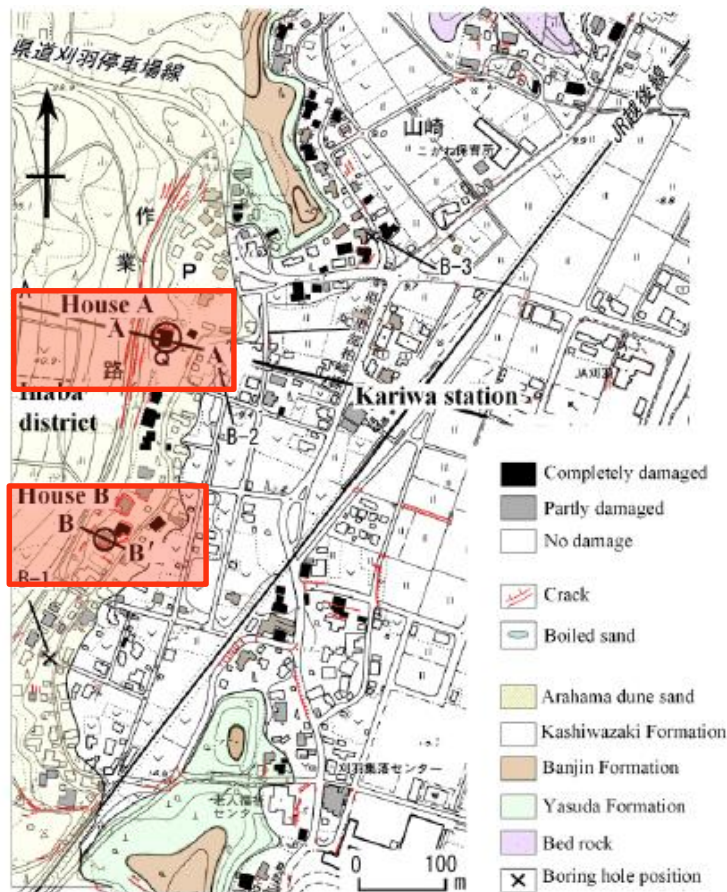
直径114mm、t=4.5mm、長さ6m、本数92

# B宅の標準貫入試験結果



# 2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

## 地震後の踏査

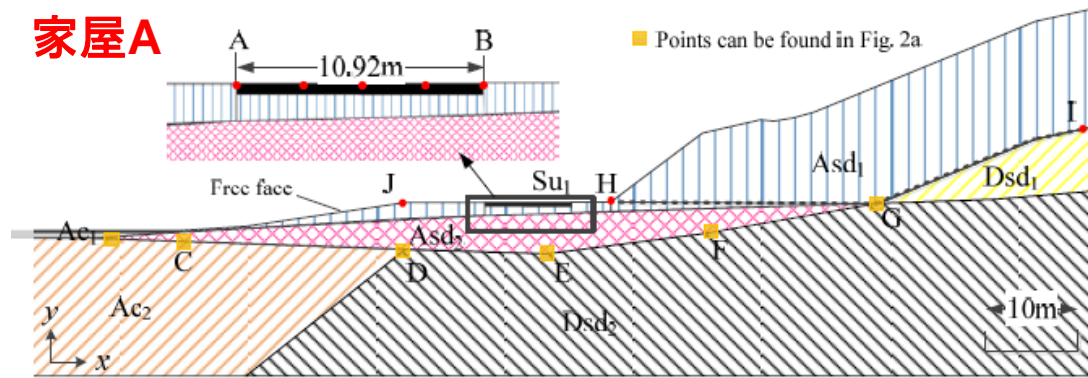




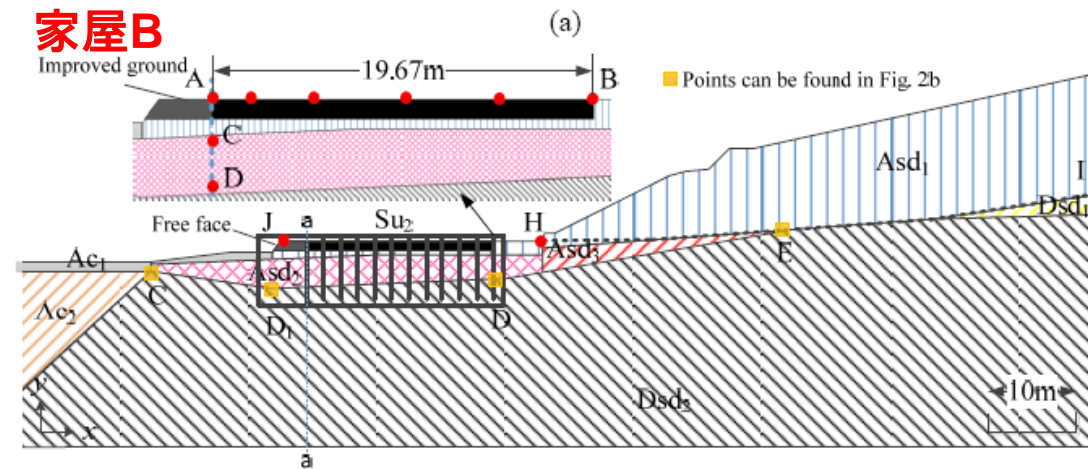
# 2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

## FEMモデル

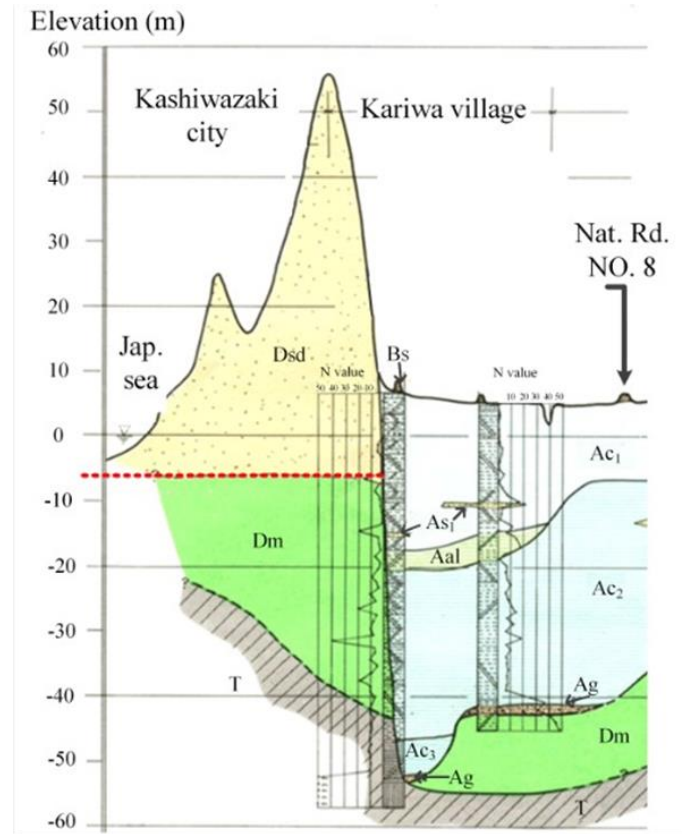
### 家屋A



### 家屋B



(b)



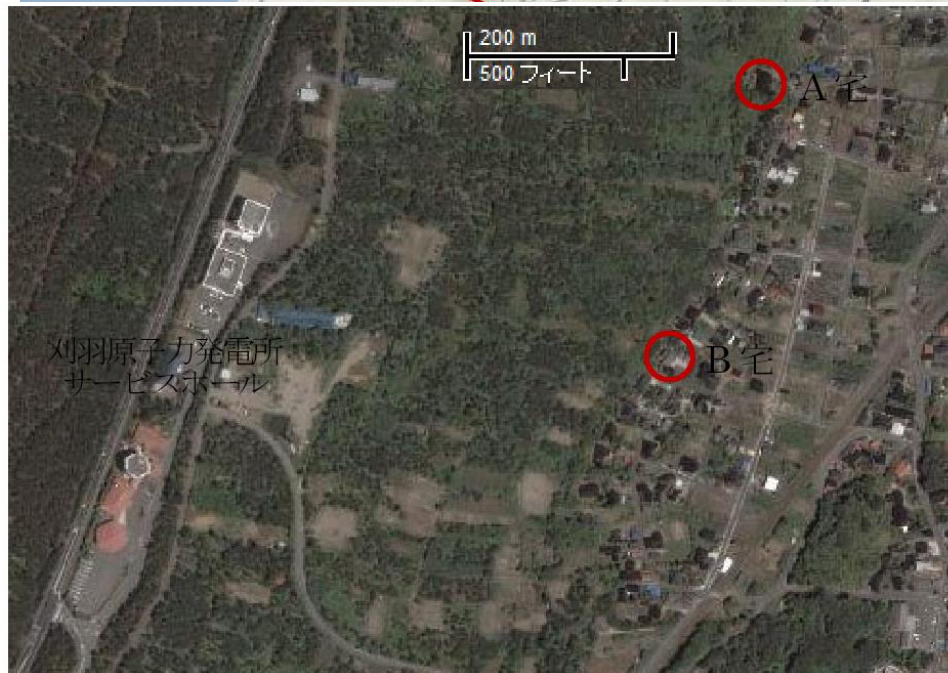
Asd: 新砂丘

Dsd: 旧砂丘

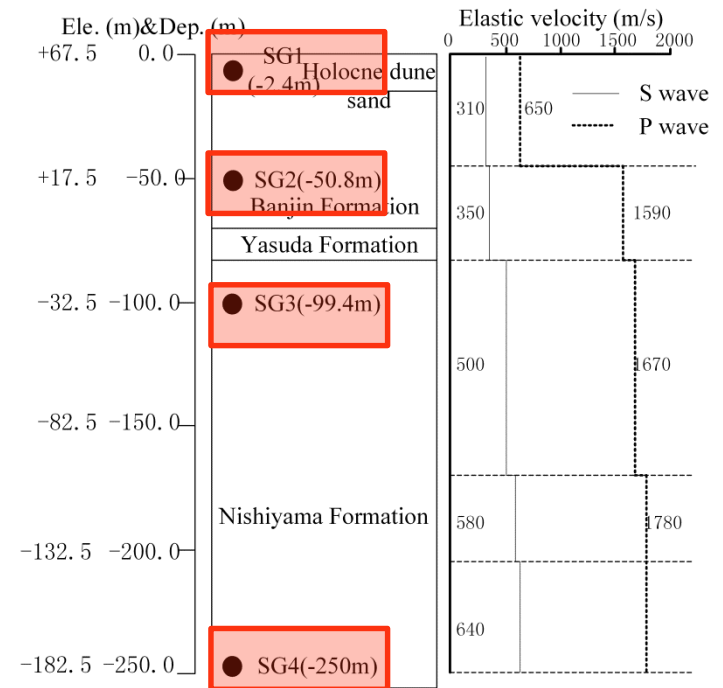
Ac: 粘性土

# 2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

## 地震波の選定



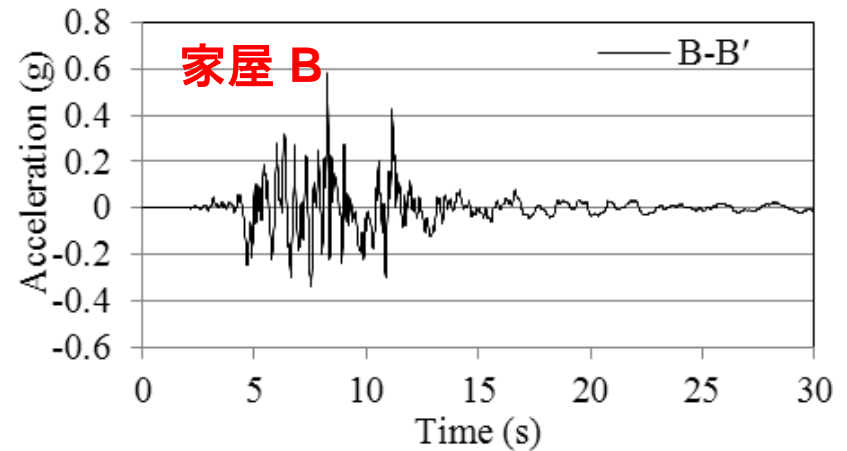
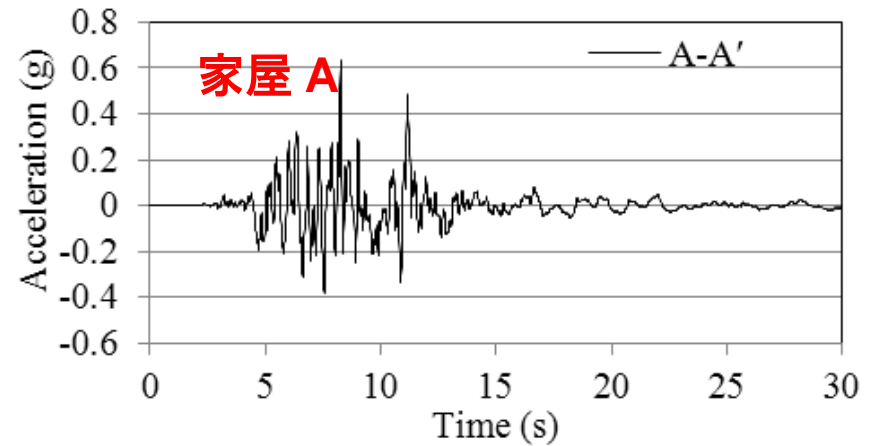
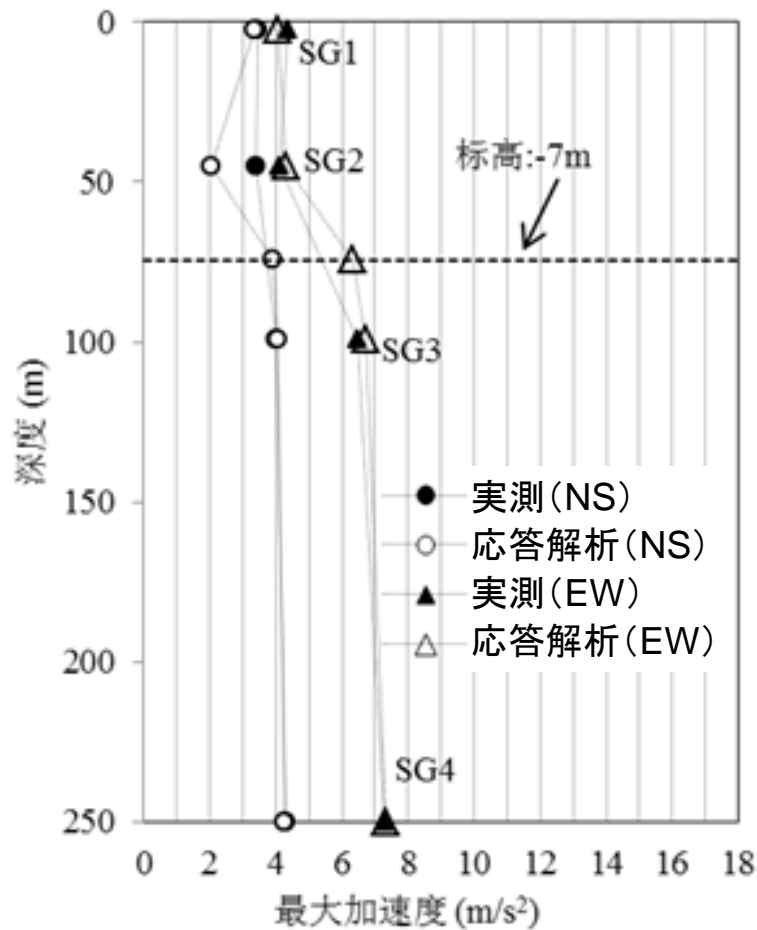
## SHAKE 91



鉛直アレー

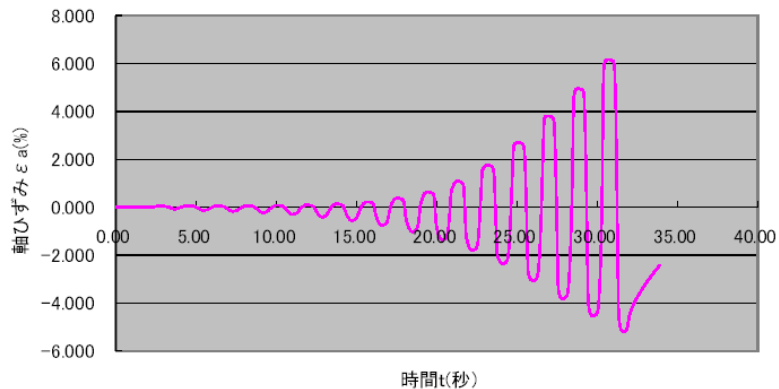
# 2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害事例

## 入力地震波

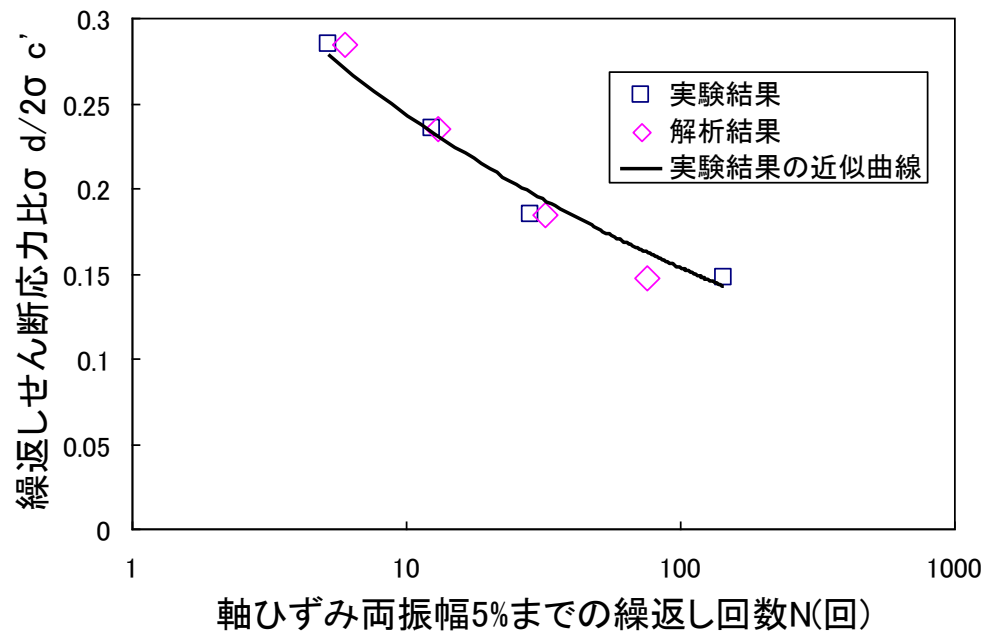
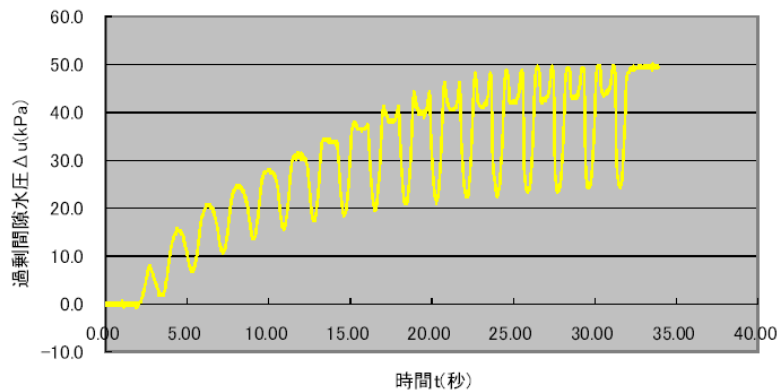


# 液状化強度 (PZ-Sandモデル)

軸ひずみの時刻歴【宅地内-②】



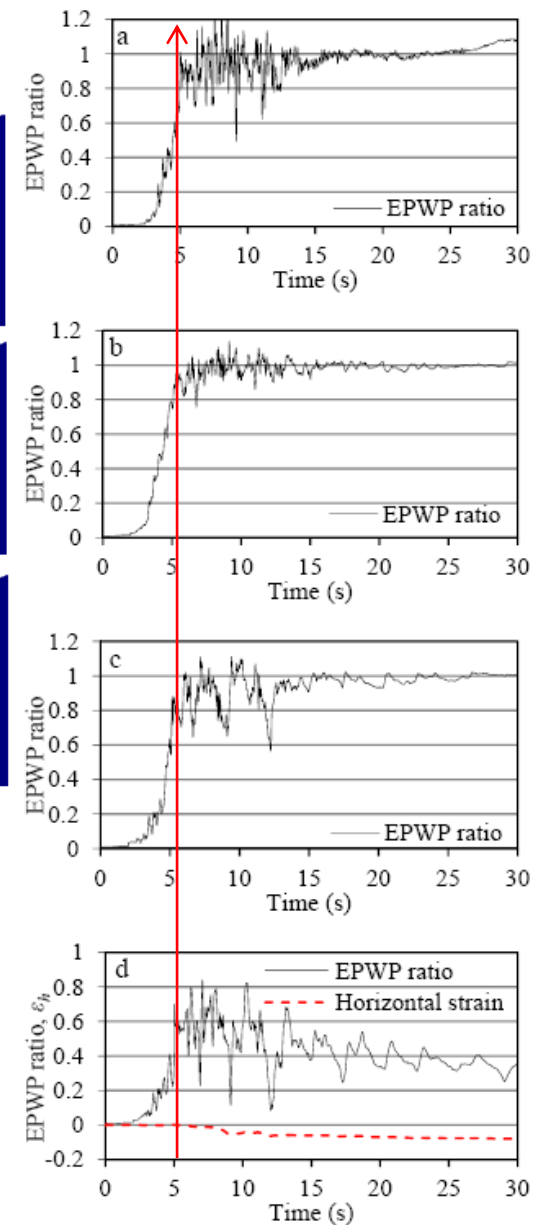
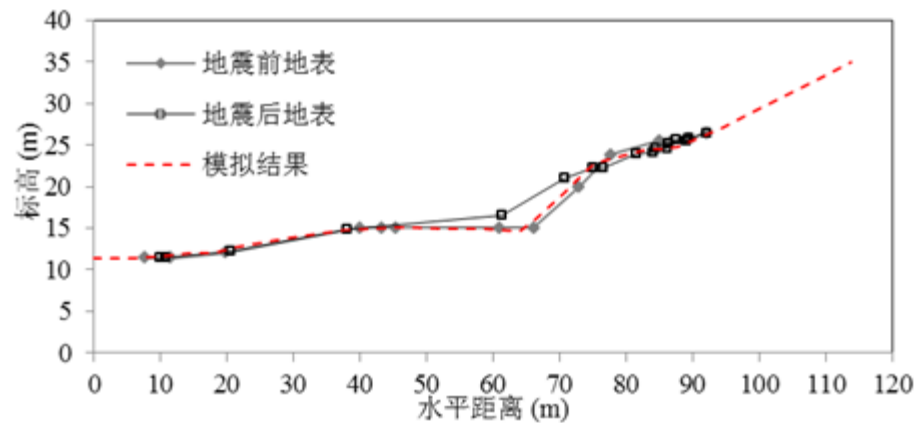
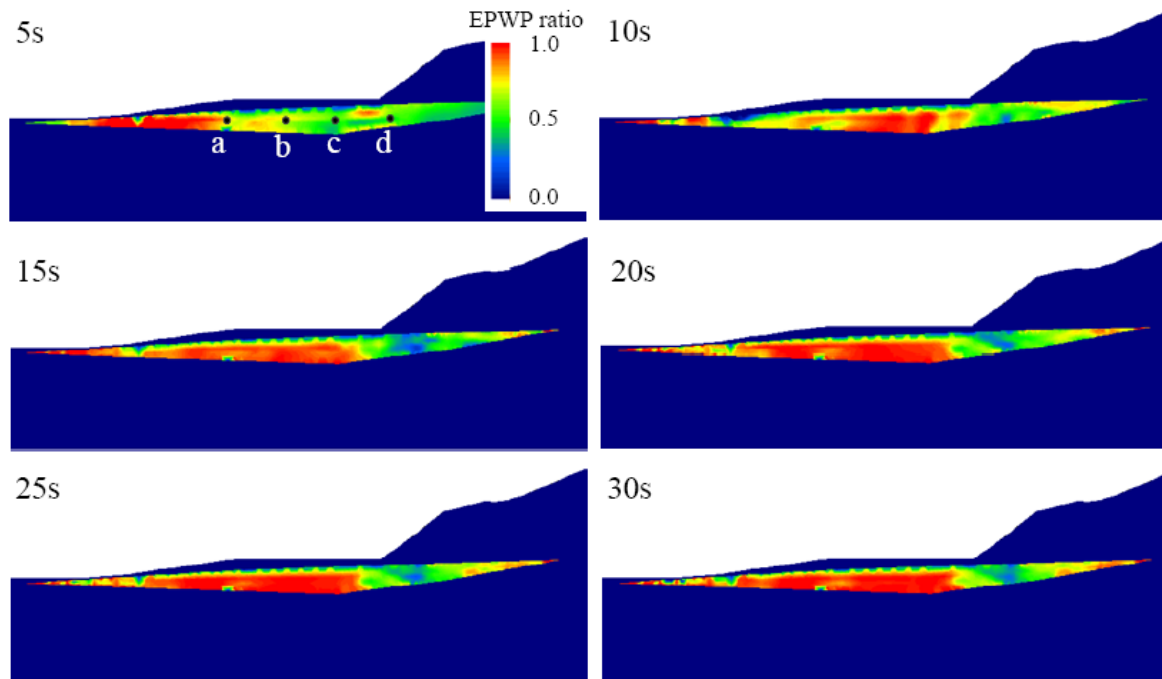
過剰間隙水圧の時刻歴【宅地内-②】



UWLC: 動的有効応力解析ソフト

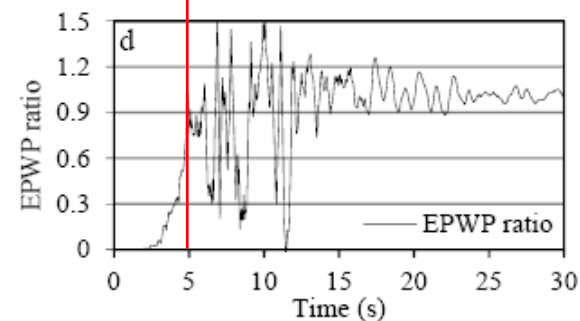
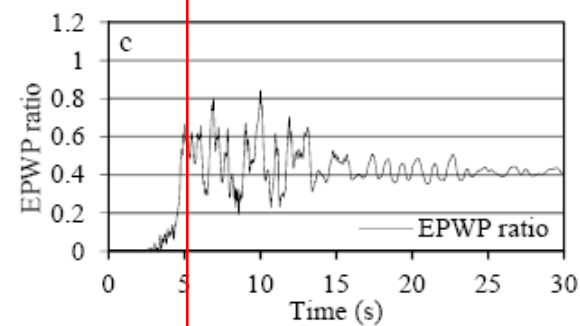
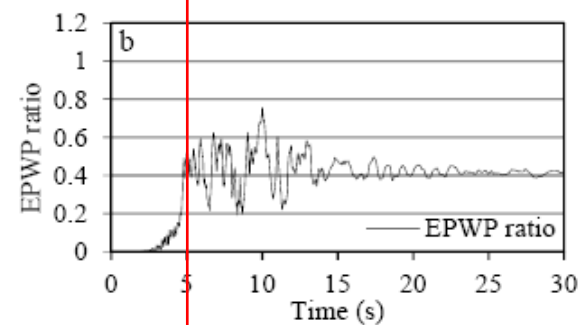
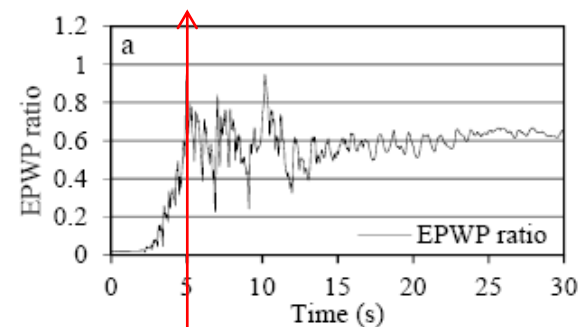
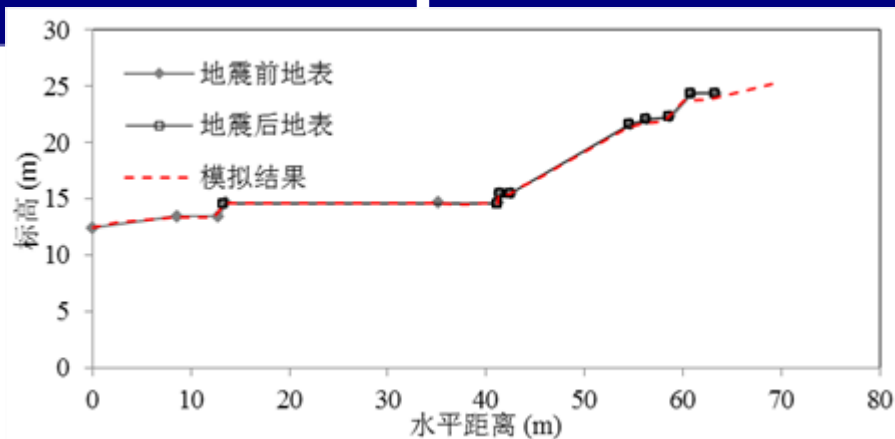
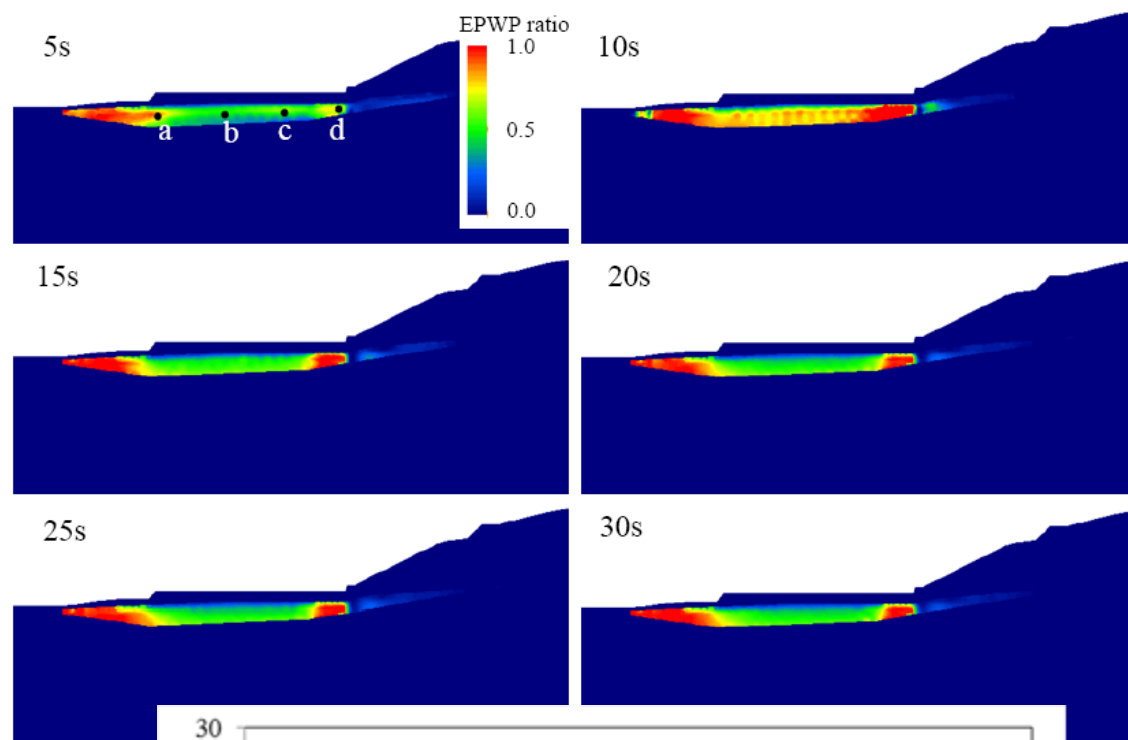
# 2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

## 家屋 A

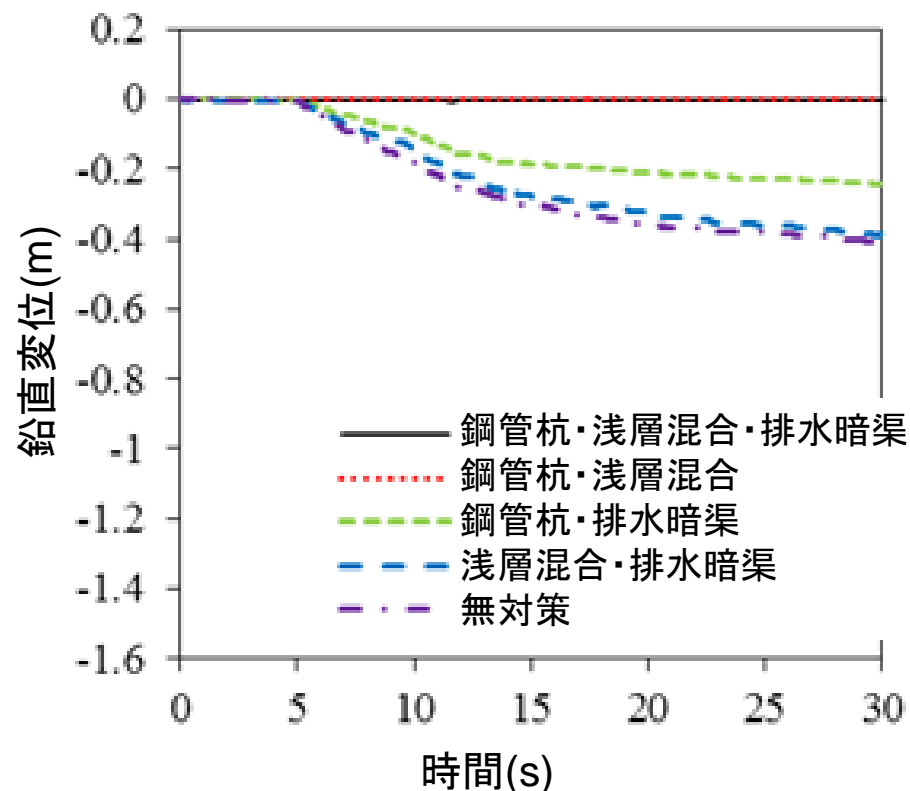
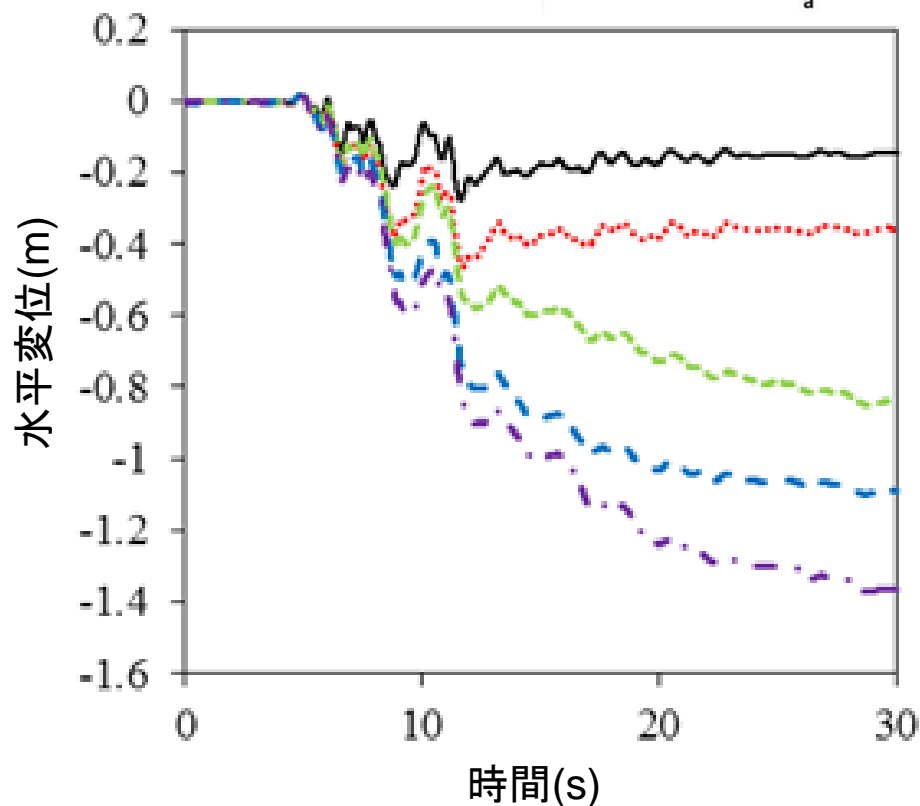
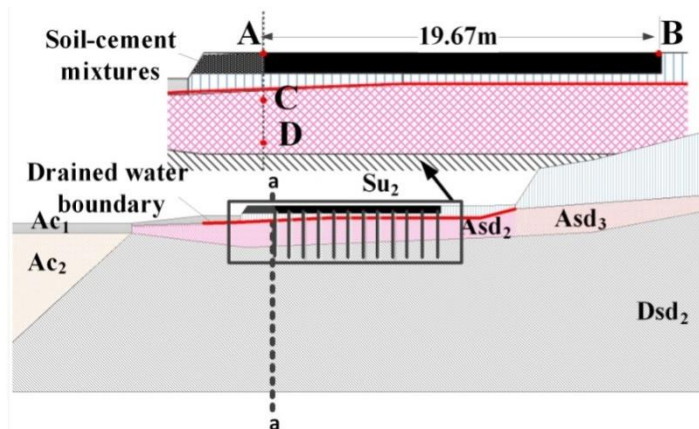




# 家屋 B

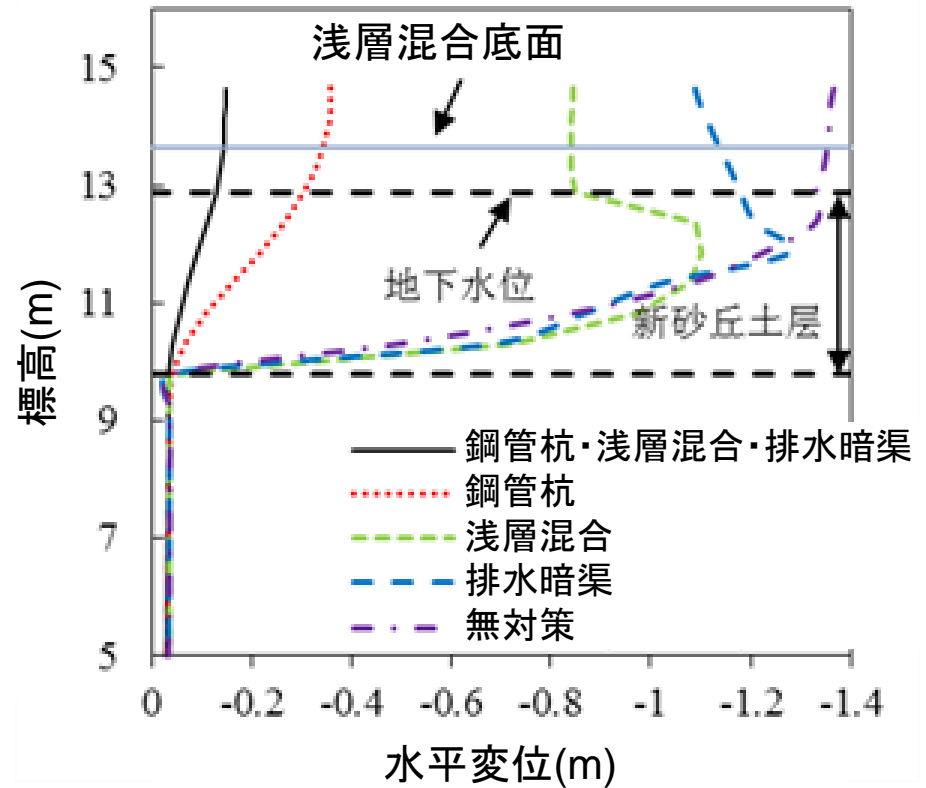
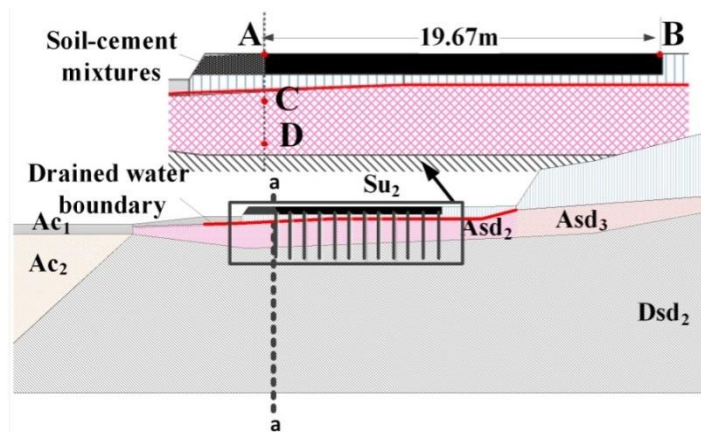


# 家屋Bにおける各々の液状化対策工の効果



# 2007新潟中越沖地震時の液状化による家屋の被害実例

## 家屋Bにおける各々の液状化対策工の効果

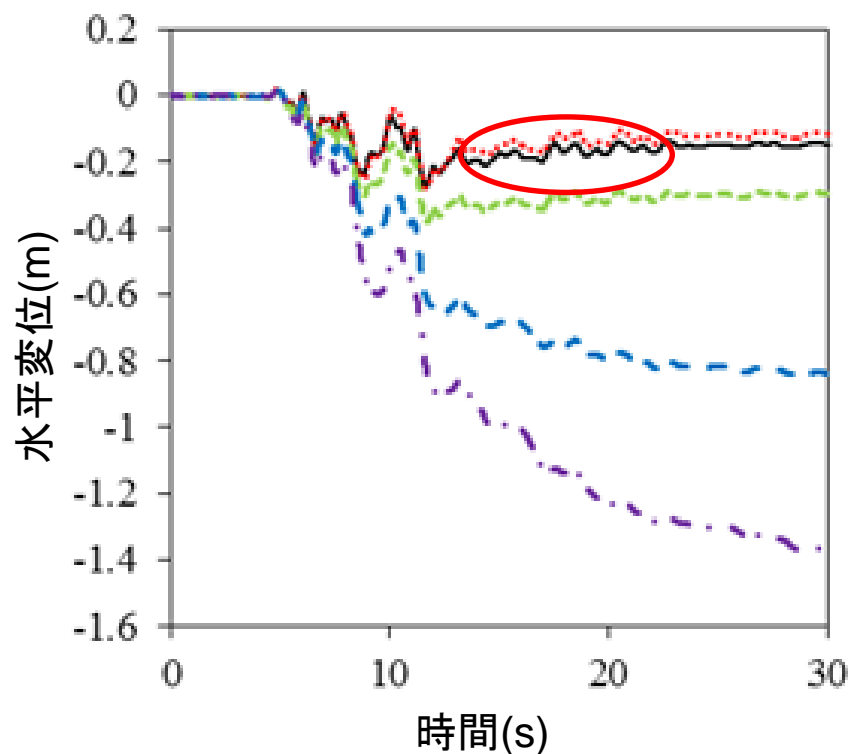


断面a-aの残留水平変位

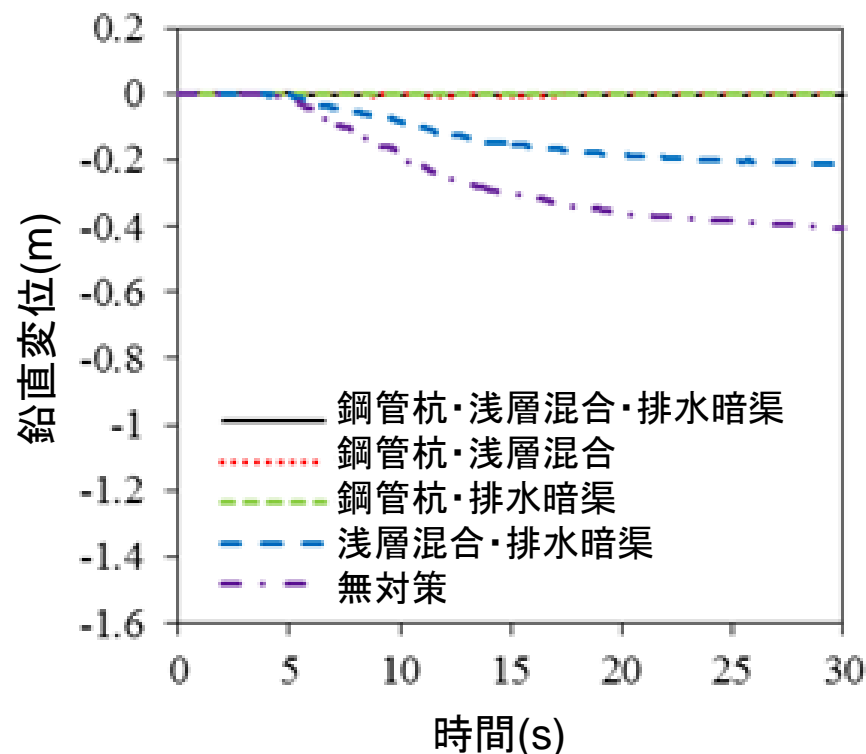


# 家屋Bにおける2種類の液状化対策工を組み合わせたときの効果

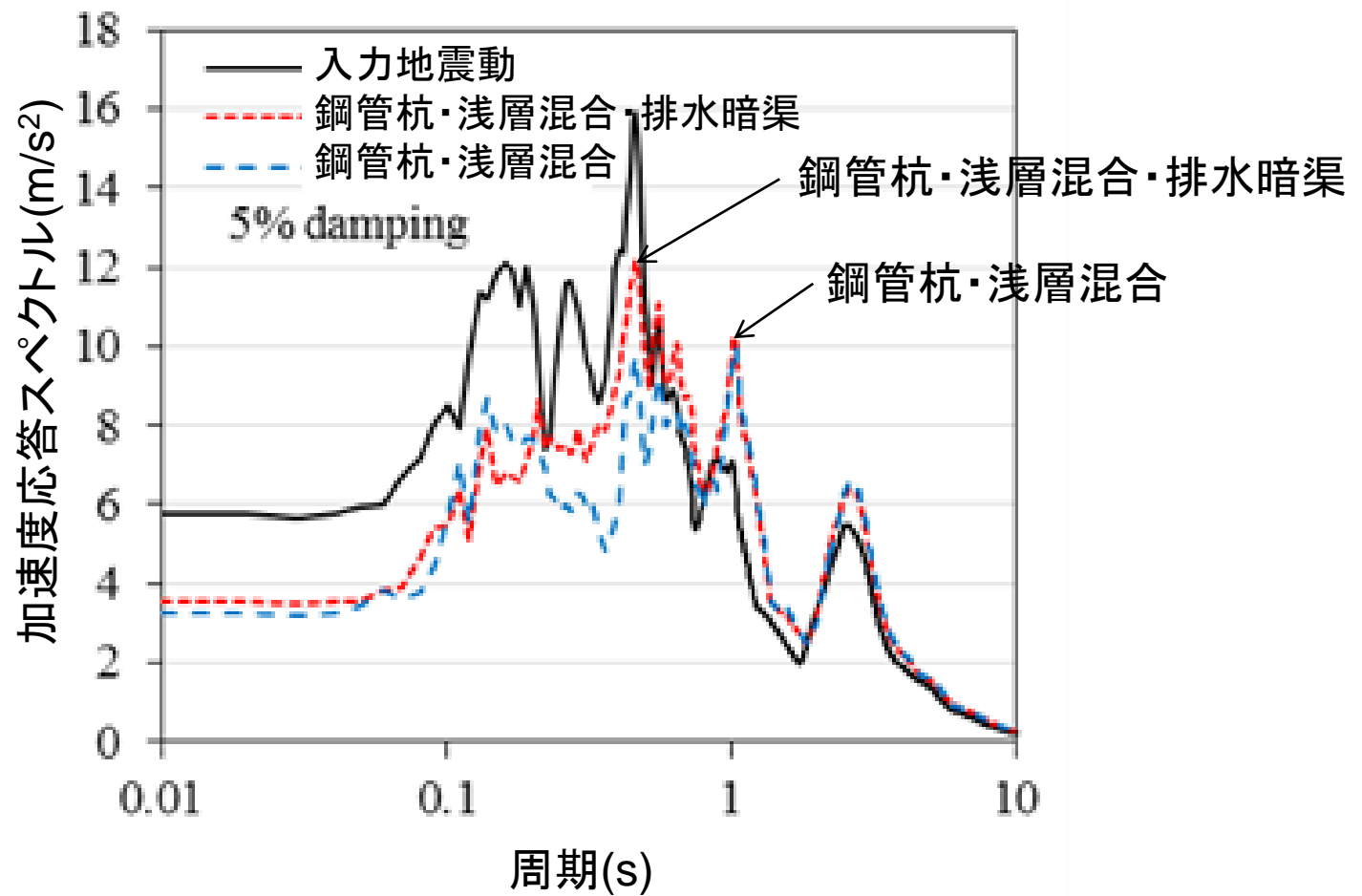
## 水平変位



## 鉛直変位



# 家屋Bにおける液状化対策工のスペクトルに与える影響



## 結論

1. A宅・B宅の再現解析より、側方変位や不同沈下の発生は砂丘層における液状化が原因であることが確認された。
2. B宅でも液状化が起きていたと考えられるが、液状化対策工法の効果により被害は軽微となったことがわかった。
3. 液状化対策工法別の解析結果より、杭基礎の打設が液状化被害による変位を抑止する効果が最も高い。表層改良や排水ドレーンは一定の深さに達しなければ、液状化の対策効果は限定的である。
4. 数値解析により、最適な液状化対策工の選定は可能であることを示唆している。

# 千葉県旭市の液状化被災地と旧飯岡町の砂鉄鉱床

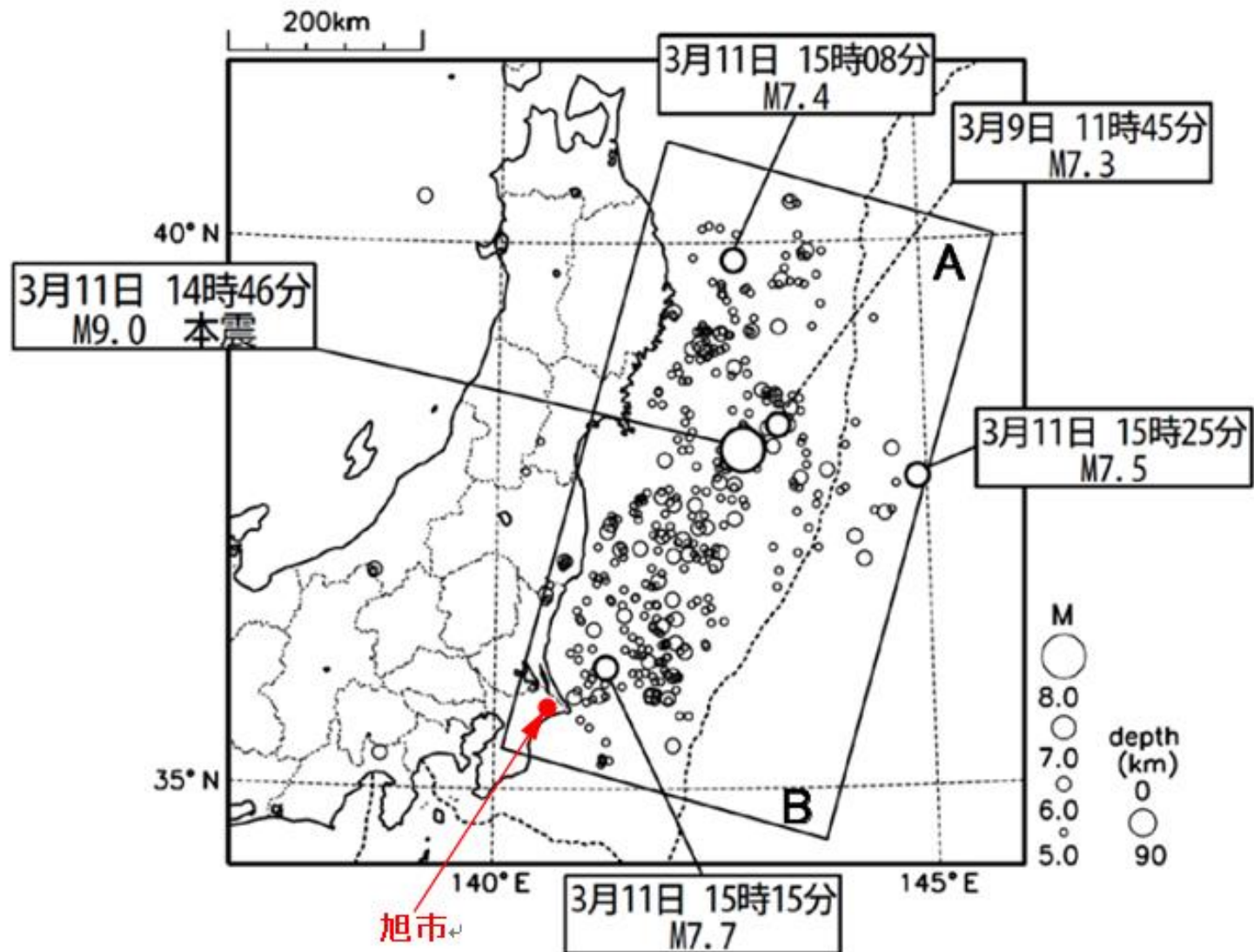


# 噴砂の状況(本震25分後, 写真提供: 池田)

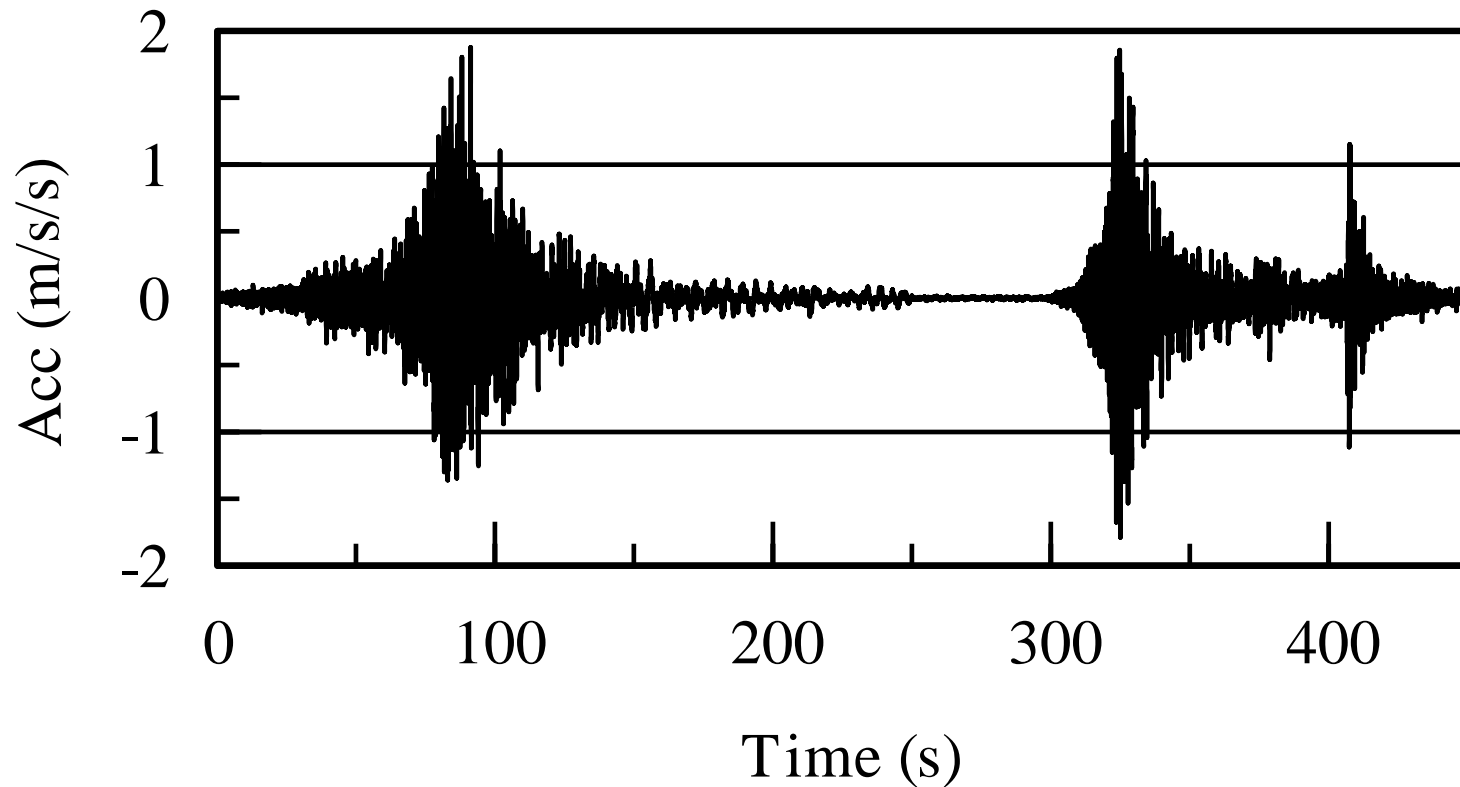




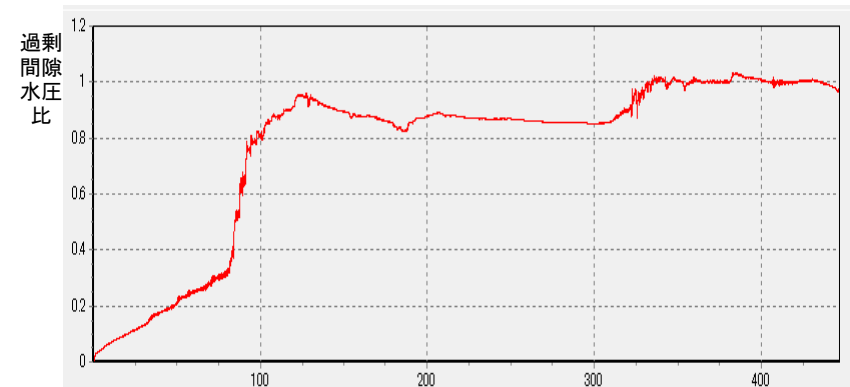
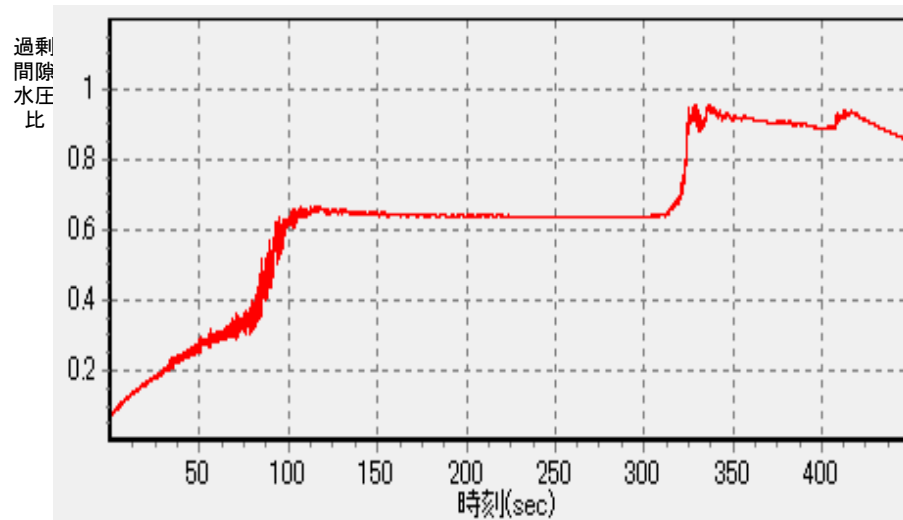
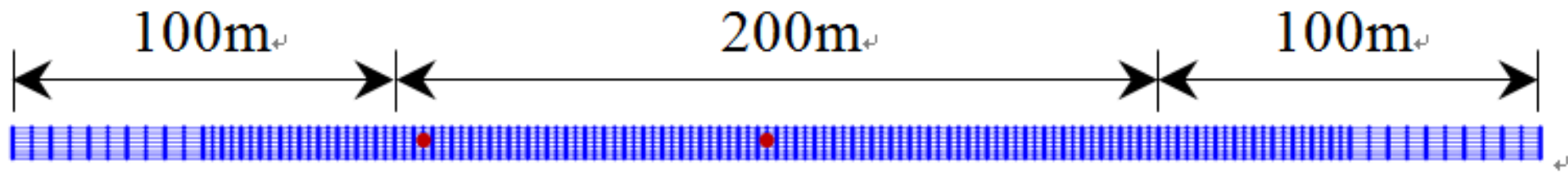
# 震源と旭市との位置関係



本震と余震の地震波をつなぎ合わせた入力地震波  
( $t=0\text{s}$  は14:47:06、  
 $t=250\text{s}$ は15:15:00にそれぞれ対応する。)



# メッシュ図と過剰間隙比の時刻歴





# 盛土（水路）の耐震性能と照査

---

## 盛土（水路）の耐震性能と照査（その2：液状化地盤における地震時挙動評価）

（独）水資源機構・伊藤保裕、細山田真、笠井泰孝、奥井芳樹

（株）建設技術研究所正会員・大竹雄

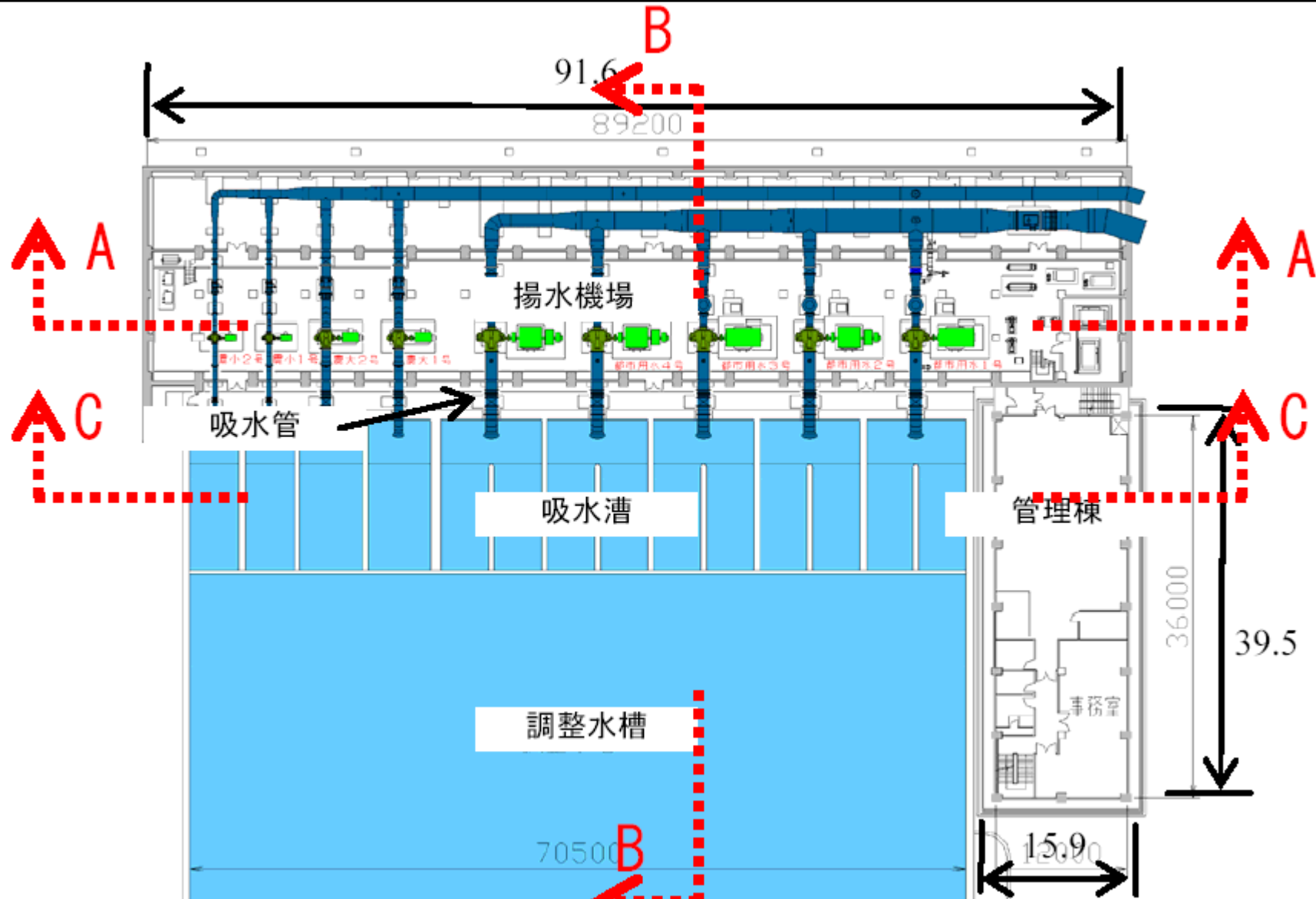
第41 回地盤工学研究発表会、pp.1861-1862、2006 年7月

## 盛土（水路）の耐震性能と照査（その3：非液状化地盤における地震時挙動評価）

（独）水資源機構・伊藤保裕、細山田真、笠井泰孝、高上昌也

（株）建設技術研究所・堀川太郎

第41 回地盤工学研究発表会、pp.1863-1864、2006 年7月

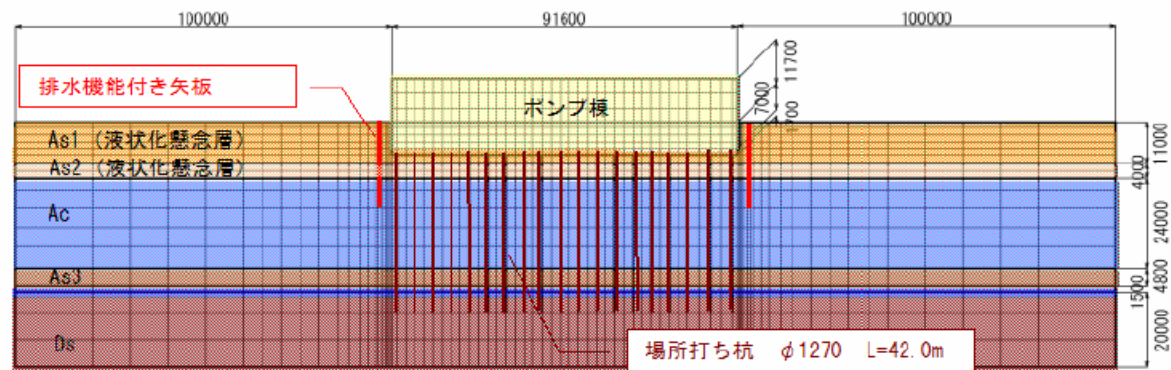


### 性能設計概念を用いた揚水機場の液状化対策(その3:合理的な対策工の提案)

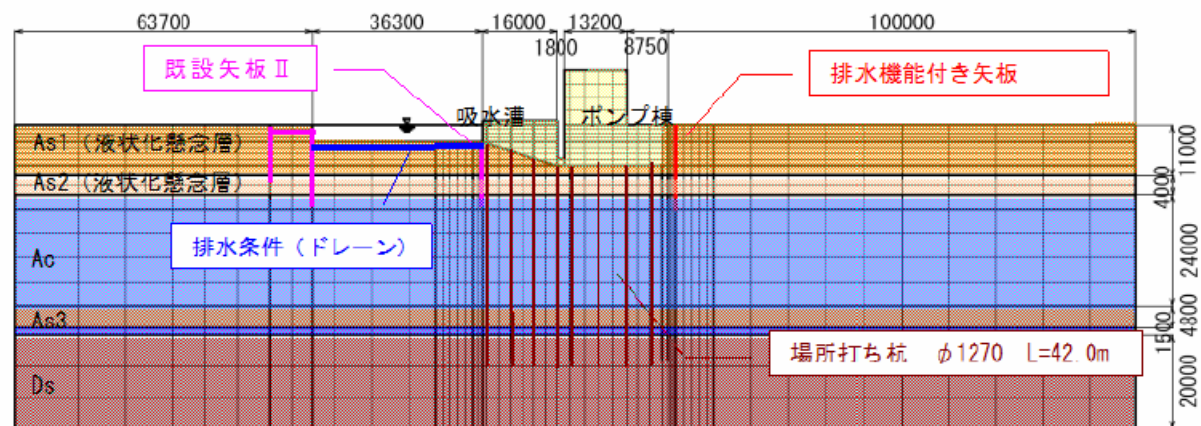
(独)水資源機構 加藤智雄・飯田準一、建設技術研究所 原隆史・大竹雄

第42回地盤工学研究発表会、pp.1687-1688、2007年.

## AA 断面



## BB 断面



## CC 断面

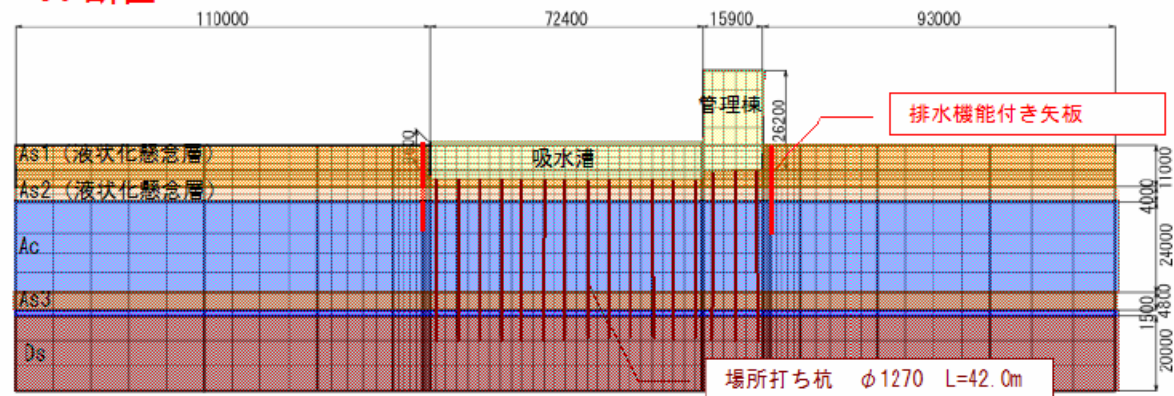
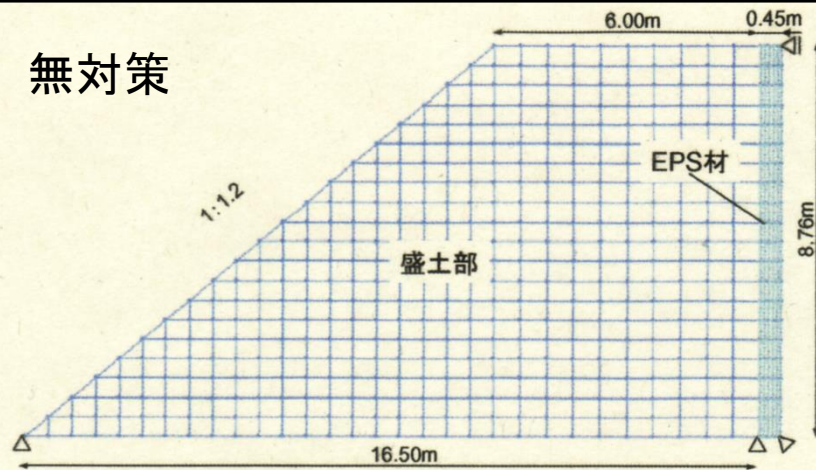


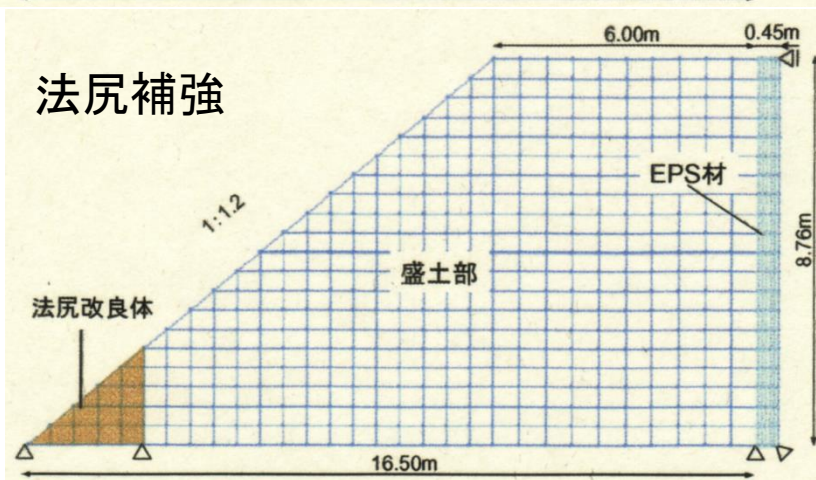
表-1 提案対策工法の経済効果

	既往の対策工	提案対策工
基本的考え方	液状化防止対策	液状化抑制対策
名 称	恒久薬液注入工法	排水機能付矢板工法
対策項目	薬液注入 (斜めボーリング)	排水機能付矢板 ( $V_L$ , $l=17.5\text{m}$ )
数 量	20,000 $\text{m}^3$	720 枚
概算工費	20 億円	7 億円
経済効果		$\Delta$ 13 億円 (全体の 35%, 65%減)

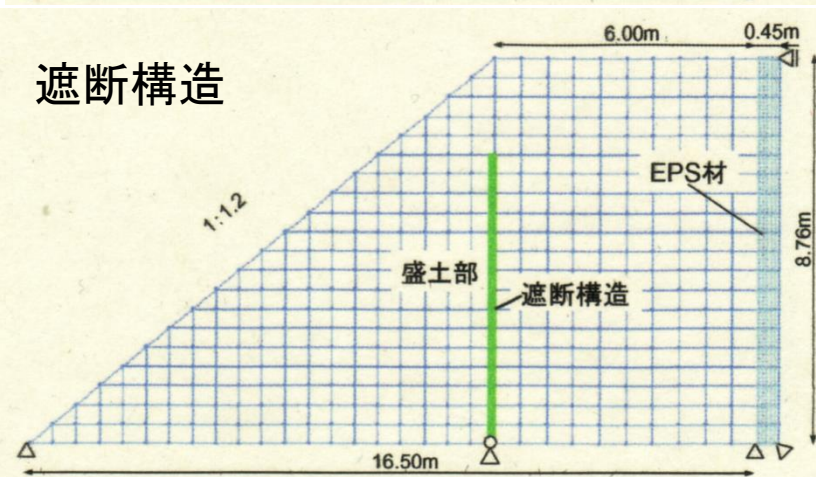
無対策



法尻補強



遮断構造



## 地震時における道路盛土のすべり破壊の制御工法に関する解析的検討

大阪大学大学院工学研究科・江川祐輔、常田賢一、小田和広  
建設技術研究所・中平明憲  
第29回土木学会地震工学研究発表会報告集、pp.1319-1327、2007年。

コメント:

ROモデル・弾完全塑性モデルが用いられたが、HDモデルもしくはUWモデルの方が望ましい。



高規格堤防盛土設計・施工マニュアル

平成 12 年 3 月

財団法人 リバーフロント整備センター

16-001

高規格堤防盛土設計・施工マニュアル  
（平成12年3月）の参考-48~49ページに、  
砂質土層の液状化現象を考慮できる代表的な解析コードとしてUWLCが紹介されている。

# 解析事例

- 岸壁
- タンク基礎
- パイプの浮き上がり
- 東竹沢地すべり(新潟県中越地震)
- 宅地液状化解析(新潟県中越沖地震)
- 文献中の解析事例