

水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会

## 活動報告会

2023年11月17日

(公社)土木学会 地震工学委員会

関西ライフライン研究会

## 目 次

### 第一部 『WG 1 : 免振・免波による津波対策の研究成果報告』

1. 免震・免波の考え方による地震・津波対策技術の開発 弘前大学 有賀義明 …… 1
2. 津波模型実験による津波波圧の低減効果に関する検討 パシフィック・コンサルタンツ (株) 市山誠 …… 34
3. 地上構造物に津波が衝突した際の SPH 法による解析的検討 (株) 構造計画研究所 渡辺高志 43
4. 免波構造に適した緩衝材の簡易評価法の検討 シバタ工業 (株) 西本安志 …… 54
5. 三次元 FEM 解析による構造物の津波安全性評価に関する検討 大成建設 (株) 坂下克之 …… 65
6. 構造物内に発生する応力に対する津波波圧の設定の影響 (株) J-POWER ビジネスサービス 鈴木隼人 …… 75

### 第二部 『WG 2 : 埋設管路の液状化に伴う浮上メカニズムと対策の研究成果報告』

1. WG2 の研究テーマとこれまでの研究経過、本活動成果の概要報告 静岡理工科大学 中澤博志 …… 82
2. 埋設管路の浮上事例やこれまでの浮上対策の研究事例 (株) 日水コン 福山正彦 …… 89
3. 大型振動台を用いた埋設管路の浮上実験とその再現解析 (防災科学技術研究所での実験内容、FEM による再現解析) (株) 日水コン 福永健一 …… 98
4. 遠心载荷模型実験による埋設管路の浮上実験 関西大学 飛田哲男 …… 105
5. 加振方向による液状化時の埋設管浮上への影響 (管軸方向と管軸直角方向にそれぞれ加振したときの影響) 神戸大学 鋤田泰子 …… 128
6. 2004 年新潟県中越地震における埋設下水道管路の浮上事例の再現解析と対策 (株) 日水コン 小西康彦 …… 137
7. 液状化に伴う上水道管路を中心とした埋設管路の浮上特性と砕石材による浮上対策の研究事例 (株) 日水コン 宮本勝利 …… 153
8. 粒状体中の剛体の浮上と沈下のメカニズム (DEM による解析結果の紹介) 鳥取大学 小野祐輔 …… 167



## 第一部 WG 1 : 免振・免波による津波対策の研究成果報告

## WG1 研究活動報告

# 免震・免波の考え方による 地震・津波対策技術の開発

有賀義明 (弘前大学)

## WG1のメンバー

有賀 義明	(弘前大学)	WG1主査,副委員長
渡辺 高志	(構造計画研究所)	WG1幹事
西本 安志	(シバタ工業)	WG1幹事
浅井 光輝	(九州大学)	
有川 太郎	(中央大学)	
市山 誠	(パシフィックコンサルタンツ)	
坂下 克之	(大成建設)	
佐藤 優乃	(ニュージェック)	
鈴木 隼人	(J-POWERビジネスサービス)	
冨尾 祥一	(構造計画研究所)	
森崎 啓	(パシフィックコンサルタンツ)	
安田 誠広	(関西大学)	
山崎 和貴	(日水コン)	
山中 明彦	(パシフィックコンサルタンツ)	

## 1. WG1の研究テーマ

水循環施設のための合理的な地震・津波対策技術の開発

## 2. 研究の背景と必要性

《過去》2011年東北地方太平洋沖地震:

→津波と強震動による甚大な被害が発生

《将来》南海トラフ地震:

日本海溝・千島海溝沿い巨大地震

→強震動と津波の双方に対して有効な対策の実現

## 3. 研究目的

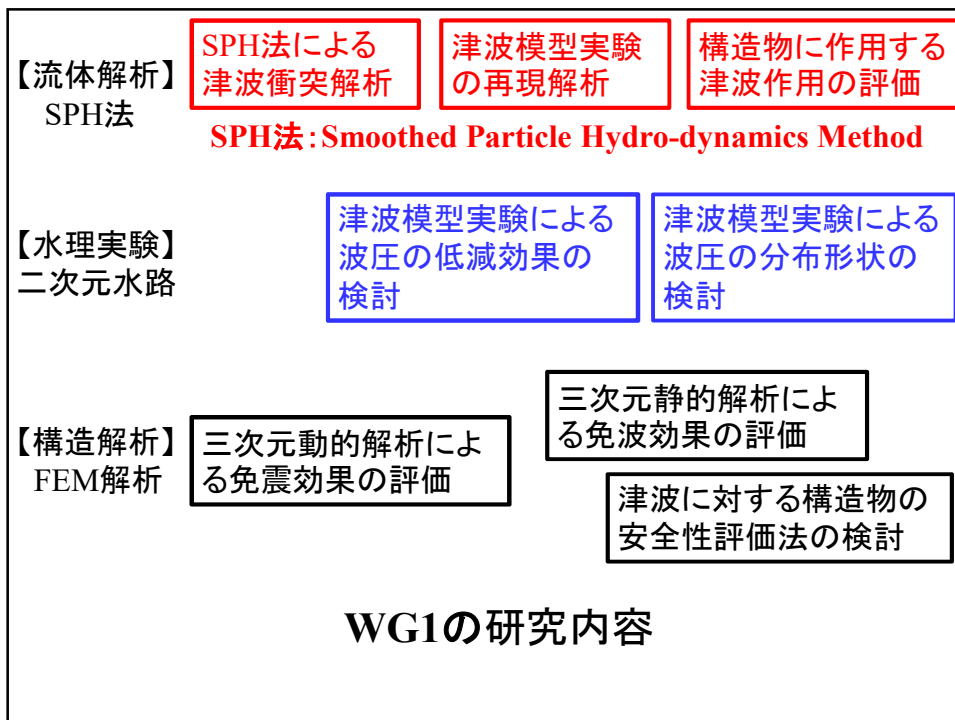
- ・沿岸域の地上建造物の防災・減災への貢献
- ・**免震・免波**という考え方に基づく対策技術の開発
- ・緩衝材の活用による免震効果と免波効果の実現

## WG1の研究報告

### 本日の発表

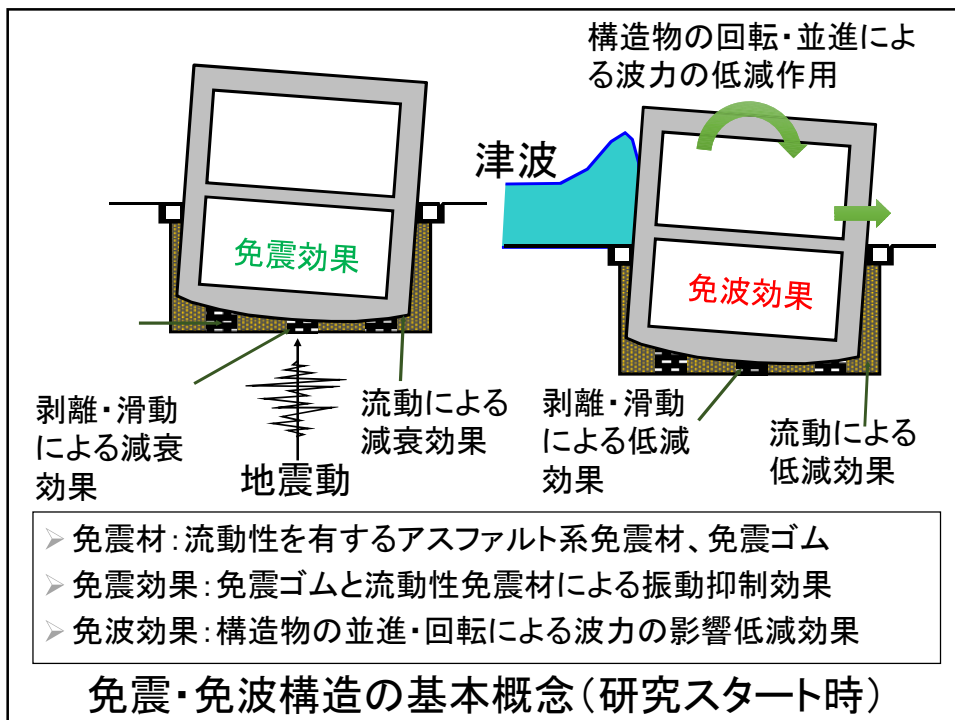
1. 免震・免波の考え方による地震・津波対策技術の開発  
(有賀義明：弘前大学)
2. 津波模型実験による津波波圧の低減効果に関する検討  
(市山 誠：パシフィックコンサルタンツ)
3. 地上建造物に津波が衝突した際のSPH法による解析的検討  
(渡辺高志：構造計画研究所)
4. 免波構造に適した緩衝材の簡易評価法の検討  
(西本安志：シバタ工業)
5. 三次元FEM解析による建造物の津波安全性評価に関する検討  
(坂下克之：大成建設)
6. 建造物内に発生する応力に対する津波波圧の影響の解析評価  
(鈴木隼人：J-POWERビジネスサービス)

# WG1 研究内容と研究経過



## その1: 免震・免波構造の基本概念

研究スタート時の考え方と  
研究の進展に伴う合理化の経過  
(2018年度 ➡ 2023年度)

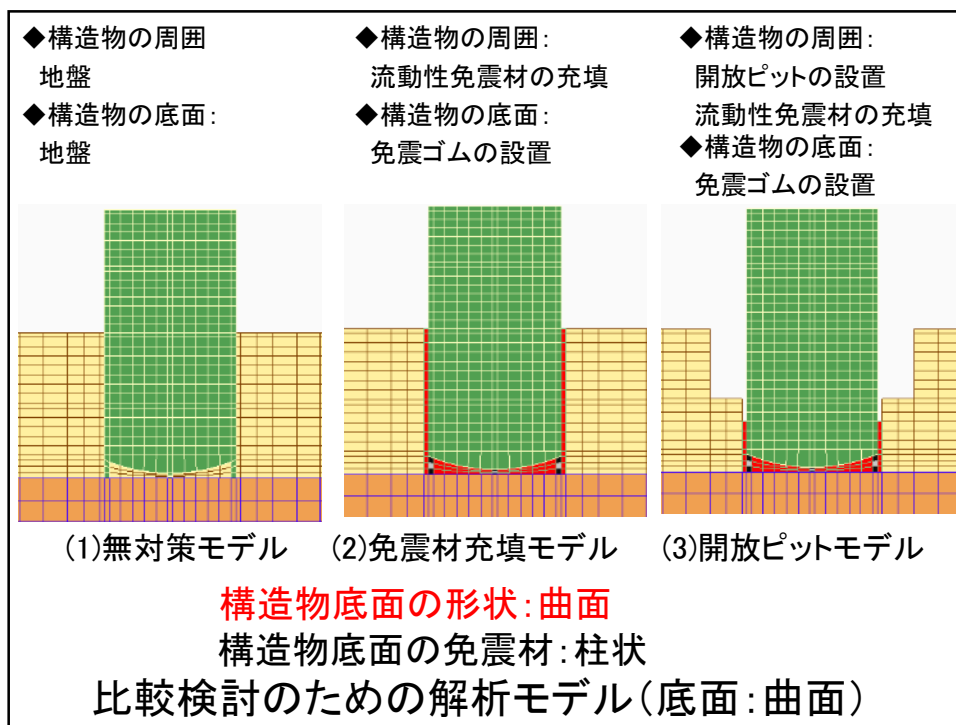
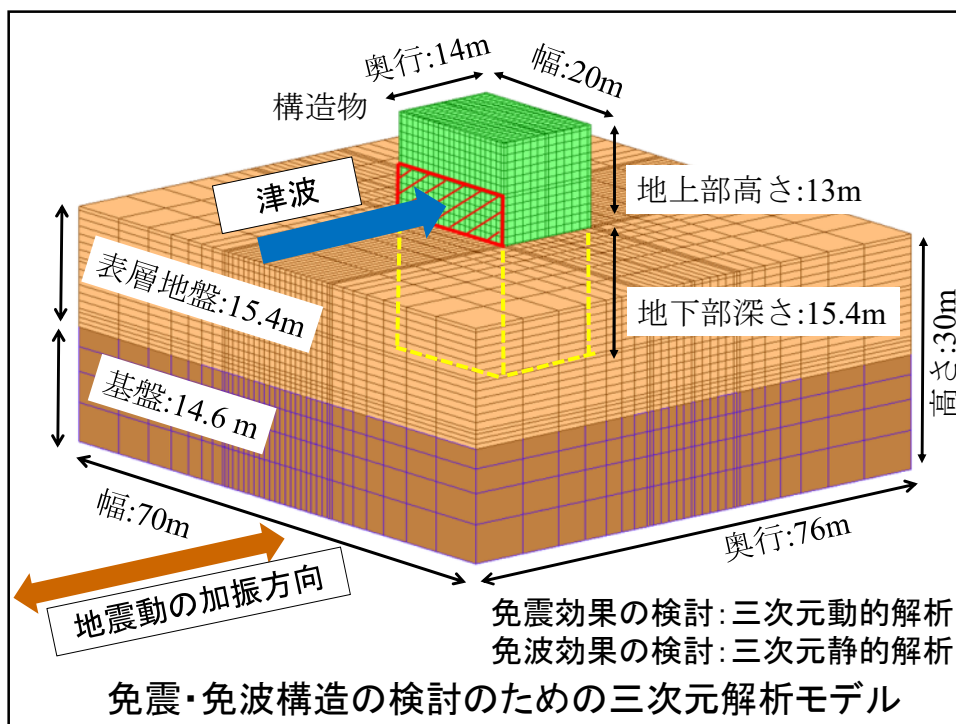


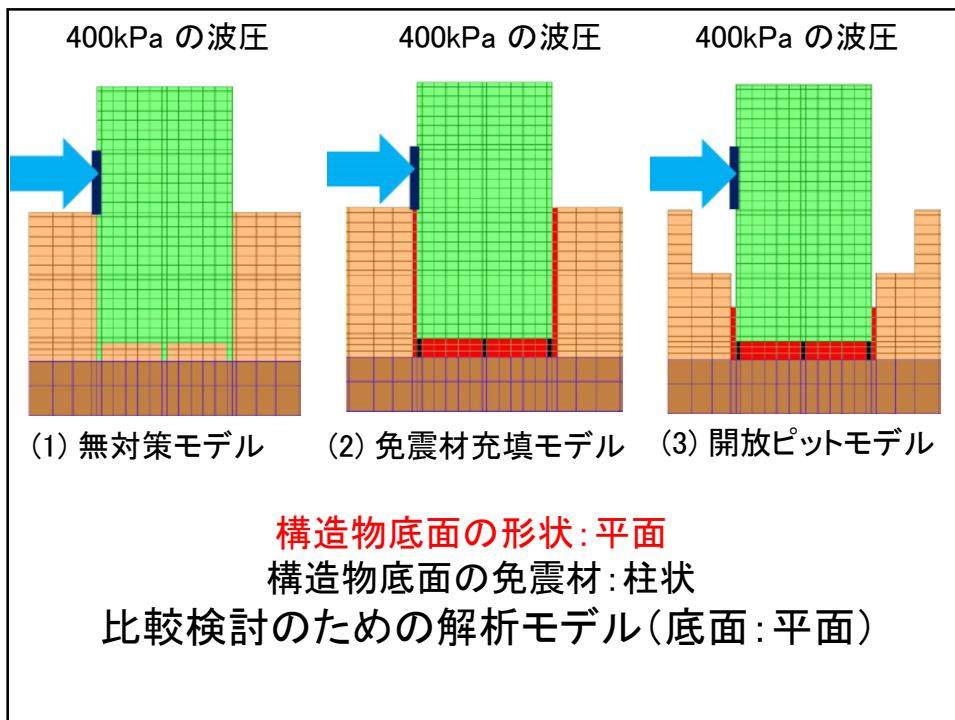
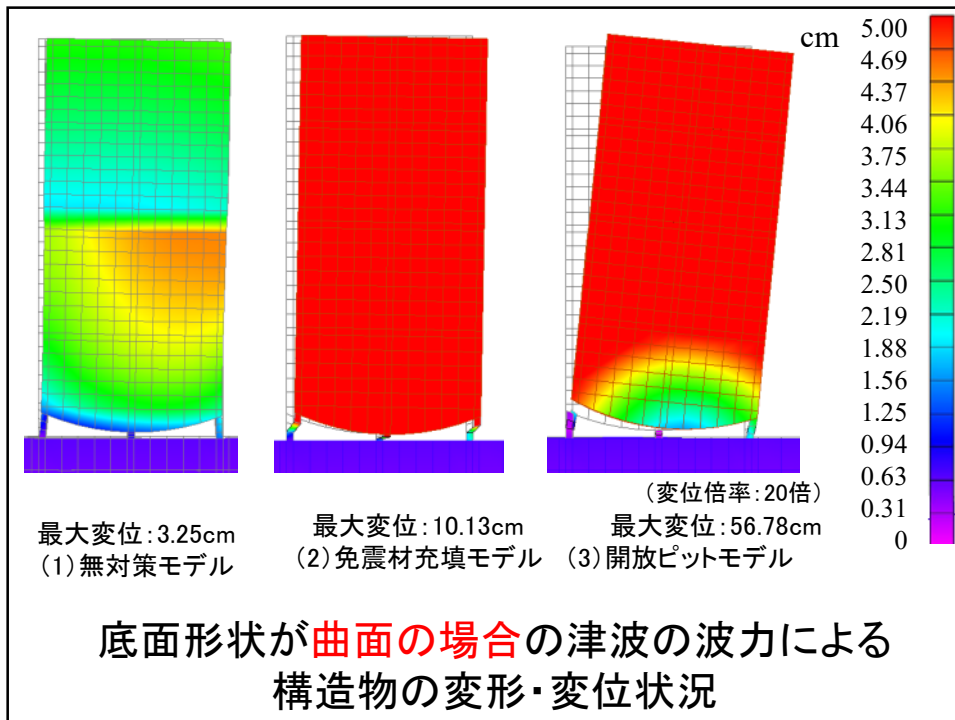
## 免震・免波技術の全体像

<b>1. 強震動対策</b>	
(1) 地下化による地震動の低減効果	
(2) 緩衝材(免震材)による地震動の低減効果→免震効果	
<b>2. 津波対策</b>	
(1) 津波の回避	
◇津波が到達しない場所での立地	
◇新設: 土地利用の防災化⇒抜本的津波対策	
◇既設: 高経年化による再開発に伴う移転	
(2) 津波からの隔離	
◇地下化による隔離	
◇ドーム構造等による被覆 ◇壁構造による遮断	
(3) 津波波力の低減	
◇建造物の表面形状の効果(平面、曲面)(鉛直面、水平面)	
◇津波の到来方向を考慮した建造物の配置	
◇建造物の表面材料の効果(エネルギー吸収型の材料)	
(4) 緩衝材(免波材)の活用	
◇津波波圧の吸収	
◇建造物の回転・並進による応力の低減→免波効果	
<b>3. 強震動・津波対策</b>	
<b>●免震効果と免波効果の両立</b>	

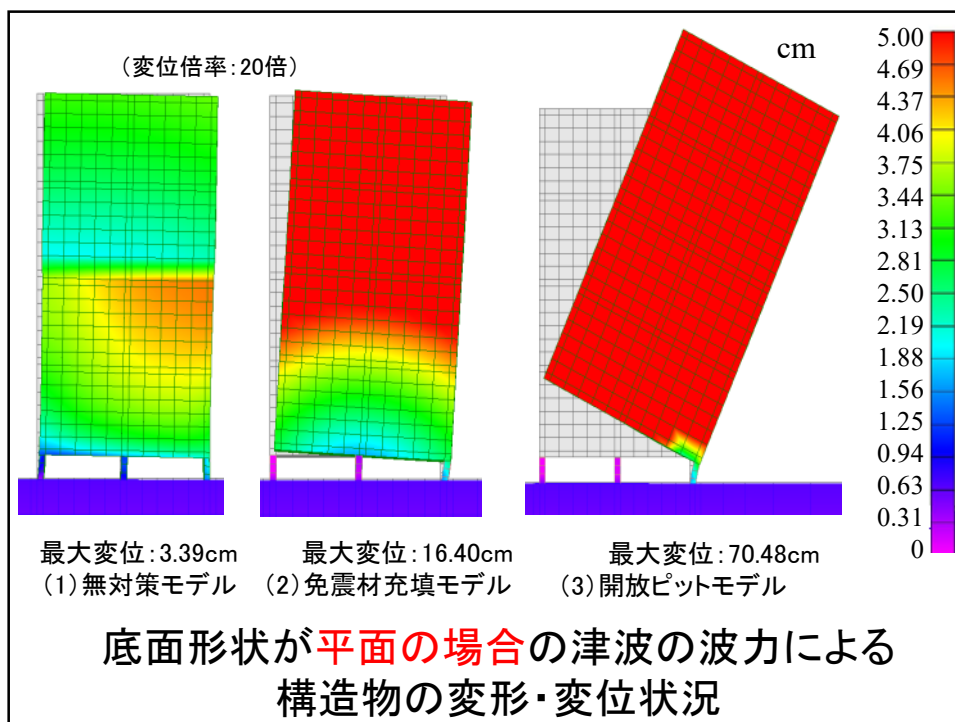
## 免震・免波構造の合理化の経過(総括)

No.	対象事象	建造物底面形状	建造物地下の緩衝材		建造物地上の緩衝材	概要
			底面	側面		
1	強震動津波	曲面	柱状	有り	なし	・研究スタート時の概念 ・免震・免波構造の最初の概念
2	強震動津波	平面	柱状	有り	なし	・建造物が回転しやすいように建造物の底面を平面に改良
3	強震動津波	平面	層状	有り	なし	・施工性、メンテナンス性を考慮して緩衝材を層状に改良
4	強震動津波	平面	省略	有り	なし	・より合理的な構造として、底面の緩衝材を省略 ・すべり支承としての構造の活用
5	津波	平面	省略	有り	有り	・津波対策の合理化 ・2021～2023年度の研究



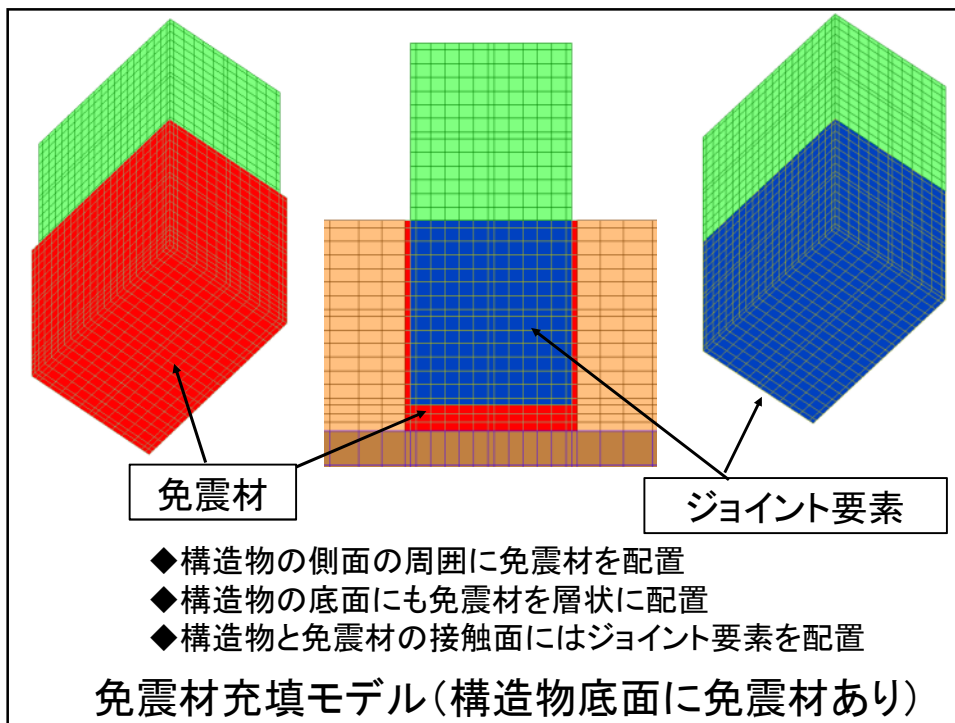
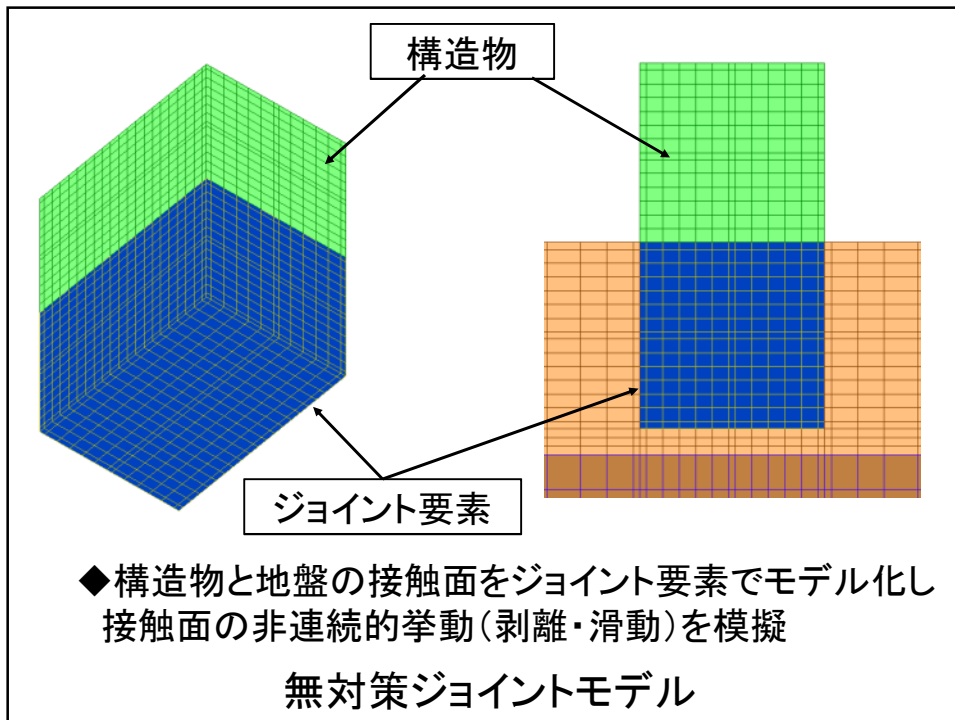


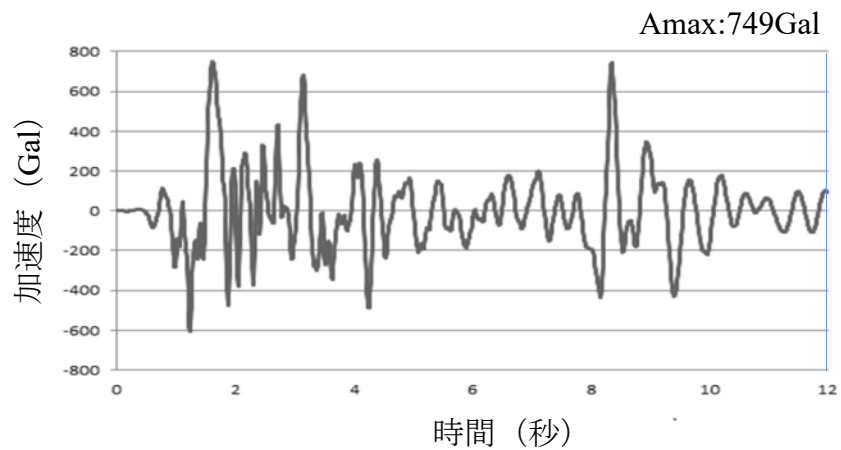




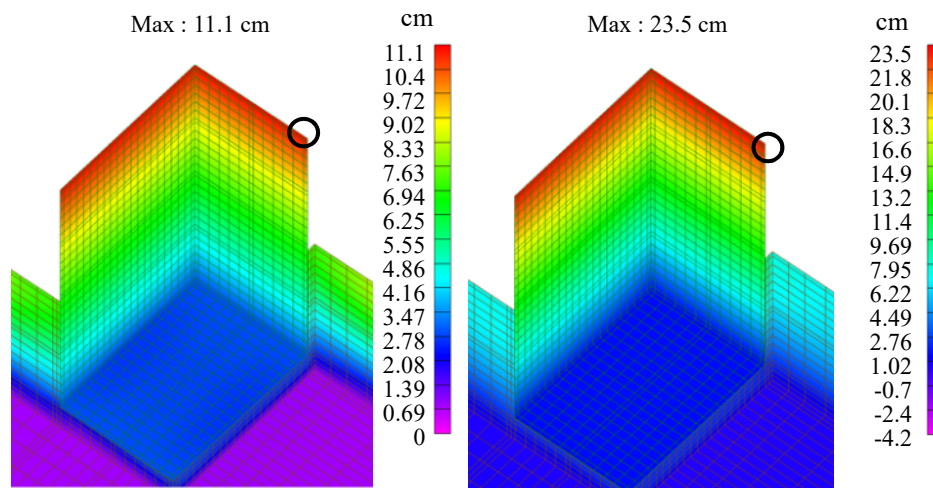
## その2: 施工性・維持管理性を考慮した 免震・免波構造の合理化

(構造物底面の緩衝材の取扱)





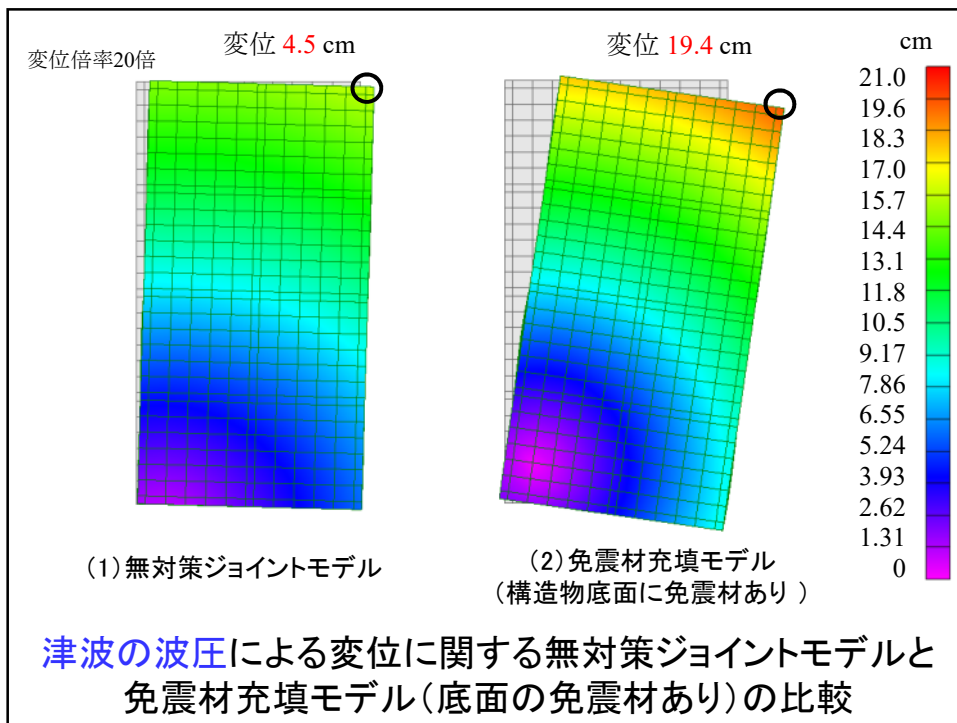
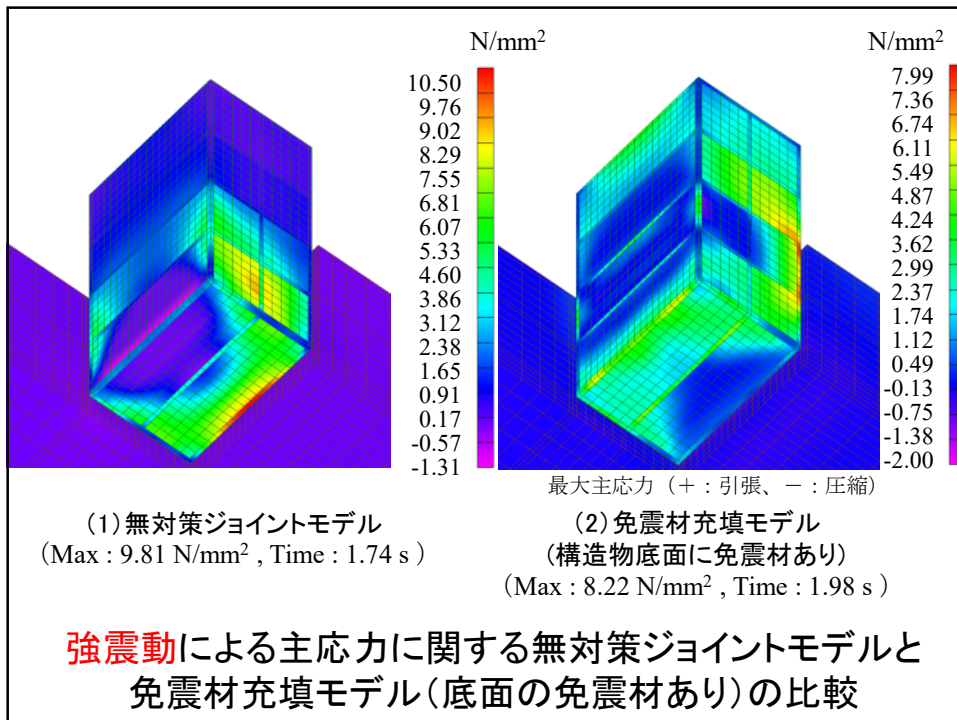
**免震効果の検討に用いた入力地震動**  
 (土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編より)

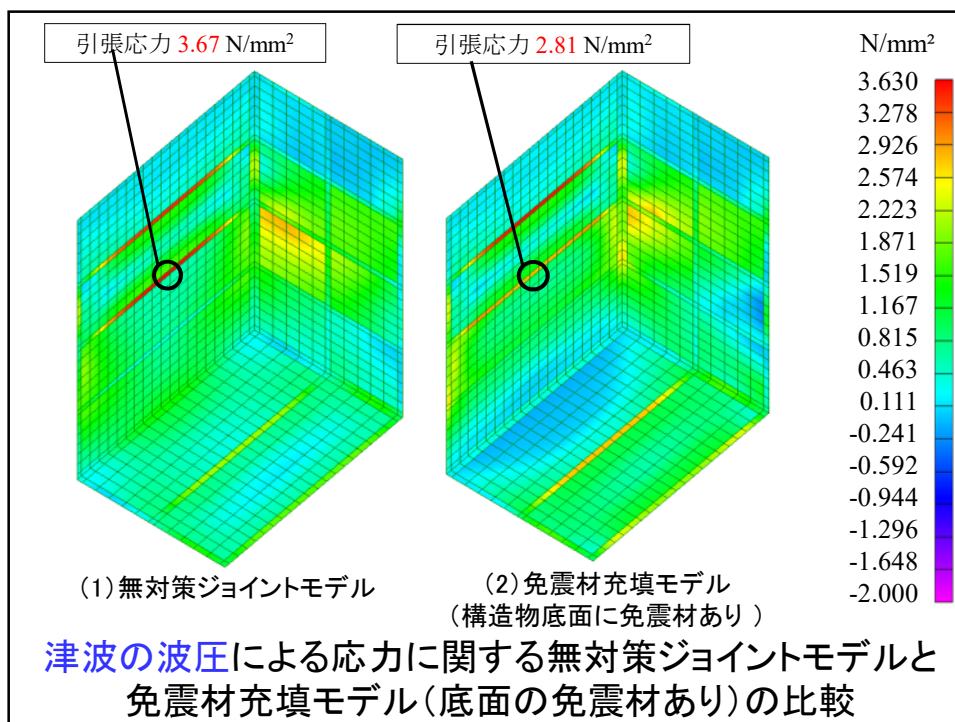


(1) 無対策ジョイントモデル  
 (Max : 11.1 cm , Time : 1.44 s)

(2) 免震材充填モデル  
 (構造物底面に免震材あり)  
 (Max : 23.5 cm , Time : 1.52 s)

**強震動**による変位応答に関する無対策ジョイントモデルと  
 免震材充填モデル(底面の免震材あり)の比較





### その3: 津波対策に主眼を置いた 免波構造の合理化

## 「免波対策」の全体像

### I. 抜本的対策（本質的対策）

#### ①津波の回避

- ・津波が来る所には構造物・施設を立地しない
- 立地技術の防災化

### II. 次善の策

既設の場合や立地条件に制約がある場合等

#### ②津波からの構造物の隔離・遮断

- ・地下化、ドーム化(被覆)等。防波壁等。

#### ③構造物の表面形状、津波の到来方向等の工夫

- ・創意/工夫による津波波圧の低減

#### ④緩衝材の活用

- ・クッション効果による津波波圧の低減

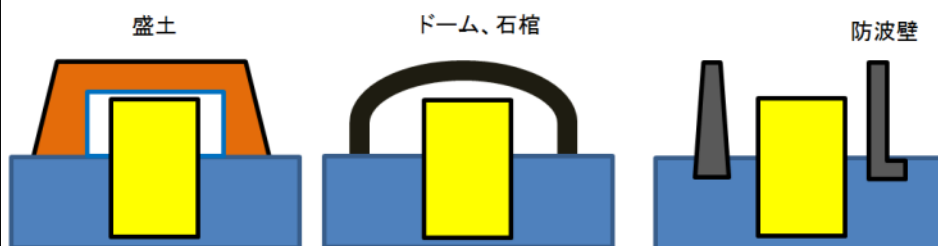
### 抜本的対策

津波の回避

- ◆津波が来ない場所に建設する→サイト選定の防災化
- ◆抜本的な津波対策→土地利用の防災化
- 津波災害の予防が100%可能

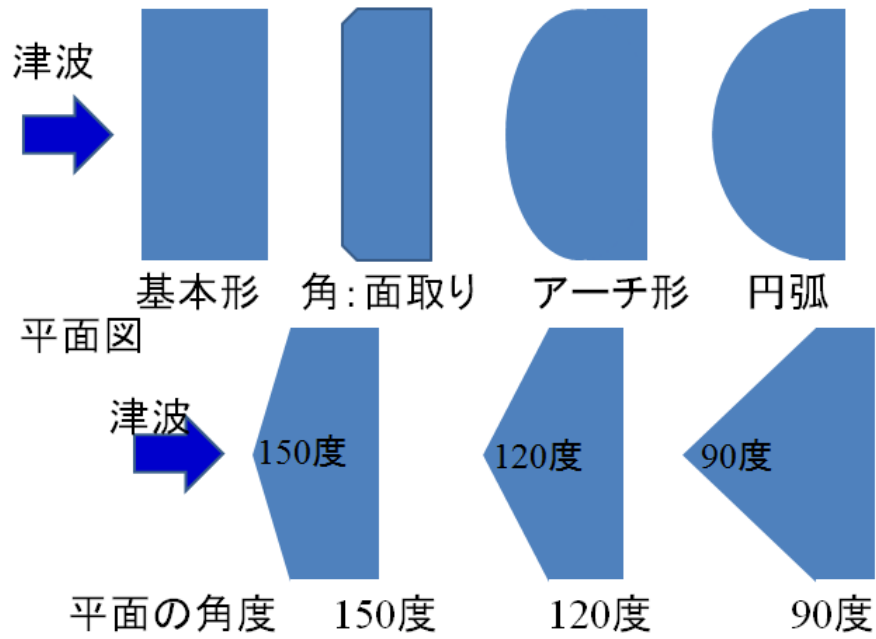
### 次善の策

津波からの隔離/遮断

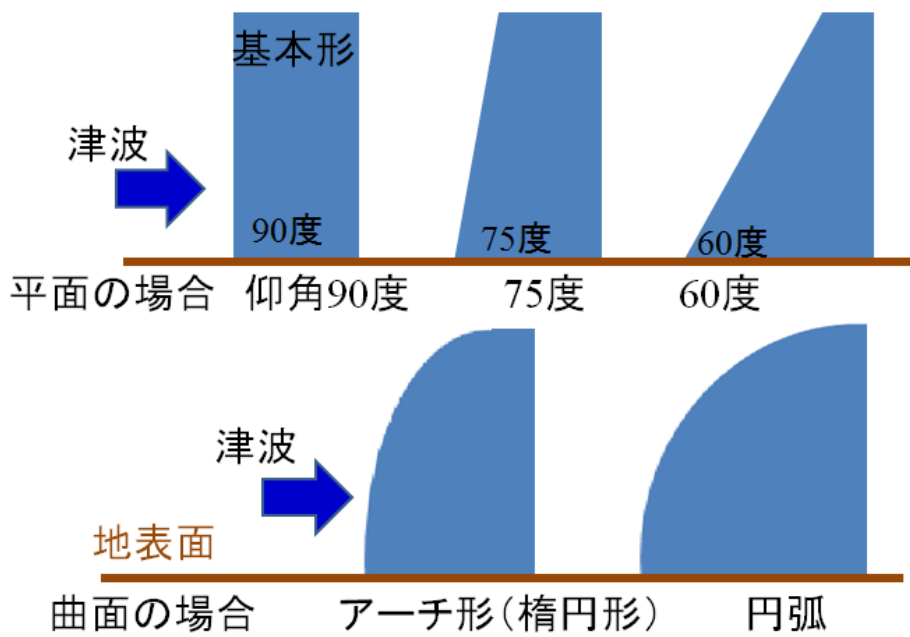


(a)地下化による隔離 (b)ドーム構造による被覆 (c)壁構造による遮断

(1) 構造物の平面形状の影響 (水平面)

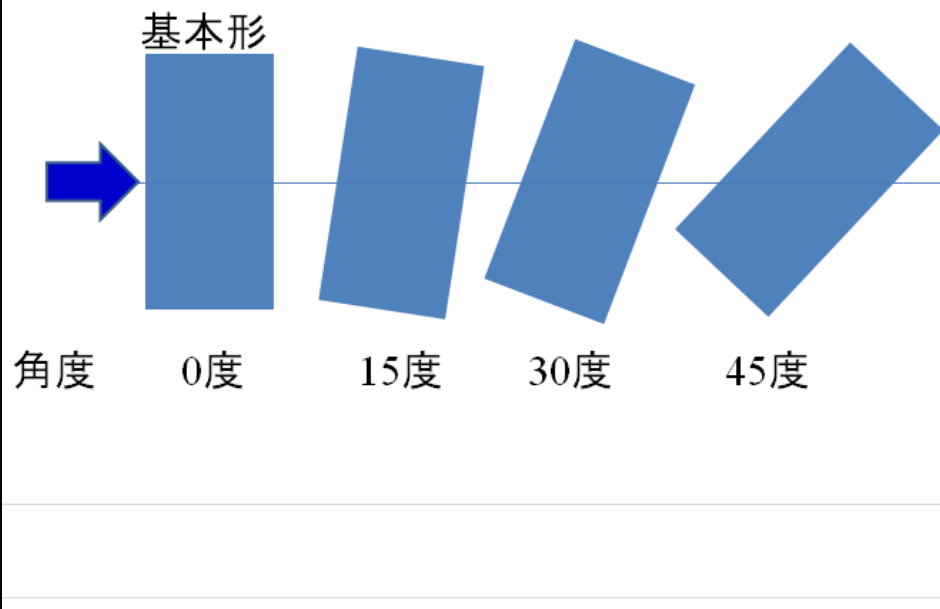


(2) 構造物の断面形状の影響 (鉛直面)



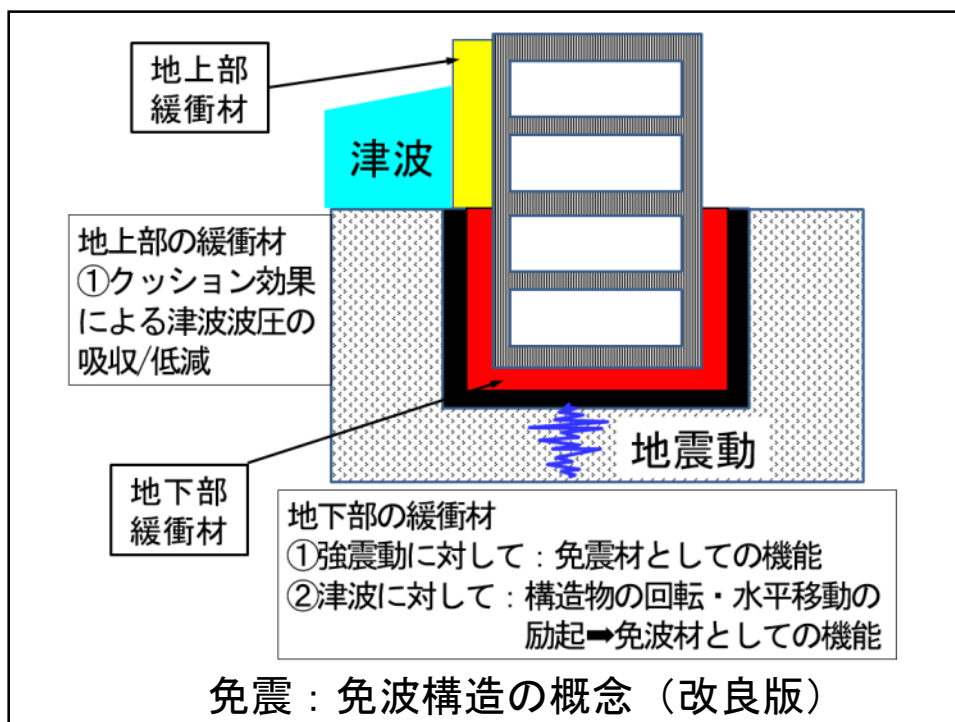


(3) 津波の到来方向の影響(平面)



現在の研究内容・成果概要





## 「免波対策」の枠組み

### I. 抜本的対策（本質的対策）

#### ①津波の回避

- ・津波が来る所には構造物・施設を立地しない  
→立地技術の防災化

### II. 次善の策

既設の場合や立地条件に制約がある場合等

#### ②津波からの構造物の隔離・遮断

- ・地下化、ドーム化（被覆）。防波壁。

#### ③構造物の表面形状，津波の到来方向等の工夫

- ・創意/工夫による津波波圧の低減

#### ④緩衝材の活用

- ・クッション効果による津波波圧の低減

## 研究方法

A. 津波模型実験による検討

B. 三次元FEM解析による検討

### A. 津波模型実験による検討

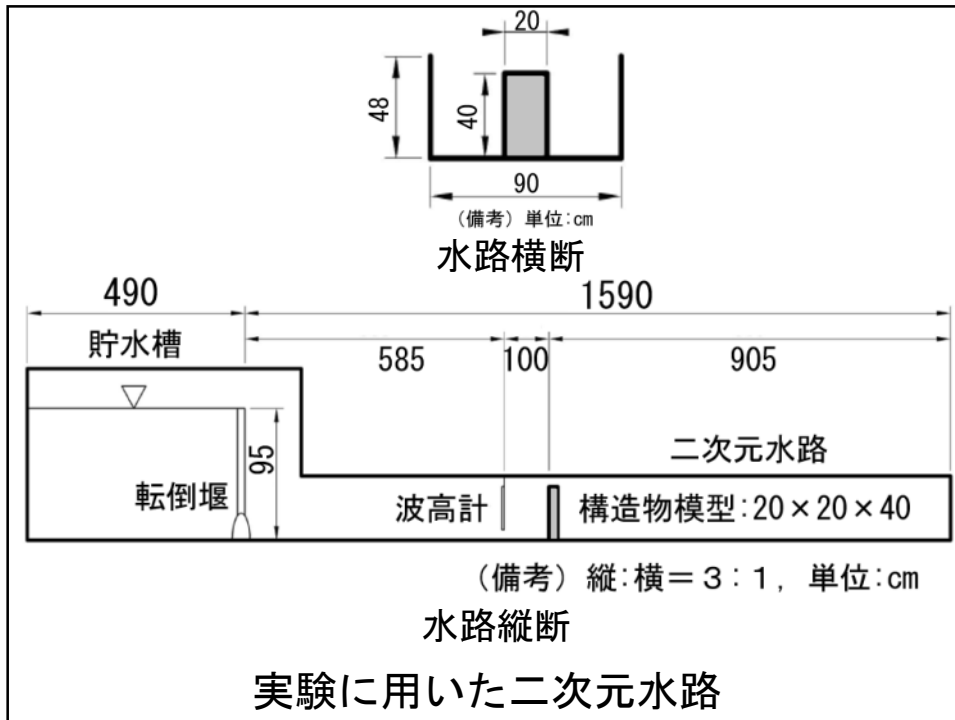
#### 着眼点

- ①津波との位置関係の工夫による津波波圧の低減  
津波の到来方向の影響の確認
- ②**構造物の側面勾配**の工夫による津波波圧の低減
- ③**緩衝材の活用**による津波波圧の低減  
➡「**構造物の側面勾配**」と「**緩衝材**」の複合効果



### 二次元実験水路

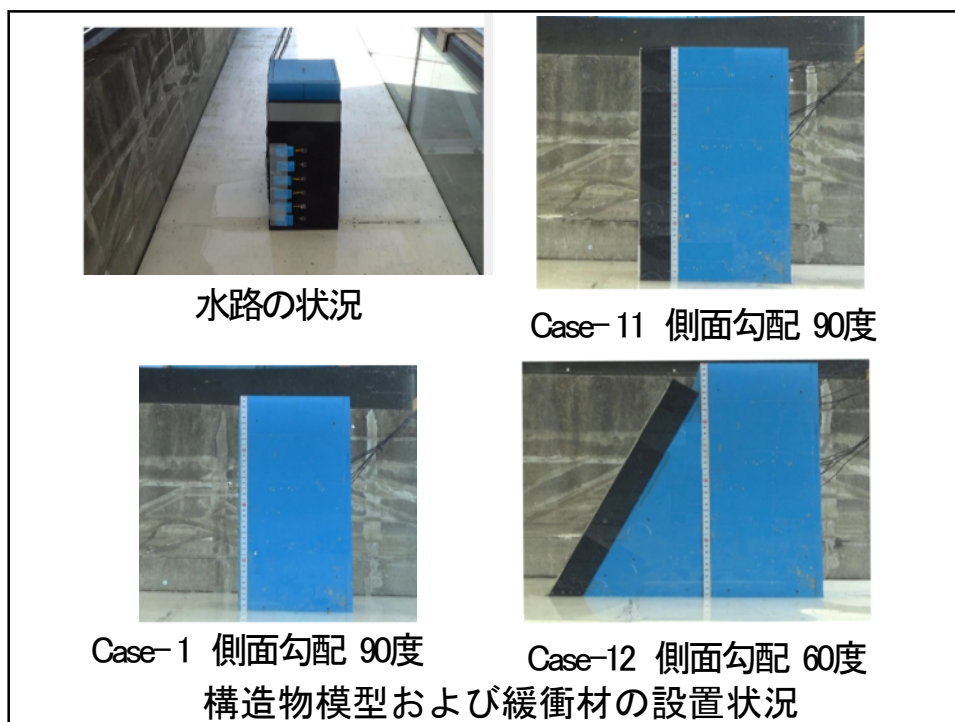
(パシフィックコンサルタンツ つくば技術研究センター所有)

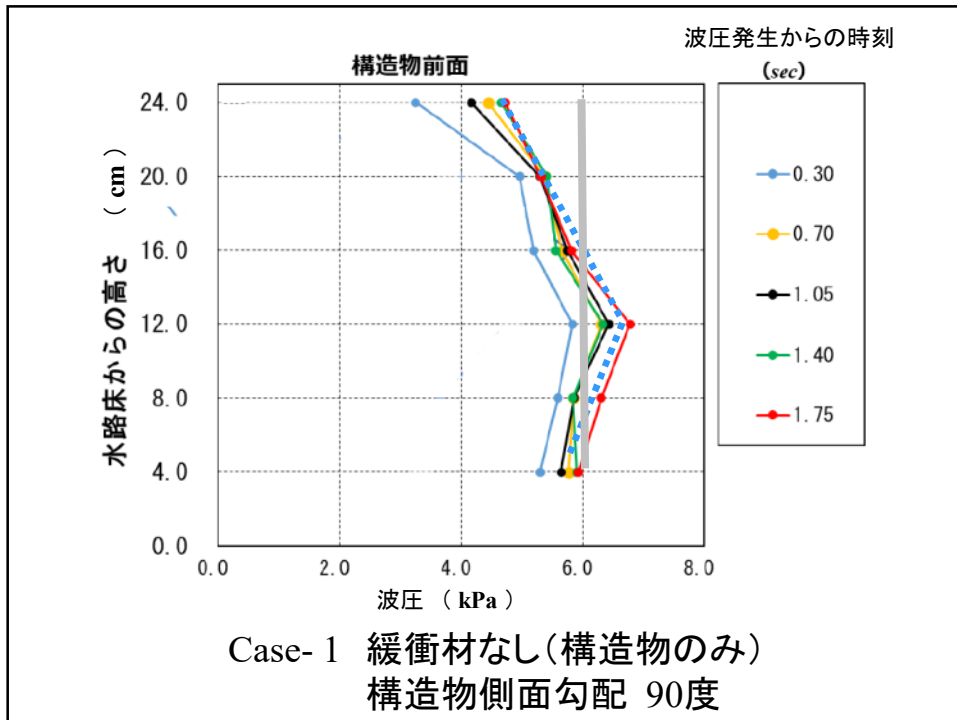
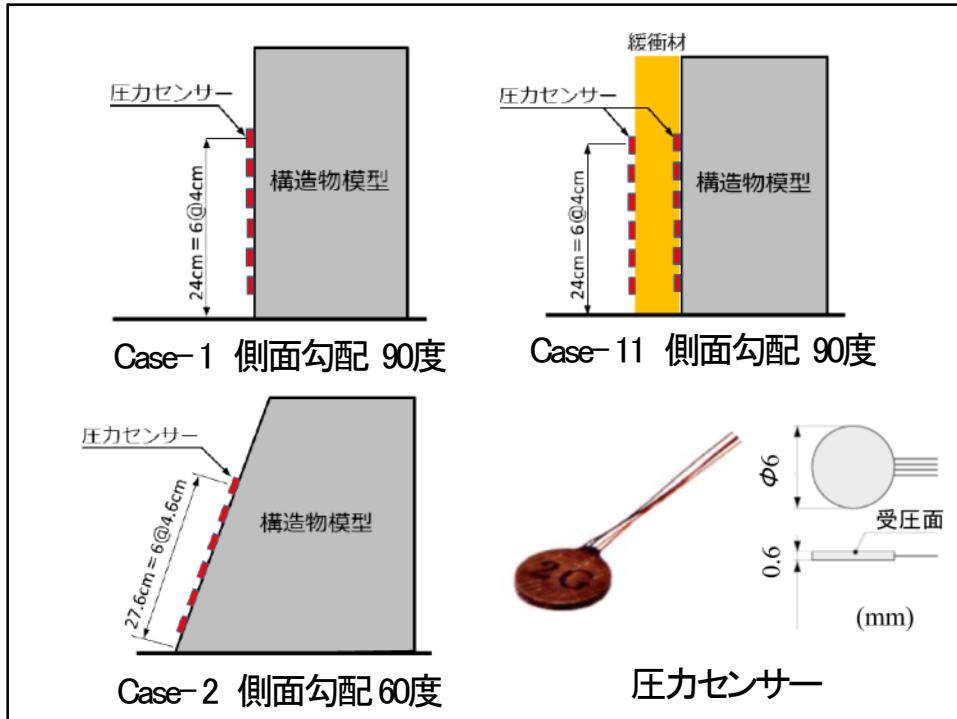


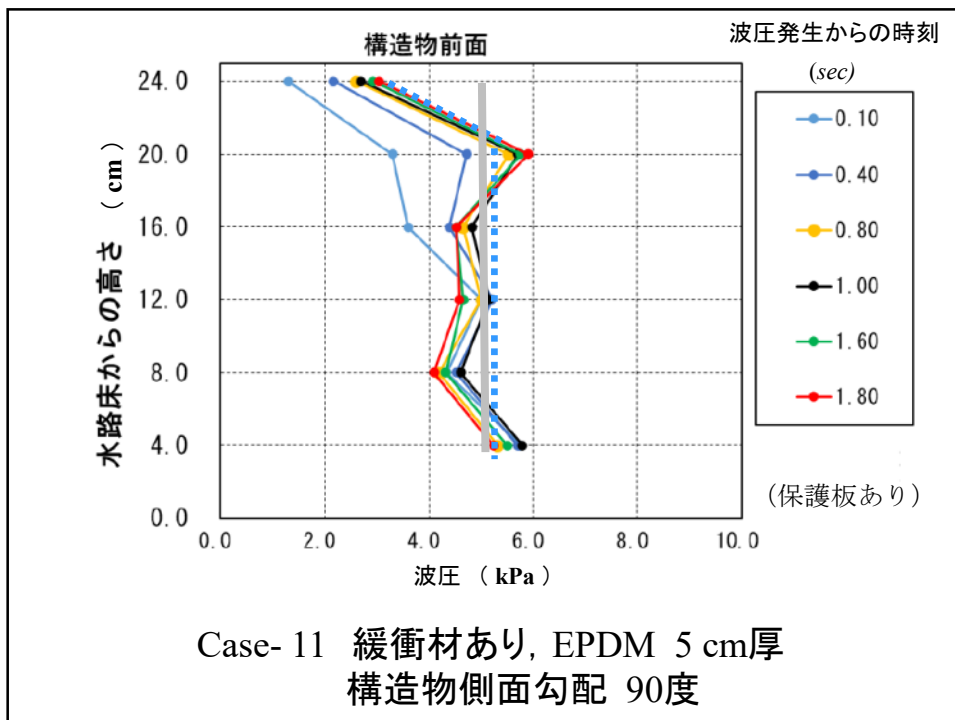
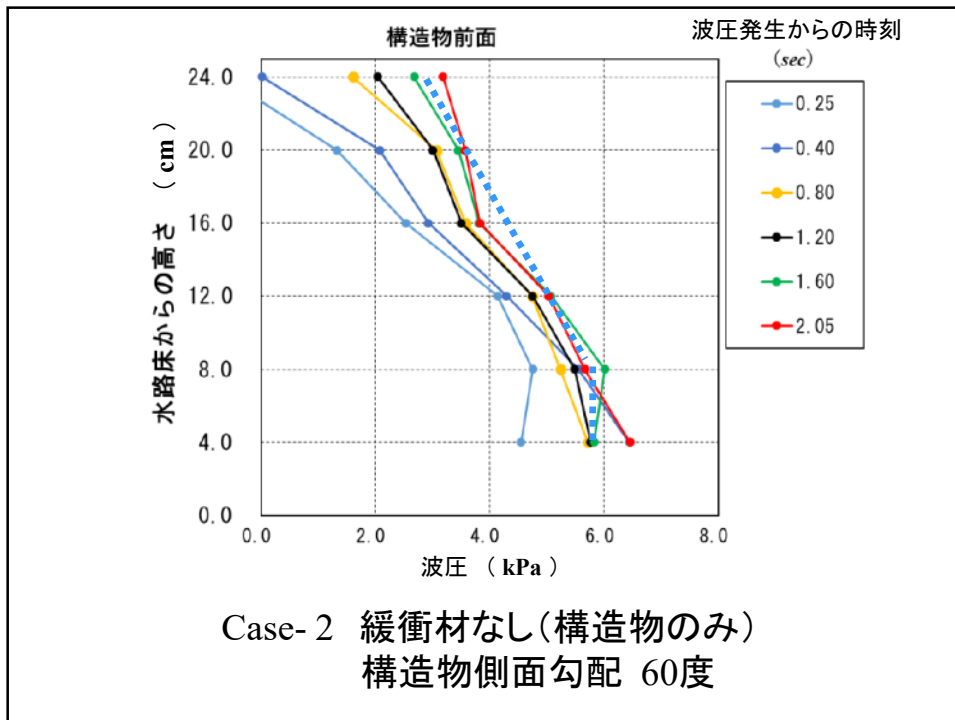
### 実験に用いた二次元水路

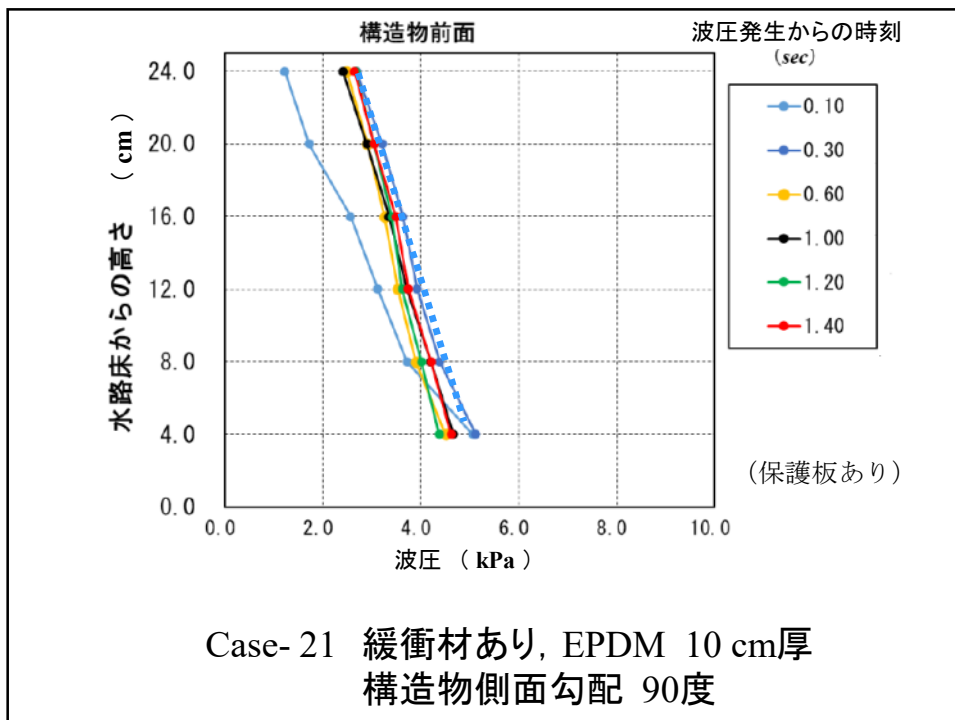
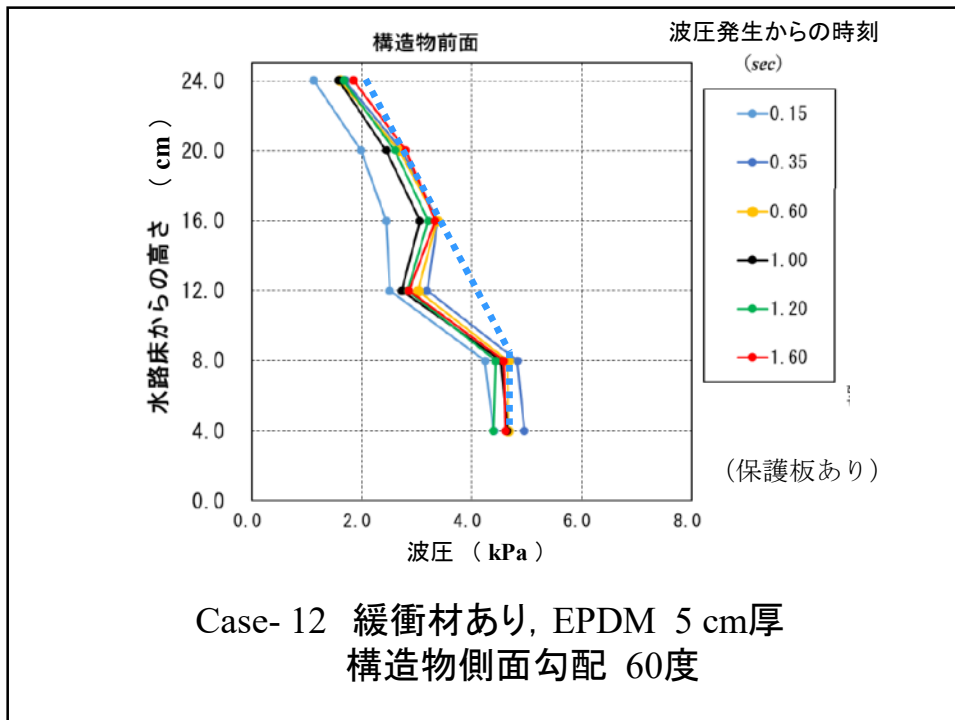
実験ケース					
実験 ケース	緩衝材		側面勾配 (仰角)	波高	入射方向
	厚さ	材質			
1	なし		90°	25 cm	正面入射
2	なし		60°	25 cm	正面入射
11	5 cm	EPDM	90°	25 cm	正面入射
12	5 cm	EPDM	60°	25 cm	正面入射
21	10 cm	EPDM	90°	25 cm	正面入射
22	10 cm	EPDM	60°	25 cm	正面入射

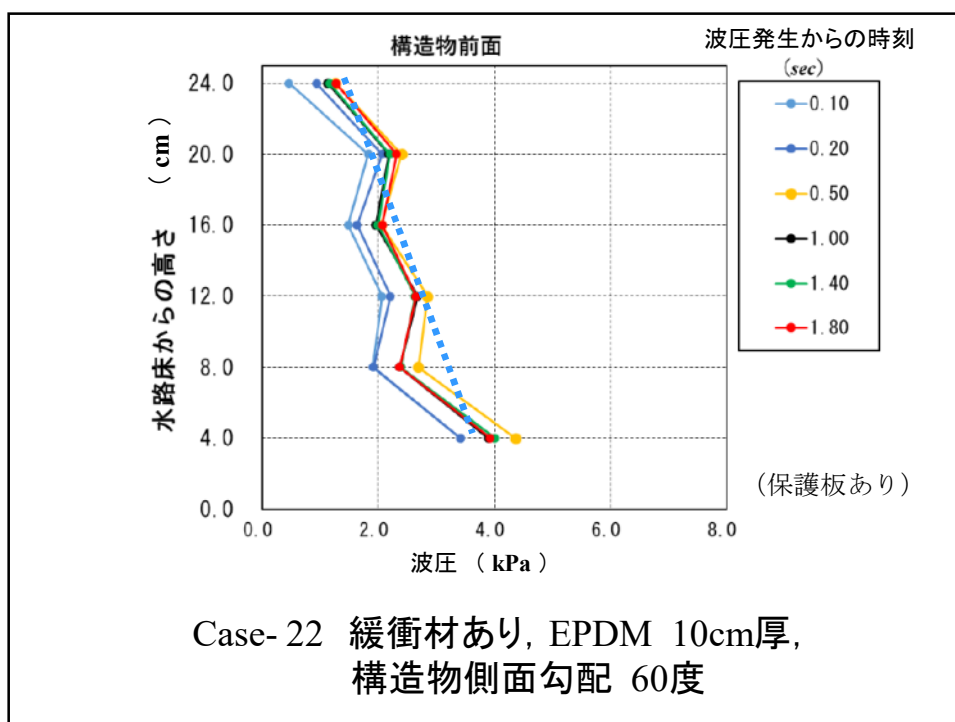
(備考) EPDM: エチレンプロピレンゴムスポンジ







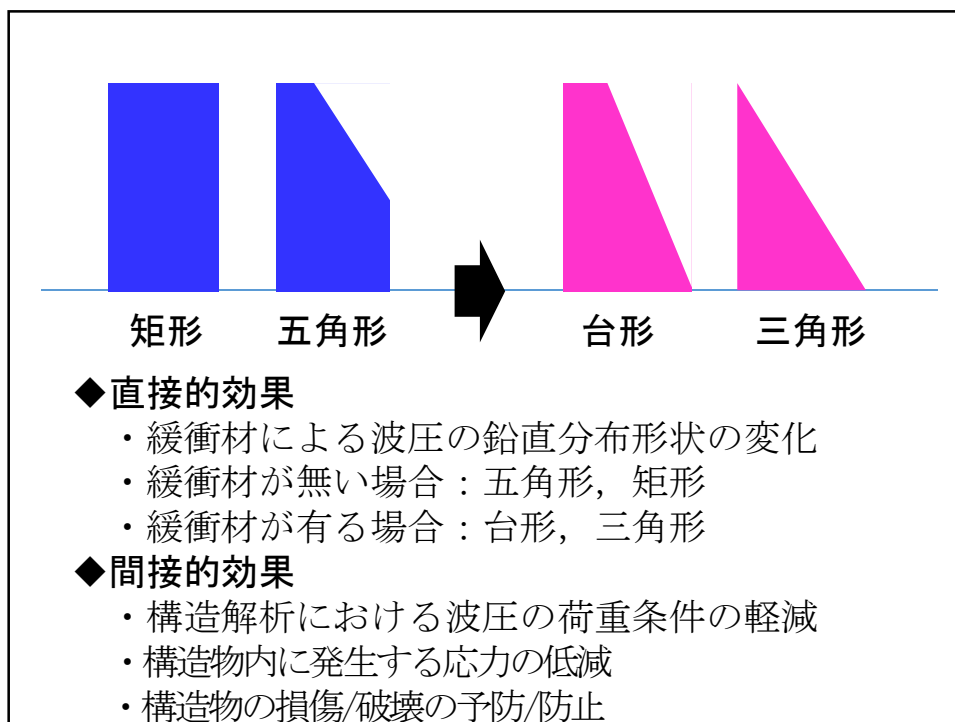
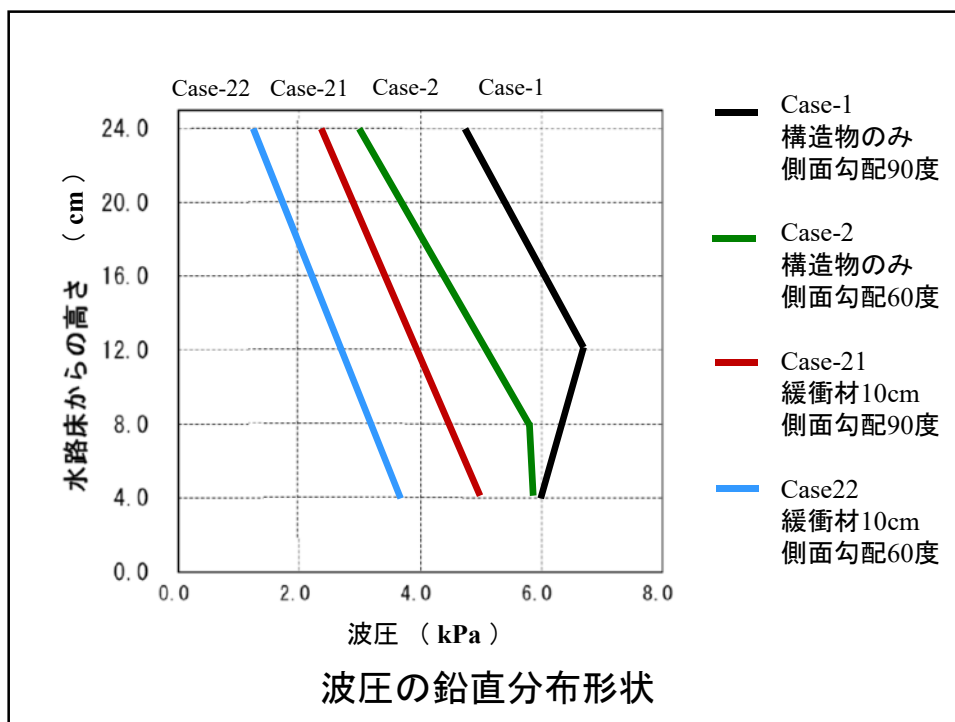




### 構造物模型の表面での波圧の計測結果

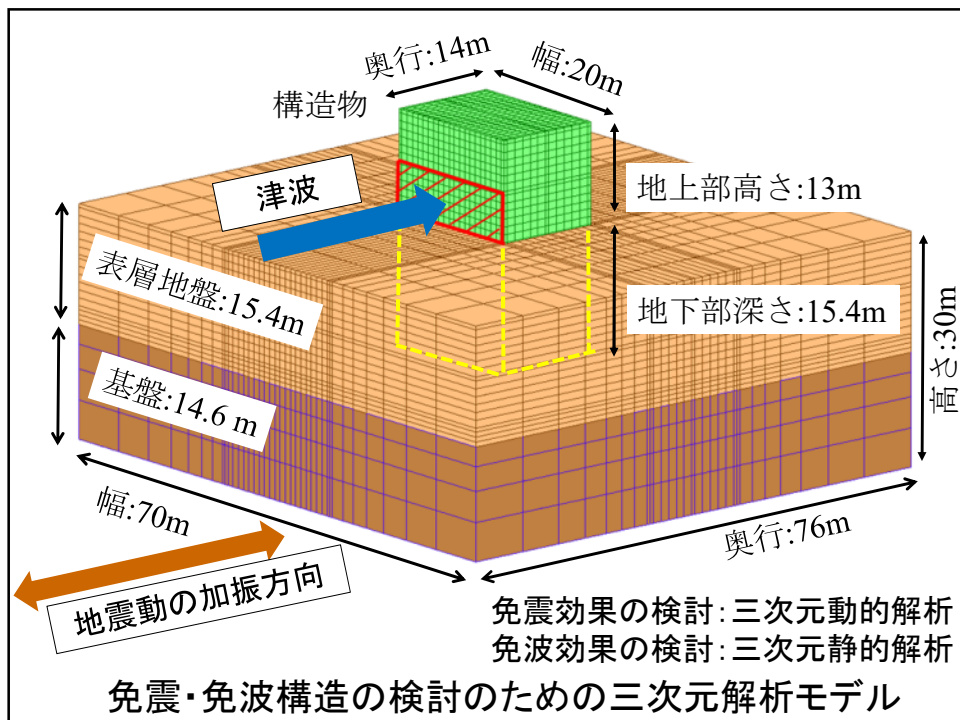
実験 ケース	構造物の 側面勾配 (仰角)	緩衝材の 材質と厚さ	波圧 (kPa)		波圧の 鉛直分布形状
			H: 水路床からの高さ		
			H=16 cm	H=12 cm	
1	90°	なし	5.8	6.7	五角形(矩形)
11	90°	EPDM 5 cm	4.8	5.1	五角形(矩形)
21	90°	EPDM 10 cm	3.7	3.9	台形(三角形)
2	60°	なし	3.8	5.1	五角形
12	60°	EPDM 5 cm	3.3	3.1	五角形
22	60°	EPDM 10 cm	2.1	2.8	台形(三角形)





## B. 三次元FEM解析による検討

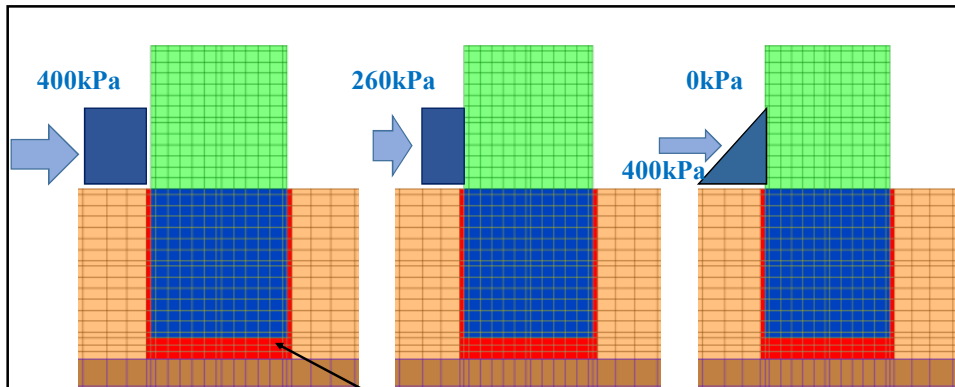
- ・波圧の大きさおよび分布形状の設定が、構造物内に発生する応力にどのように影響するかを検討
- ・津波に対する構造物の安全性評価の視点からの考察



## 解析ケース

解析ケース	波圧の設定	
	鉛直分布形状	波圧の大きさ
1	矩形分布	400kPa
2	矩形分布	260kPa
3	三角形分布	400kPa

- ・指針/基準類では三角形分布が基本
- ・解析プログラムは“ISCEF”を使用



構造物の地下部に配置した緩衝材  
(主に免震材としての機能、免波材としても機能)

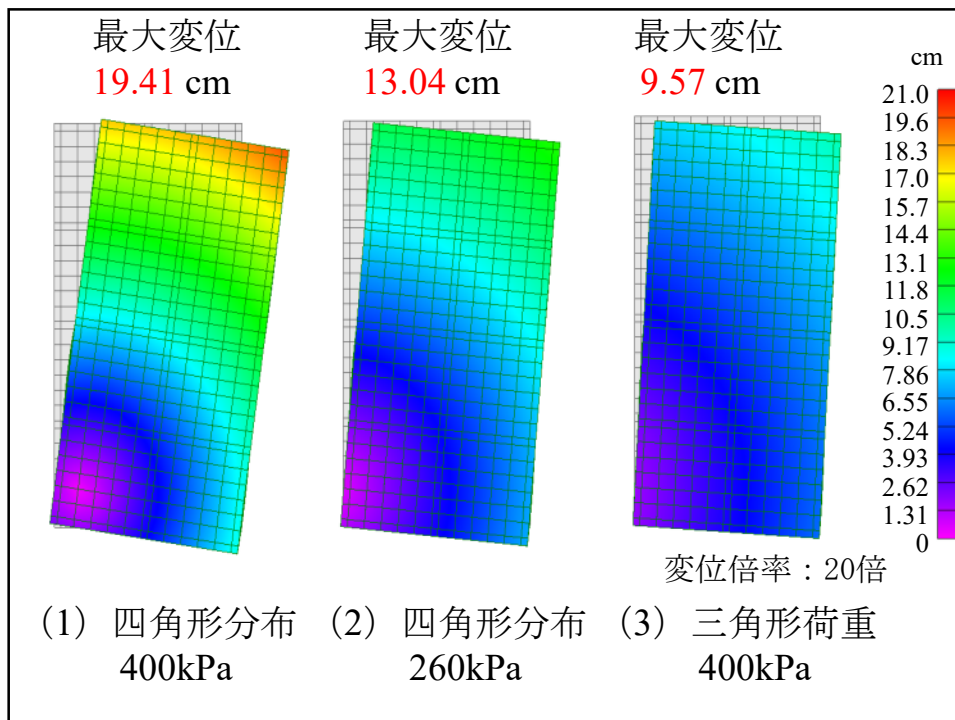
- (1) 矩形分布      (2) 矩形分布      (3) 三角形分布  
 波圧400kPa      波圧260kPa      波圧400kPa

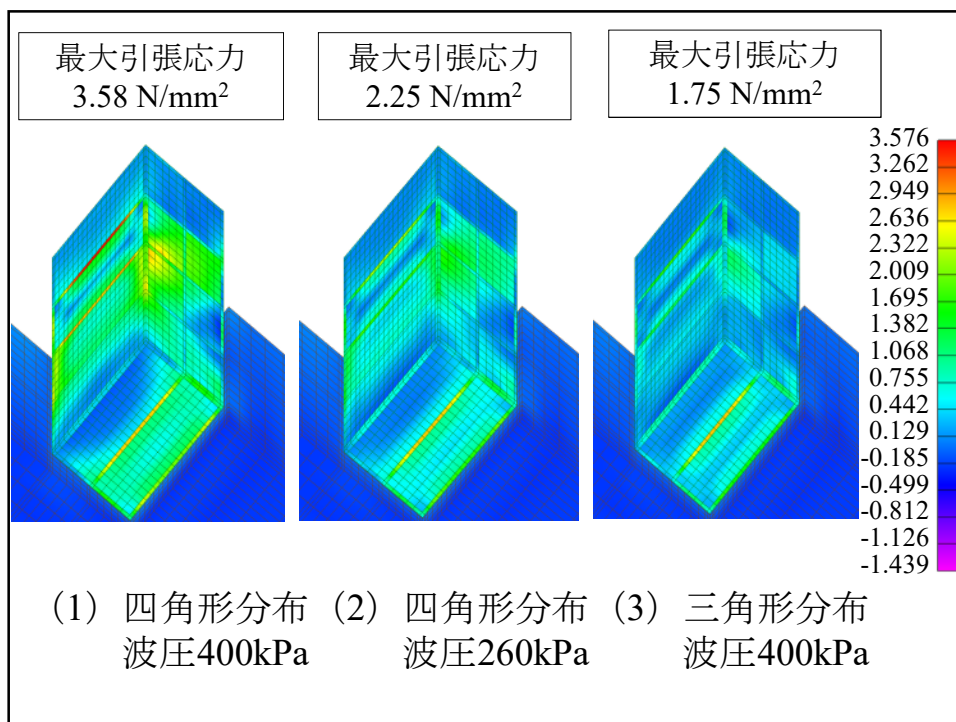
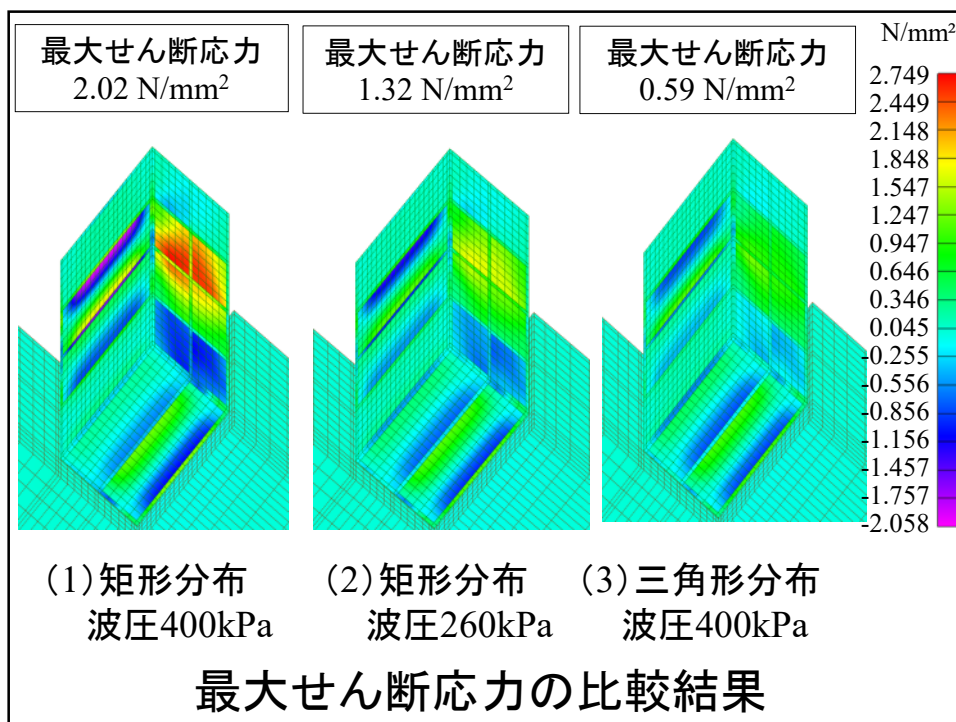
## 構造物と緩衝材の物性値

項目	せん断剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比
構造物	14,600	2.40	0.2
緩衝材	0.24	1.00	0.49

## 地盤の物性値

項目	厚さ (m)	S波速度 (m/s)	せん断剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比
表層地盤	15.4	90	16	2.0	0.40
基盤層	14.6	330	240	2.2	0.35





## まとめ

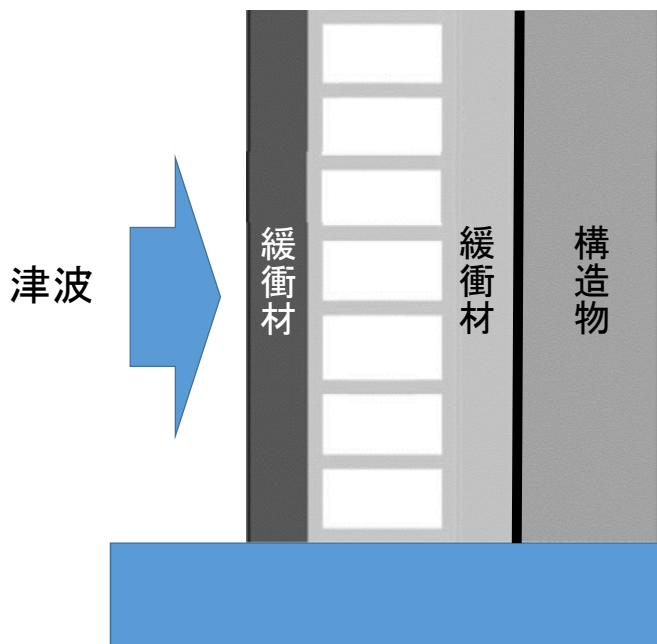
◆緩衝材の活用と構造物の側面勾配の工夫によって波圧の低減が可能かどうかについて津波模型実験を行い検討した。

◆その結果、構造物の表面に緩衝材を配置することによって、また、構造物の側面勾配を低角にすることによって、波圧を低減させることが可能であることが可能であること、及び、波圧の鉛直分布形状を複雑な形状から単純な形状へと変化させることが可能であることを示す結果を得ることができた。

◆三次元FEM解析による応力評価を行った結果、波圧の大きさと鉛直分布形状の設定は、構造物内に発生する応力に直接的に著しい影響を及ぼすことを確認することができた。

◆津波に対する構造物の安全性を正しく評価するためには、波圧の大きさと鉛直分布形状を正確に設定することが必要である。

## 実際の構造物を想定した場合の設置イメージ



### 今後の課題

#### ◆波圧の分布形状

- ・水平分布形状の検討（鉛直分布形状だけでなく）
- ・曲線形状の設定の必要性（直線形状だけでなく）

#### ◆安全性評価の精度・信頼性

（FEM解析での波圧の作用方法）

- ・静的載荷による解析の信頼性
- ・動的載荷による解析の必要性

### 謝 辞

本研究はJSPS科研費 JP21K04603の助成を受けて実施しました。  
記して感謝の意を表します。

## WG1 学会発表実績

### 【査読論文】

- 1) 渡辺高志, 有賀義明, 市山誠, 西本安志: 陸上構造物の側面勾配による津波波圧低減効果の検討, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.79, No.13, 22-13021, 2023
- 2) 渡辺高志, 有賀義明, 西本安志, 大峯秀一, 山中明彦, 森崎啓, 坂下克之, 市山誠: 衝突条件の違いによる陸上構造物に作用する津波波圧の低減効果の検討, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.77, No.4, I\_659-I\_669, 2021
- 3) 有賀義明: 地下浄水池に連結された形状が複雑な大口径地中管路の地震時応答の評価について, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4, I\_259-I\_266, 2020
- 4) 有賀義明: 水路と橋脚の接続状態が水路橋の地震時応答に及ぼす影響について, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.4, I\_189-I\_198, 2019
- 5) C. Miura, Y. Ariga, K. Inoko, K. Takehara: Seismic Response of Large Underground Purification Reservoir induced by Earthquake Motion in the Short-axis Direction, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.18, No.3, pp.3\_26-3\_39, 2018
- 6) 有賀義明, 佐藤優乃, 渡辺高志, 西本安志, 曹増延, 坂下克之, 鈴木高二朗, 有川太郎, 浅井光輝, 堀宗朗: 水循環施設における免震・免波構造の効果の評価に関する検討, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, I-721-729, 2017

### 【学会発表】

#### 令和6年度(2024年度)

- 1) Y. Ariga: Seismic and tsunami isolation technology for onshore structures by utilizing cushioning material, 18WCEE (18<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering) 2024.6/30-7/5, ミラノ
- 2) Y. Ariga: Influence of nonlinearity of dynamic shear modulus on the seismic safety of arch dam, 18WCEE (18<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering) 2024.6/30-7/5, ミラノ

#### 令和5年度(2023年度)

- 3) 有賀義明, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志, 坂下克之, 鈴木隼人, 佐藤優乃: 地上構造物のための変形し易い緩衝材を活用した地震・津波対策技術の開発、第16回日本地震工学シンポジウム、Day2-G419-12 (11/24, 11:47-11:59)、2023年11月
- 4) 坂下克之, 有賀義明, 鈴木隼人, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志: 三次元FEM解析による構造物の津波安全性評価に関する検討、第16回日本地震工学シンポジウム、Day1-G404-27 (11/23, 16:32-16:44)、2023年11月23~25日
- 5) 有賀義明, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志: 緩衝材による波圧の低減効果を考慮した構造物応力評価について、(D14-12)、土木学会論文集(特集号)(投稿中)
- 6) 渡辺高志, 有賀義明, 市山誠, 西本安志, 坂下克之, 鈴木隼人: 緩衝材による陸上構造物に対する津波作用の低減効果の解析的検討、(D24-140)土木学会論文集(特集号)(投稿中)
- 7) 有賀義明, 鈴木隼人, 坂下克之, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志, 佐藤優乃: 構造物の変位・応力評価における波圧の設定の影響、(B13-103)土木学会論文集(特集号)(投稿中)



- 8) 西本安志, 有賀義明, 市山誠, 渡辺高志, 坂下克之, 鈴木隼人: 構造物に作用する津波波圧の5低減効果を期待した緩衝材の特性評価に関する一考察、土木学会第43回地震工学研究発表会、D24-97、pp.1-5、2023年9月8日
- 9) 渡辺高志, 有賀義明, 市山誠, 西本安志, 坂下克之, 鈴木隼人: 緩衝材による津波作用の低減に関するSPH法による解析、土木学会第43回地震工学研究発表会、D24-140、pp.1-6、2023年9月8日
- 10) 鈴木隼人, 有賀義明, 坂下克之, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志, 佐藤優乃: 構造物に発生する応力に対する波圧の分布形状の影響、土木学会第43回地震工学研究発表会、B13-103、pp.1-5、2023年9月7日

#### 令和4年度(2022年度)

- 12) 有賀義明, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志: 緩衝材を活用した津波波圧の低減効果について、土木学会第42回地震工学研究発表会論文集、D14-12、pp.1-9、2022.10.4 (Zoom)
- 13) 渡辺高志, 有賀義明, 市山誠, 西本安志: 構造物に作用する津波波圧に対する構造物の側面勾配の影響、土木学会第42回地震工学研究発表会論文集、D14-29、pp.1-7、2022.10.4 (Zoom)
- 14) 有賀義明, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志: 構造物に作用する津波波圧の緩衝材による低減について、令和4年度土木学会第77回年次学術講演会講演概要集、I-276、pp.1-2、2022.9.14-16 (対面)
- 15) 有賀義明, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志: 構造物形状と緩衝材を活用した津波対策技術の検討」日本地震工学会・大会2022、pp.1-7、2022.12.15-16、北海道大学にて (対面)

- 16) 有賀義明: 「緩衝材を活用した地震・津波対策技術の開発」令和4年度東北地域災害科学研究集会、pp.1-2、2022.12.27、弘前大学にて (対面)
- 17) 有賀義明, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志: 津波作用の低減に対する構造物の側面勾配と緩衝材の複合効果について、土木学会第13回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム、pp.1-6、2023.1.12 (Zoom)
- 18) 渡辺高志, 有賀義明, 市山誠, 西本安志: SPH法による緩衝材の津波波圧低減効果に関する解析的検討、土木学会第13回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム、pp.1-5、2023.1.12 (Zoom)

#### 令和3年度(2021年度)

- 19) 有賀義明, 市山誠, 渡辺高志, 西本安志, 大峯秀一, 坂下克之, 森崎啓, 山中明彦, 山崎和貴: 緩衝材による津波波圧の低減に関する基礎的検討、土木学会第12回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集、pp.62-68、2022
- 20) 渡辺高志, 有賀義明, 市山誠, 西本安志, 坂下克之, 大峯秀一, 森崎啓, 山中明彦, 山崎和貴: 構造物の側面構内による津波波圧の低減効果の数値解析による検討、土木学会第12回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集、pp.72-77、2022
- 21) 市山誠, 有賀義明, 渡辺高志, 西本安志, 大峯秀一, 坂下克之, 山中明彦, 森崎啓, 山崎和貴: 津波波圧に対する構造物の側面勾配の影響に関する模型実験、土木学会第12回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集、pp.123-127、2022
- 22) 渡辺高志, 有賀義明, 西本安志, 大峯秀一, 山中明彦, 森崎啓, 坂下構造物の克之, 市山誠: 衝突条件の違いによる陸上構造物に作用する津波波圧の低減効果の検討、土木学会論文集A1 (構造・地震工学)、Vol.77, No.4, I\_659-I\_669, 2021

23) Y. Ariga, T. Watanabe, Y. Nishimoto, K. Sakashita, S. Omine, H. Morisaki, A. Yamanaka, M. Ichiyama, Y. Sato : Effective countermeasures against both strong earthquake motion and tsunami for water cycle facility, 17<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 2e-0004, pp.1-9, 2021

**令和2年度(2020年度)**

24) 渡辺高志、有賀義明、西本安志、大峯秀一、山中明彦、森崎啓、坂下克之、市山誠：衝突条件の違いによる陸上構造物に作用する津波波圧の低減効果の検討、土木学会第40回地震工学研究発表会講演論文集、C11-1642、pp.1-9、2020年10月

25) 渡辺高志、有賀義明、市山誠、西本安志、大峯秀一、森崎啓、山中明彦、坂下克之：SPH法による津波波圧の低減効果の検討、土木学会第11回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム、2021年1月8日

26) 市山誠、有賀義明、渡辺高志、森崎啓、西本安志、大峯秀一、山中明彦、坂下克之：免波構造に関する津波模型実験の概要、土木学会第11回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム、2021年1月8日

**令和1年度(2019年度)**

27) 渡辺高志、有賀義明、西本安志、大峯秀一、山中明彦、森崎啓、佐藤優乃：粒子法を用いた陸上構造物に作用する津波波圧の衝突条件による影響評価、土木学会第39回地震工学研究発表会講演論文集、C12-1470、pp.1-8、2019年10月。

28) 渡辺高志、有賀義明、西本安志：アスファルト系免震材を用いた免震・免波構造の適用性に関する基礎的考察、土木学会第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム、2019年12月。

29) 有賀義明、渡辺高志、西本安志、坂下克之、大峯秀一、森崎啓、佐藤優乃：沿岸域の水循環施設の減災のための免震・免波技術の開発、土木学会第10回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム、2020年1月。

30) 渡辺高志、有賀義明、西本安志、山中明彦、市山誠、安田誠宏：粒子法による津波波圧に対する構造物の表面形状の影響に関する解析的検討、土木学会第10回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム、2020年1月。



水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会  
WG 1：免振・免波による津波対策

# 津波模型実験による津波波圧の低減効果に関する検討

令和5年（2023年）11月17日

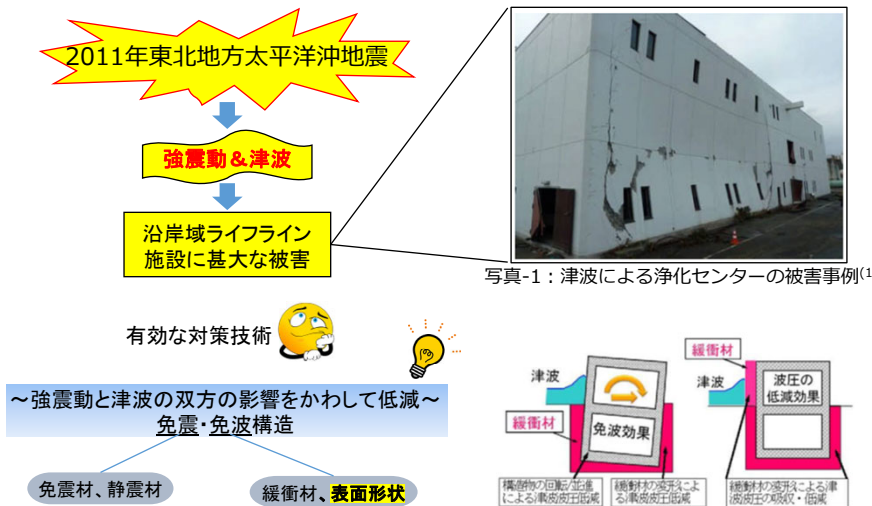
パシフィックコンサルタンツ（株）  
つくば技術研究センター  
市山 誠

Copyright © Pacific Consultants Co., LTD.

1



## 研究の背景



2011年東北地方太平洋沖地震では、強震動と津波によって甚大な被害が発生した。写真は、宮城県仙台市南蒲生浄化センターの構造物の被害状況である。

上下水道施設をはじめとする沿岸域に位置する社会インフラ施設は、強震動と津波の双方に対して有効な対策技術の実現が求められる。

我々は、強震動と津波の双方の影響をかわして低減するための技術として免震・免波構造という概念を提案している。その中の免波構造は、剛性が低く変形し易い緩衝材等を活用する技術と構造物の表面形状を工夫することで津波波圧の一部を避ける技術である。

ここでは、水理模型実験による津波波圧の低減効果検討について、結果を報告する。

1) 2011年東北地方太平洋沖地震 宮城県仙台市 南蒲生浄化センター 第三ポンプ室

Copyright © Pacific Consultants Co., LTD.

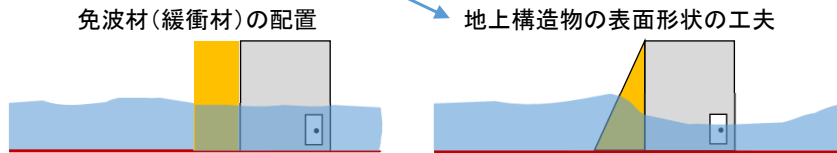
2

2

## 実験目的

### 実験目的

- ① 地上構造物に作用する津波波圧の影響把握
- ② 免波構造による津波波圧低減効果の把握



### 実験結果の評価・考察

免波材の有無、免波構造の相異による相対比較

実験目的は、地上構造物に作用する津波波圧の影響の把握および免波構造による津波波圧の低減効果の把握である。

免波構造に、大別して2つ構造を考え、一つは津波波圧が作用する地上構造物の周囲に免波材(緩衝材)を配置することによる津波波圧低減構造、もう一つは地上構造物の表面形の工夫による津波波圧の低減・回避構造である。

なお、実験では、免波構造による津波波圧の低減効果の基本的な把握・解明を主眼としており、理想化したシンプルな構造体と実験模型としている。このことから、実験計測結果は、免波対策の有無、免波構造の相異による相対比較により評価・考察することとしている。

## 実験装置 <実験水路>

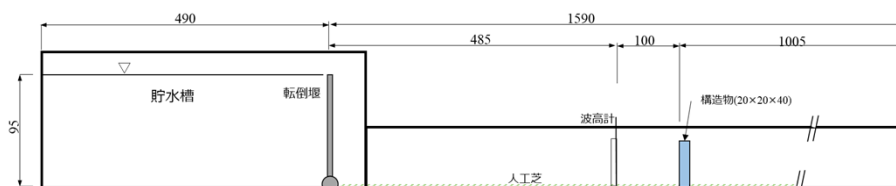


図-1 水路側面概念図

$S_H:S_V = 1:2$

単位 (cm)

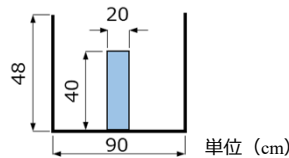


図-2 水路断面概念図

$S_H:S_V = 1:2$

単位 (cm)

実験には、の直線二次元水路を用いた。実験は、水路内に設置した構造物模型に流水(津波段波)を作用させ、構造物模型の表面に配置した圧力センサーにより波圧を計測した。

実験水路は、コンクリート製であり、延長4.9mの貯水槽と延長15.9mの二次元水路で構成されている。上流側の貯水槽は、容量4.2m<sup>3</sup>であり、転倒堰で下流側の二次元水路と仕切られている。この転倒堰を一気に倒すことで貯水槽内の水が水路を流下し、津波を発生させる仕組みである。二次元水路の断面は、幅0.9m、側壁高0.48mの矩形である。

水路床には、毛足約1cmの人工芝を設置した。構造物模型は、上流面を転倒堰から5.85mの位置に配置した。これらの条件は、構造物に作用する津波の先端勾配を急にするための工夫である。

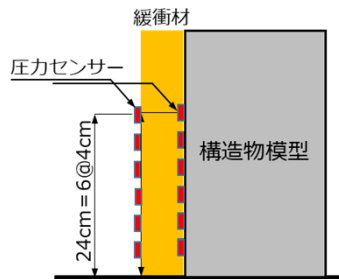
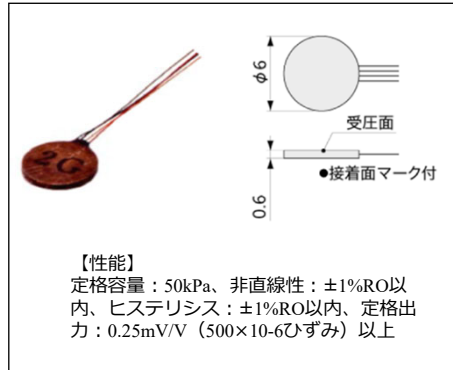


図-1 小型圧力センサー設置高



【性能】  
 定格容量：50kPa、非直線性：±1%RO以内、ヒステリシス：±1%RO以内、定格出力：0.25mV/V（500×10-6ひずみ）以上

図-2 小型圧力センサー

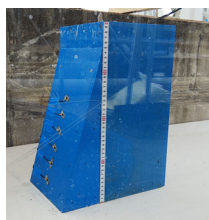
津波高を確認するために、構造物の波圧計測実験では、構造物模型の上流側1.0mの位置に容量型波高計を設置し、サンプリング周期50Hzで波高を計測した。  
 津波波圧の計測には、直径6mm、厚さ0.6mmの小型圧力センサー（共和電業製PS-C※1）を用いた。このセンサーは、センサー内部でブリッジを構成し、型薄構造をした圧変換器である。センサーからのデータは、ユニバーサルレコーダ（共和電業 EDX-100A）により記録した。

圧力センサーは、水路床から4.0cm間隔で6個を構造物模型または、緩衝材の表面に接着固定し、サンプリング周期5kHzで計測した。構造物側面が斜めの勾配を持つ場合は、水路床から鉛直高4.0cm間隔でセンサーと取り付けた。

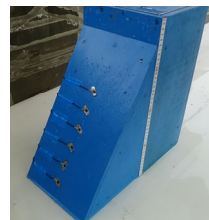
※1： <https://www.kyowa-ei.com/jpn/product/category/sensors/ps-c/index.html>



(a) 基本形



(b) 仰角75°



(c) 仰角60°

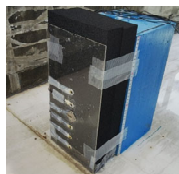
図-1 構造物模型

実験に用いた構造物模型は、幅20cm、高さ40cm、奥行20cmの直方体を基本とした。外壁の材質は12mmの耐水合板、表面は水性塗料で塗装とした。内部は30mmの角材の骨組みの剛な構造である。

構造物模型の上流側面に勾配（仰角）を設ける場合は、上記直方体の構造物に三角柱の構造物を取り付けた。側面勾配は、75°と60°パターンを設定した。

緩衝材を構造物模型の表面に配置する実験では、津波作用側の構造物模型の壁面全体を緩衝材が被覆するように設置した。緩衝材は構造物模型に固定せず、粘着力の弱い養生テープにより、倒れない様に保持するだけとした。

緩衝材の材質は、スポンジ系としてエチレンプロピレンゴム（EPDM）、軟質ウレタンフォーム、ウレタンスポンジ、ゴムチップについて検討した。更に不織布系として建築断熱材に使用されるグラスウールを検討した。



EPDM



ウレタンスポンジ(1)



軟質ウレタンフォーム



ゴムチップ



ウレタンスポンジ(2)

図-2 緩衝材

表-1 実験ケースと実験条件

Case	浸水深 (cm)	入射角 (DEG.)	構造物上流面 勾配 (DEG.)	緩衝材			水路床	備考
				種類	厚さ (cm)	保護板		
C5-01	20.0	0.0	90.0 (鉛直)	-	-	-	人工芝	二次元条件の実験ケース
C5-02	20.0	0.0	90.0	EPDM	10.0	有り	人工芝	
C5-11	25	0.0	90.0	-	-	-	-	基本ケース
C5-13	25.0	0.0	90.0	-	-	-	人工芝	
C5-21	25.0	45.0	90.0	-	-	-	-	入射角の影響の確認
C5-31	25.0	0.0	90.0	EPDM	10.0	なし	人工芝	緩衝材の効果および保護板の効果の検討
C5-32	25.0	0.0	90.0	EPDM	10.0	有り	-	
C5-41	25.0	0.0	75.0	-	-	-	人工芝	構造物の側面勾配の効果の検討
C5-42	25.0	0.0	60.0	-	-	-	人工芝	
C5-51	25.0	0.0	75.0	EPDM	10.0	なし	人工芝	側面勾配と緩衝材の複合効果の検討
C5-52	25.0	0.0	60.0	EPDM	10.0	有り	人工芝	
C5-61	25.0	0.0	90.0	ウルタスポンジ®(2)	10.0	なし	人工芝	新規緩衝材の効果の検討
C5-62	25.0	0.0	90.0	ウルタスポンジ®(2)	10.0	有り	人工芝	
C5-71	25.0	0.0	75.0	ウルタスポンジ®(2)	10.0	有り	人工芝	側面勾配と新規緩衝材の複合効果の検討
C5-72	25.0	0.0	60.0	ウルタスポンジ®(2)	10.0	有り	人工芝	

本報告で示す主な実験ケースは、表-1に示すとおりである。浸水深（津波高）の25.0cmは、水路の最大波高として津波の通過検定で決定した。浸水深が、16cmのケースも行っているが、ここでは割愛する。

C5-13は、直方体の構造物模型に津波を作用させるケースであり、基本ケースである。C5-21は、直方体構造物模型を45°回転させて配置したケースである。

C5-31, 32は、EPDM緩衝材の波圧低減効果および保護板の効果検討ケースである。

C5-41, 42は、構造物の側面勾配の違いによる効果検討ケースである。C5-51, 52, 71, 72は、構造物模型の側面勾配と緩衝材の複合効果を検討するケースである。

C5-61, 62は、EPDMよりも柔軟性の高いウルタスポンジ®(2)の効果検討ケースである。

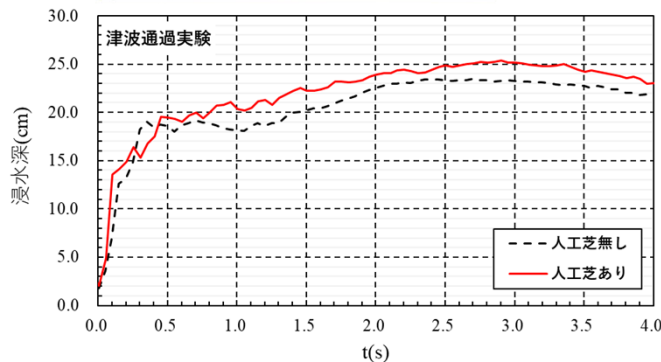
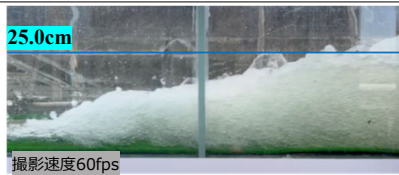


図-1 構造物模型設置位置の浸水深

1 m間隔で設置した波高計の値から推定される津波（段波）先端の到達時差は、凡そ0.3秒、波速は1.0m/0.3sec=330cm/sと推算された。

本研究では、津波先端の水面形状を少しでも実現象に近づけるために、次のような水路床条件の改良を行った。前頁の実験一覧表において、水路床条件の欄が「-」の実験ケースは、この水路改良前に実施したものである。

津波先端の水面勾配を急なものとするため、水路床に人工芝（厚さt=10mm）を敷設し、通過実験を行った。人工芝の設置により津波先端の水面勾配は急となり、底面粗度によって、最大浸水深が凡そ1.5cm増大した。

実験結果① <基本ケース：緩衝材無し、水路床条件の違い>

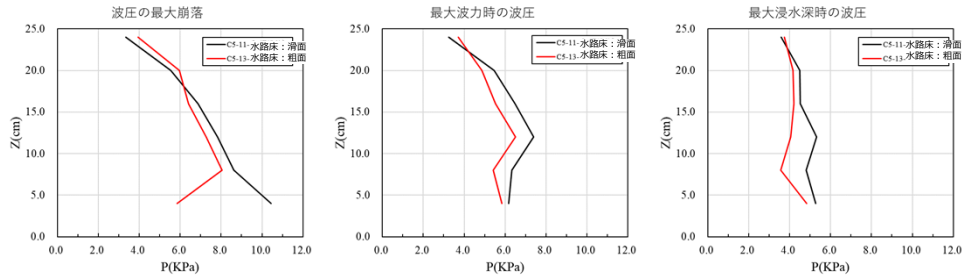


図-1 波圧の鉛直分布

図-1は、波圧の鉛直分布を、時系列中の最大値を連ねた最大崩落、最大波力発生時、及び最大浸水深発生時について示している。ここで、波力とは鉛直方向に4cm間隔で配置した圧力計の値を積分した単位幅あたりの波圧である。図-2は、波力と構造物の上流側1m地点で計測した浸水深の時系列を示している。

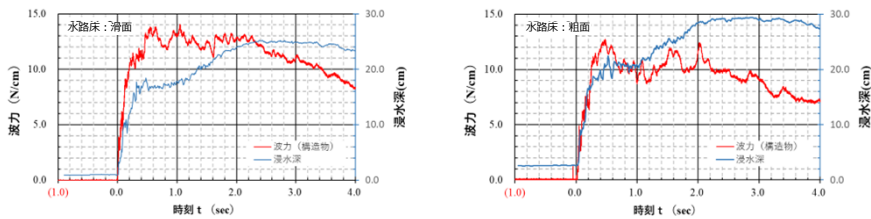


図-2 波力・浸水深の時系列

相対的に底面粗度が小さいC5-11は、底面付近で最大波圧が発生するが、これは底面付近を先行する高速流の影響と思われる。C5-13は底面粗度により底面から浸水深の3割程度の位置で最大波圧を示している。

最大波力時の波圧分布は、2ケースとも同様の台形分布である。

実験結果② <入射角の影響、入射角45度>

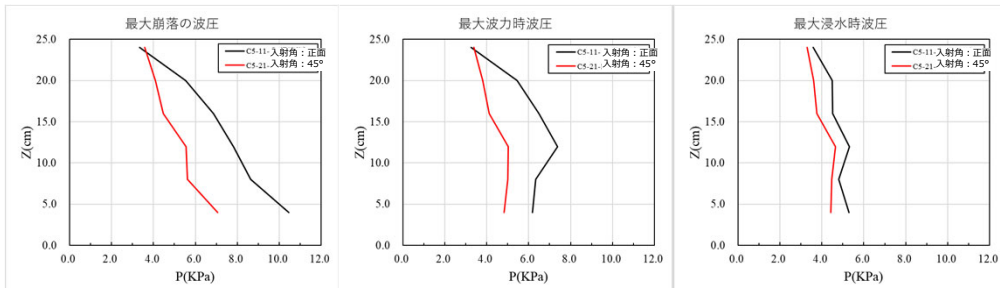


図-1 波圧の鉛直分布

図中の赤色実線は、水路中で構造物模型を45度回転設置し、津波の入射角度を変更したケースである。

津波が構造物に作用した1.0秒以内の衝撃圧、動圧の寄与が大きい最大崩落時と最大波力時の波圧鉛直分布は、入射角が45度となることで75%程度に減じている。動圧が減じる最大浸水時の波圧は、正面入射の80%程度である。

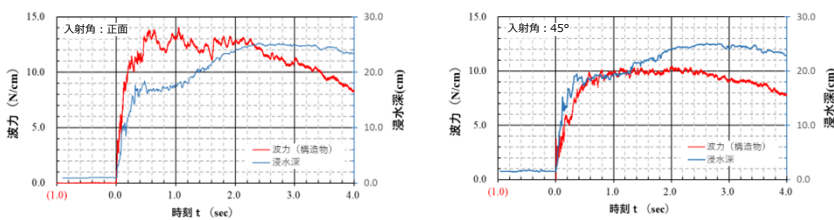
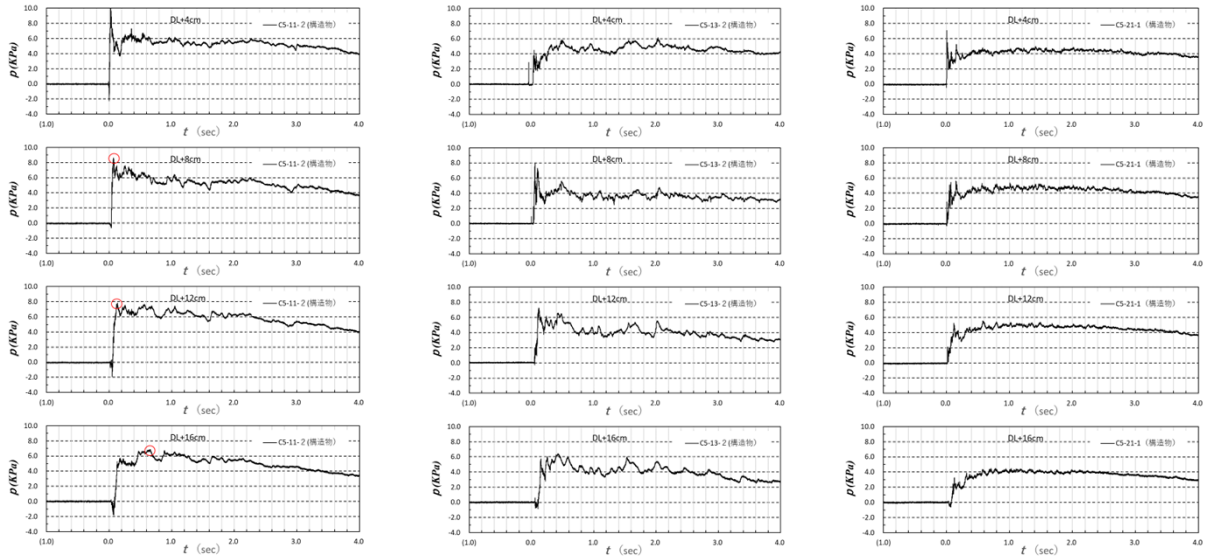


図-2 波力・浸水深の時系列

波力の時系列を見ると、津波作用時から1秒間の波力の急上昇（衝撃圧）が緩和されている。実際の構造物で入射角をコントロールすることは難しいと思われるが、津波入射角の変更は、有効手段と云える。



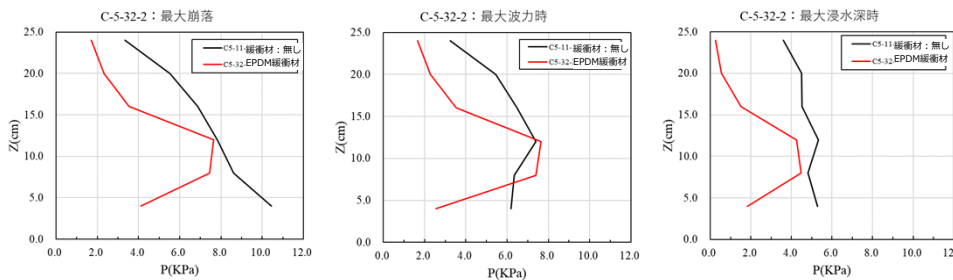
実験結果 <基本ケース：緩衝材無し、入射角の変更>



Copyright © Pacific Consultants Co., LTD.

11

実験結果③-1 <EPDM緩衝材の効果>



図中の赤色実線は、EPDM素材の緩衝材を構造物模型の津波作用面に取り付けたケースの波圧分布である。EPDMは厚さ5.0cmあり、これを2枚重ねて設置した。設置は、EPDM側面と背後の構造物模型を養生テープで仮止めしており、津波作用時には脱落する程度の粘着力である。

図-1 波圧の鉛直分布

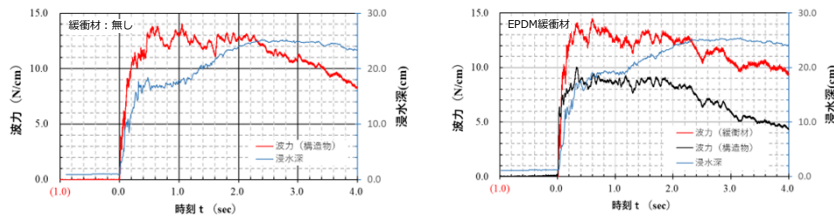


図-2 波力・浸水深の時系列

波圧の鉛直分布は、浸水深の1/2付近で波圧が最大となる。凸形状の分布形となる。構造物面の波力は、緩衝材により30%程度減じている。但し、浸水深の1/2付近の波圧は、河床材の無い基本ケースとほぼ同じである。これは、EPDMの変位により、浸水深の1/2付近に流れが集中し、そこから上部の動圧が減じると共に緩衝材の効果が合わさったものと推察している。

Copyright © Pacific Consultants Co., LTD.

12



実験結果③ <EPDM緩衝材の効果>

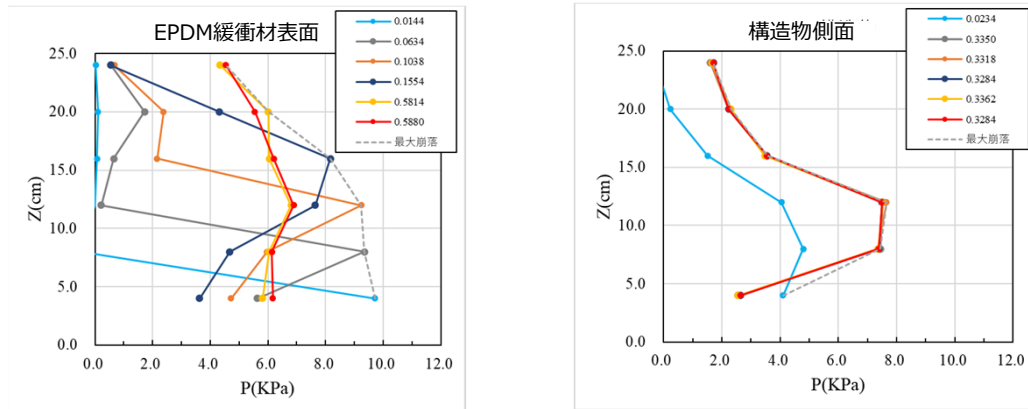


図-1 波圧鉛直分布の時系列

Copyright © Pacific Consultants Co., LTD.

実験結果③-2 <ウレタンスポンジ系緩衝材の効果>

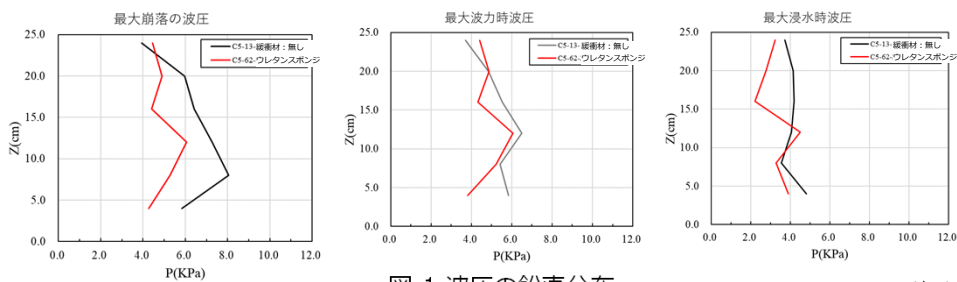


図-1 波圧の鉛直分布

図中の赤色実線は、EPDM素材の緩衝材よりも柔らかいウレタンスポンジの緩衝材を取り付けたケースの波圧分布である。緩衝材をの厚さは5.0cmあり、これを2枚重ねて設置した。固定方法は、EPDM緩衝材と同様に、津波作用前に転倒ないように保持する程度であり、津波作用時には脱落する。

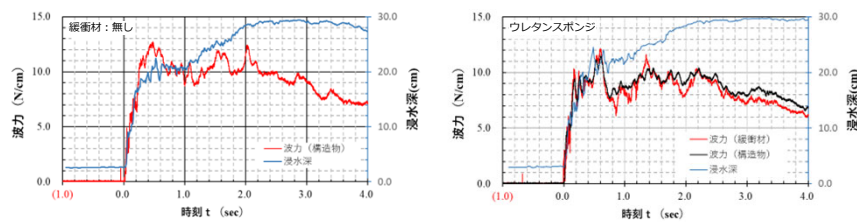


図-2 波力・浸水深の時系列

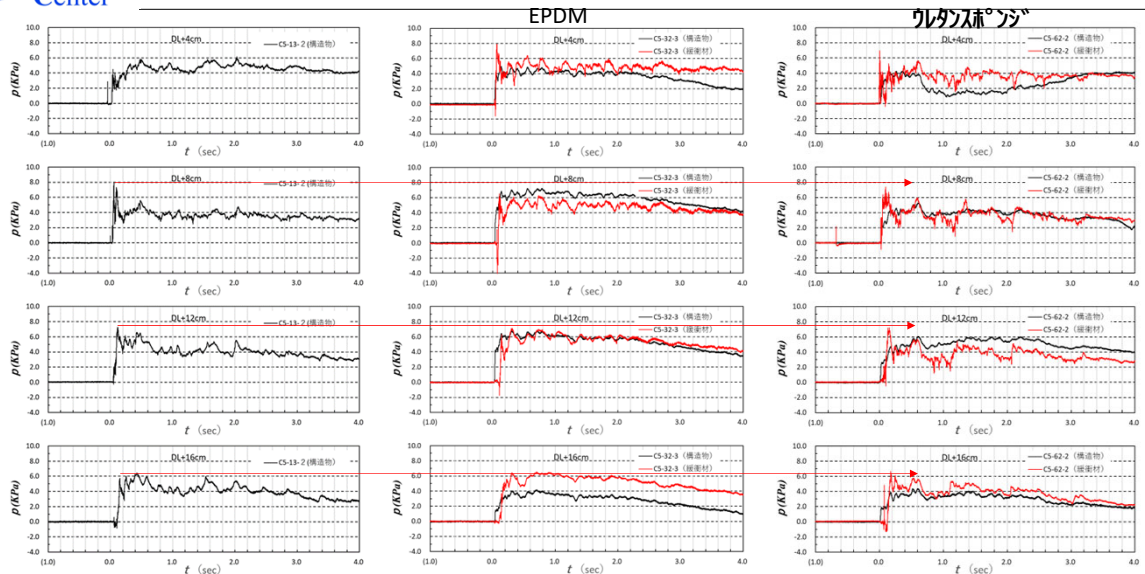
波圧の鉛直分布は、緩衝材の無い基本形に似ている。各計測点の最大値を連ねた図-1の「最大崩落の波圧」では緩衝材の波圧低減効果が認められる。

最大波力時の波圧は、バラツキはあるものの、鉛直方向に一樣な波圧分布と見ることが出来る。これは、緩衝材がEPDMよりも変形しやすいため、浸水の1/2以下で緩衝効果が効いたためと推察する。

また、計測点ごとの波圧時系列を見る津波作用時の衝撃圧の緩和が確認された。

Copyright © Pacific Consultants Co., LTD.

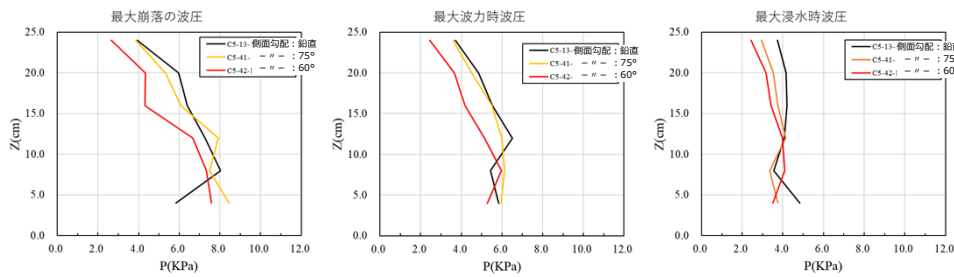
実験結果③-2 <ウレタン系緩衝材の効果>



Copyright © Pacific Consultants Co., LTD.

15

実験結果④ <構造物の側面勾配の効果の検討>



図中の黄色と赤色実線は、構造物模型の津波作用面の勾配を75度と60度としたケースの波圧分布である。  
 勾配60度において、最大波圧の低減効果が認められる。勾配75度ではバラツキはあるものの側面鉛直の基本ケースと変わらない波圧分である。

図-1 波圧の鉛直分布

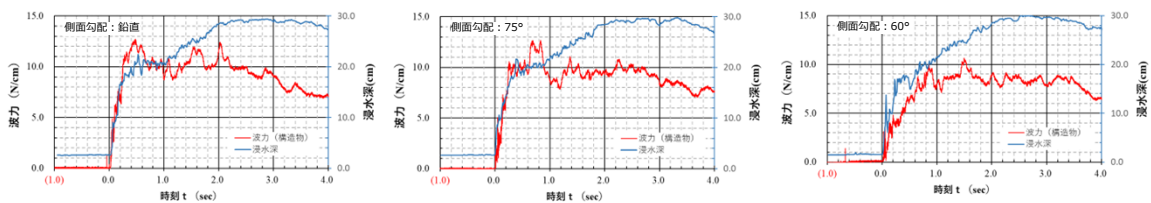


図-2 波力・浸水深の時系列

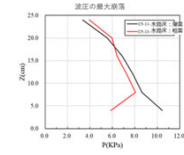
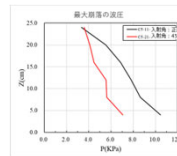
Copyright © Pacific Consultants Co., LTD.

13

16

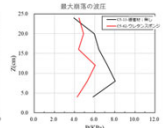
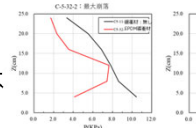
水理実験から得られた津波外力による鉛直波圧分布等について、免波材(緩衝材)の有無、免波構造(側面勾配)、及び津波入射角度の相異に対する相対比較を行った。

- ① 直方体の構造物模型に作用する鉛直波圧分布は、底面粗度により、底面から浸水深の3割程度の位置で最大波圧を示した。

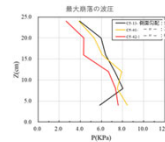


- ② 最大波圧の鉛直分布は、入射角が45度となることで正面からの作用に対して75%程度に減じた。

- ③ EPDM緩衝材によって、構造物面の波圧は緩衝材未装着から30%程度減じた。但し、浸水深の1/2付近の波圧は、ほぼ同じであった。  
ウレタンスポンジ緩衝材では、波圧の鉛直分布形は、緩衝材の無い基本形に似た形状となった。最大波圧は、緩衝材による低減効果が認められた。



- ④ 構造物模型の津波作用面に勾配持たせた実験では、勾配60度において、最大波圧の低減効果が認められた。



Thank you so much for allowing us to make a presentation.

# 地上構造物に津波が衝突した際の SPH法による解析的検討

2023年11月17日  
水循環施設の合理的な地震・津波対策検討小委員会 活動報告会

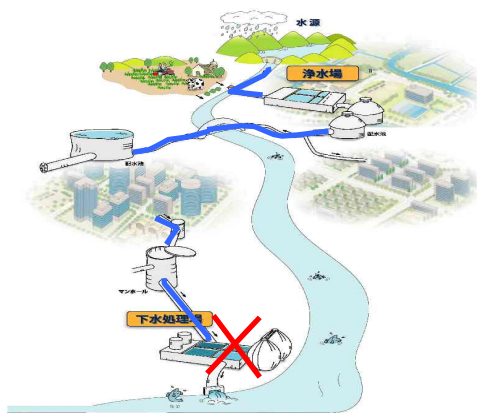
(株)構造計画研究所 渡辺 高志

1

1

## はじめに

浄化センターなど、**沿岸域・河川河口域に位置する施設**は、地震動による被害軽減だけでなく、津波に対する被害軽減策が重要。



衝撃的な波力(波圧)の低減に活路を見出す。

2011年の東北地方太平洋沖地震で発生した大津波は浄化センターに大きな被害を生じさせた。



ポンプ室外壁の損傷 (仙台市建設局)



曝気槽送風機室外壁の損傷 (仙台市建設局)

2

2

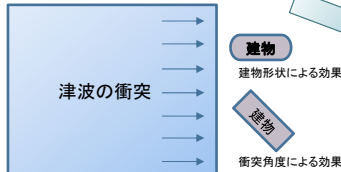
# 津波波圧の低減メカニズム

津波衝突作用の低減効果を考えると、

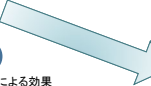
そもそも論

ダランベールの原理より

$$\int_{t=1,t2} F dt = m(v_1 - v_2)$$



右辺を小さくする



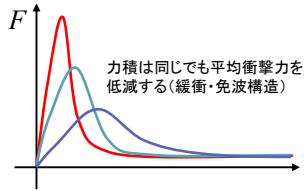
① 施設を沿岸域から遠ざける、被覆する、防護する等、直接の津波衝突を避けることが第1原則である。

② 面的な衝突を避けることで、流体の運動量変化を小さくする。  
⇒ 衝突角度による効果  
⇒ 建物形状による効果

③ エネルギー吸収効果を得る。  
⇒ 衝突面に**緩衝・吸収材を配置**  
⇒ 地形効果、濠、溝、表面粗度

④ 衝突作用の長周期化により平均衝撃力の低減を図る。  
⇒ 面的衝突回避からの副次効果  
⇒ 緩衝材・緩衝機構による効果

**免震・免波構造**



力積時刻歴を考慮

①～④の効果を包括して「免波」による効果が得られる。  
②および、③と④の効果について解析的検討例を紹介。

3

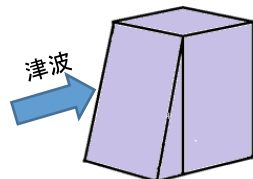
3

# 検討内容について

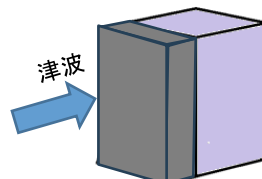
陸上構造物に遡上津波が直接衝突する際の波圧や波力を把握する上で数値解析は有用であり、実験の実施や計測が困難な内容の検討が可能となる。本報告では津波衝突時の緩衝効果を検討した解析実施例を2つ紹介する。

1. 面的な衝突を避けることで得られる緩衝効果について
  - ・2次元水路による津波模型実験を対象とした数値解析を実施。
  - ・構造物前面に持たせる傾斜の有無を比較し緩衝効果を確認。
2. 構造物前面に緩衝材を設けることで得られる緩衝効果について
  - ・実規模構造物に津波が衝突する際の緩衝効果について解析を実施。
  - ・構造物前面に設ける緩衝材の有無を比較し波圧と波力の低減効果を確認。

それぞれ、津波は水柱崩壊で発生させており、また、3次元解析を実施した。



建物形状(鉛直断面)の影響



構造物前面の緩衝材の影響

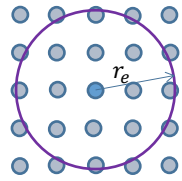
4

4

# 適用する解析手法について

津波液面の**大変形を考慮**するために、粒子法の一つであるSPH法を採用した。  
また、流体解析手法として移流現象、界面捕捉の計算精度の観点から有利である。

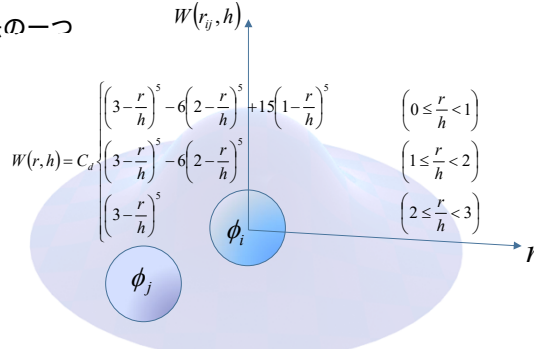
SPH法とは：代表的な粒子法の一つ



近傍の粒子点値から着目位置の物理量を計算する

$$\phi(\mathbf{x}) \approx \langle \phi_i \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \phi_j W(r_{ij}, h)$$

カーネル関数による近似計算を行う



カーネル関数の例 (Quintic B-spline)

空間勾配をカーネル関数の微分で表現し、支配方程式を離散化する。  
非圧縮性の粘性流体のNavier-Stokes方程式を離散化して計算※1を行う。  
なお、圧力の計算にはポアソン方程式の求解を行うISPH法※2を採用した。

※1 構造計画研究所で開発している解析コード「DYBECS」を使用。

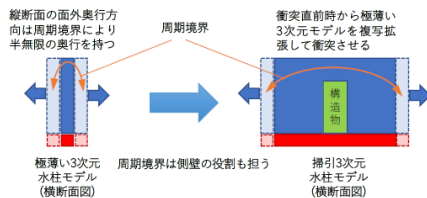
※2 Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics法：時間方向に半陰的な射影法。

5

5

# 解析の省力化の工夫

対象構造物の幅は大きくないため、津波衝突現象には3次元性があり、3次元解析の計算負荷は非常に大きなものとなる。なお、衝突する直前までの現象は2次元元的であることに着目すると、衝突前の遡上過程計算を省力化可能である。  
紹介する2つの解析事例では、**周期境界を用いた2次元の体系(解析次元は3次元)の水柱崩壊解析を行い、構造物衝突直前でリスタートする工夫を行った。**



なお、衝突解析における側壁の境界条件は引き続き周期境界が担う(対称な現象の場合)。  
⇒この場合、滑り壁条件となる。  
⇒非対称の場合、側壁が必要。

紹介する解析事例では水柱崩壊による津波遡上過程より、衝突後の流況解析に設定する計算時間の方が長いあまり効果的ではないが、地形影響等を考慮した遡上解析を行う上では省力化手法が有効である。

6

6



# 津波模型実験の解析について

転倒堰による水柱崩壊を使用した津波模型実験の再現解析を行った。  
 真水の条件を想定し、粒子間隔1cmの解析モデルを用いて計算した。  
 最初に水柱崩壊計算を行い、衝突直前から3次元体系のリスタート計算を実施。

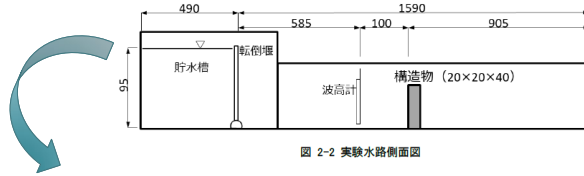


図 2-2 実験水路側面図

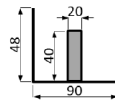
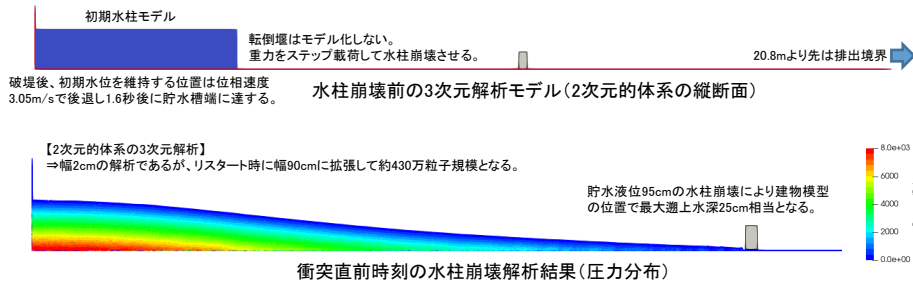


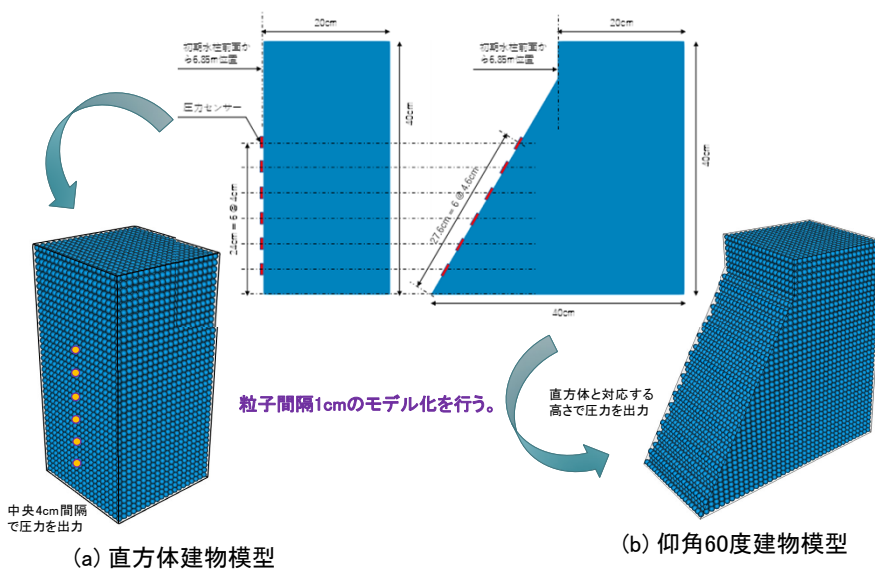
図 2-3 実験水路横断面図



7

7

# 構造物モデルの詳細



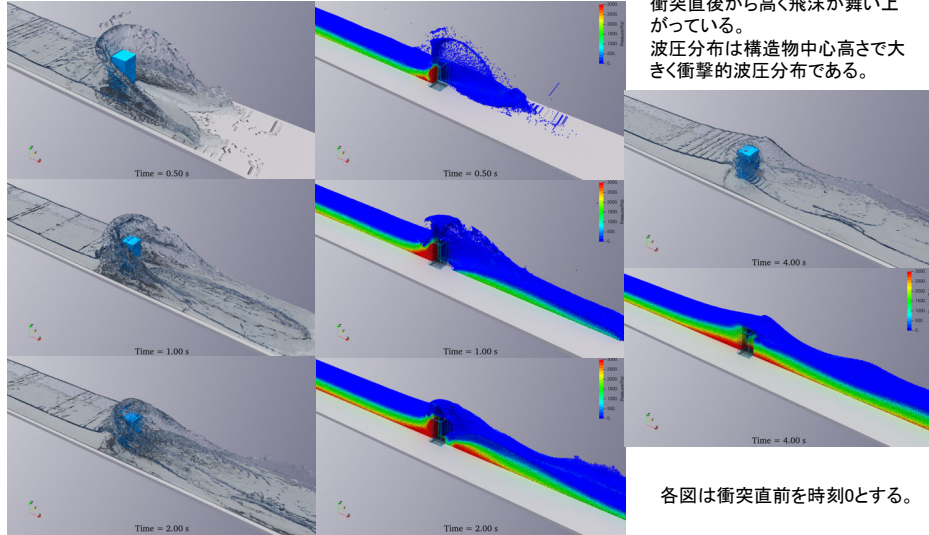
津波模型実験解析の構造物の粒子法解析モデル

8

8

# 直方体建物ケースの解析結果

解析結果より流況と中心断面の圧力分布を下图に示す。



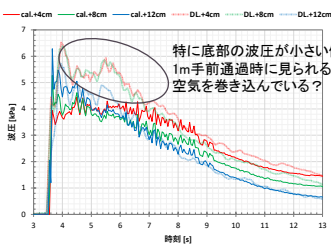
衝突直後から高く飛沫が舞い上がっている。  
波圧分布は構造物中心高さで大きく衝撃的波圧分布である。

各図は衝突直前を時刻0とする。

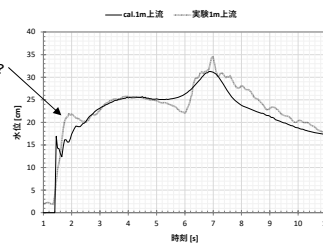
9

9

# 直方体建物ケースの解析結果

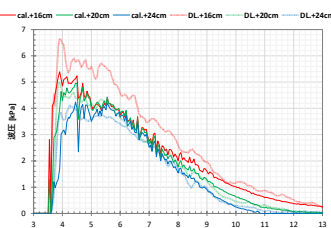


下部3点の波圧履歴の比較 (薄太線が実験)



1m上流地点の水位履歴の比較 (薄太線が実験)

特に底部の波圧が小さい傾向にある。  
1m手前通過時に見られる立ち上がりの影響？  
空気を巻き込んでいる？



上部3点の波圧履歴の比較 (薄太線が実験)

- 下部では圧力の大小関係が逆転が見られる。
- 圧力は下部が小さく、上部が大きくなっている。
- 上部の圧力は実験結果と整合的である。
- 細かい液面変動は捉えられていないが、1m上流の水位は比較的整合的である。
- 衝突流体の速度は、下部ほど小さく、上部ほど大きくなっていると考えられる。

流速分布の把握と再現が課題事項であると考えられる。  
また、空気を巻き込んでいる可能性もある。

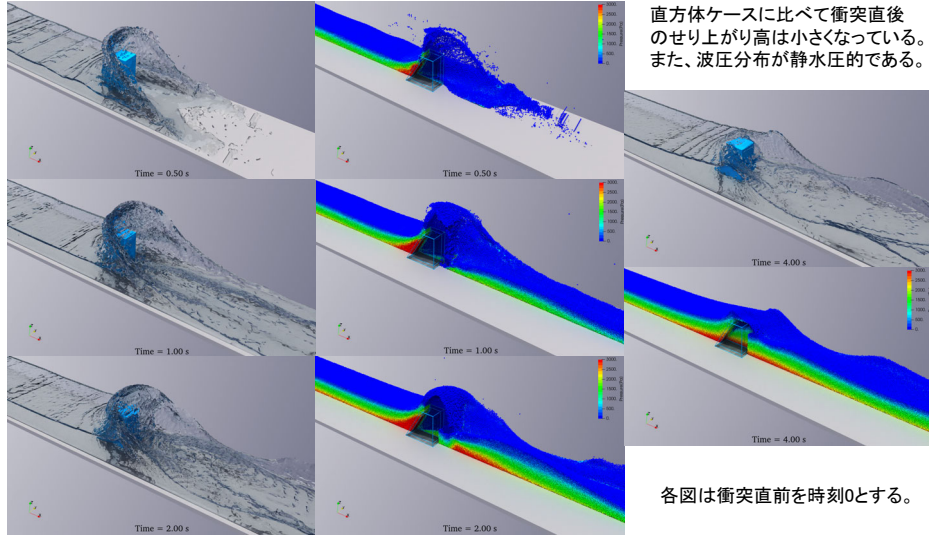
10

10



# 仰角60度建物ケースの解析結果

解析結果より流況と中心断面の圧力分布を下图に示す。



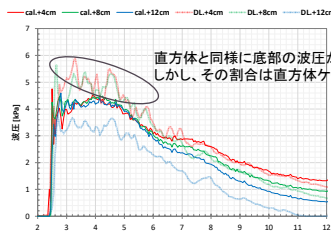
直方体ケースに比べて衝突直後のせり上がり高は小さくなっている。また、波圧分布が静水圧的である。

各図は衝突直前を時刻0とする。

11

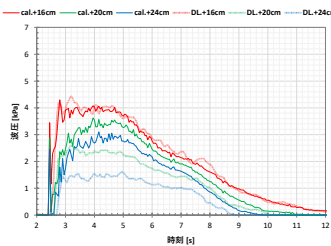
11

# 仰角60度建物ケースの解析結果

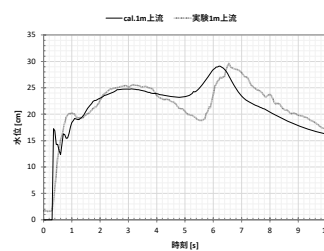


直方体と同様に底部の波圧が小さい傾向にある。しかし、その割合は直方体ケースほどではない。

下部3点の波圧履歴の比較 (薄太線が実験)



上部3点の波圧履歴の比較 (薄太線が実験)



1m上流地点の水位履歴の比較 (薄太線が実験)

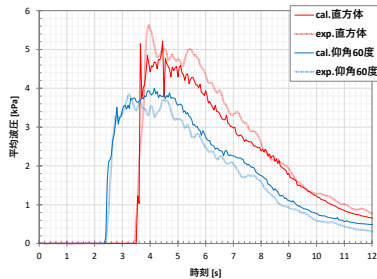
- 実験との比較では直方体ケースと同様の傾向。
- 圧力比較は下部が小さく、上部が大きくなっている。
- 1m上流の水位は細かい変化が捉えられていないが比較的整合的である。
- 直方体ケースに比べて波圧が小さくなる傾向は解析結果からも確認できる。

流速分布の把握と再現が課題事項であると考えられる。また、巻き込まれた空気の影響があると考えられる。ただし、直方体建物ケースに比べると影響は小さい。

12

12

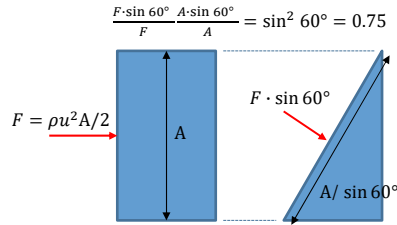
# 建物形状の影響について



解析と実験結果の平均波圧の比較

平均圧力波形のピークの比較では、

- 解析結果: 75%
  - 実験結果: 67%
- と形状による低減効果に違いが見られた。
- 幾何的な条件を考慮すると75%程度に低減するものと考えられる。



(a) 直方体ケース (b) 仰角60度ケース

仰角60度条件では同じ外力条件の場合、壁面に作用する圧力は75%となる。  
⇒sin<sup>2</sup>60°

解析結果と実験結果は水位の履歴や平均圧力波形などは概ね整合的であるが、圧力分布に違いが生じている。

- ⇒流速の高さ方向分布に違いがある。
- ⇒床面の見直しや乱流等の影響。
- ⇒巻き込まれた気体の影響等がある。

13

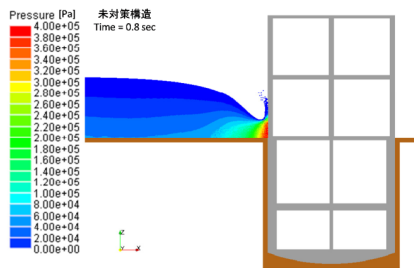
13

# 緩衝材の効果の検討について

緩衝メカニズムを再現して構造検討を行う上で模型実験が有力であるが、相似則を満たす実験条件の設定が難しい。そこで、実規模構造を想定した数値解析を行い、津波衝突に対する緩衝効果の確認を行った。

過去に実規模の下水浄化センターのポンプ場を対象とした2次元鉛直断面の津波衝突解析を実施しており、その際は地下構造部にアスファルト系免震材を充填した免波構造の緩衝効果を検討している。

この紹介事例は、同じ構造物を対象として、**建物前面に柔なゴムによる緩衝材を配置した際の緩衝効果を検討した。**



2次元鉛直断面の津波衝突解析: 竹内ほか(2015)

## 【建物規模】

幅 26.4m  
高さ 13.0m (地上部分)  
奥行 13.5m

## 【想定津波】

波高 6.5m (遡上水深)  
位相速度を初速度として設定した水柱を建物手前10mで崩壊させる。

14

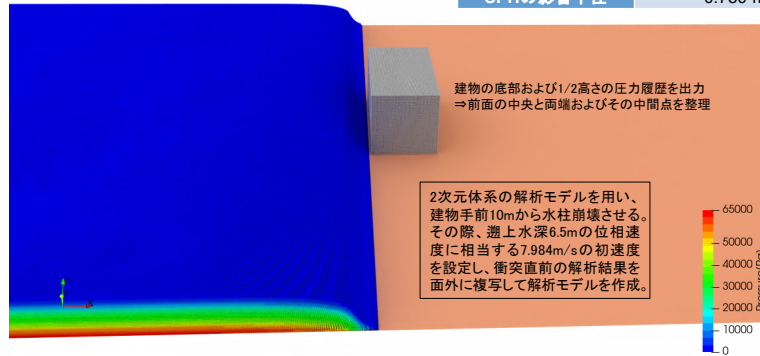
14

# 実規模構造津波衝突解析モデル

津波モデルは構造物の寸法の定数倍とし、進行方向に対する奥行きは10倍、直交する幅は5倍として設定してその両端を周期境界とした。

構造物幅: 26.4m ⇒ 津波の幅: 132m  
 建物奥行き: 13.5m ⇒ 水柱奥行き: 135m  
 750万粒子規模の解析モデルとなる。

設定項目	設定内容
水の密度	1000 kg/m <sup>3</sup>
水の粘度	0.001 Pa·s
重力加速度	9.807 m/s <sup>2</sup>
初期粒子間距離	0.250 m
SPHの影響半径	0.750 m



津波衝突解析の粒子法解析モデル

15

15

# 構造物/緩衝材のモデル化方法

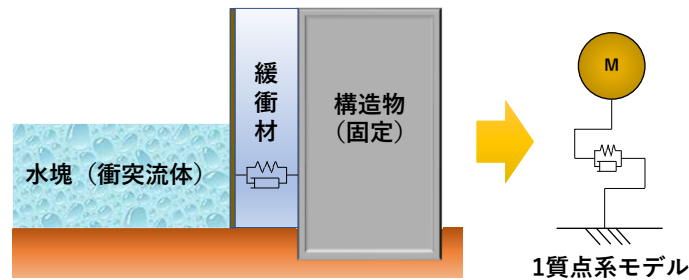
粒子法解析では構造物も粒子集合としてモデル化し緩衝材は以下のように考慮した。

## 【緩衝材を設置しない場合】

実験では剛な構造物を床面に固定しているため、緩衝材を設定しない場合は同様に粒子集合を座標固定しておけば良い。

## 【緩衝材を設置する場合】

緩衝材をばね-ダッシュポット要素から成る質点系としてモデル化する。剛な構造物は床面に固定されており、緩衝材の前面には剛版を貼り付ける想定であるため、構造物は下図のような置き換えが可能である。



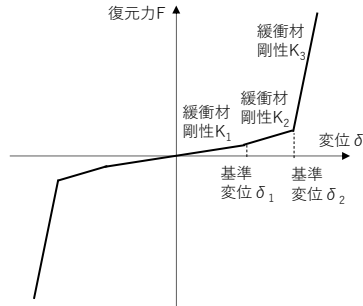
緩衝材を設置した構造物モデルのイメージ図

16

16

# 緩衝材の変形特性のモデル化

緩衝材の特性はトリリニア型の非線形弾性ばねとダッシュポットでモデル化する。



緩衝材復元力特性のイメージ図（トリリニア）

重錘落下試験を参考にして緩衝材モデルの条件を設定した。ここでは、トリリニア型の非線形弾性ばねとダンパーを並列配置するフオークトモデルとした。

緩衝材の剛性や質量は建物に比べて非常に小さいため、1質点系モデルとしては緩衝材物性のみからこれを設定した。

EPDMゴムスポンジの比重は0.2。緩衝材厚さは2.0mとする想定。剛性は面積に比例し、厚さに反比例することから下表の設定値を採用した。

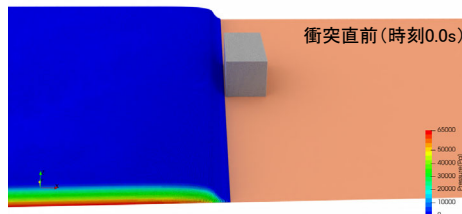
項目	設定内容
緩衝機構の総質量	137.28 Mg/m <sup>3</sup>
緩衝材剛性K <sub>1</sub>	17.16 MN/m
緩衝材剛性K <sub>2</sub>	34.32 MN/m
緩衝材剛性K <sub>3</sub>	343.20 MN/m
基準変位δ <sub>1</sub>	1.00 m
基準変位δ <sub>2</sub>	1.60 m
減衰比	0.15

17

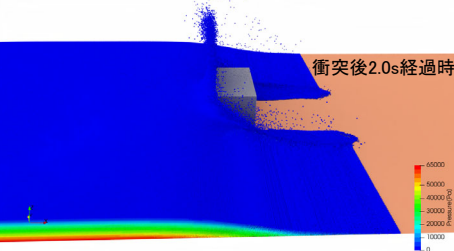
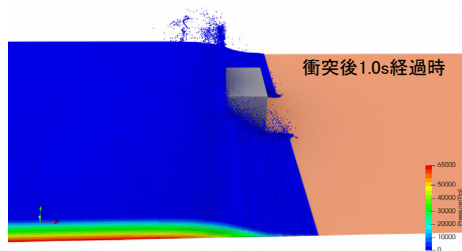
17

# 解析結果より津波衝突の様子

解析では津波衝突から2.0s経過時までの現象を対象として取り扱った。



衝突後局所的な堰上げが生じて飛沫が舞い上がっている。対象としている衝突後2.0s経過時までにおいて境界の影響は見られない。



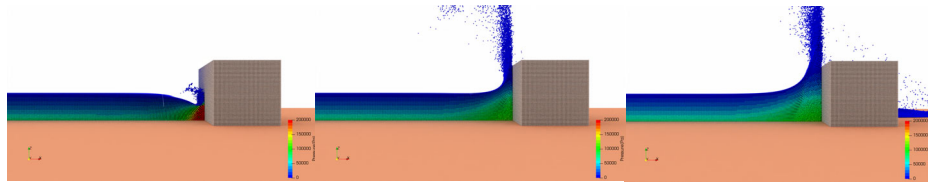
緩衝材を設置していないケースの衝突後の流況

18

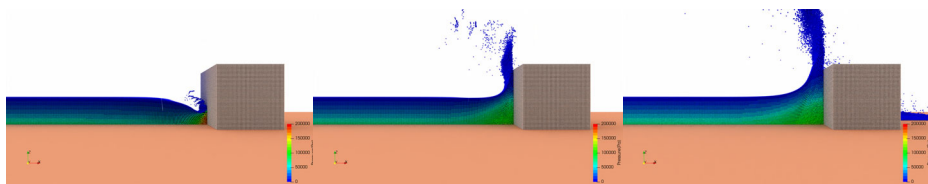
18

# 解析結果より津波衝突の様子

緩衝材の有無による水圧分布と流況の違いを津波中央縦断面図で比較した。  
緩衝材を設置しているケースでは波圧が低下し、堰上げ高さが小さくなっている。



緩衝材を設置していないケースの津波中央縦断面の水圧分布と流況



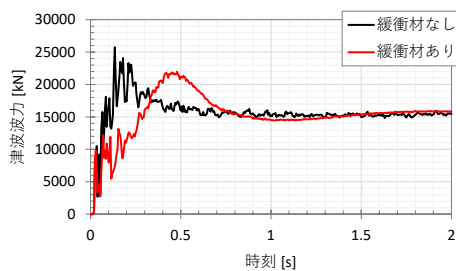
緩衝材を設置しているケースの津波中央縦断面の水圧分布と流況

19

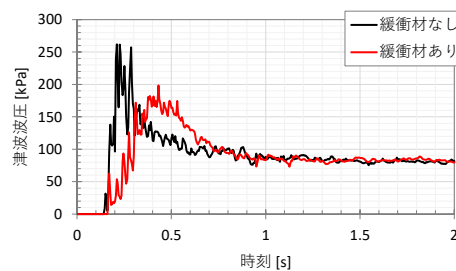
19

# 津波波力と波圧履歴の比較

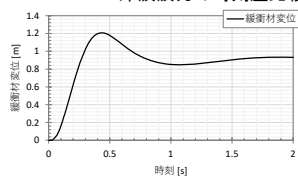
解析結果より、圧力勾配項を集計して津波波力の時刻歴を出力し、これを比較した。  
また、波圧低減効果は上部ほど顕著であり、中央部1/2高さの圧力履歴を比較した。  
(底部の最大波圧は緩衝材変形が生じる前に発生するため解析上の寄与は小さい)



津波波力の時刻歴比較

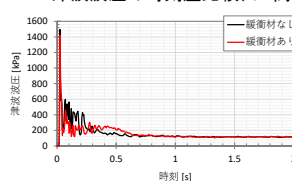


津波波圧の時刻歴比較(1/2高さ)



緩衝材の変位時刻歴

厚さ2.0mの条件では  
余裕がある。  
剛性が2倍となる変形  
領域に収まっている。

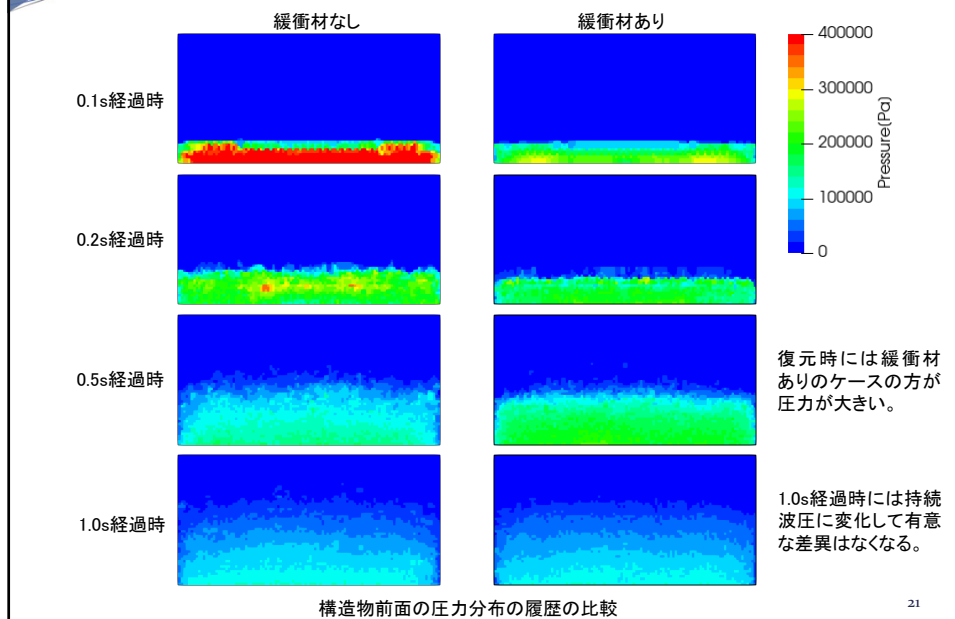


津波波圧の時刻歴比較(底部)

20

20

## 構造物前面の圧力分布



21

## まとめ

- 陸上構造物に津波が衝突した際の壁面作用波圧や構造物に作用する波力の評価を行う上では、移流計算や界面捕捉精度に優れた粒子法解析が有効であり、SPH法による解析事例を示した。
- 津波衝突直前までを2次元体系で取り扱う省力化方法を用いて3次元津波衝突解析を行い、建物形状効果に着目した実験の再現解析や、実規模構造を対象に建物前面に緩衝材を配置する場合と未対策の場合の比較を行った。
- 津波模型実験の再現解析では、直方体と仰角60度の建物形状の違いによる効果を確認し、実験と解析である程度整合的な結果が得られている。波圧や波力を低減する上で建物形状や津波到来方向の影響は重要である。
- 実規模構造への津波衝突解析では、前面に配置する緩衝材の有無による影響を確認した。建物底部に働く衝撃波圧の対策には課題があるが、緩衝材を介して波圧と波力が低減することを確認した。流体-構造間の相互作用を考慮した外力が得られることで、より詳細な構造検討を実施することが可能となる。

22

22





シバタ工業株式会社  
SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD.

水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会・活動報告会

## — 免波構造に適した緩衝材 の簡易評価法の検討 —

構造物に作用する津波波圧の低減効果を  
期待した緩衝材の特性評価に関する一考察

2023年11月17日

シバタ工業(株) 西本 安志

1



### 1.研究の背景(1)

2011年の東日本大震災では、津波と強震動によって沿岸域に位置する構造物に甚大な被害が発生した。今後も、東海、東南海地震の発生が懸念される。



仙台市南蒲生浄化センターのポンプ室、ならびに曝気槽送風機室の津波損傷の事例  
(仙台市建設局)

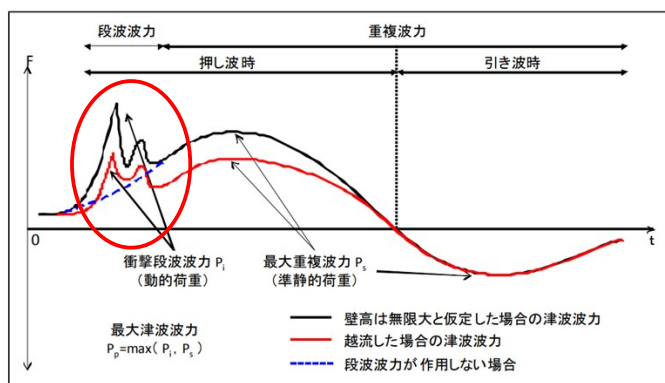


このような状況から、沿岸域の構造物については、「**強震動と津波の双方**  
**に対して有効な対策**」の実現が求められている。(免震・免波構造に着目  
した研究)

Copyright(C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD. AllRights Reserved.

2

## 2.研究の背景(2)



参考図-2 段波波力と重複波力の区分イメージ

「国土交通省港湾局:防波堤の耐津波設計ガイドライン, p21, 平成25年9月」より

津波波圧を低減させるための緩衝材の役割については、**構造物に作用する衝撃段波波力(動的荷重)の低減を期待した**ものであり、如何に段波波圧が作用しない状態に近づけることができるかが重要である。

## 3.研究の目的

衝撃段波波力圧の低減効果を期待するには、「構造物自体の形状を工夫すること」や「**構造物前面に緩衝材設置すること**」が考えられる。



**構造物前面に設置される緩衝材に着目**

- ・どのような特性を有する緩衝材が適しているか
- ・その特性の簡易な評価法について検討すること

を目的とした。

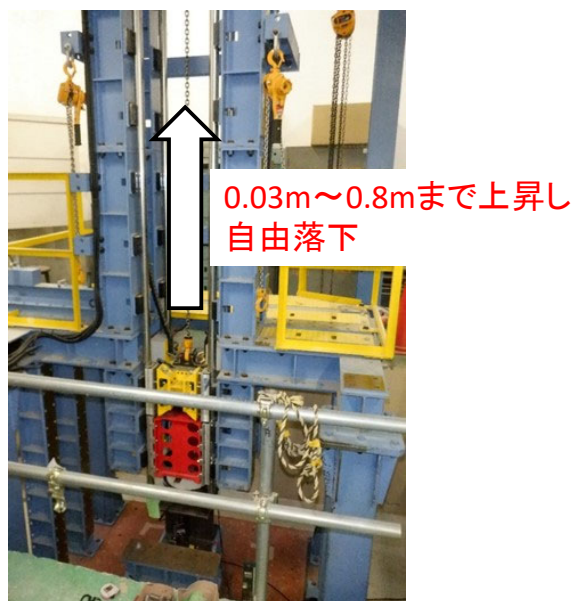
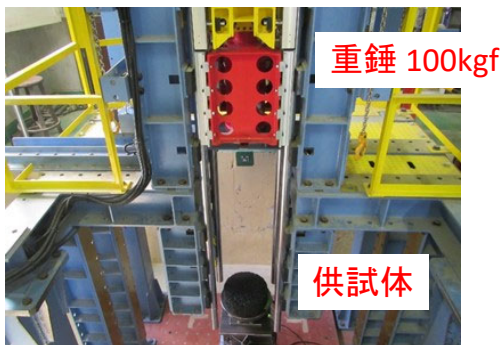


その第一段階として、剛性の異なる弾性材料について、厚さや断面構造を変化させ、それらをパラメータとした落錘式衝撃実験を行い、背面に伝達される荷重や応力を計測した上で、緩衝材に求められる特性や断面構造について考察を行った。



#### 4. 落錘式衝撃実験の概要

- ・実験場所: 防衛大学校 建設環境工学科
- ・実験装置: 落錘式衝撃試験機

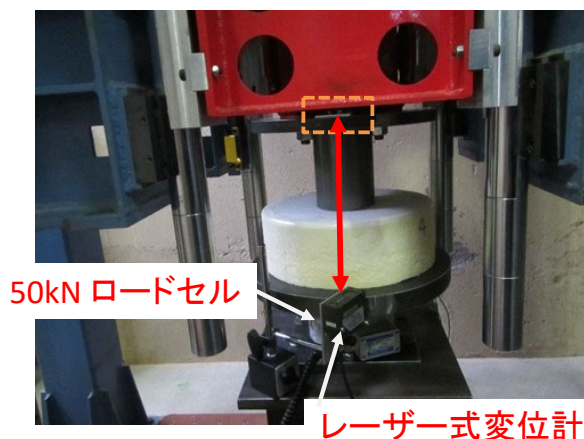


5

#### 5. 落錘式衝撃実験の計測項目

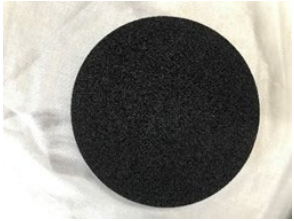





- ・背面伝達荷重 (50kN ロードセル)
- ・緩衝材の変形状況 (レーザー式変位計)
- ・背面伝達応力 (圧力センサー)

サンプリング: 10kHz

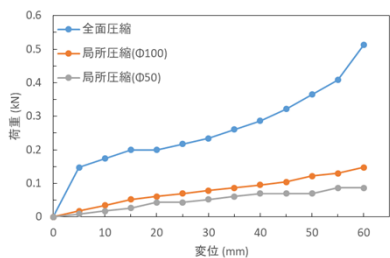


6

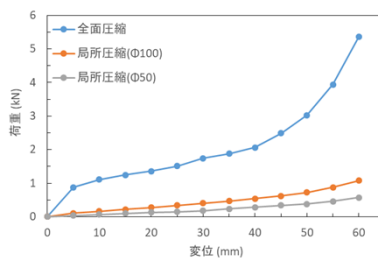
## 6. 実験に用いた供試体

EPDMゴムスポンジ (φ300×50、100)	ウレタンゴムスポンジ (φ300×100)	ゴムチップ (φ300×100)
		
		

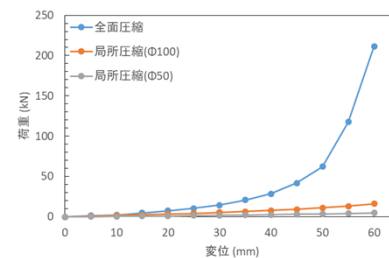
## 7. 供試体の静的圧縮試験結果



EPDMゴムスポンジ  
100mmt



ウレタンゴムスポンジ  
100mmt

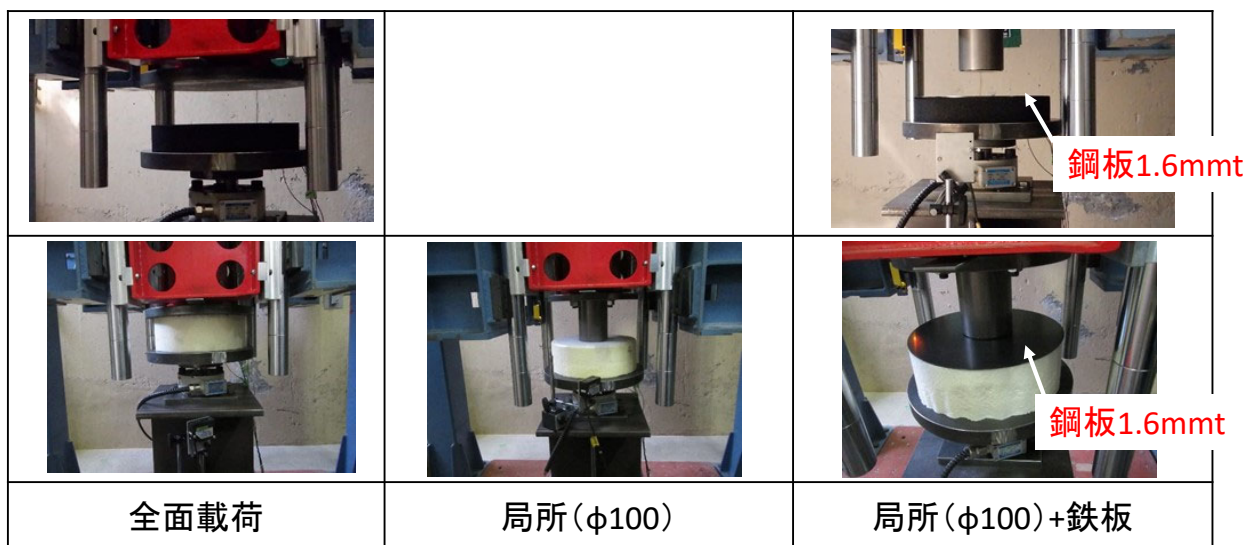


ゴムチップ  
100mmt

## 8. 落錘式衝撃実験の载荷条件

供試体の種類	試験体厚み	载荷条件	落下高さ m	
EPDM ゴムスポンジ	50mm	全面载荷 局所载荷 局所载荷+鉄板1.6mmt	0.03, 0.03 0.03,	0.05, 0.10 0.05, 0.10
	100mm	全面载荷 局所载荷 局所载荷+鉄板1.6mmt	0.03, 0.03, 0.04 0.03, 0.04,	0.05, 0.10, 0.15, 0.20 0.10
ウレタンゴム スポンジ	100mm	全面载荷 局所载荷 局所载荷+鉄板1.6mmt	0.05, 0.10, 0.15, 0.05, 0.10, 0.15,	0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80 0.30 0.30
ゴムチップ ブロック	100mm	全面载荷 局所载荷 局所载荷+鉄板1.6mmt	0.05, 0.10, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20	0.25, 0.30, 0.50, 0.60, 0.70 0.50, 0.60, 0.70

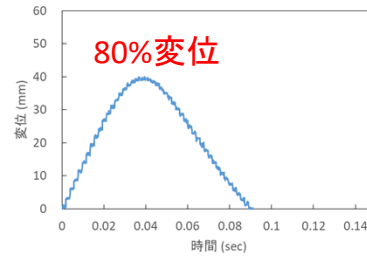
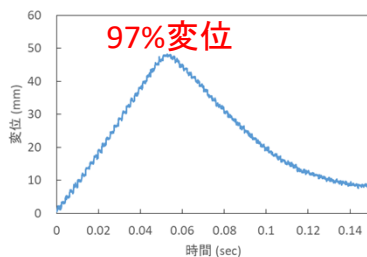
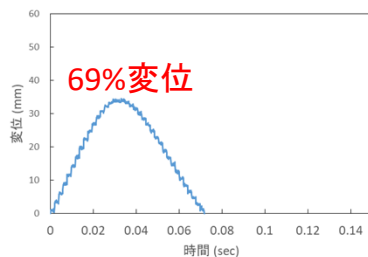
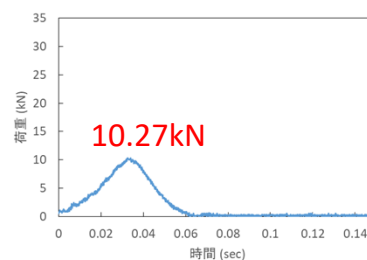
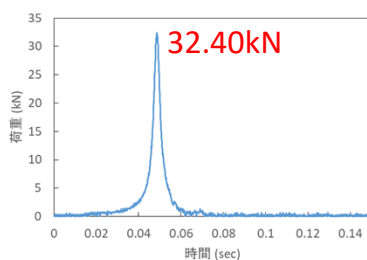
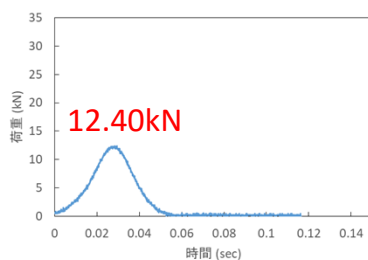
## 9. 落錘式衝撃実験の状況



## 10. 運動量保存則成立の確認

試験体の種類	载荷条件	落下高さ	重錘速度の変化から見た運動量の変化(N・sec)	得られた背面伝達荷重～時間関係から見た力積(N・sec)
EPDM ゴムスポンジ50mmt	全面	0.10m	225.9	295.2
EPDM ゴムスポンジ100mmt	全面	0.20m	386.5	426.6
ウレタンゴム スポンジ	全面	0.30m	474.0	507.1
		0.70m	590.7	703.2
	局所	0.05m	151.3	303.7
		0.30m	427.3	471.4
ゴムチップ ブロック	全面	0.25m	359.5	366.5
		0.70m	601.9	642.4
	局所	0.10m	225.9	275.9
		0.70m	687.7	621.7

## 11. EPDMゴムスポンジ 50mmt の測定結果



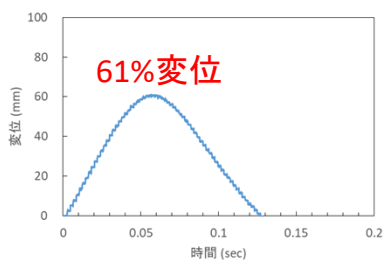
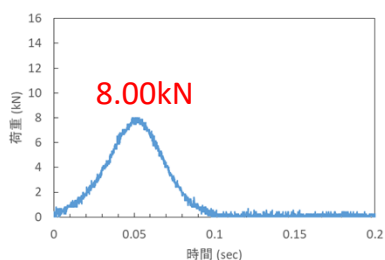
全面载荷  
落下高さ0.10m

局所载荷(φ100mm)  
落下高さ0.03m

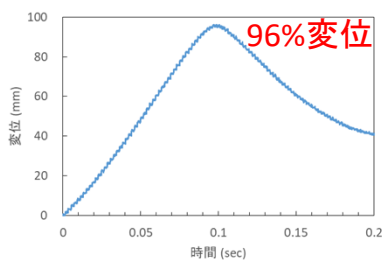
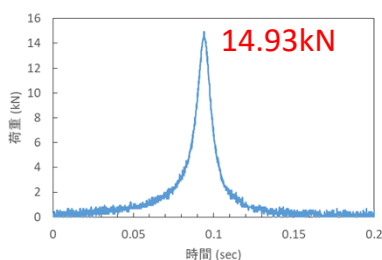
局所载荷+鉄板1.6mmt  
落下高さ0.10m



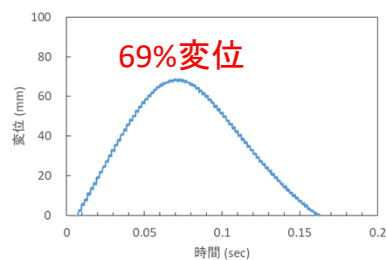
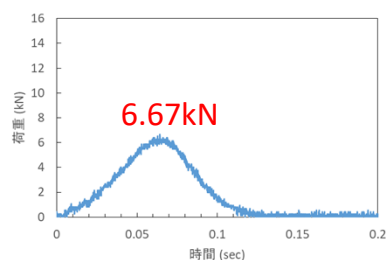
## 12. EPDMゴムスポンジ 100mmt の測定結果



全面載荷  
落下高さ 0.10m



局所載荷 (φ100mm)  
落下高さ 0.03m



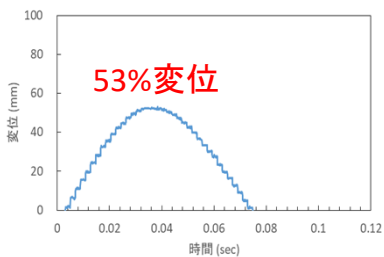
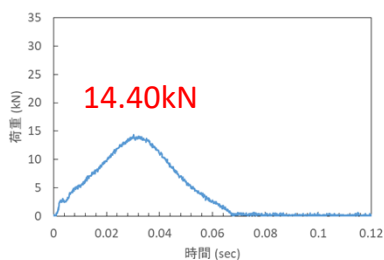
局所載荷+鉄板1.6mmt  
落下高さ 0.10m

Copyright (C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO., LTD. All Rights Reserved.

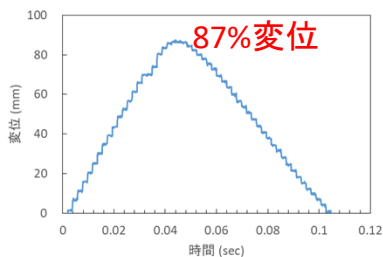
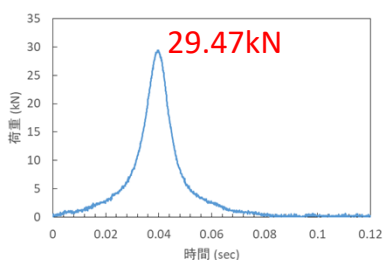
13



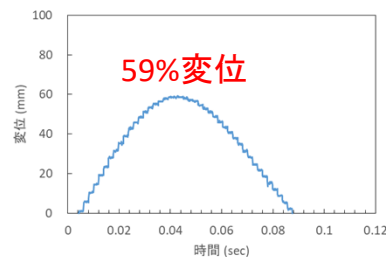
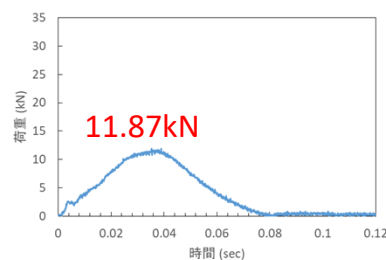
## 13. ウレタンゴムスポンジ 100mmt の測定結果



全面載荷  
落下高さ 0.30m



局所載荷 (φ100mm)  
落下高さ 0.30m



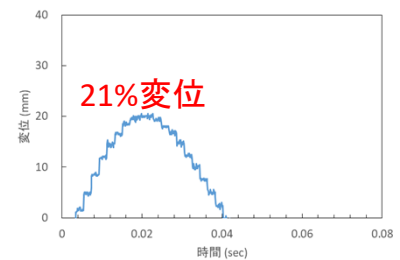
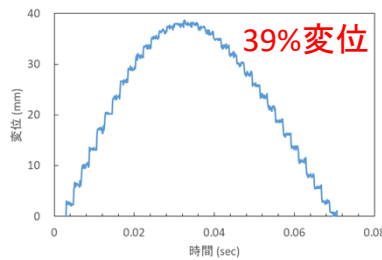
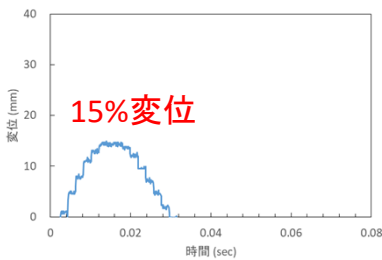
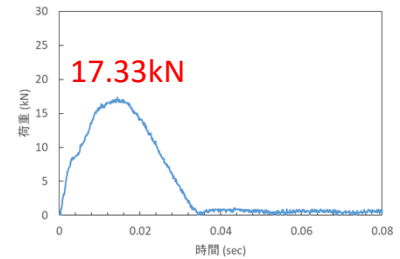
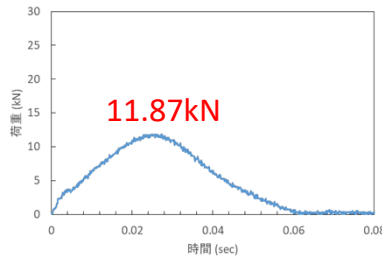
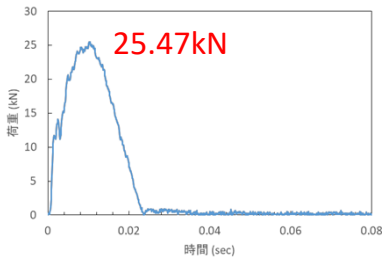
局所載荷+鉄板1.6mmt  
落下高さ 0.30m

Copyright (C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO., LTD. All Rights Reserved.

14



### 14. ゴムチップ100mmt の測定結果



全面載荷  
落下高さ0.25m

局所載荷(φ100mm)  
落下高さ0.20m

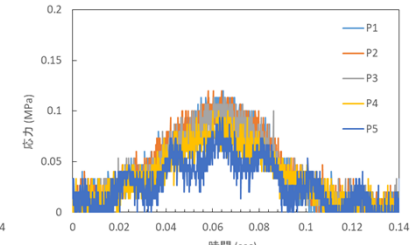
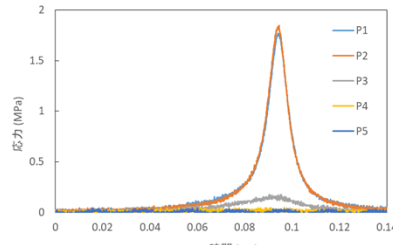
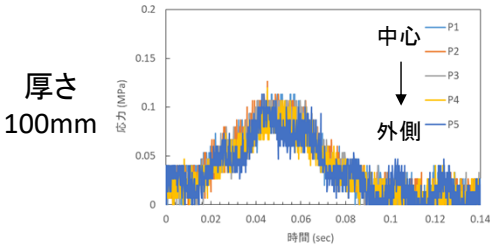
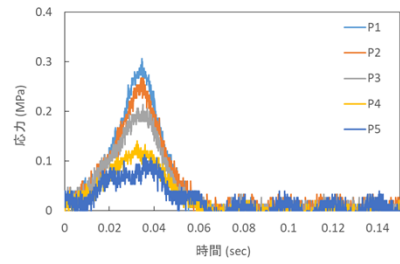
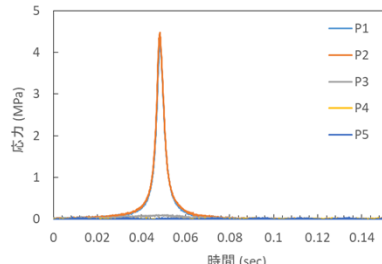
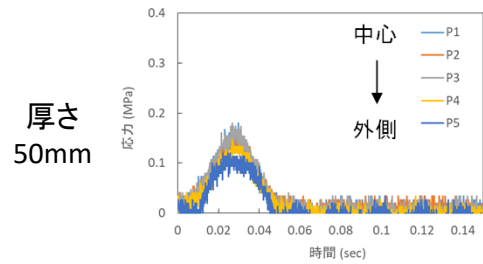
局所載荷+鉄板1.6mmt  
落下高さ0.20m

Copyright(C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD. AllRights Reserved.

15



### 15. EPDMゴムスポンジの測定結果(応力~時間関係)



全面載荷  
落下高さ0.10m

局所載荷(φ100mm)  
落下高さ0.03m

局所載荷+鉄板1.6mmt  
落下高さ0.10m

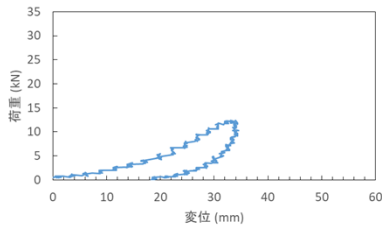
Copyright(C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD. AllRights Reserved.

16

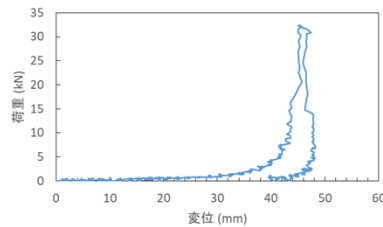




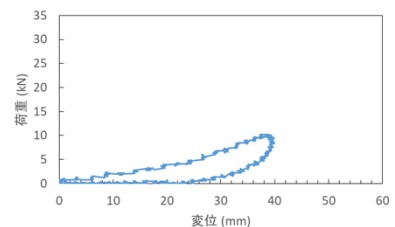
## 16. EPDMゴムスポンジ 50mmt の測定結果(荷重—変位 関係)



全面载荷  
落下高さ 0.10m



局所载荷(φ100mm)  
落下高さ 0.03m



局所载荷+鉄板1.6mmt  
落下高さ 0.10m

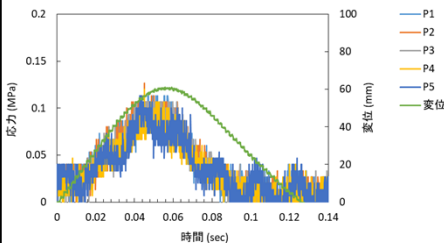
※緩衝材として、**極度なハードニングに入るまでが「緩衝効果を発揮できる適用可能領域」と考える。**

Copyright(C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD. AllRights Reserved.

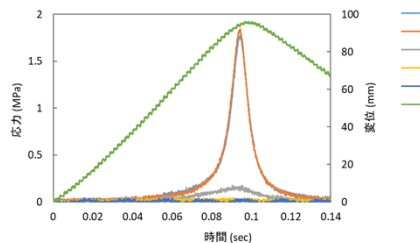
17



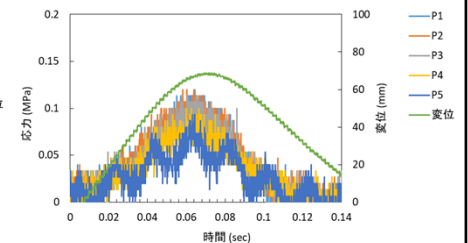
## 17. 荷重分散効果から見た緩衝材の断面構造(EPDMゴムスポンジ 100mmt)



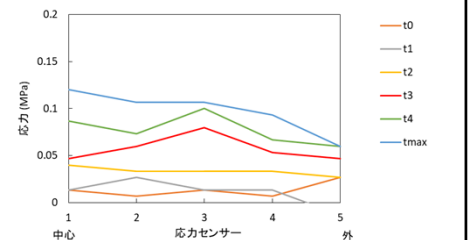
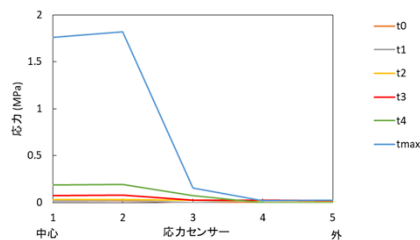
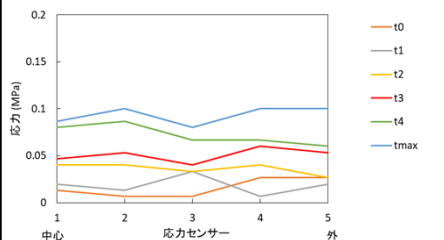
全面载荷  
落下高さ 0.10m



局所载荷(φ100mm)  
落下高さ 0.03m



局所载荷+鉄板1.6mmt  
落下高さ 0.10m



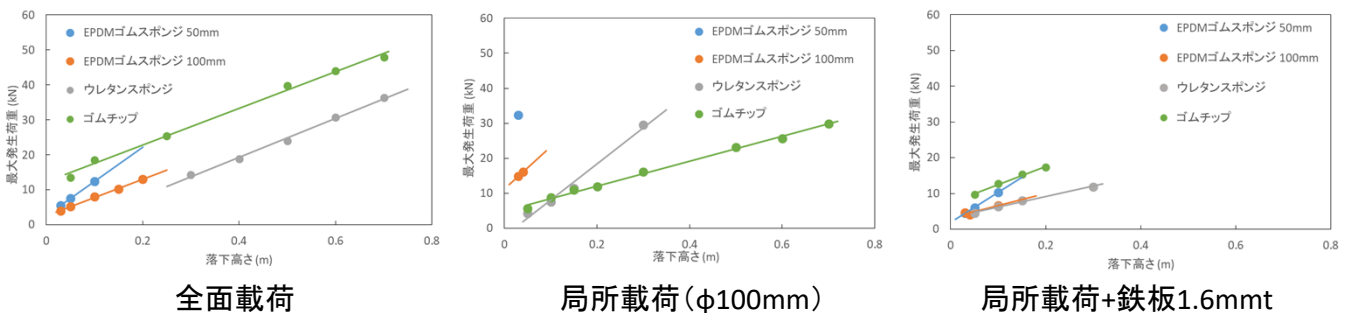
Copyright(C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD. AllRights Reserved.

18

## 18. 津波荷重を低減させる緩衝材に関する提案(1)

■緩衝材の断面構造は、**衝突面に剛性板を設けること**が望ましい。

■最大背面伝達荷重と重錘の落下高さの関係を見ると、それぞれの**緩衝材の剛性**に応じて、**緩衝材として機能できる適用範囲が存在する**。



## 19. 津波荷重を低減させる緩衝材に関する提案(2)

■最大背面伝達荷重と重錘の落下高さの関係を見ると、それぞれの**緩衝材の剛性**に応じて、**緩衝材として機能できる適用範囲が存在する**。

➡背面伝達荷重～時間関係から求まる力積に着目すると、同じ外力であれば、作用時間が長くなるような緩衝材が望ましく、**適度な剛性と厚さを有することや弾塑性的な挙動を示すこと**が望ましい。

➡津波波力は、どのくらいの物体(質量)がどのくらいの速度で衝突するかが換算できると、「簡易な衝撃実験」での実験的評価が可能となる。そうならば、静的な荷重～変位関係で評価できる可能性もある。





## 20. まとめ

- 1) 本実験で得られた背面伝達荷重～時間関係および重錘の時刻歴位置から求めた緩衝材の変形量～時間関係より、供試体に直接的に作用させる局所載荷では極端に最大伝達荷重が大きくなる傾向を示したが、局所載荷でも衝突面に剛性板を設置した場合には、背面伝達荷重および緩衝材の変形挙動が全面載荷に近づく傾向を示した。
- 2) この傾向は圧力センサーにて得られた背面伝達応力～時間関係においても同様の傾向を示した。
- 3) 以上のことから、緩衝材の断面構造としては、衝突面に剛性板を設けることが望ましいと言える。
- 4) 緩衝材にはその剛性によって、効果を発揮できる適用範囲が存在することを確認した。
- 5) 津波の衝撃段波波圧の低減効果を期待する緩衝材の断面構造や背面伝達荷重～時間関係から求まる力積に着目した考察を行った。

→ 今後の課題としては、実構造物に適用される緩衝材について、**構造物に作用する衝撃段波波圧(動的荷重)の低減を実現するための評価手法や設計手法**について検討する必要があるとともに、**波圧だけでなく漂流物の衝突をも考慮した検討**が必要であると考えます。

Copyright(C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD. AllRights Reserved.

21



Copyright(C) 2017 SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD. AllRights Reserved.

22

# 三次元FEM解析による構造物の 津波安全性評価に関する検討

大成建設 坂下 克之

1

## はじめに



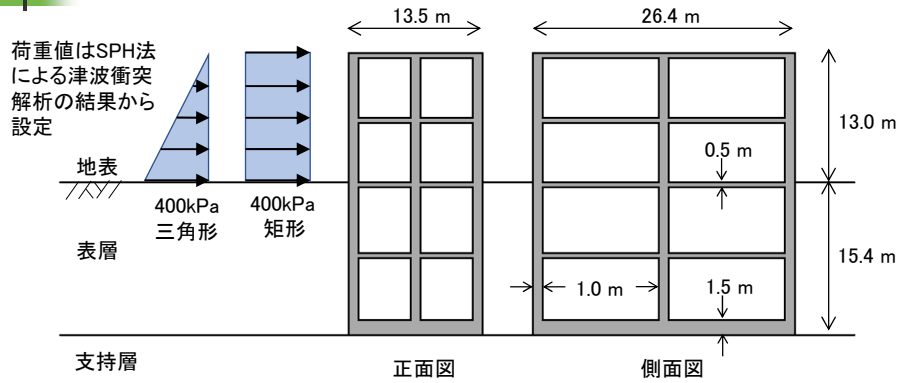
2011年東北地方太平洋沖地震における浄化センターの被害  
(写真：仙台市建設局)

本検討では、構造物にRC非線形特性を考慮した三次元FEM解析により、波圧形状の差異や荷重の静的・動的作用の違いが、構造物の変位・応力・ひずみ等の応答に与える影響を検討した。

2

2

## 検討対象構造物および想定津波荷重



	壁厚	配筋
側壁・隔壁	1.0 m	D32@200 mm 被り100 mm 水平方向・鉛直方向共通
屋上床・中間階床	0.5 m	D25@200 mm 被り80 mm 水平2方向共通
底版	1.5 m	D32@200 mm 被り150 mm 水平2方向共通

3

3

## 諸元・物性値

### コンクリート

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	24.0
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	0.0
圧縮強度対応ひずみ	0.002
圧縮側非線形構成則	2次関数型
ポアソン比	0.20
密度 (kN/m <sup>3</sup> )	23.0

### 鉄筋

ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	200.0 × 10 <sup>3</sup>
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	345.0
非線形構成則	バイリニア
ポアソン比	0.30
密度 (kN/m <sup>3</sup> )	77.0

### 地盤

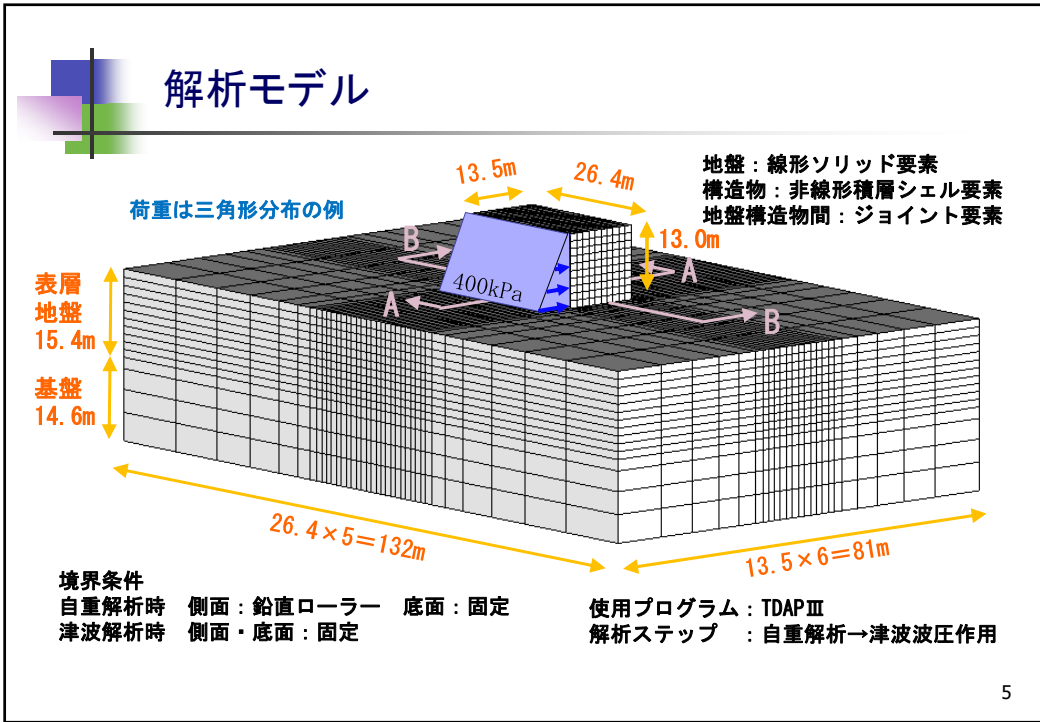
層	表層	支持層
S波速度 (m/s)	90	330
密度 (t/m <sup>3</sup> )	2.0	2.2
ポアソン比	0.40	0.35

### 地盤-構造物間

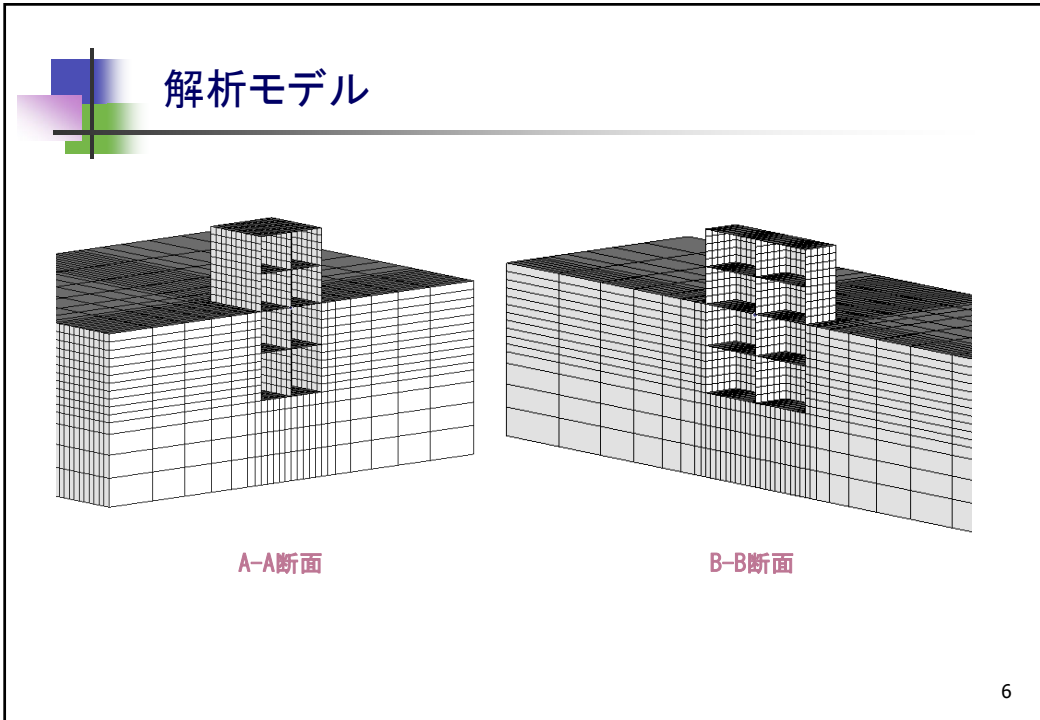
引張強度	0.0
粘着力	0.0
摩擦係数	0.5

4

4



5

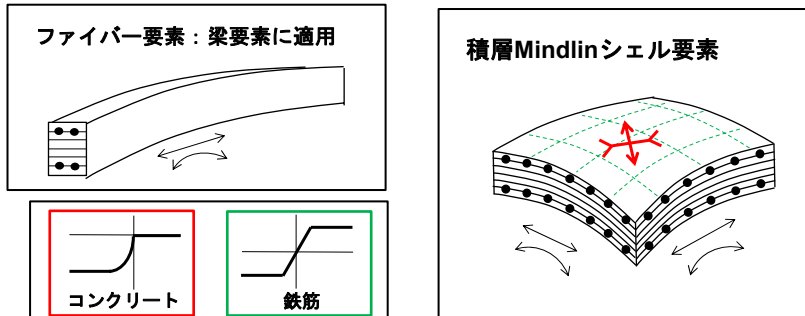


6

## 構造物のモデル化

構造物は積層Mindlinシェル要素にて非線形を考慮

積層Mindlinシェル要素：ファイバー要素の概念をMindlinシェル要素に拡張して伸縮および曲げに対する非線形挙動を評価するもので、要素を厚さ方向に層分割し、各層でコンクリートは面内の主応力2方向で、鉄筋は配筋方向で、それぞれ非線形構成則に適合するように応力ひずみ履歴を追跡するもの。

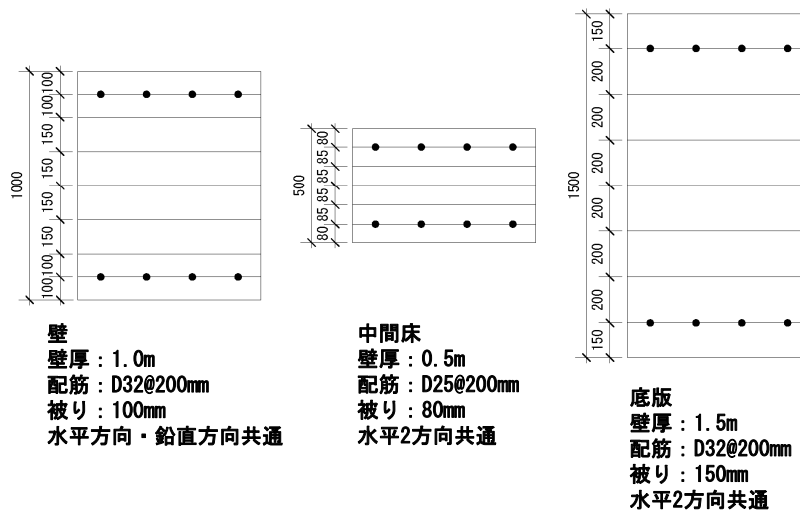


7

7

## 構造物のモデル化

積層Mindlinシェル要素の配筋条件およびコンクリート層分割



8

8

## 解析ケース

	波圧形状	静的・動的
Case1	矩形分布	静的
Case2	三角形分布	静的
Case3	三角形分布	動的

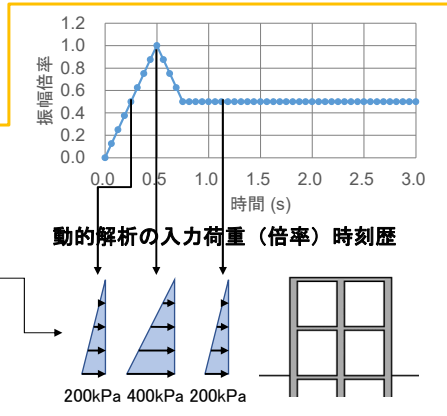
動的解析の条件：

○津波衝突直後の衝撃的な波圧の後に定常的な波圧となる状態を想定

○分布形状（三角形分布）の時間変化はなし

○減衰 5.0Hzで 地盤：5.0% コンクリート：5.0% 鉄筋：3.0% となる剛性比例型減衰

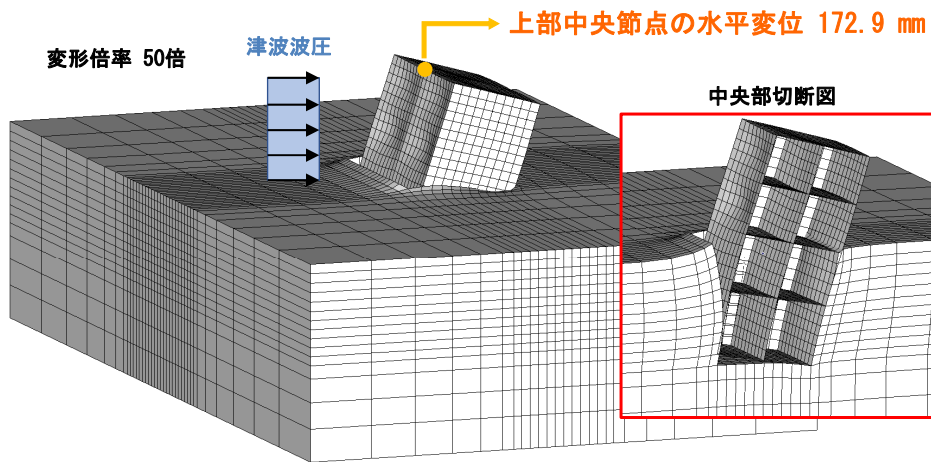
○履歴則 コンクリート：Ristic他の履歴則  
鉄筋：移動硬化



9

9

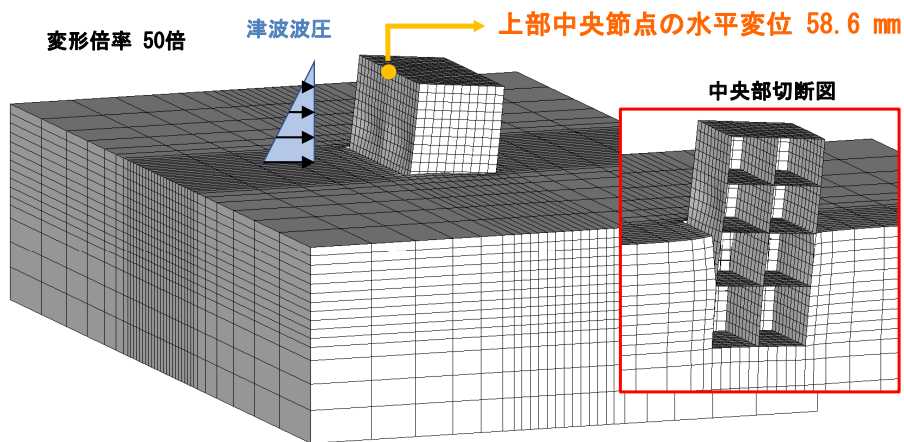
## Case1(矩形分布:静的载荷) 変形図



10

10

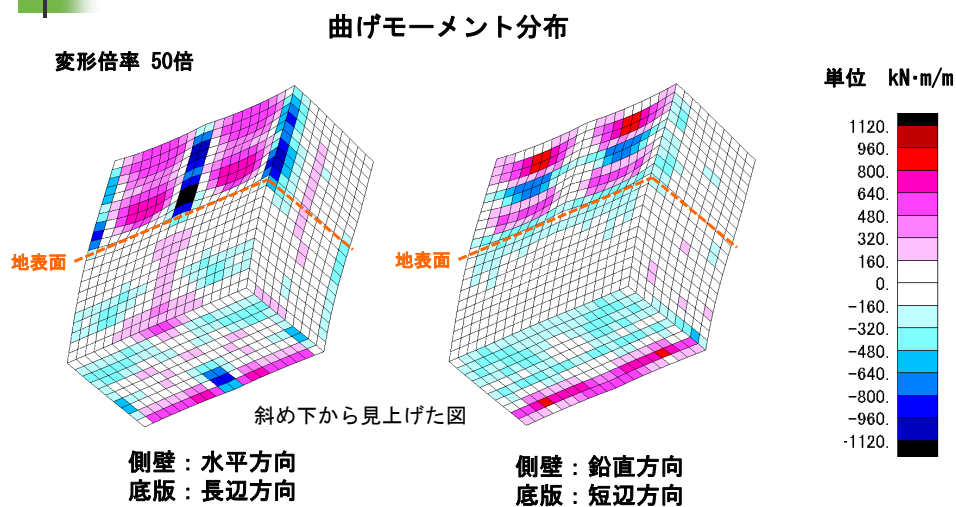
## Case2(三角形分布:静的載荷) 変形図



11

11

## Case1(矩形分布:静的載荷) 構造物の変形および断面力



12

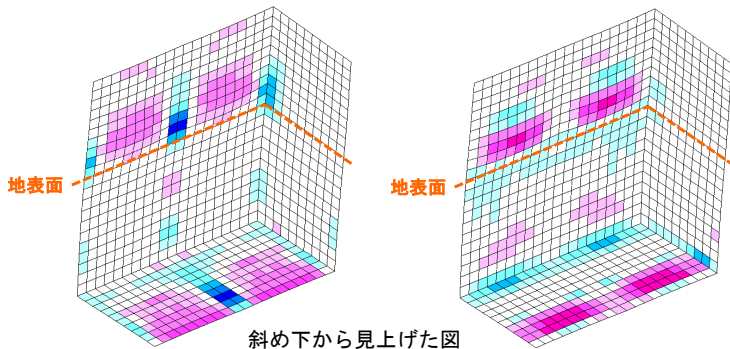
12



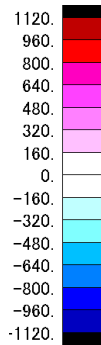
## Case2(三角形分布:静的載荷) 構造物の変形および断面力

### 曲げモーメント分布

変形倍率 50倍



単位 kN·m/m



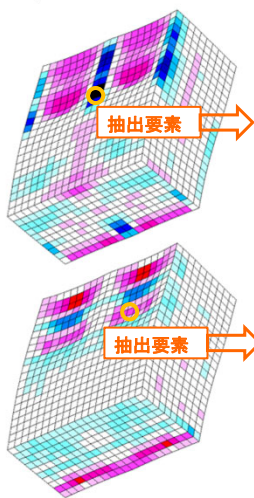
側壁：水平方向  
底版：長辺方向

側壁：鉛直方向  
底版：短辺方向

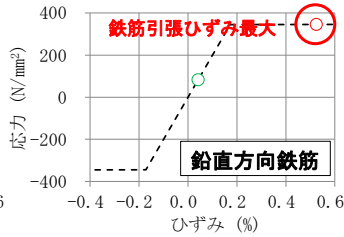
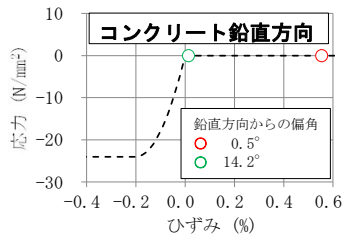
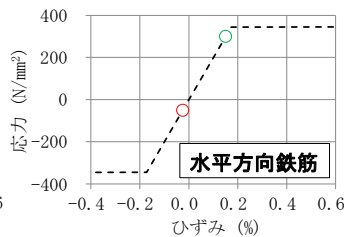
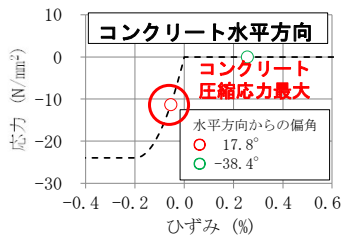
13

13

## Case1(矩形分布:静的載荷) 構造物の応力およびひずみ



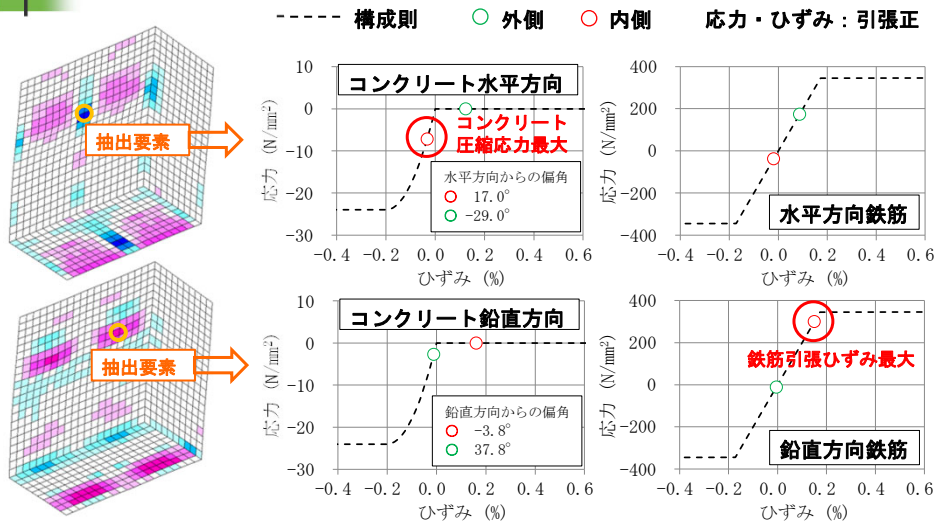
----- 構成則    ○ 外側    ○ 内側    応力・ひずみ：引張正



14

14

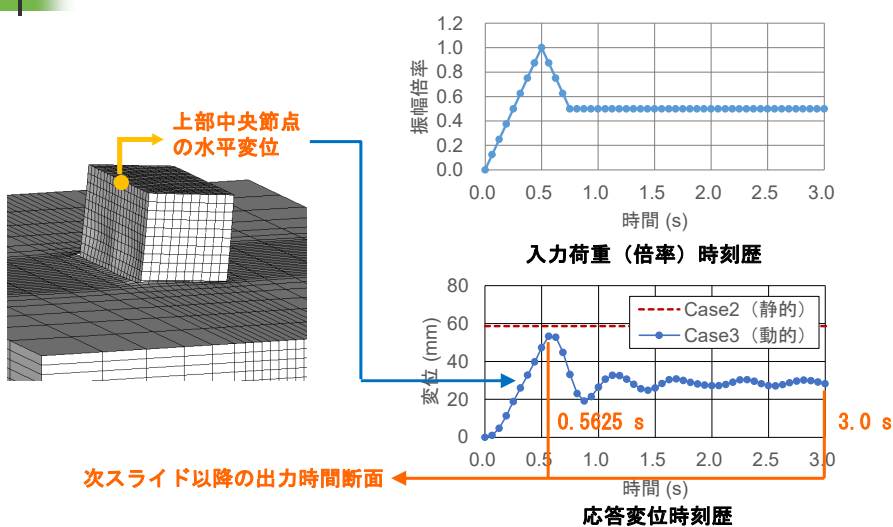
### Case2(三角形分布:静的载荷) 構造物の応力およびひずみ



15

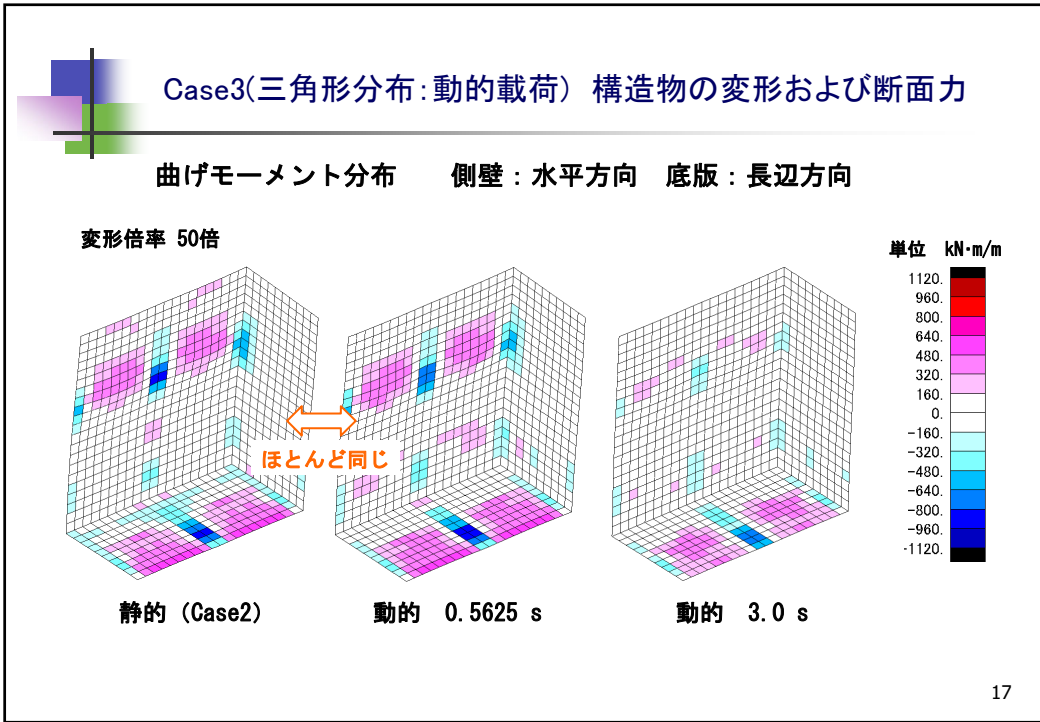
15

### Case3(三角形分布:動的载荷) 変形の時刻歴

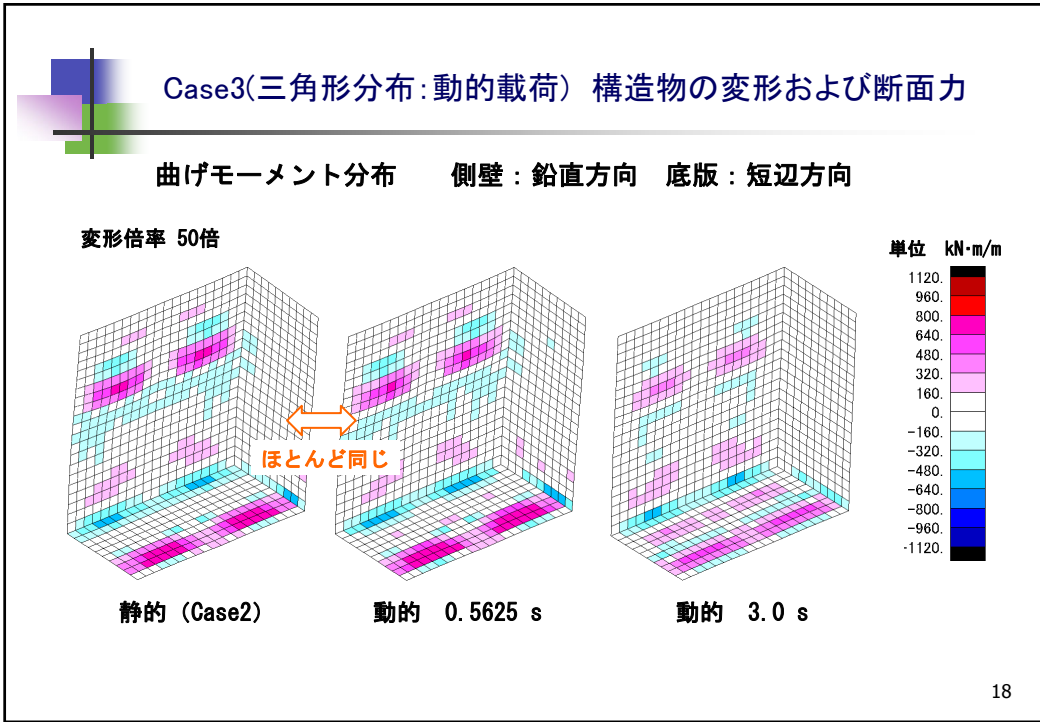


16

16

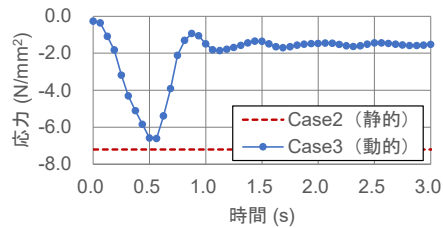
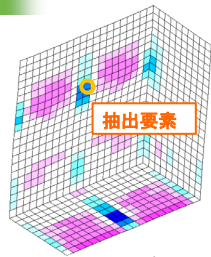


17

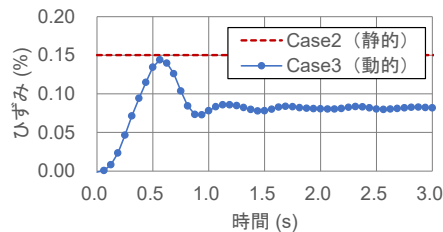
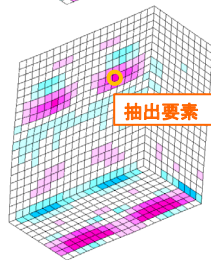


18

### Case3(三角形分布:動的载荷) 構造物の応力・ひずみの時刻歴



内側コンクリートの水平方向応力時刻歴



内側鉛直方向鉄筋ひずみ時刻歴

符号：引張正

19

19

### まとめ

- 矩形分布静的载荷では、構造物頂部の変位は172.9mm。鉄筋ひずみは降伏ひずみに達するが、コンクリート応力は圧縮強度の半分程度。
- 三角形分布静的载荷は矩形分布载荷と比較して構造物の応答値は低下するが、最大断面力よりも構造物の変位の低下に与える影響の方が大きい。(波圧分布形状から当然の結果)
- 津波衝突直後の衝撃的な波圧の後に定常的な波圧となる状態を想定した荷重を与えた動的解析結果は、慣性力や減衰の影響で、構造物の変位・応力・ひずみのピーク時刻は荷重ピーク時刻よりもわずかに遅れる。またその応答値は静的解析結果と比較してわずかに低下する。しかしその低下の程度は顕著ではないため、津波衝突直後の衝撃的な波圧をやわらげる緩衝材の開発が有効となると考えられる。

20

20

# 構造物内に発生する応力に対する 津波波圧の設定の影響

(株) J-POWERビジネスサービス  
鈴木 隼人

1

## はじめに

- 2011年東北地方太平洋沖地震：津波と強震動による甚大な被害が発生した。
- 南海トラフ地震：津波と強震動による甚大な被害の想定
  - ≫ 強震動と津波の双方に対して有効な対策の実現が必要



ポンプ室外壁の損傷（仙台市建設局）



曝気槽送風機室外壁の損傷（仙台市建設局）

2011年の東北地方太平洋沖地震での仙台市南蒲生浄化センターの被害状況

2

2

## はじめに

免震・免波という考え方に基づく地震・津波対策技術の開発  
(これまでの研究経緯)

- SPH法による津波衝突解析<sup>1)</sup>
- 三次元FEM解析による強震動と津波に対する安全性評価法の検討<sup>2)</sup>
- 津波模型実験による緩衝材の波圧低減効果の検討<sup>3)</sup>

構造物の津波安全性を評価する場合に波圧の分布形状の設定が  
応力にどのような影響を及ぼすかについては未検討の課題がある。



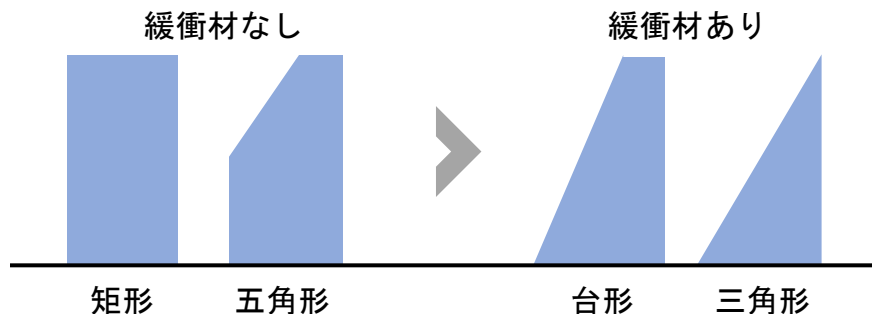
波圧の鉛直分布形状が構造物内に発生する応力等にどのような影響を及ぼすかを三次元FEM解析により検討

1) 渡辺ほか(2021)：衝突条件の違いによる陸上構造物に作用する津波波圧の低減効果の検討。土木学会論文集A1, Vol. 77, No. 4, I\_659-I\_669.  
2) 有賀ほか(2017)：水循環施設における免震・免波構造の効果の評価に関する検討。土木学会論文集A1, Vol. 73, No. 4, I\_721-I\_729.  
3) 有賀ほか(2022)：緩衝材を活用した津波波圧の低減効果について。土木学会第42回地震工学研究発表会講演論文集, D14-12, pp. 1-9

## 津波模型実験による波圧の鉛直分布形状の結果

構造物の前面に緩衝材を配置した場合の波圧の鉛直分布形状の変化

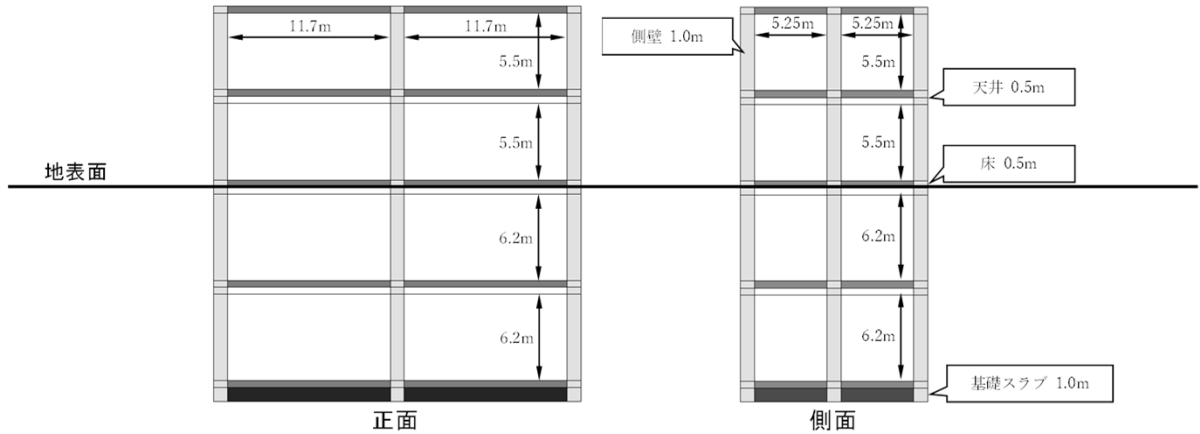
- ▶緩衝材が無い場合（構造物のみ）：波圧の分布形状は 矩形/五角形
- ▶緩衝材がある場合（緩衝材を配置）：波圧の分布形状は 台形/三角形



緩衝材の効果の模式（EPDMスポンジを用いた場合）

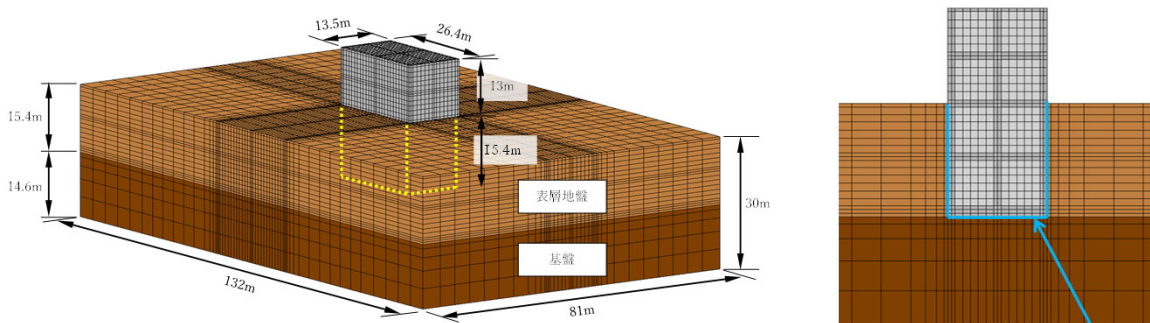
# 解析対象構造物

地上2階/地下2階のPC構造物  
幅26.4m 奥行13.5m 高さ28.4m



2011年東北地方太平洋沖地震での仙台市南蒲生浄化センターの事例を参考に設定

# FEM解析モデル



## 構造物の物性値

せん断剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
14600	0.2

## 地盤の物性値

	S波速度 (m/s)	せん断剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
表層地盤	90	16	0.4
基礎盤	330	240	0.35

ジョイント要素  
(非連続の場合)

解析ステップ : ① 自重解析 ② 津波解析



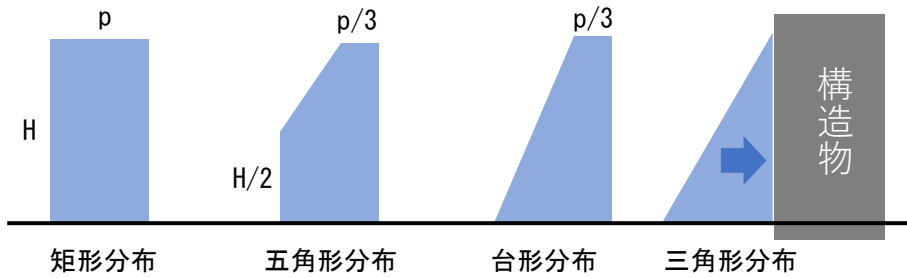
## 構造物に作用させる波圧の分布形状と大きさ

(既往の検討結果<sup>1)2)</sup>を参考に設定)

H : 構造物の高さ

p : 波圧の大きさ (p=400kPa)

波圧は静的荷重として構造物の地上部表面に載荷

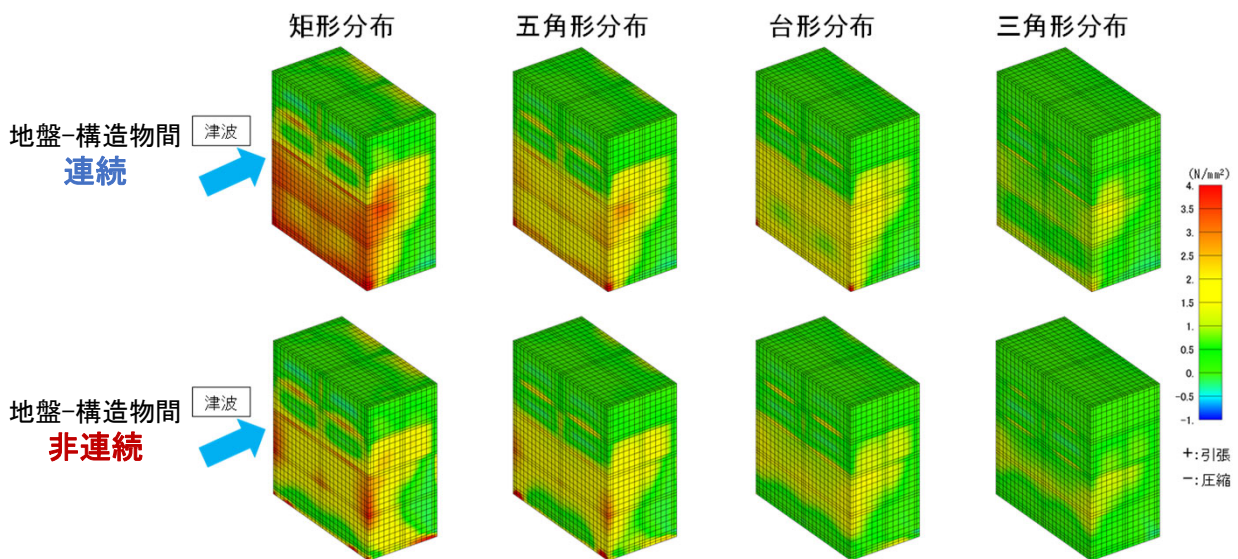


緩衝材をモデル化して、その表面に静的に荷重を作用させると、荷重がそのまま構造物の表面に作用するだけという結果しか得られないことがわかっている。  
 》 便宜的な方法として、緩衝材の波圧の低減効果を分布形状に置き換えて解析を行う。

1) 有賀ほか(2022) : 緩衝材を活用した津波波圧の低減効果について, 土木学会第42 回地震工学研究発表会講演論文集, D14-12, pp. 1-9  
 2) 渡辺ほか(2021) : 衝突条件の違いによる陸上構造物に作用する津波波圧の低減効果の検討, 土木学会論文集A1, Vol. 77, No. 4, 1\_659-1\_669.

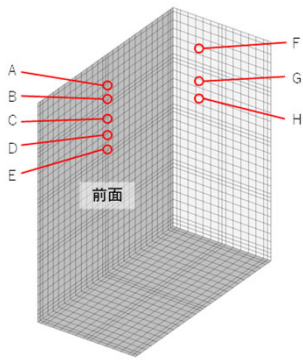
7

## 解析結果 - 構造物における最大主応力

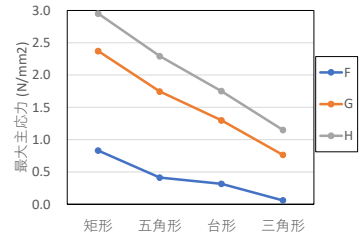
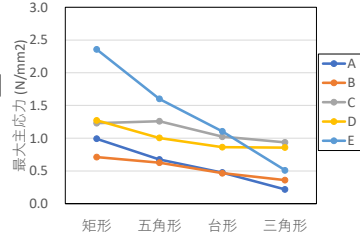


8

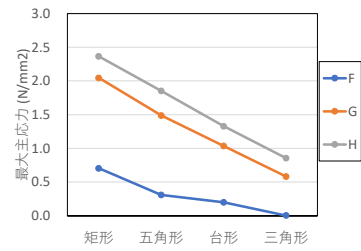
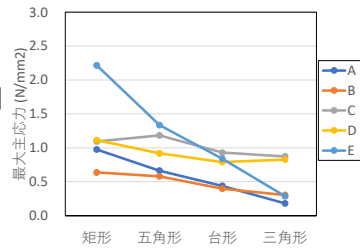
## 解析結果 - 代表位置における最大主応力の比較



地盤-構造物間  
連続



地盤-構造物間  
非連続



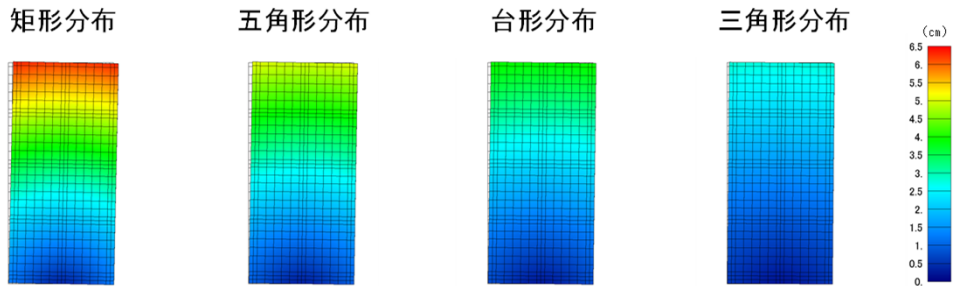
+ : 引張 - : 圧縮

9

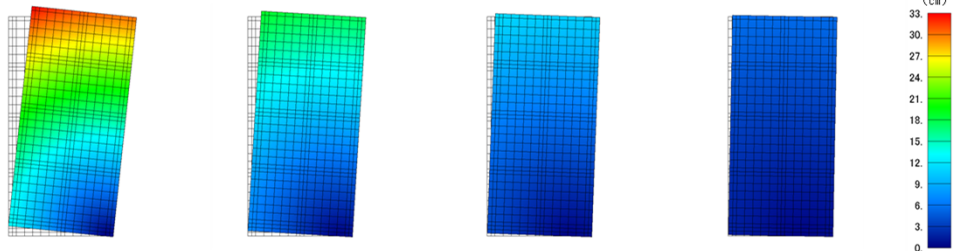
9

## 解析結果 - 構造物における変位挙動 変形倍率 : 10倍

津波  
地盤-構造物間  
連続



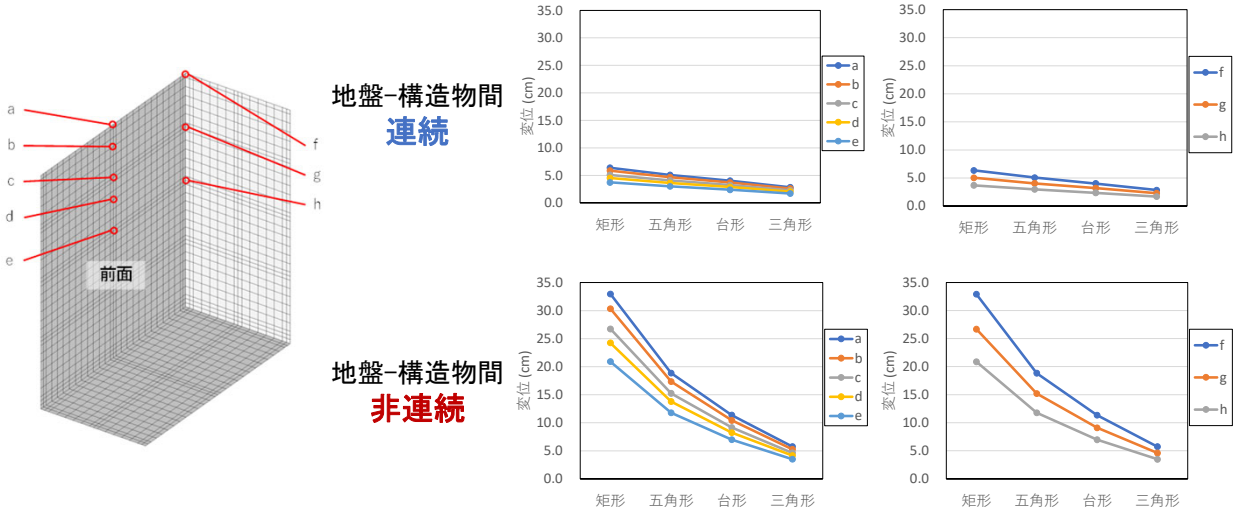
津波  
地盤-構造物間  
非連続



10

10

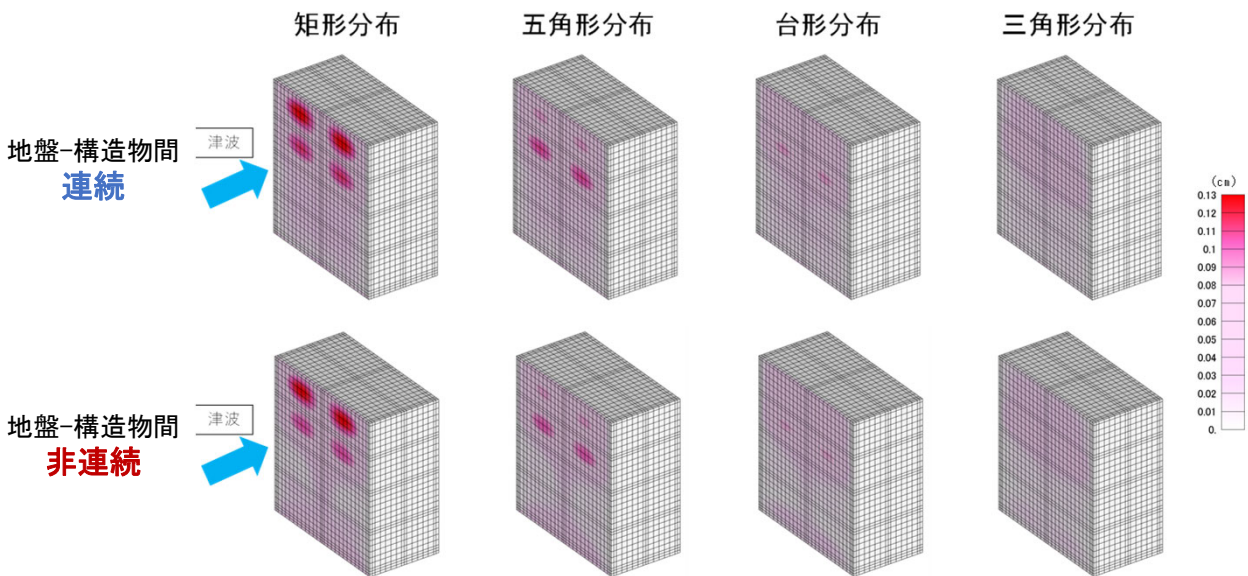
## 解析結果 - 代表位置における変位の比較



11

11

## 解析結果 - 構造物壁面における変形



12

12

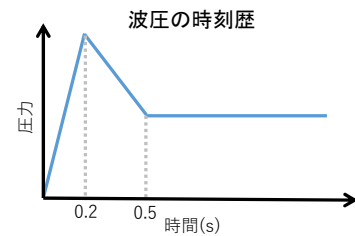
## まとめ

波圧の鉛直分布形状が構造物内に発生する応力等にどのような影響を及ぼすかについて、三次元FEM解析を行い検討した。

- ▶ 構造物内に発生する応力は、**矩形分布で最大**、**三角形分布で最小**。
- ▶ 構造物内に発生する応力を評価する際には、**地盤と構造物間の非連続性**の考慮が必要。
- ▶ 津波に対する構造物の安全性を正確に評価するためには、津波が構造物に衝突した際の**衝撃波圧**の分布形状を正確に設定することが必要。

## 今後の検討

構造物の前面に緩衝材を配置した場合の緩衝材のクッション効果を評価するために波圧を動的荷重として構造物に作用させる解析を実施予定。



13

**第二部 WG 2 : 埋設管路の液状化に伴う浮上メカニズム  
と対策の研究成果報告**

## 『WG2:埋設管路の液状化に伴う浮上メカニズムと 対策の研究成果報告』

2023年11月17日(金) 15:00~16:50

ブリーゼプラザ801・802号室

静岡理科大学 中澤 博志

### WG2活動内容

- 埋設管の浮上対策に関する事例研究と新たな提案
- 「水道施設耐震工法指針・解説(日本水道協会)」の改定作業における技術的支援

## WG2活動の経緯

はじまりを、つくる



### 1. WG2の研究テーマとこれまでの研究経過、本活動成果の概要報告

静岡理科大学 中澤博志

2. 埋設管路の浮上事例やこれまでの浮上対策の研究事例 (株)日水コン 福山正彦
3. 大型振動台を用いた埋設管路の浮上実験とその再現解析 (防災科学技術研究所での実験内容、FEMによる再現解析) (株)日水コン 福永健一
4. 遠心载荷模型実験による埋設管路の浮上実験 関西大学 飛田哲男
5. 加振方向による液状化時の埋設管浮上への影響 (管軸方向と管軸直角方向にそれぞれ加振したときの影響) 神戸大学 鎌田泰子
6. 2004年新潟県中越地震における埋設下水道管路の浮上事例の再現解析と対策 (株)日水コン 小西康彦
7. 液状化に伴う下水道管路を中心とした埋設管路の浮上特性と砕石材による浮上対策の研究事例 (株)日水コン 宮本勝利
8. 粒状体中の剛体の浮上と沈下のメカニズム (DEMIによる解析結果の紹介) 鳥取大学 小野祐輔

SIST 静岡理科大学 Copyright © Shizuoka Institute of Science and Technology

3

## 研究の背景

はじまりを、つくる



### 過去の地震による下水道管路の被害

#### 【構造的な被害】

- ①マンホールと管きよの接続部
- ②本管の軸方向クラック
- ③管と管の継手部の突っ込み・抜け出し・沈下

対策

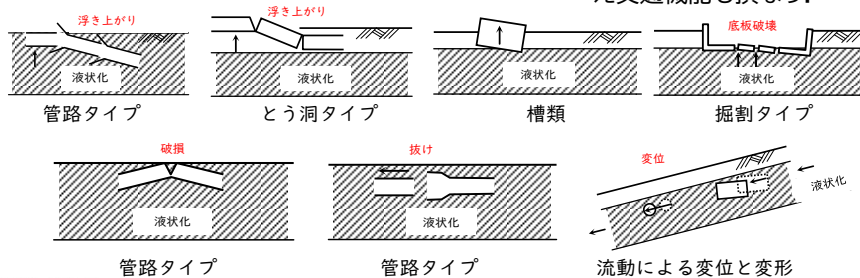
曲げ・せん断:可とう性継手  
引張り・圧縮:伸縮性継手  
クッション材

#### 【液状化による被害】

- ①マンホールの浮上
- ②本管の浮上
- ③管と管の継手部の抜け出し・沈下

影響

液状化地盤中の埋設管の浮き上がりに伴い、継手に破損などの被害が生じる。管路の機能障害に加え交通機能も損なう。



SIST 静岡理科大学 Copyright © Shizuoka Institute of Science and Technology

液状化による地下埋設物の被害パターン

4



## 研究の背景

はじまりを、つくる

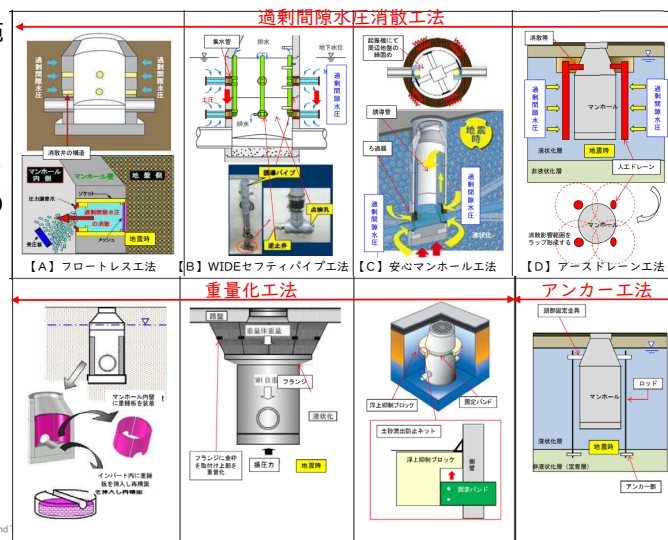


### 液状化対策の現状

【マンホール浮上対策】  
「重要幹線道路」「重要な管路施設」を中心に自治体による採用が進んでいる。

【本管の浮上対策】  
新設では、埋戻し土の締固め度90%以上の確保や固化処理の対策を行っている。  
既設に対しては、全く開発が進んでいない。

#### マンホールの液状化対策



SIST 静岡理科大学 Copyright © Shizuoka Institute of Science and Technology

5

## WG2の主な研究・提案

はじまりを、つくる



### 液状化被害事例と管きよの浮上対策の必要性

#### 【2004年新潟県中越地震長岡市の事例】

- 周辺地盤が液状化しない地盤における埋戻し土の液状化により、マンホールや塩ビ管の浮上が**広範囲**に発生。

#### 【2011年東北地方太平洋沖地震浦安市の事例】

- 海砂の埋戻し地盤に造成された市街地が噴砂を伴い**広域的**に液状化し、地表面が数十センチ沈下。マンホールと本管接続部や取付管接続部などが破断。
- 液状化した砂が管路内に流入・流路を閉塞させ流下不能に。

#### 【管きよ(本管)の浮上対策】

- 管きよは面的に広く整備が進んでおり、工事費が膨大になる。
- 埋設管路の浮上について、管路条件や埋設条件および地震条件等の違いに着目し、総合的に研究した事例は少ない。
- 実用的かつ安価な下水道本管の浮上対策を開発したい。

#### 【WG2における提案】

既設の本管が浮上する条件(管種・管径・土被り・地下水位など)を考慮した新たな下水道管路浮上対策の提案へ。

SIST 静岡理科大学 Copyright © Shizuoka Institute of Science and Technology

6

## WG2の主な研究・提案

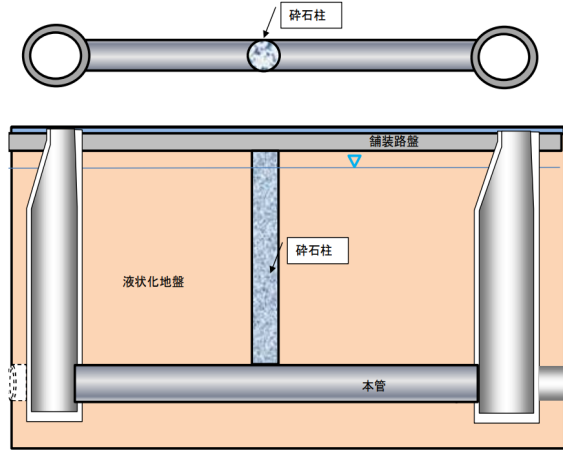
はじまりを、つくる



### 既設の本管をどのように対策するか？

#### 【既設管の浮上対策の課題】

- 道路上での施工となる、交通規制の少ない施工法。
- 大規模掘削することなく、施工機械も小規模に。
- 力学的な検証⇒設計が可能となるような方法。
- 道路管理者の承認が得やすい方法(原理がイメージしやすい)。



碎石柱による本管浮上対策

#### 碎石柱の打設による本管浮上対策

- 施工機械は大口径ボーリングマシンを想定。
- 碎石ドレーンは液状化対策として実績が多い。
- マンホール間に1~2か所程度。
- 碎石柱が支点となり浮上を抑制。

SIST 静岡理工科大学 Copyright © Shizuoka Institute of Science and Technology

小西康彦, 中澤博志, 飛田哲男, 小野祐輔, 佐藤清, 宮本勝利, 福永健一, 福山正彦 (2020): 液状化による下水道管路の浮上安全度と対策に関する研究. 第10回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム論文集, pp.129-133.

7

## 碎石柱の打設による本管浮上対策検討の経緯

はじまりを、つくる



2020

小型振動台による簡易実験

碎石柱本数の計算手法

大型振動台実験による検証

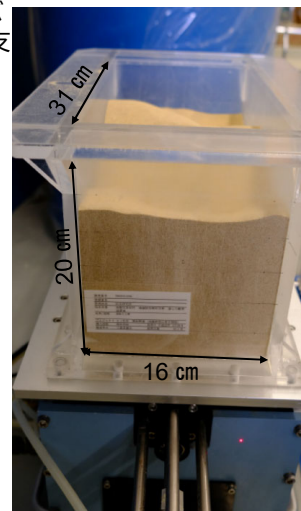
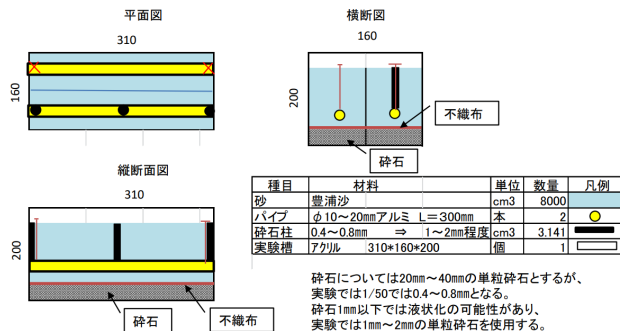
2021-2022

遠心載荷実験

数値解析

メカニズム・事例研究……

浮上防止効果は、碎石柱による支点反力だけでは薄い(重量バランス的に揚圧力を碎石柱で支えるのは無理がある)のでは？ドレーン機能を考慮するとどうか？



関西大学における実験

8

## 砕石柱の打設による本管浮上対策検討の経緯

はじまりを、つくる



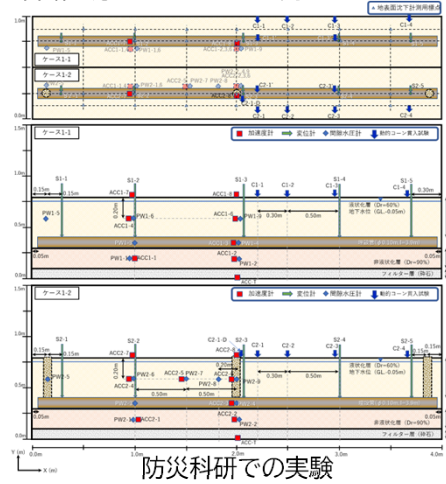
2020  
 小型振動台による簡易実験  
 砕石柱本数の計算手法  
 大型振動台実験による検証  
 2021-2022  
 遠心载荷実験  
 数値解析  
 メカニズム・事例研究……

- 完全な液状化には至らず(段階的に $\alpha = 591\text{Gal}$ )
- 加振方向の影響? 管下部の非液状化層の存在?
- 加振後の過剰間隙水圧の消散には効果あり(等価有効円を確認)
- 実験後, 砕石柱の形状保持を確認。
- 無対策で液状化や管路の浮上をどのように発生させるか?



土槽内の様子

福永 健一, 小西 康彦, 中澤 博志, 飛田 哲男 (2022) : 液状化による下水道管の浮上対策に関する研究 (その1), 第11回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム論文集, pp.145-156



防災科研での実験

9

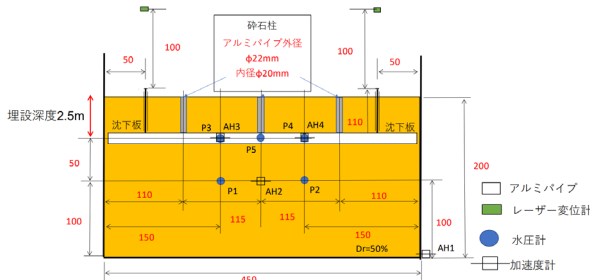
## 砕石柱の打設による本管浮上対策検討の経緯

はじまりを、つくる



2020  
 小型振動台による簡易実験  
 砕石柱本数の計算手法  
 大型振動台実験による検証  
 2021-2022  
 遠心载荷実験  
 数値解析  
 メカニズム・事例研究……

砕石柱による浮上対策ケースと無対策ケースを同時加振し, 浮上量に着目した結果, 管路の浮上抑制効果は確認できた。しかし, 対策効果は小さかった。



静岡理科大学 Copyright © Shizuoka Institute of Science and Technology



関西大学における実験

10

## 砕石柱の打設による本管浮上対策検討の経緯

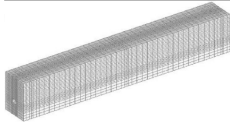
はじまりを、つくる



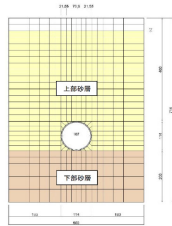
2020  
小型振動台による簡易実験  
砕石柱本数の計算手法  
大型振動台実験による検証  
2021-2022  
遠心载荷実験  
数値解析  
メカニズム・事例研究・・・

【本管浮上対策の数値解析を先行】

- ① 実験では明確な対策効果を確認できていない。  
⇒モデル地盤の液状化が不完全で、対策無で本管の顕著な浮上を再現していない。
- ② 数値解析により対策無しで本管が浮上する実験条件を見つけ出す。
- ③ 実験だけでは検討できない条件を確認



- 加振方向は縦断方向より横断方向のほうが管は浮上する。
- 無対策の場合、管の浮上は最大20mm程度。
- 管下層地盤はDr=80%よりDr=60%のほうが浮上量は大きい。



「5. 加振方向による液状化時の埋設管浮上への影響」

管断面に水平加振した浮上り量よりも管軸方向に水平加振した浮上り量の方が0.5~0.87倍小さい。」

「8. 粒状体中の剛体の浮上と沈下のメカニズム」

管の見かけの密度が周辺地盤より小さい場合、振動数が小さいほど浮上しやすい。管の見かけの密度が周辺地盤より小さい場合、振幅が大きいくほど浮上しやすい。

11

## 砕石柱の打設による本管浮上対策効果と実用化に向けて

はじまりを、つくる



「7. 液状化に伴う上水道管路を中心とした埋設管路の浮上特性と砕石柱による浮上対策の研究事例」

土被り、管断面形状、管路下部地盤、管周辺の液状化範囲、管内水の有無などの検討。

- ある程度の浮上量を削減することを目的とした場合への適用。
- 複合的な効果を期待(ドレーン機能、反力材(路盤を反力点)とする効果、荷重としての浮上抑制効果)

⇒ ドレーン機能は、実験、解析からも確認

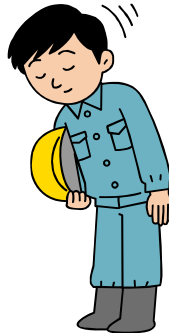
「3. 大型振動台を用いた埋設管路の浮上実験とその再現解析」

⇒ 砕石柱の自重による支点効果を考慮した解析(長岡市の埋設管浮上事例)  
浮上量を災害時の管路復旧判断基準の5cm以下に。

「6. 2004年新潟県中越地震における埋設下水道管路の浮上事例の再現解析と対策」

12

ご静聴，ありがとうございました。





2023/11/17

水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会 活動報告会

【WG2】 2. 埋設管路の浮上事例やこれまでの浮上対策の研究事例



0

コンテンツ

報告の内容

1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例
2. 既往の検討
3. 文献調査
4. まとめ

1

1



## 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

### 地下埋設物の浮上がり被害

- 1964年 新潟地震
- 1983年 日本海中部地震
- 1993年 釧路沖地震
- 2003年 十勝沖地震
- 2004年 新潟県中越地震
- 2011年 東北地方太平洋沖地震

兵庫県南部地震では大規模な液状化が確認されたものの、埋設物の浮上がりはさほど報告されていない。

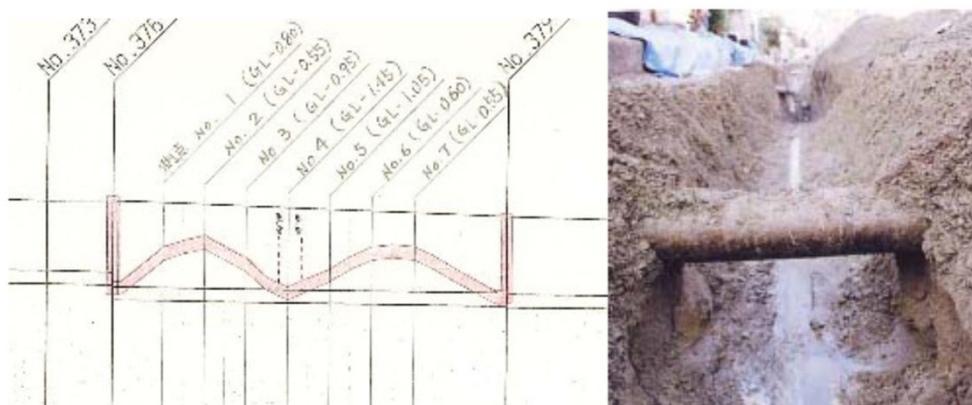
2

2

## 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

### 2004年新潟県中越地震における長岡市の下水本管浮上事例

#### 長岡市の応急復旧工事に見る下水管被害状況



塩ビ管内径250mm、路線延長約38m、土被が1.5m程度の路線で、人孔は浮上してないが、管が液状化で浮上している。中間のますが2箇所取り付けしているところで、取り付け管が支えとなって浮上していない。

3

3



## 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

### 2004年新潟県中越地震における長岡市の下水本管浮上事例



(左)人孔周囲に亀裂は入っているが、浮上はしていない。(右)取り付け間は垂直に取り付いており、埋め戻しは発生土(?)なのか、液状化の痕跡は見られない。

4

4

## 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

### 2004年新潟県中越地震における長岡市の下水本管浮上事例



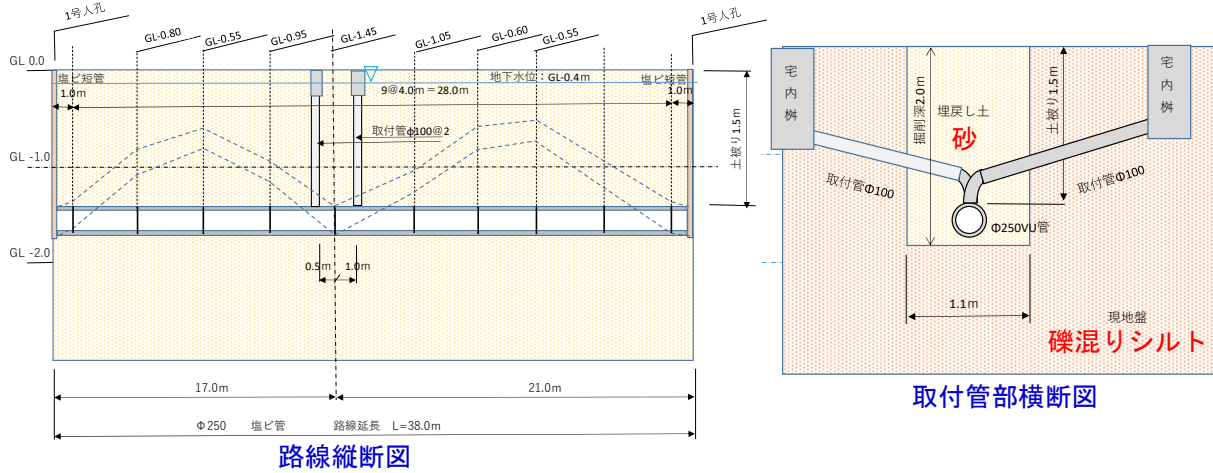
同じ路線とはとても思えない各測点での土被り。

5

5

# 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

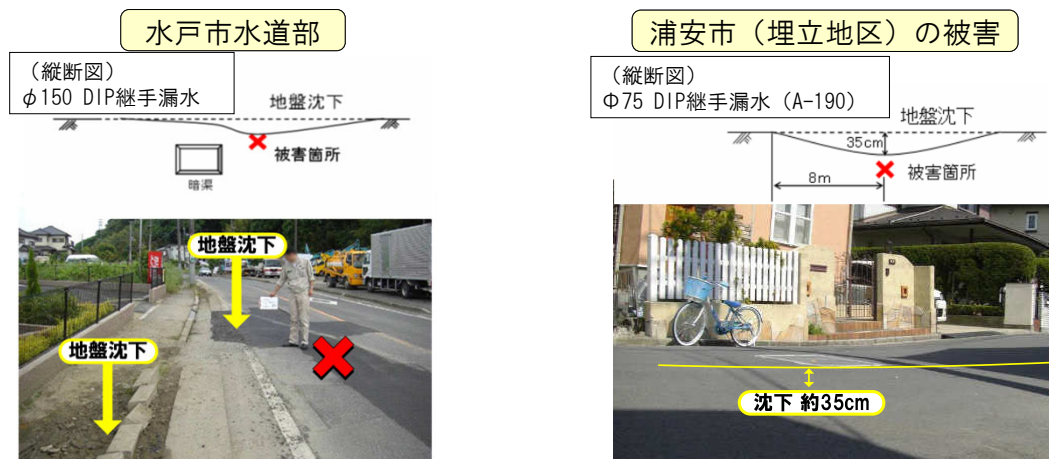
## 2004年新潟県中越地震における長岡市の下水本管浮上事例



- 最大95cmの浮上を確認。
- 中間は取付管により浮上が抑えられている。

# 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

## 2011年東北地方太平洋沖地震における継手被害事例



- 液状化に伴う地盤沈下の箇所において管路継手の被害が多い。
- ダクティル鑄鉄管浮上の被害報告は確認できていない。

## 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

### 2011年東北地方太平洋沖地震における鰐川浄水場の被害



	急速ろ過池～浄水池連絡管				中間ポンプ棟～活性炭接触池連絡管				浄水池～送水ポンプ棟連絡管				送水管				逆洗管				表洗管				逆洗・表洗 排水管	
口径	600	600	600	600	600	600	600	600	800	300	300	600	600	600	600	400	350	350	250	250	150	150				
△地盤 ▽管底	10	80	80	50	60	40	40	40	100	100	100	60	10	20	20	50	20	20	50	20	20	40	40			
深度 (cm)		20	80	80	50	40	40	40	20	30	20	60	35	30	1	15	65	40	40	40	60					
地盤沈下率	3	27	20	13	15	10	10	10	20	20	20	12	3	7	5	13	7	5	13	5	5					
管路沈下率	7	27	3	15	13	10	10	10	4	6	4	12	12	10	0	4	18	10	10	10	15					

地盤沈下率: 液状化層厚に対する地盤の沈下率[%]    〇: 漏水、脱管等の被害管路  
 管路沈下率: 液状化層厚に対する管路の沈下率[%]    〇: 側方流動の影響が顕著と考えられる点    △: 周辺地盤沈下量[cm]    ▽: 管路沈下量[cm]



- 地震後の液状化現象や共同溝の浮上現象が長時間継続した。
- 余震の影響により被害が拡大した。
- ただし、充水された埋設管路の浮上は全く確認されなかった。

8

8

## 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

### 液状化地盤の地下埋設物の浮上がり被害形態

- ① 上下水道管路
  - ② パイプライン
  - ③ マンホール
  - ④ 地下タンク
  - ⑤ 地下浄化槽
  - ⑥ 地下貯水槽
- 等

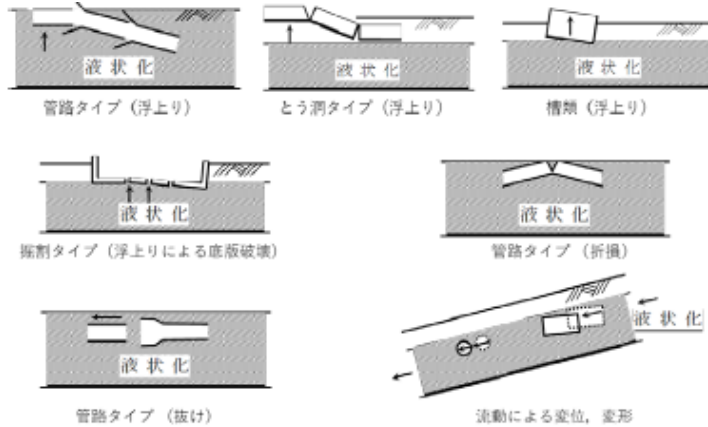
管路やマンホール等の比較的小さな構造に被害が起こりやすいが、RC構造物や地下貯水槽でも浮上被害が発生している

9

9

## 1. 埋設管の浮上がりに関する被災事例

### 液状化地盤における地下埋設物の被害形態



#### 【被害形態】

- 折損
- 抜け
- 圧縮
- 継手部の損傷

#### 【要因】

- 埋戻土の液状化による揚水圧や側方流動

➡ 継手部の破損が多い

10

10

## 2. 既往の検討

### 浮上がり安全率を用いた設計

液状化時のマンホールの浮上判定に対する安全率

$$F_s = \frac{W + Q}{U_s + U_d} > 1.0$$

$U_s$  : マンホール底部に働く静水圧による揚圧力 (kN)

$$U_s = A \times (h - h_w) \times \gamma_w$$

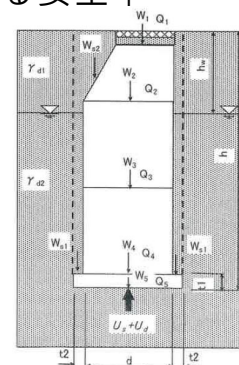
A : マンホール底面積

$U_d$  : マンホールの底部に働く過剰間隙水圧による揚圧力

W : マンホール底部に働く鉛直荷重 (kN)

Q : マンホールの側壁に働く摩擦力 (kN)

※液状化に対する抵抗率  $FL \leq 1.0$  の液状化地盤では、原則としてQは考慮しない



ある一瞬の力のつり合い条件であるため、  
被害程度の定量的な評価に結び付けることが難しい

11

11



## 2. 既往の検討

### 地下埋設物の浮上がりに関する定量的な予測手法

#### 現場実験事例

制御発破を用いた人工液状化実験 (H19, 港湾空港技術研究所)

- ✓ 発破時の実大地下埋設管の挙動
- ✓ 液状化の残留変形・残留変位の検討

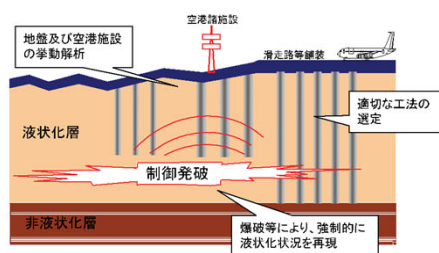
#### 数値解析による評価・検証事例

大型振動実験における埋設管の浮上実験を対象としたブラインド解析 (H15, 地盤工学会)

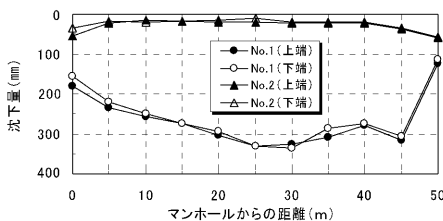
- ✓ 埋設管の浮上がりに関する模型実験に対する一斉解析
- ✓ 全応力・有効応力解析、DEM、液状化地盤を粘性流体とした解析
  - 解析手法・解析者によるばらつき
  - 予測が実験結果の傾向を捉えきれていない点がある

## 2. 既往の検討

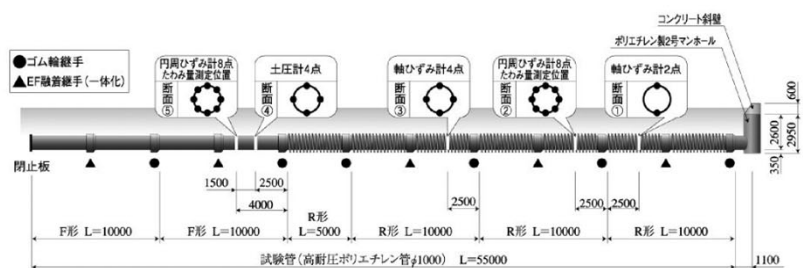
### 制御発破を用いた人工液状化実験 (H19)



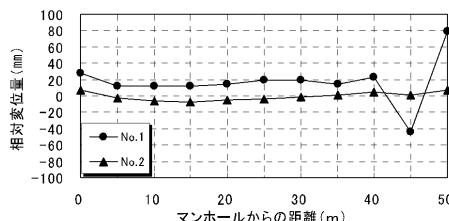
液状化実験の概要



管軸方向の沈下



埋設管の配置

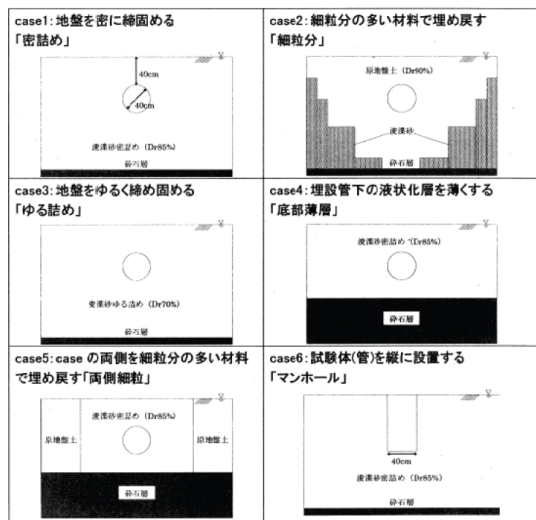


舗装面と管との距離

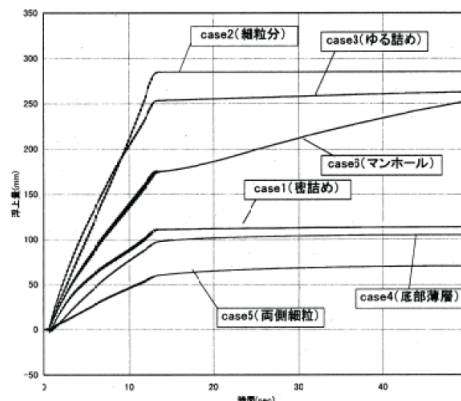
管周囲に地盤改良を施すことで、作用する動土圧や管の断面変形を低減させ、沈下量および総体沈下量を低減させる効果が認められた。

## 2. 既往の検討

### 大型振動実験における埋設管の浮上実験を対象としたブラインド解析



実験断面



実験結果

- ✓ 実験と予測で浮上量の差異が発生するケースがある。
- ✓ 実験では加震終了後も浮上を続けたが、挙動を表現できない手法もある。

14

14

## 3. 文献調査

### 土木学会全国大会への投稿

- ① 地盤の強化  
薬液注入・固化改良  
過圧密効果の検討（ウェルポイント・排水）
- ② 埋設管の浮上がり現象・メカニズムの評価  
廃ガラスリサイクル粗粒材料の透水試験を応用
- ③ 埋戻材料の提案  
下水汚泥焼却灰を用いた改良土  
セメント混合砂
- ④ シート材料を用いた浮上対策
- ⑤ 流下機能の確保  
土砂流入による管内閉塞防止

#### 遠心載荷実験

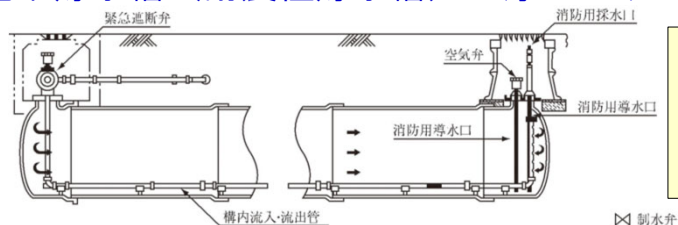
- 数値解析の精度向上
- モデルの妥当性検証

15

15

### 3. 文献調査

#### 地下貯水槽（耐震性貯水槽）の浮上がり



- ✓ 躯体の耐震性に焦点が当てられ、液状化による浮上がり対策に関する検討がされていない。
- ✓ 液状化対策型貯水槽（Co製）を提案し、大型振動台実験により効果を検証。



- ✓ 鋼製やダクタイル鋳鉄製の比較的軽い材質の貯水槽における浮上対策を検討した事例は少ない。
- ✓ 周辺地盤改良や埋戻材による対策、アンカー等による荷重増を今後検討。

2011年東北地方太平洋沖地震における耐震性貯水槽の浮上被害

16

16

### 4. まとめ

#### まとめと考察

- 液状化に伴うマンホールや埋設管路浮上対策は、実験や解析による研究が多く実施されている。
- 埋設管路浮上の対策は確立された手法がない。
- 充水された上水道管路の浮上に関する研究を行った事例はない。
- 埋設管路の浮上挙動の特性について、**管路条件や埋設条件および地震条件等の違い**に着目し、総合的に研究した事例は少ない。
- **地震後（加震後）の管路浮上**にも着目し、解析的な研究を行った事例は少ない。

17

17



## 大型振動台を用いた既設管路の

## 浮上実験と再現解析

〇㈱日水コン

福永 健一

© Copyright Nihon Suido Consultants Co., Ltd.

1

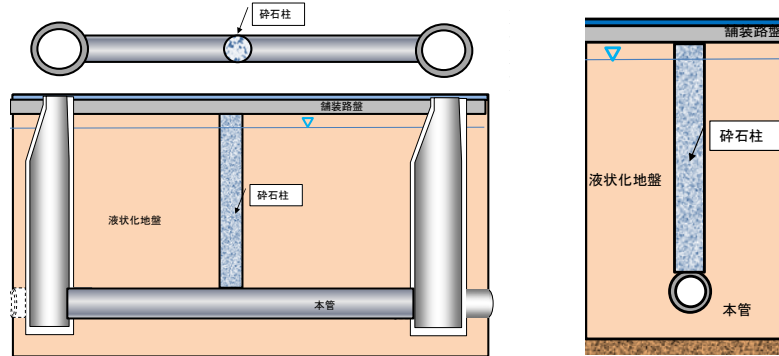
## 目次

1. 研究の目的
2. 実験条件の設定
3. 実験結果
4. 再現解析
5. まとめ

2

## 1. 研究の目的

砕石柱を、数か所既設下水道本管直上に構築し、ドレーン効果等により周辺地盤の液状化防止及び本管の浮上を抑制



対策方法の効果検証、設計条件、設計方法の確立に向けて、模型実験、数値解析を実施する。本研究では**実施した模型実験結果等の概要を報告**する。

3

## 2. 実験条件の設定

### ①対象下水道管路施設

【モデル施設】  $\Phi 500\text{mm}$  ・地下水位: GL-0.25m ・土被り: 2.0m  
 $\Phi 1000\text{mm}$  ・地下水位: GL-0.50m ・土被り: 3.0m

### ②実験施設

振動台 : 搭載可能エリアは12.5 m × 12.5 m  
 土槽寸法: 長さ4.0m × 幅1.0m × 高さ1.5m  
 実験規模: **1/5スケール**の模型を用いた**1G場**とした。

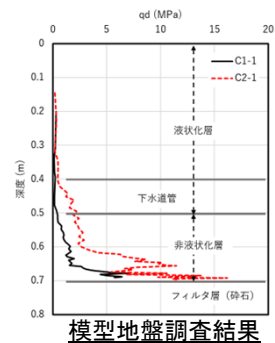
### ③土槽の作成

地盤材料 : **6号硅砂**。ほぼ砂分の単粒径の材料。  
 撒き出し厚: **1層あたり20 cm程度**  
 相対密度 : 液状化層は**相対密度 $D_r=60\%$ 程度**  
                   非液状化層は**相対密度 $D_r=90\%$ 以上**  
 液状化強度 $R_{L20}$ は、0.245、0.493程度

模型地盤飽和後の液状化層のコーン貫入抵抗 $q_d$ は**2~3MPa未満**

### ④砕石柱の造成

砕石柱は、**市販の5号砕石**を使用、粒径の範囲は13~20mm。



模型地盤調査結果

4

## 2.実験条件の設定

### ⑤加振条件

#### 加振条件

加振 No.	適用ケース	加振内容	振動台加速度 (Gal)	備考
1	Case1-1, Case1-2	正弦波 (5Hz, 20波)	62.0	入力波は5Hzの正弦波とし、漸増部(2 s)、定常部(4 s)および漸減部(2 s)で構成される計8 sの波が用いた。
2		正弦波 (5Hz, 20波)	110.0	
3		正弦波 (5Hz, 20波)	163.5	
4		正弦波 (5Hz, 20波)	226.9	
5		正弦波 (5Hz, 20波)	257.7	
6		正弦波 (5Hz, 20波)	312.9	
7		正弦波 (5Hz, 20波)	590.7	
8	Case2-1, Case2-2	正弦波 (5Hz, 20波)	106.1	無対策モデルの浮き上がり確認をもって加振終了とした。 砕石柱の限界を見極めることを目的とした。
9	Case2-1, Case2-2	正弦波 (5Hz, 継続時間87s, 435波)	113.0	
10	Case2-1, Case2-2	正弦波 (5Hz, 継続時間180s, 900波)	401.2	

### ⑥計測項目

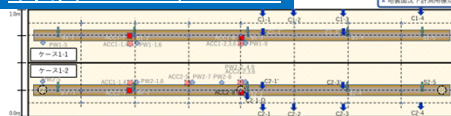
加速度計(ACC), 間隙水圧計(PW)および変位計(S)を模型地盤および下水道管モデルに設置し計測した。

5

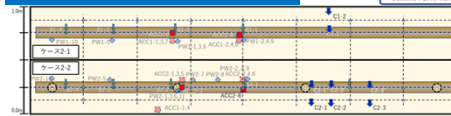
## 2.実験条件の設定

### ⑦模型実験の断面・平面図

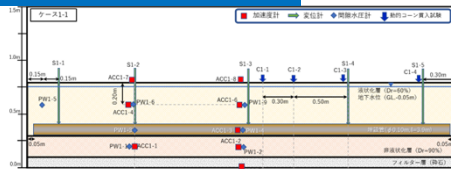
平面図Case1-1, Case1-2



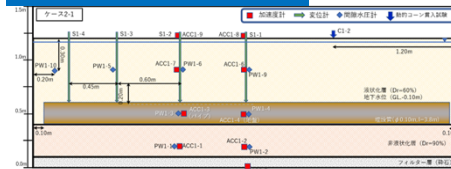
平面図Case2-1, Case2-2



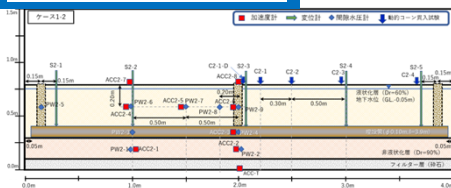
断面図Case1-1(対策無し)



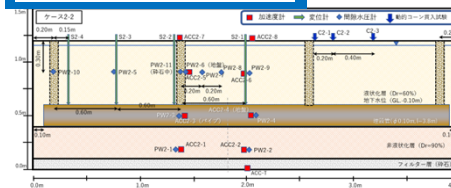
断面図Case2-1(対策無し)



断面図Case1-2(対策有り)



断面図Case2-2(対策有り)

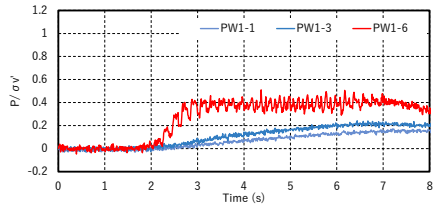


6

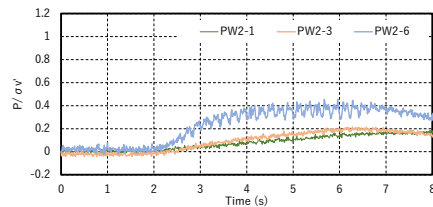
### 3.実験結果 ①過剰間隙水圧比の時系列

【150Gal】

<砕石柱なし>

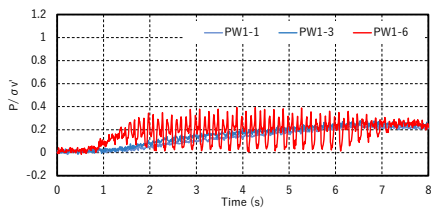


<砕石柱あり>

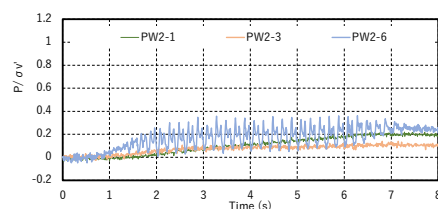


【250Gal】

<砕石柱なし>



<砕石柱あり>

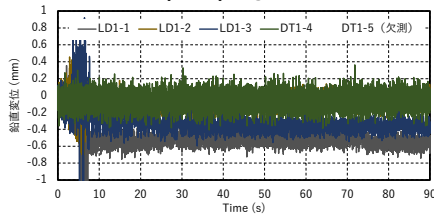


7

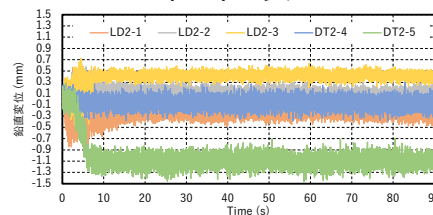
### 3.実験結果 ②変位の時系列

【150Gal】

<砕石柱なし>

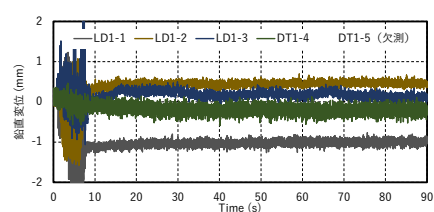


<砕石柱あり>

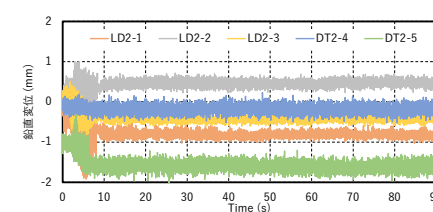


【250Gal】

<砕石柱なし>



<砕石柱あり>



8

### 3.実験結果 ⑥目視による状況確認

#### ①土槽の状況

起震前は、土槽の地表面部は水が浮く状態は確認されていないが、起震により過剰間隙水圧が上昇し、**土中の水が碎石柱等を通して地表面に排水**される様子が実験中確認できた。



(a)起震前 (b)起震終了時  
土槽の状況

#### ②碎石柱の状況

碎石柱の拘束力が低下することによって、地震動等で碎石柱がバラバラに分散することが危惧されていたが、碎石の間隙部に多くの砂が流入し目詰まりしている状態であるが、**碎石柱は所定の形状を保っており、碎石柱を露出しても自立**することが確認された。



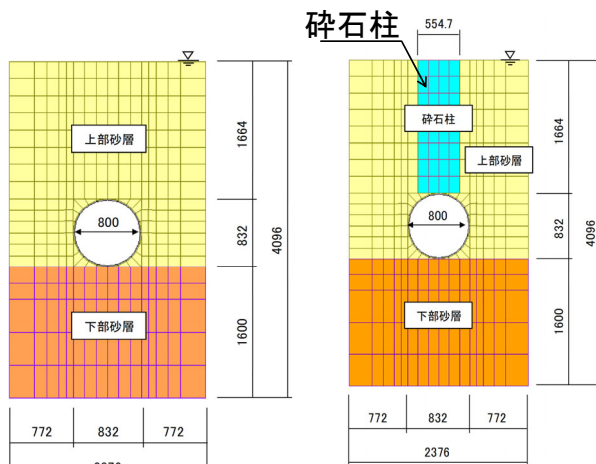
実験終了後の碎石柱の状況(写真はCase1実験時のもの)

9

### 4.再現解析

#### 解析モデル・解析ケース

【自重解析+動的解析+圧密解析】

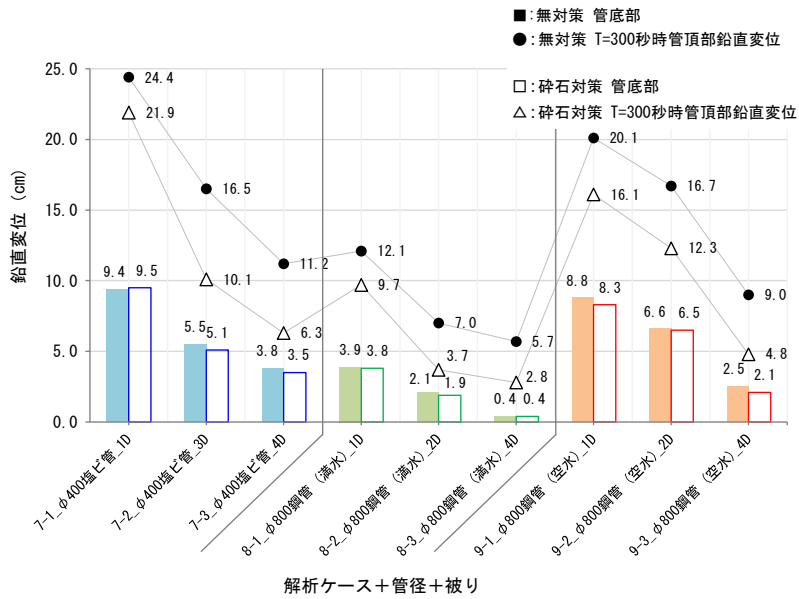


(e) φ800鋼管・土被り2Dモデル

解析ケース	管径	土被り	側方境界条件	加振方向	採用振動数 F(Hz)
1-1		1D			8.0
1-2		3D	等変位	水平	5.0
1-3	φ400 塩ビ管	4D			4.0
1-4		1D	鉛直ローラー		8.0
1-5		1D	等変位	水平+鉛直	8.0
2-1		1D			4.0
2-2		2D	等変位	水平	3.0
2-3	φ800鋼管 (満水)	4D			2.0
2-4		1D	鉛直ローラー		4.0
2-5		1D	等変位	水平+鉛直	4.0
3-1		1D			4.0
3-2		2D	等変位	水平	3.0
3-3	φ800鋼管 (空水)	4D			2.0
3-4		1D	鉛直ローラー		4.0
3-5		1D	等変位	水平+鉛直	4.0
4-1		1D			4.0
4-2		3D	等変位	水平	4.0
4-3	φ400 塩ビ管	4D			4.0
4-4		1D	鉛直ローラー		4.0
4-5		1D	等変位	水平+鉛直	4.0
5-1		1D			4.0
5-2		2D	等変位	水平	4.0
5-3	φ800鋼管 (満水)	4D			4.0
5-4		1D	鉛直ローラー		4.0
5-5		1D	等変位	水平+鉛直	4.0
6-1		1D			4.0
6-2	φ800鋼管 (空水)	2D	等変位	水平	4.0
6-3		4D			4.0
6-4		1D	鉛直ローラー		4.0
6-5		1D	等変位	水平+鉛直	4.0
7-1		1D			5.0
7-2	φ400 塩ビ管	3D	等変位	水平	5.0
7-3		4D			5.0
7-4		1D	鉛直ローラー		5.0
7-5		1D	等変位	水平+鉛直	5.0
8-1		1D			5.0
8-2	φ800鋼管 (満水)	2D	等変位	水平	5.0
8-3		4D			5.0
8-4		1D	鉛直ローラー		5.0
8-5		1D	等変位	水平+鉛直	5.0
9-1		1D			5.0
9-2	φ800鋼管 (空水)	2D	等変位	水平	5.0
9-3		4D			5.0
9-4		1D	鉛直ローラー		5.0
9-5		1D	等変位	水平+鉛直	5.0

10

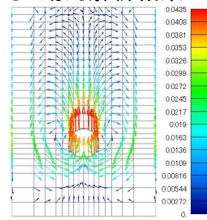
# 4.再現解析



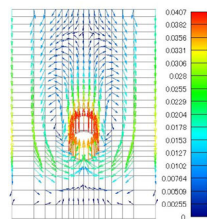
11

# 4.再現解析

## ○ 動的解析結果



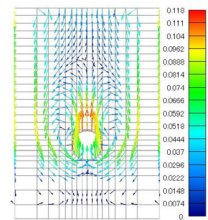
(a) 無対策



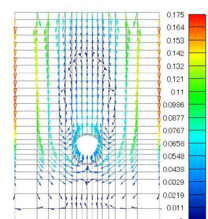
(b) 碎石柱

図 変形図 (動的解析: t=30s)

## ○ 圧密解析結果



(a) 無対策



(b) 碎石柱

図 変形図 (圧密解析: t=300s)

12

## 5.まとめ

### 【浮上実験】

- ①管きよが浮上する現象は確認できなかった。
- ②計測された過剰間隙水圧比は0.4程度であった。
- ③砕石柱の有無により結果に大きな違いは確認されなかった。
- ④起震終了時における土槽の状況は、起震により過剰間隙水圧が上昇し、土中の水が地表面に排水される様子が確認できた。
- ⑤実験完了後の砕石柱は、間隙部に多くの砂が流入し目詰まりしているが、砕石柱は所定の形状を保っており、自立することが確認された。

### 【再現解析】

- ①砕石柱有りとしても浮上量を無くすような効果は確認されない。
- ②砕石柱無しと比較して、浮上量は小さくなるため、浮上抑制効果は得られる。
- ③対策の効果が現れるのは、地震後の圧密解析時であり、過剰間隙水圧の消散を促すことによる効果は確認される。
- ④土被りが大きくなると浮上量軽減効果がやや大きく現れるようになる。土被りが3Dや4Dの場合、浮上量は半分程度に低下する。
- ⑤大口径の場合は、管自体が浮上しやすく、土被りが1Dでも土被り量としては大きく、効率的な効果が期待できる可能性がある。



# 遠心載荷模型実験による 埋設管路の浮上実験

関西大学 環境都市工学部都市 システム工学科  
飛田哲男

## 研究の背景

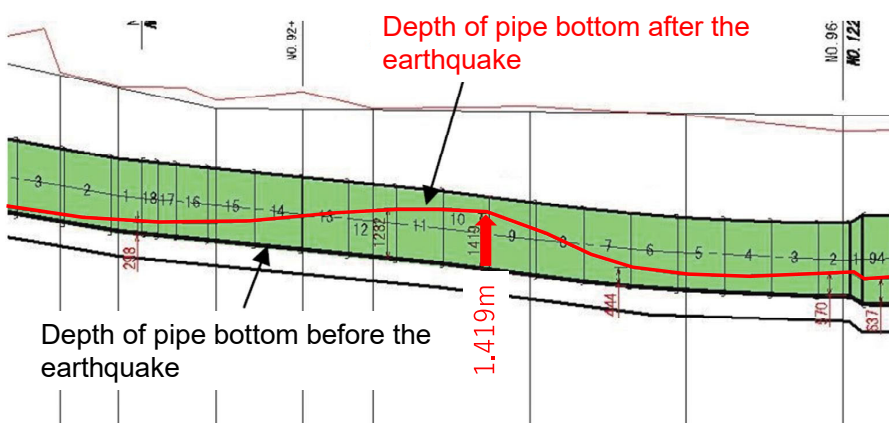


Fig. 33 矢吹南第2幹線分水工周辺 (Fig.30) の縦断面図 (赤: 地震後の位置, 単位 mm, Longitudinal profile at the point of fig.30



Fig. 37 不陸により滞水しているパイプ (矢吹南工区)  
Stagnant water due to unevenness of pipe at Yabukiminami subsection

(有吉他, 2012)

## 研究の目的

管路の浮上対策については有効な工法がない

⇒管路の浮上量を最小限にするため、対策工法を提案する

- ・グラベルドレーン工法(砕石柱による過剰間隙水圧抑制) (2022年度)
- ・おもりによる浮上抑制 (2023年度)

## 目的(2022年度)

遠心力載荷模型実験により、

- ・液状化により管路が浮上することを確認
- ・トレンチ幅と管路浮上量の関係を調べる
- ・砕石柱による浮上抑制効果の確認

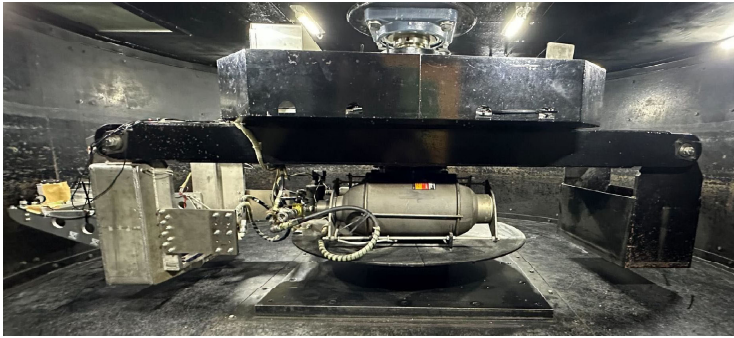
縮尺1/50の模型

50Gの遠心場

遠心模型実験における相似則

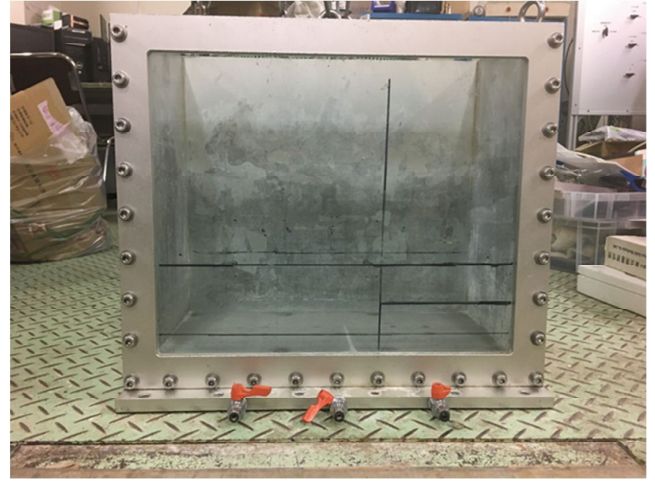
項目	実物	模型
密度	1	1
長さ	1	1/N
変位	1	1/N
速度	1	1
加速度	1	N
重力加速度	1	N
質量	1	1/N <sup>3</sup>
力	1	1/N <sup>2</sup>
応力	1	1
ひずみ	1	1
時間(動的)	1	1/N
時間(静的)	1	1/N <sup>2</sup>

実験装置



関西大学所有のビーム型遠心力载荷装置

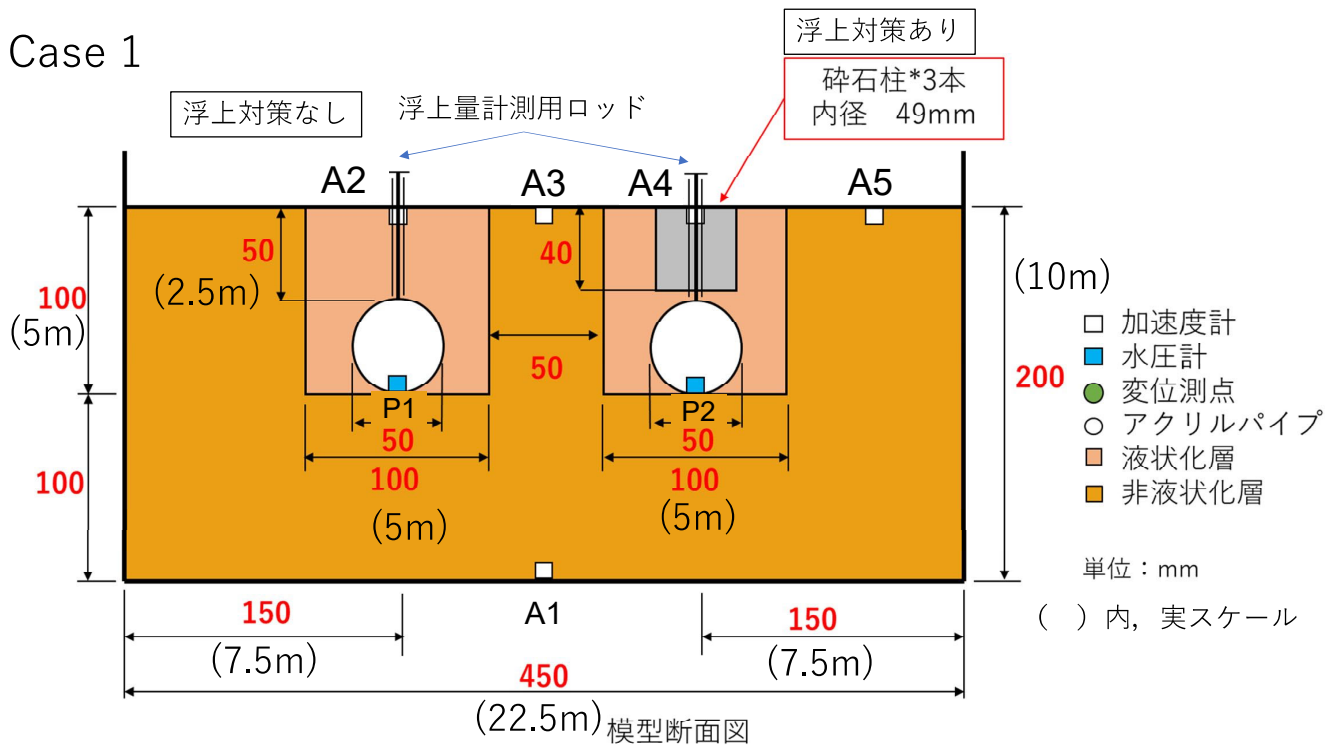
半径：1.5m

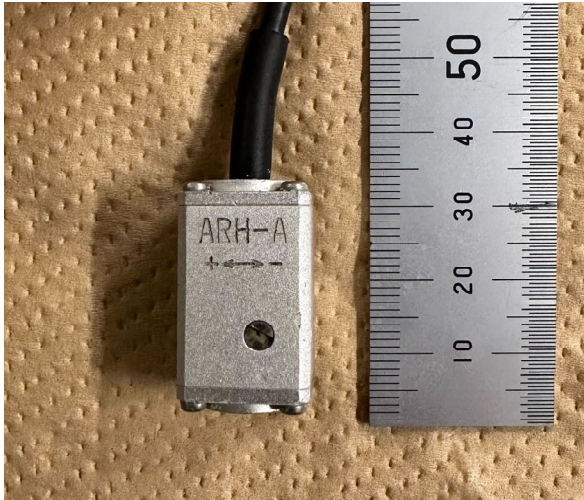


土槽

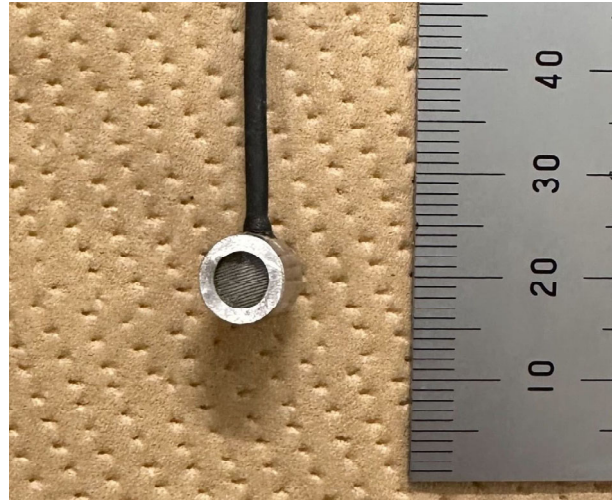
幅：450mm  
高さ：400mm  
奥ゆき：200mm

Case 1





加速度計(東京測器研究所：ARH-200A)



水圧計(SSK製：P310-A)

使用した模型



模型管路	長さmm	内径mm	体積mm <sup>3</sup>	質量g	みかけ密度g/cm <sup>3</sup>
対策なし	180	48	353429	73	0.21
対策あり	180	48	353429	71	0.20

原地盤に使用した砂

トレンチ内の砂	豊浦標準砂
最大間隙比 $e_{max}$	0.989
最小間隙比 $e_{min}$	0.614
土粒子密度 $G_s(g/cm^3)$	2.656

条件

非液化化層  
 液化化層  
 砕石柱  
 Dr90%  
 Dr40%  
 珪砂3号



## 粘性流体作成

メトローズ(90SH-100,信越化学)を用いて, 水の粘性の50倍の50cStの溶液を作成  
2%溶液, 100cSt ⇒ 少しずつ水を加え, 50cStの粘性流体を作成



粘度計測器  
(株)アタゴ製: VISCO, VISCO-895)

## 実験の手順

模型・粘性流体作成

飽和

圧密(5分)

加振



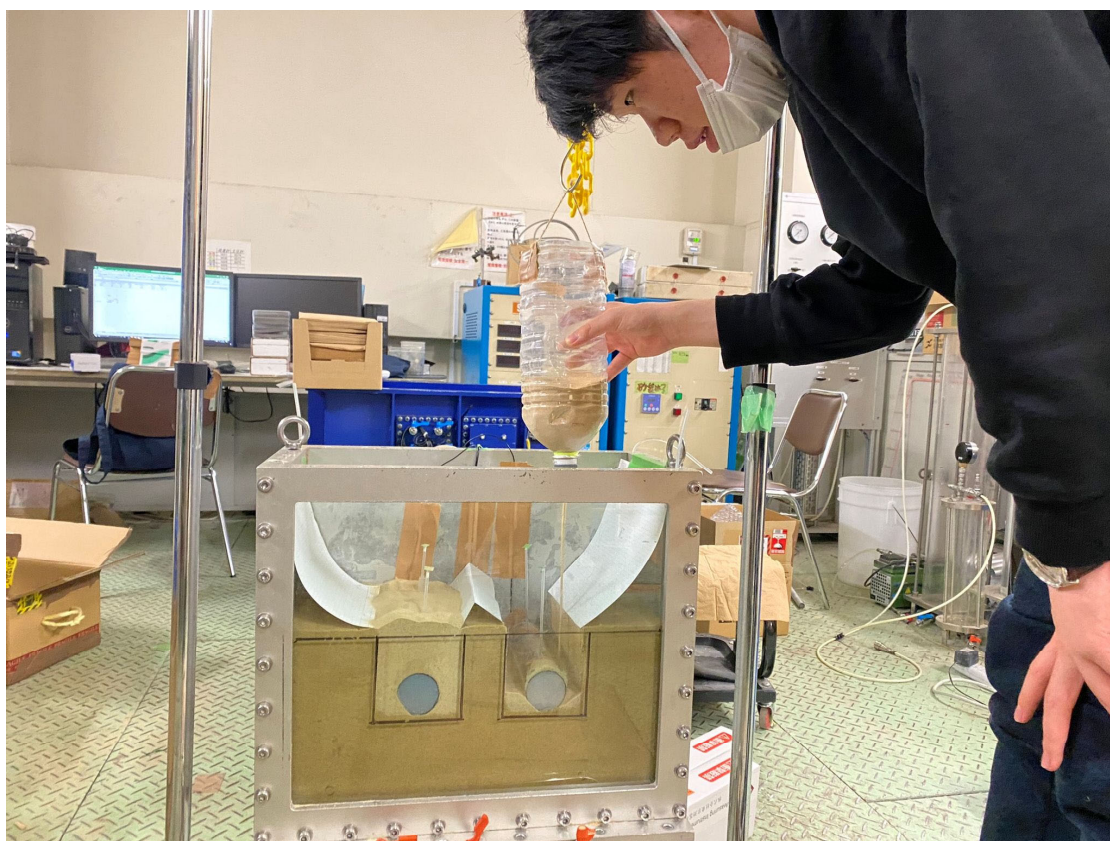
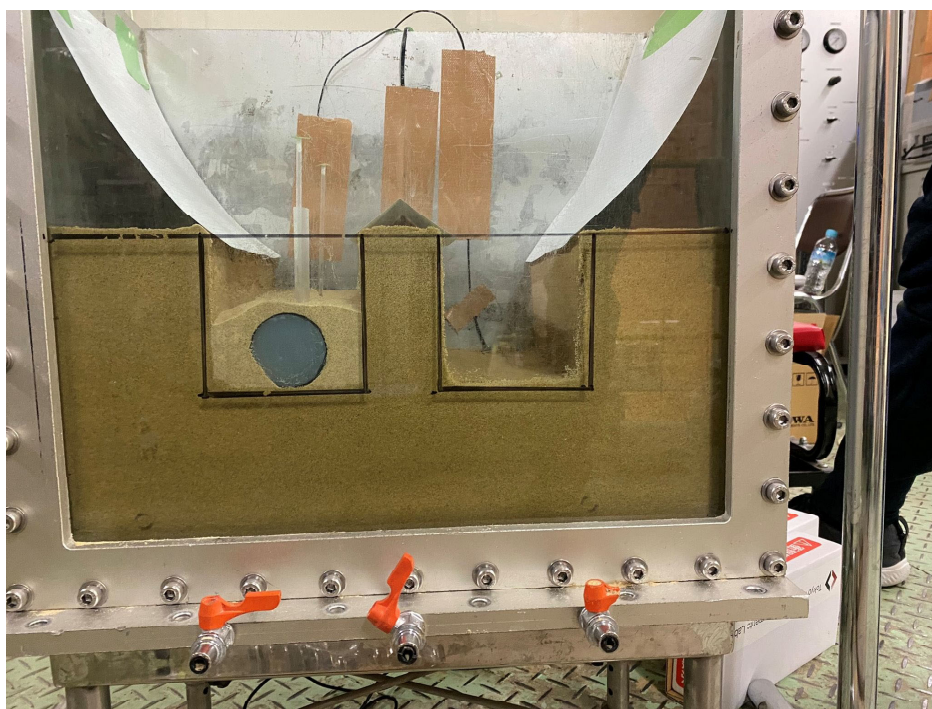
飽和



加振後

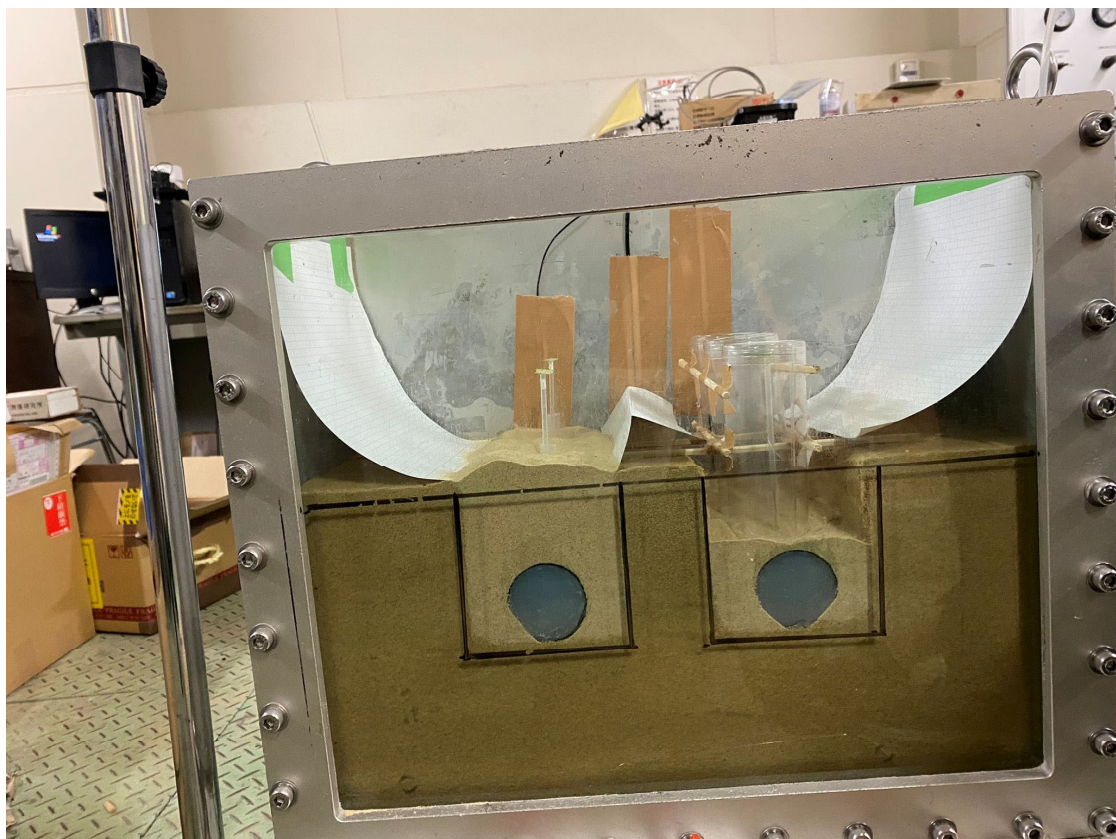
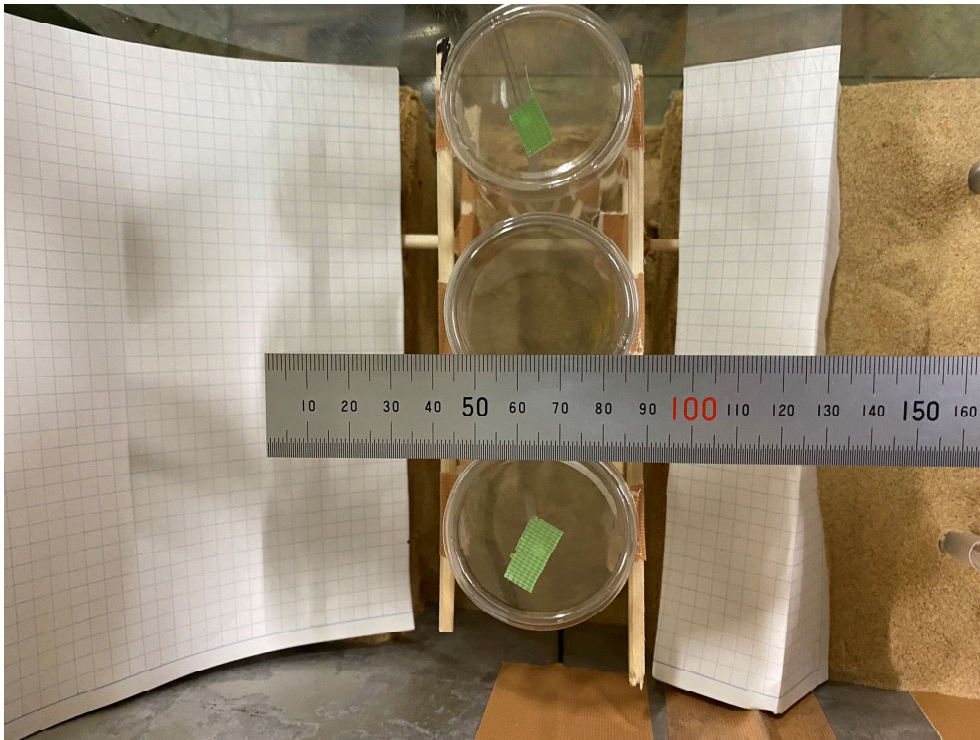


あらかじめトレンチの大きさのスチレンフォームを設置し、トレンチを作成  
トレンチ内に空中落下法により緩詰地盤を作成

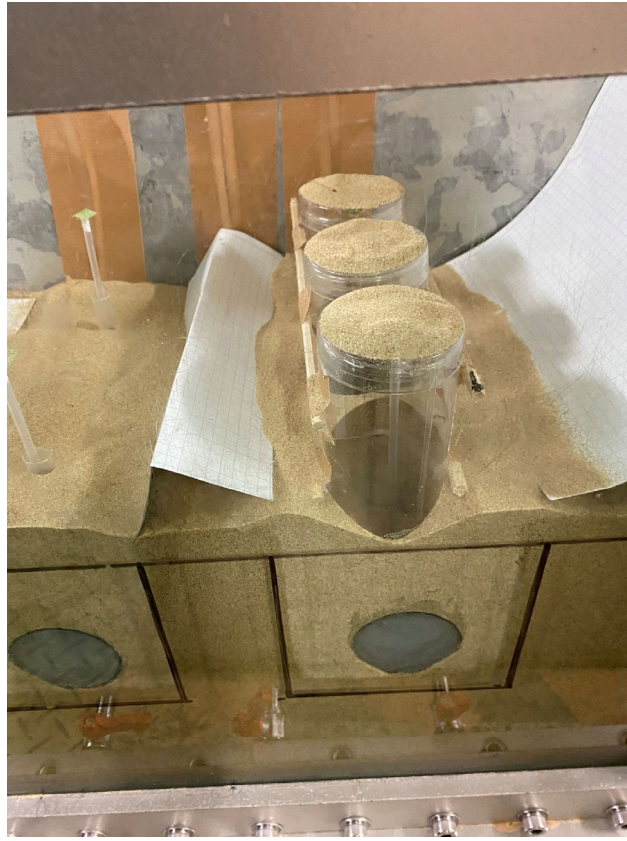




碎石柱を作成するための型枠（直径50mmの亚克力円柱）を管路の上部に設置

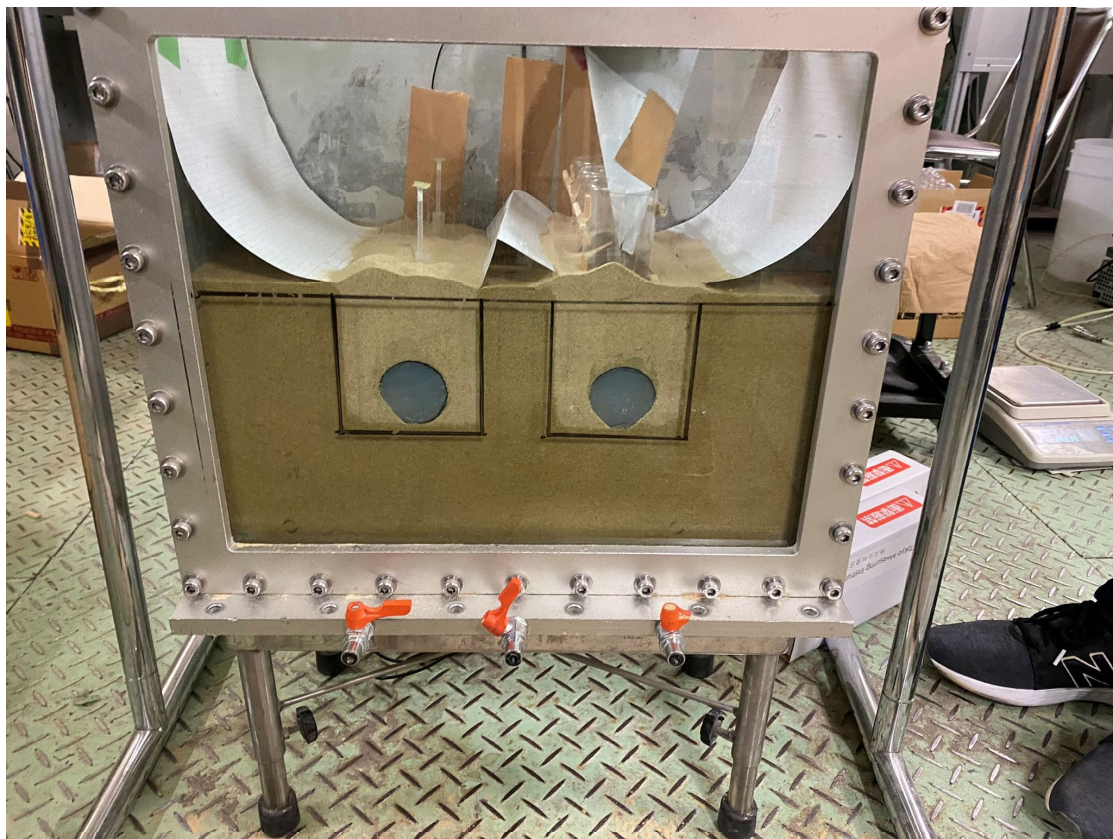




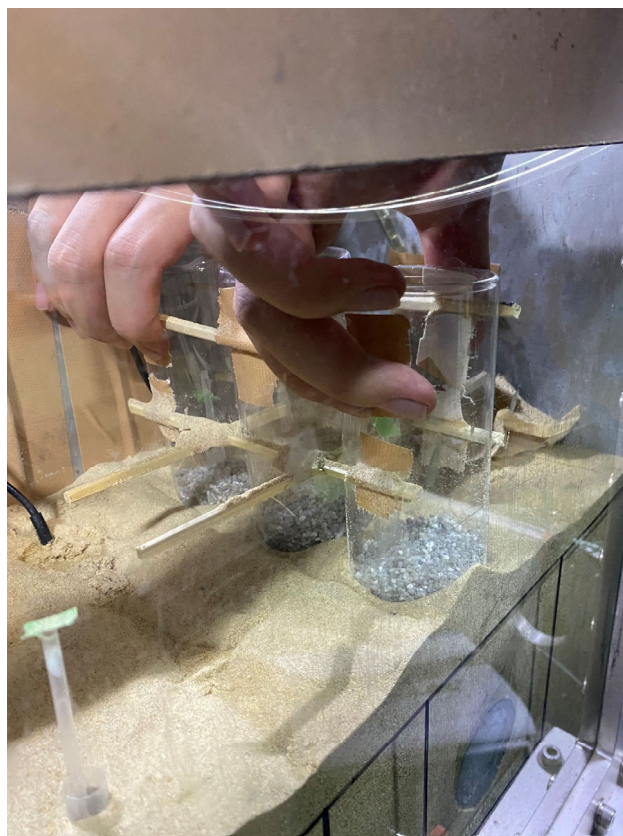


碎石柱の投入  
締固めはしない



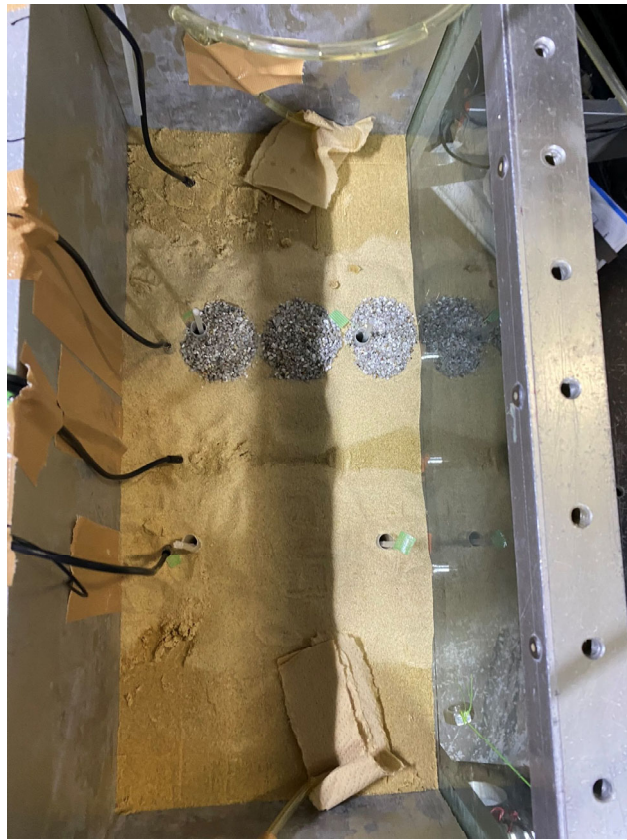


碎石柱の型枠撤去

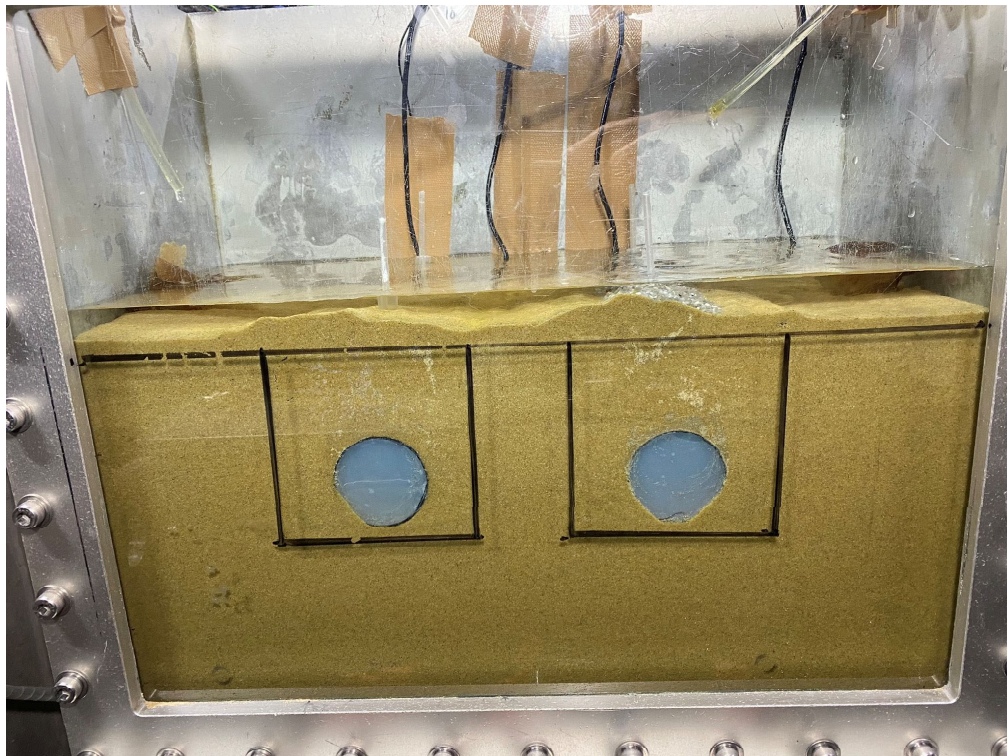




間隙流体を地表面から滴下



飽和地盤の作成完了

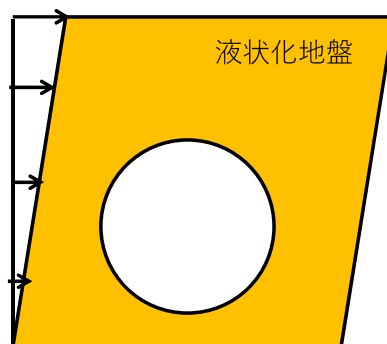


## 実験ケース

実験ケース	トレンチ幅m	管路下 液状化層厚m	砕石柱高さm	砕石柱 1本あたり質量kg	間隙流体	加振時間(s)
Case1	5.0	0	2.0	21500	水	<b>30</b>
Case2	5.0	0	1.5	18708	水	
Case3	5.0	1.0	1.0	6167	メトローズ	<b>200</b>
Case4	5.0	1.0	1.0	11000	メトローズ	
Case5	考慮しない	1.0	1.0	10708	メトローズ	
Case6	考慮しない	1.0	1.5 (砕石柱を固化)	12071	メトローズ	

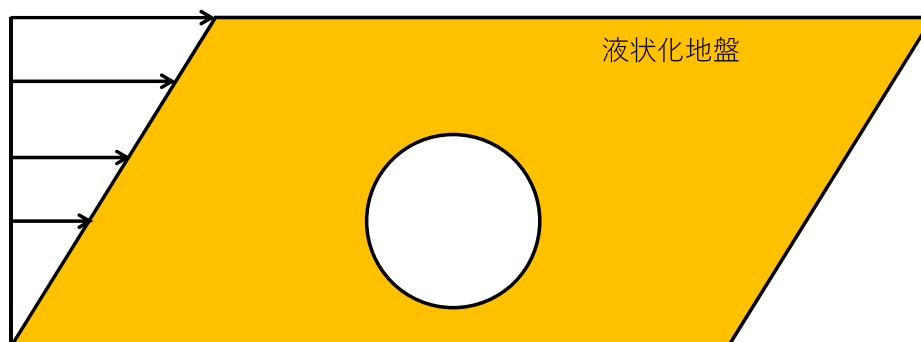
トレンチを考慮した場合、ほとんど浮上しなかった！

トレンチ幅：狭い

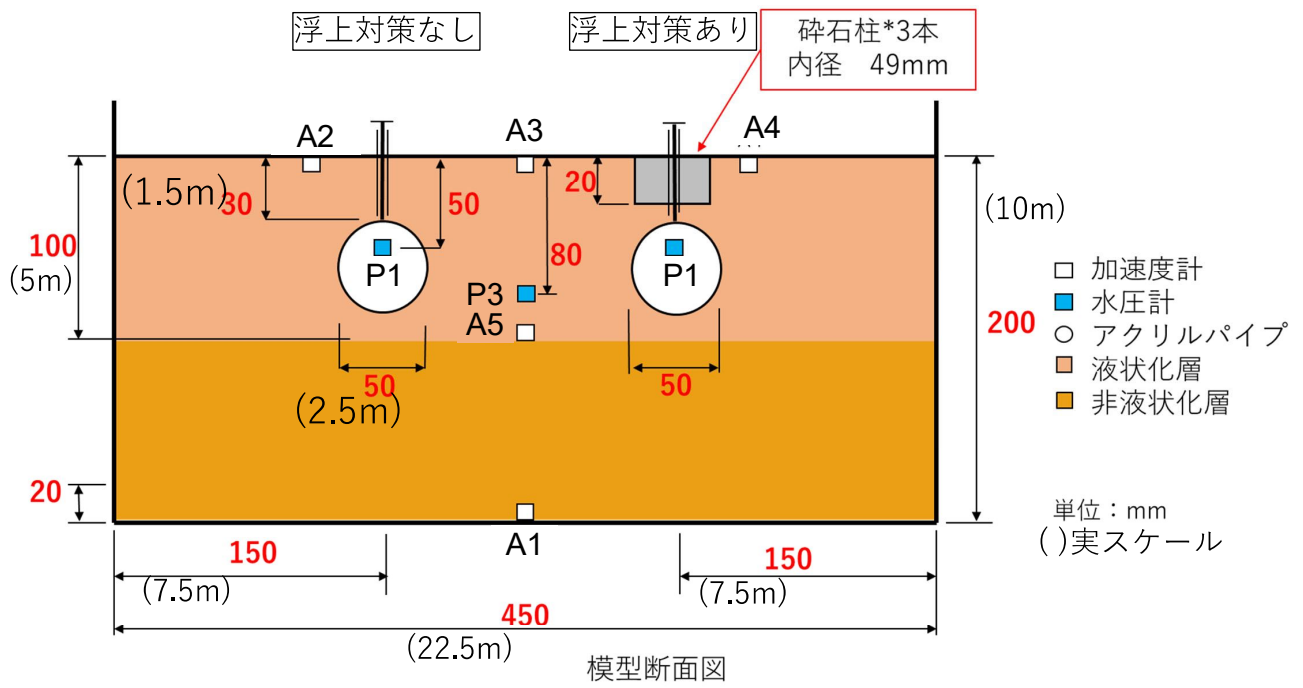


トレンチによりせん断変形  
が拘束される  
→液状化は発生しにくい

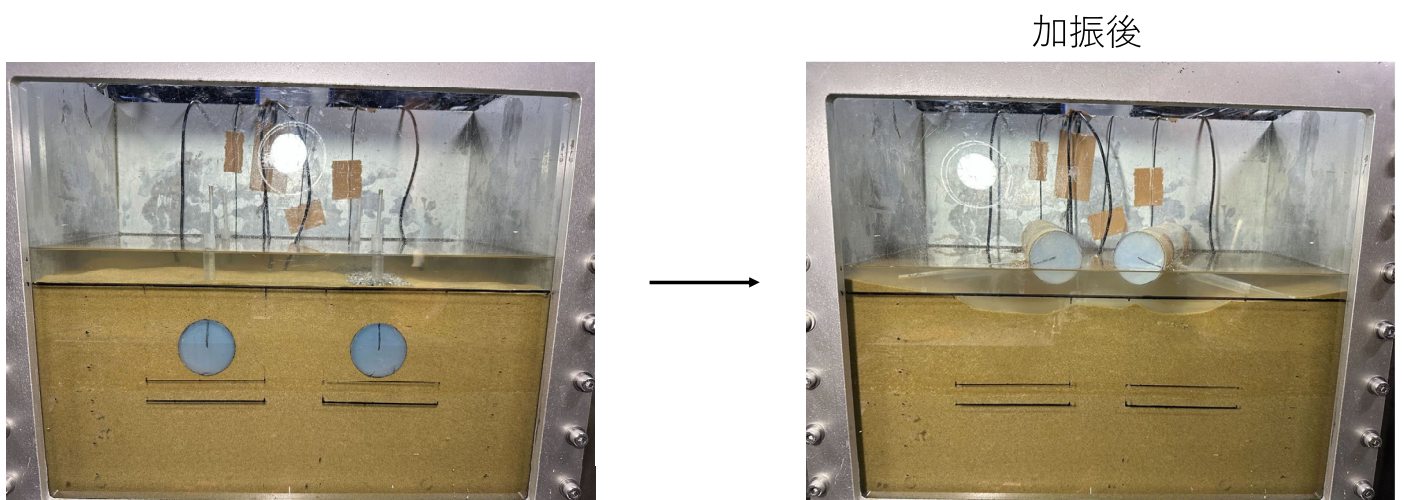
トレンチ幅：広い



Case 5



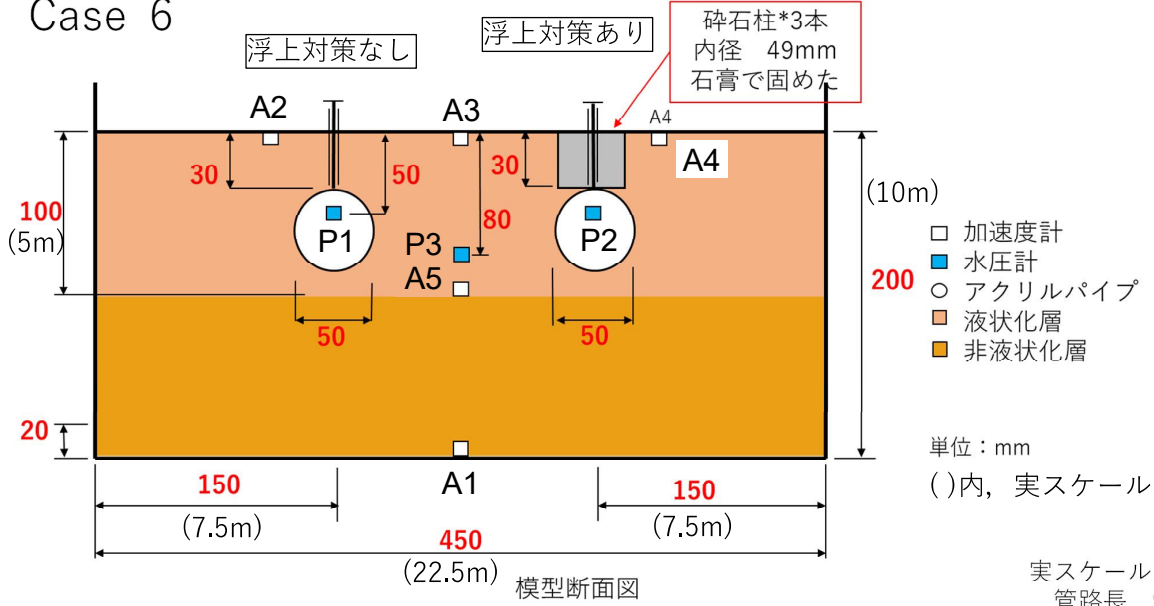
Case 5



トレンチがない場合、管路は完全に浮上した

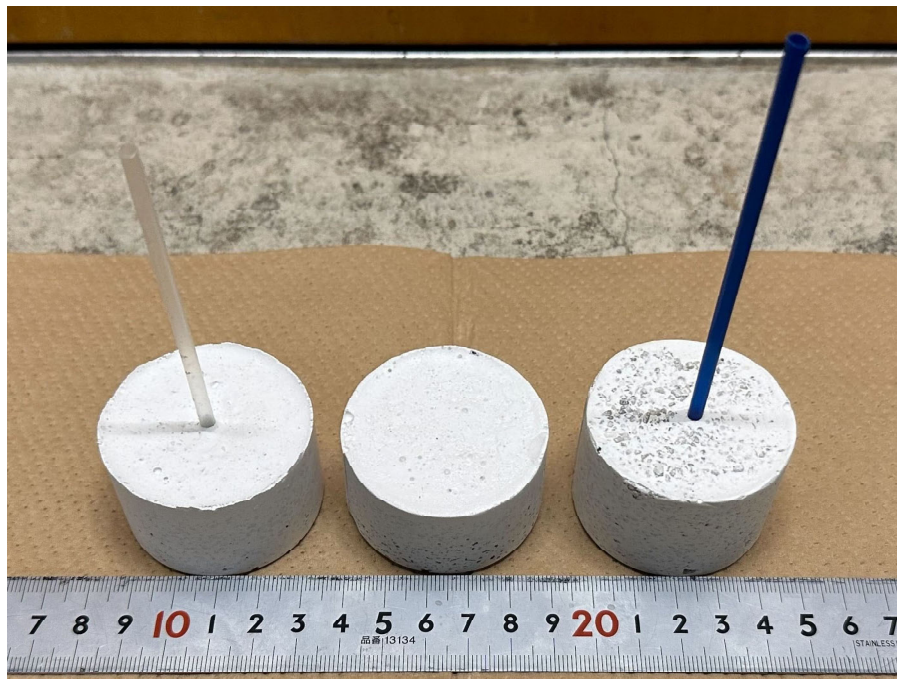


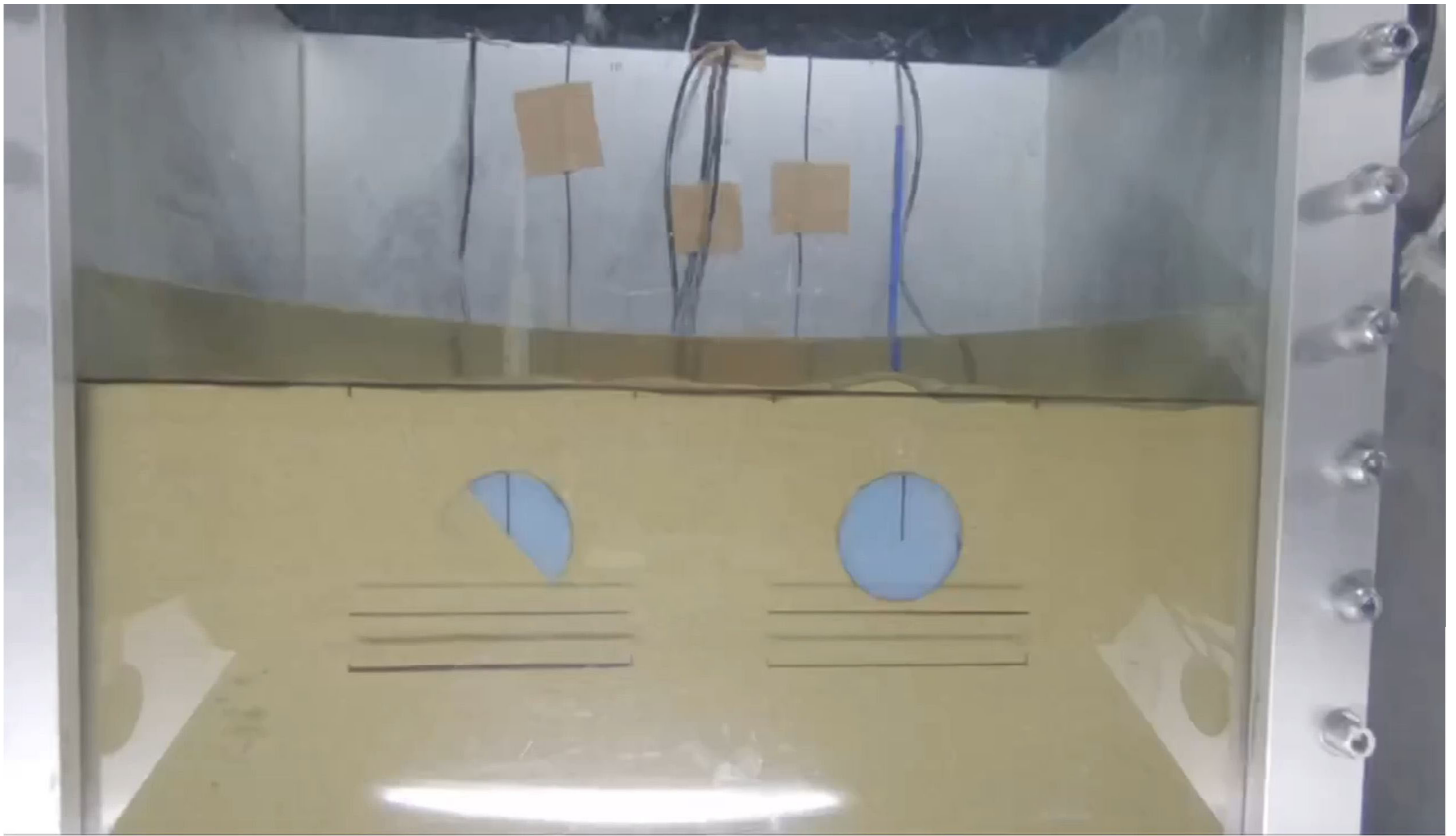
# Case 6



レキと石こうを  
混ぜて固めた

密度  
 レキ+石こう 1.72g/cm<sup>3</sup>  
 レキのみ 1.50g/cm<sup>3</sup>

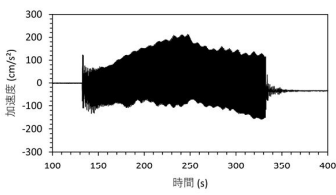




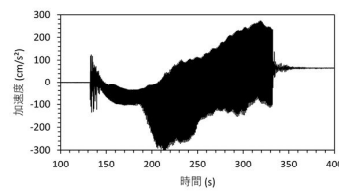
Case5

加速度-時刻歴

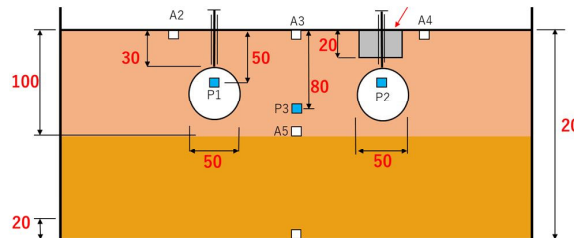
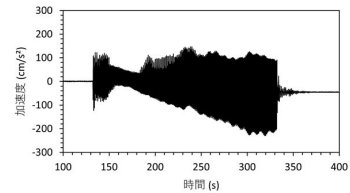
A2 : 対策なし



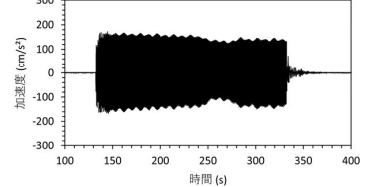
A3 : 液状化地盤



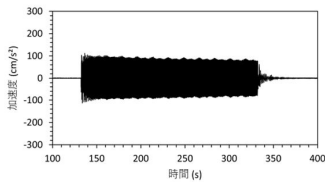
A4 : 対策あり



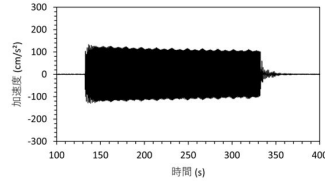
A5 : 液状化地盤底部



Input : 振動台天板

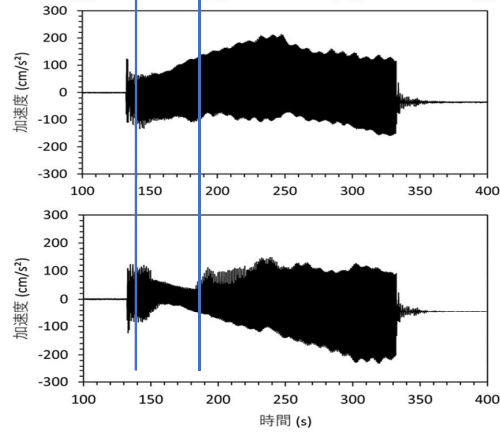
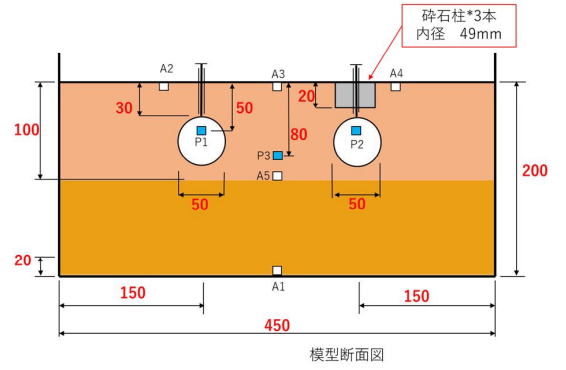
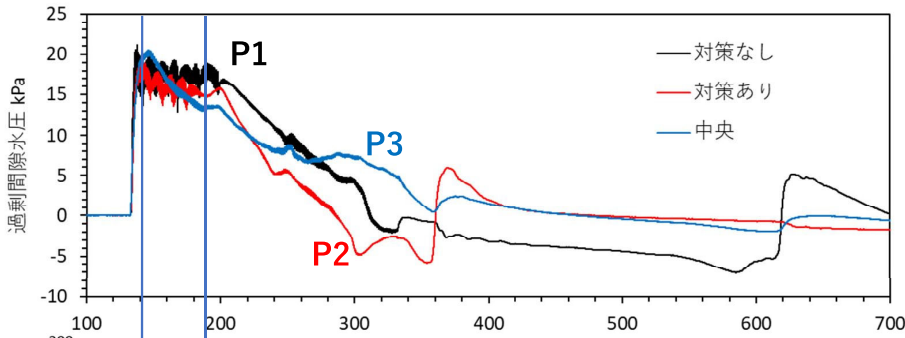


A1 : 模型地盤底部





# Case 5



A2 : 対策なし

加速度振幅が減衰⇒液状化

過剰間隙水圧の上昇したとき、完全な浮上

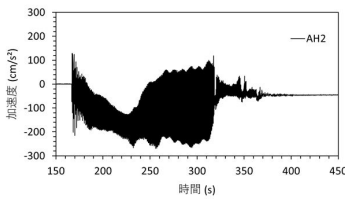
P2(対策あり)の方が早く浮上

A4 : 対策あり

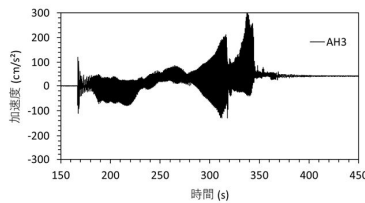
# Case6

## 加速度-時刻歴

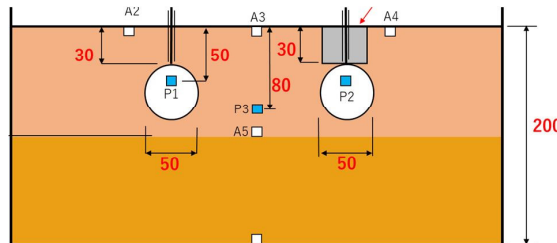
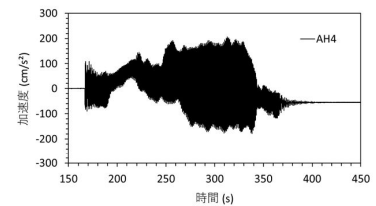
A2 : 対策なし



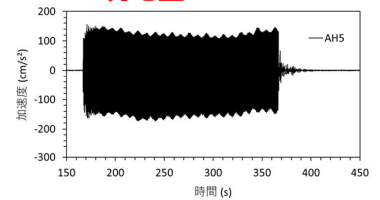
A3 : 液状化地盤



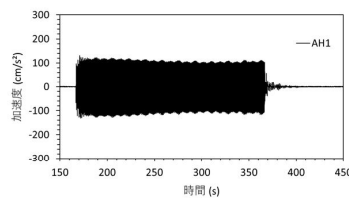
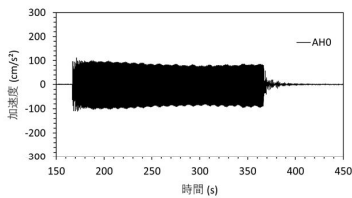
A4 : 対策あり



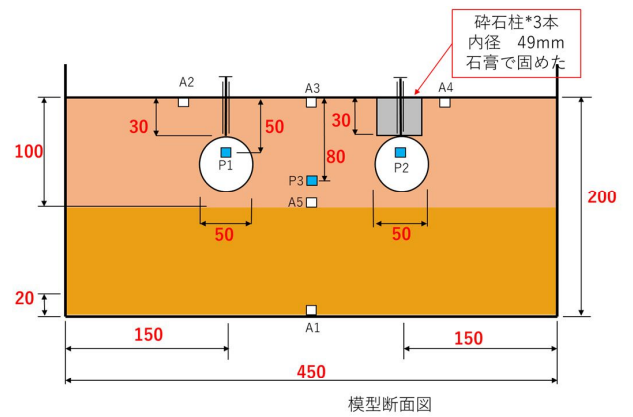
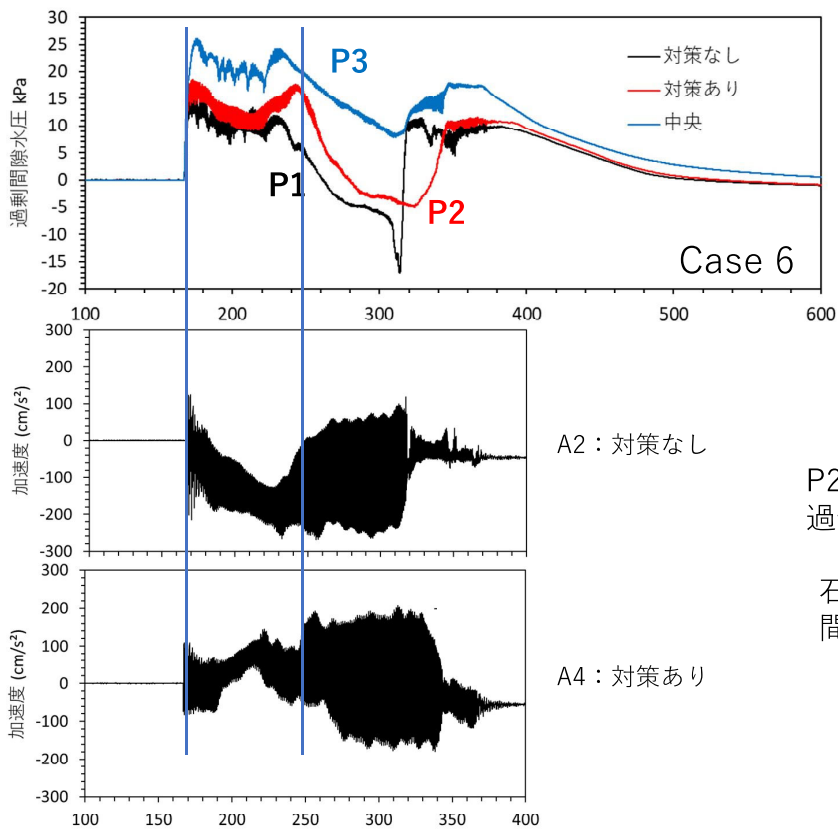
A5 : 現地盤



Input : 振動台天板



A1 : 模型地盤底部



P2(対策あり)の方が  
過剰間隙水圧が消散し始めるのが遅い

石こうで固めたため、砕石柱中の間隙がない  
間隙水が地表面に逃げ出せなかった

### 管路の浮上量 まとめ

先に浮上

管路浮上量(cm)	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
対策なし	14.2	<u>20.0</u>	58.3	59.6	完全に浮上	<u>完全に浮上</u>
対策あり	<u>20.8</u>	3.3	<u>完全に浮上</u>	<u>91.6</u>	完全に浮上	完全に浮上

—— 浮上量大きい方

## 2022年度のまとめ

本研究では埋設深度1.5m，管路直径2.5m，見かけの密度 $0.21\text{g/cm}^3$ の管路に対し，高さ1~1.5mの砕石柱3本の効果について検討

Case 3と4：過剰間隙水圧は「対策なし」の方が早く消散

浮上量は「対策あり」の方が大きい。

Case 5：過剰間隙水圧は「対策あり」の方が早く消散

トレンチの有無が管路の浮上に影響する。

Case 6：過剰間隙水圧は「対策なし」の方が早く消散

## 2022年度のまとめ

- ・ トレンチの有無が管路の浮上に影響することがわかった。
- ・ 砕石柱は過剰間隙水圧の消散に多少寄与することがわかった。
- ・ 砕石柱の剛性が小さく，管路の浮上を抑えることができなかった。  
⇒ 砕石柱に代えて透水性のない石こうを用いた場合，多少の浮上抑制効果は得られたが，おもりとして作用したものと推察される。(Case6)

そこで，2023年度は，おもりの効果を検証することとした。

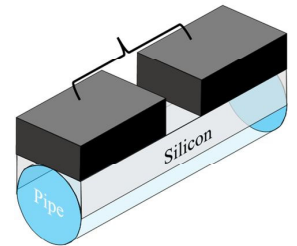
## Cases of centrifuge model tests (2023)

Case	Countermeasure	Pipe depth (m)	Note
1	Stone column	2.5	Verification of preliminary research.
2	Added weight	2.5	
3		3.0	
4		3.5	

Installation of the stone column

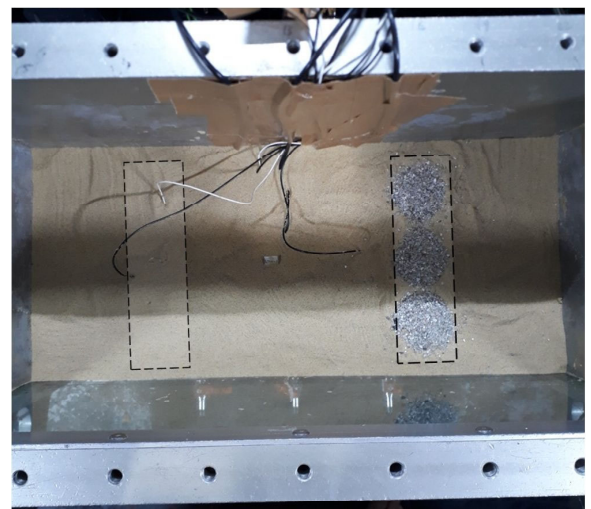
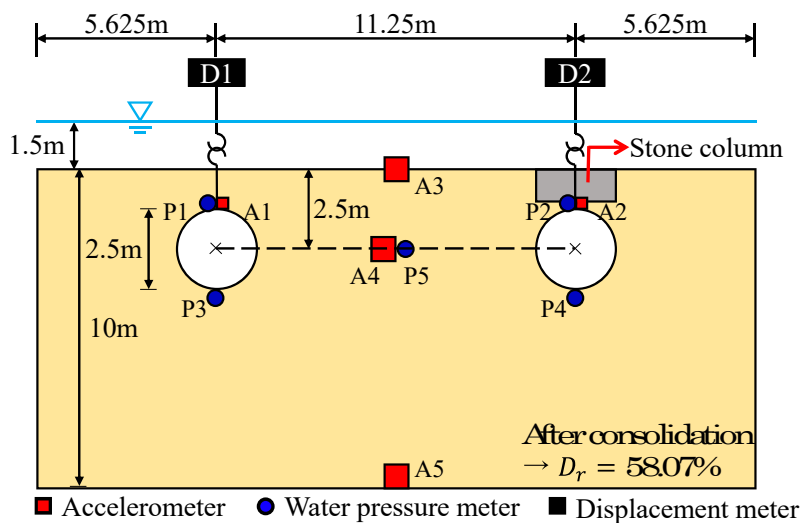


Added weight (578 g = 8 times of pipe weight)



## Centrifuge mode (Case 1)

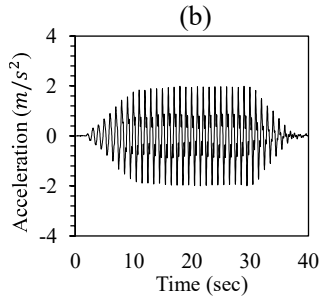
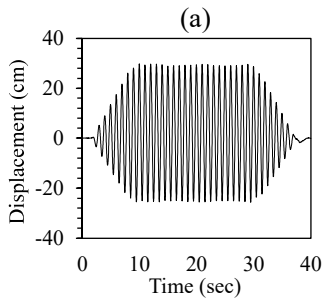
(Centrifugal acceleration: 50G)



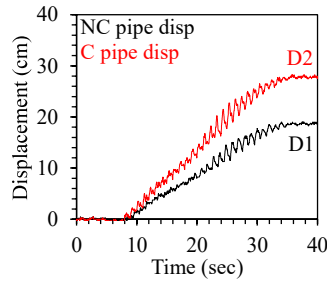
Top view

2023年度は巻き取り式変位計を使い、加振中の浮上変位を計測した。

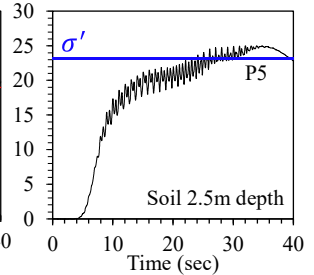
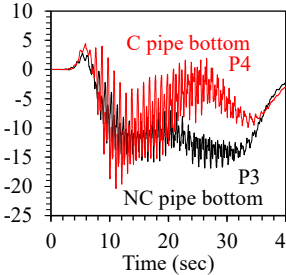
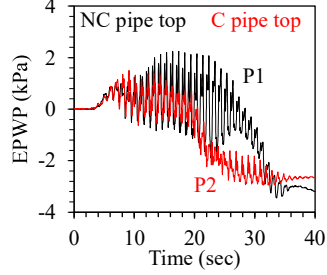
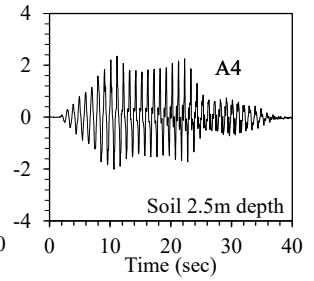
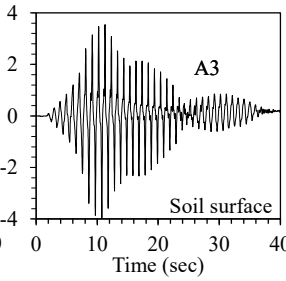
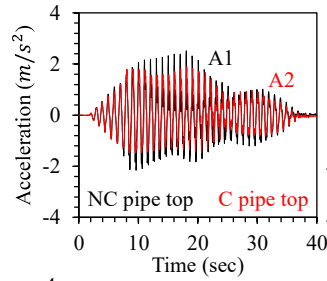
# Case 1



Input motion (Prototype scale)  
(a) Displacement, (b) Acceleration



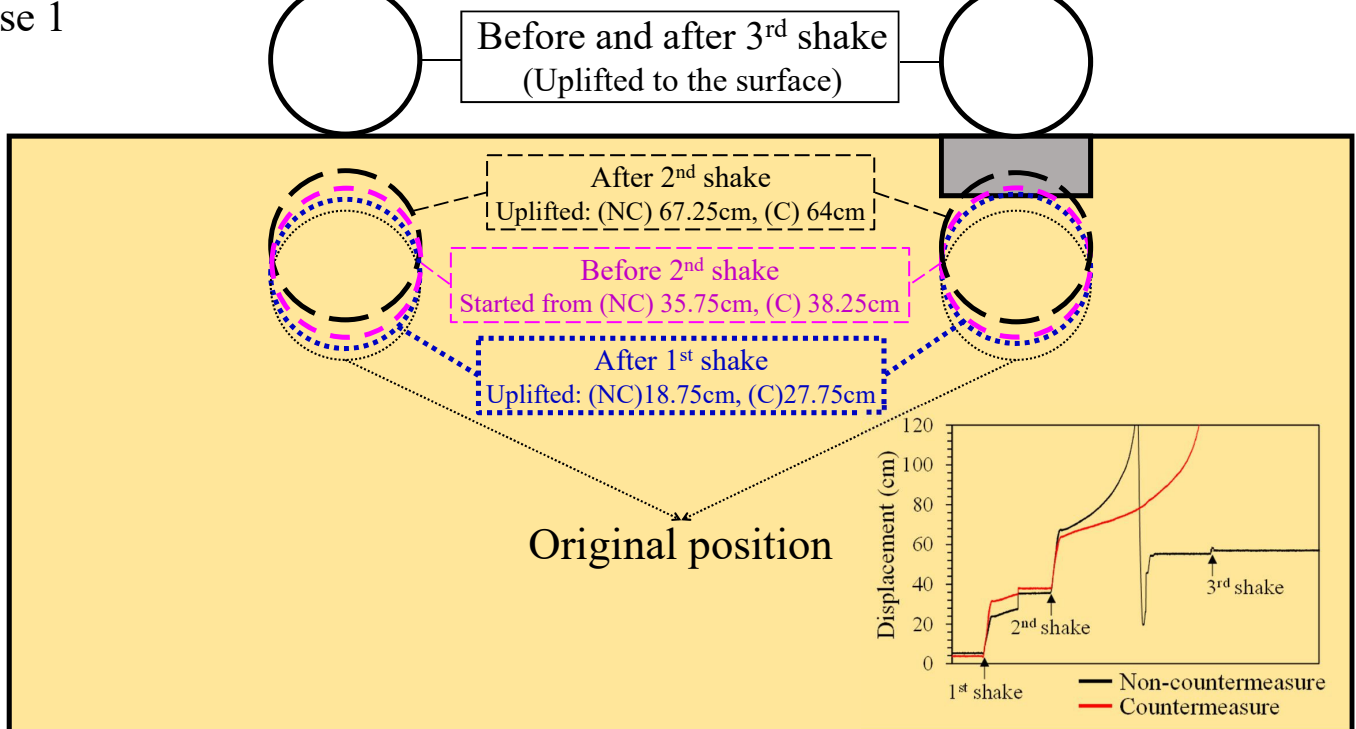
NC: Non-countermeasure  
C: Countermeasure



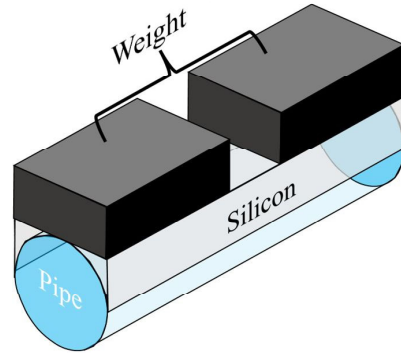
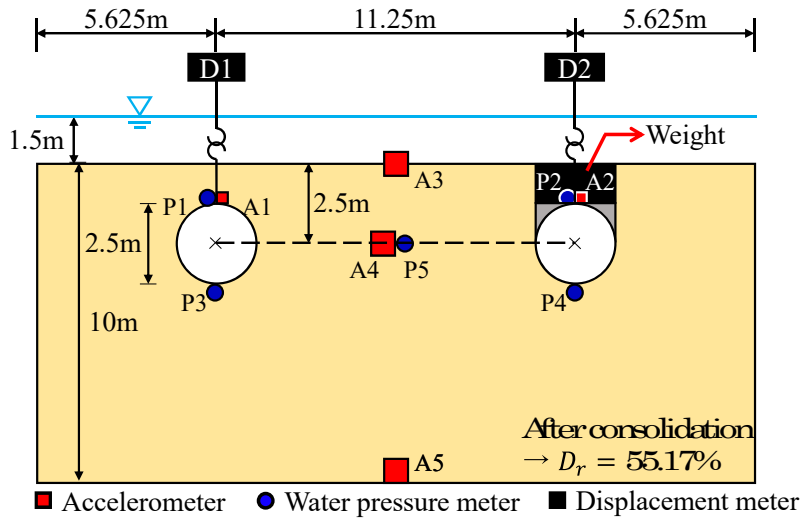
# Case 1

対策なし

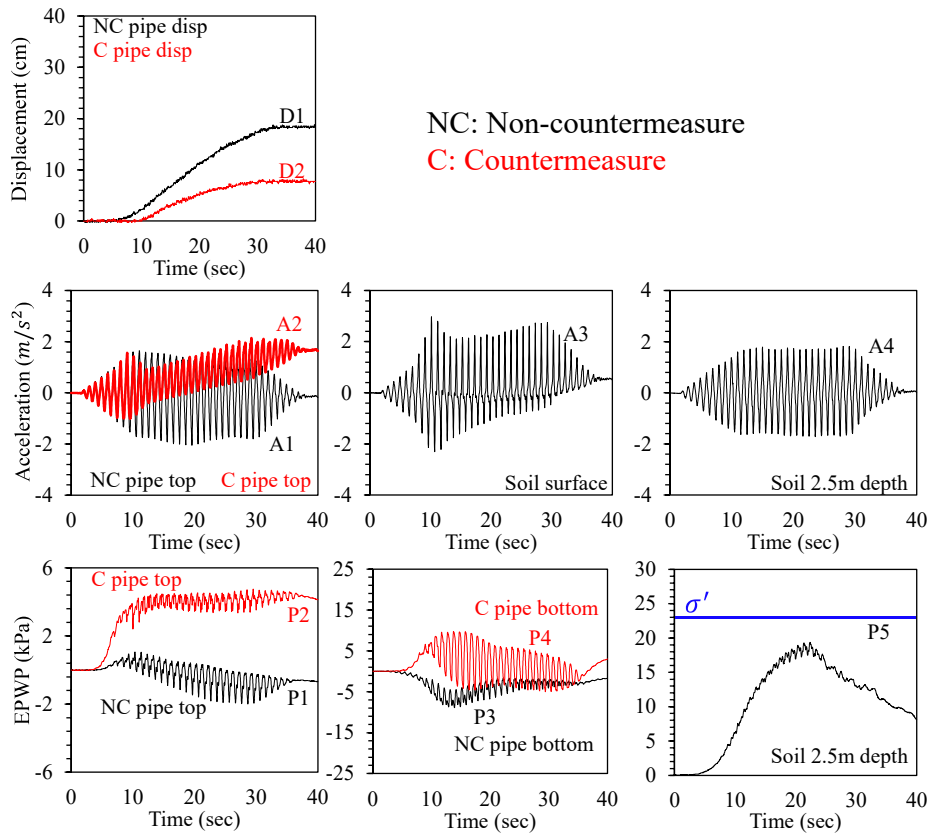
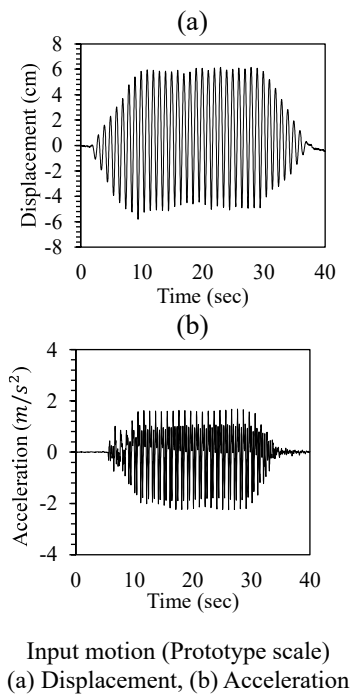
対策あり



## Case 2



## Case 2

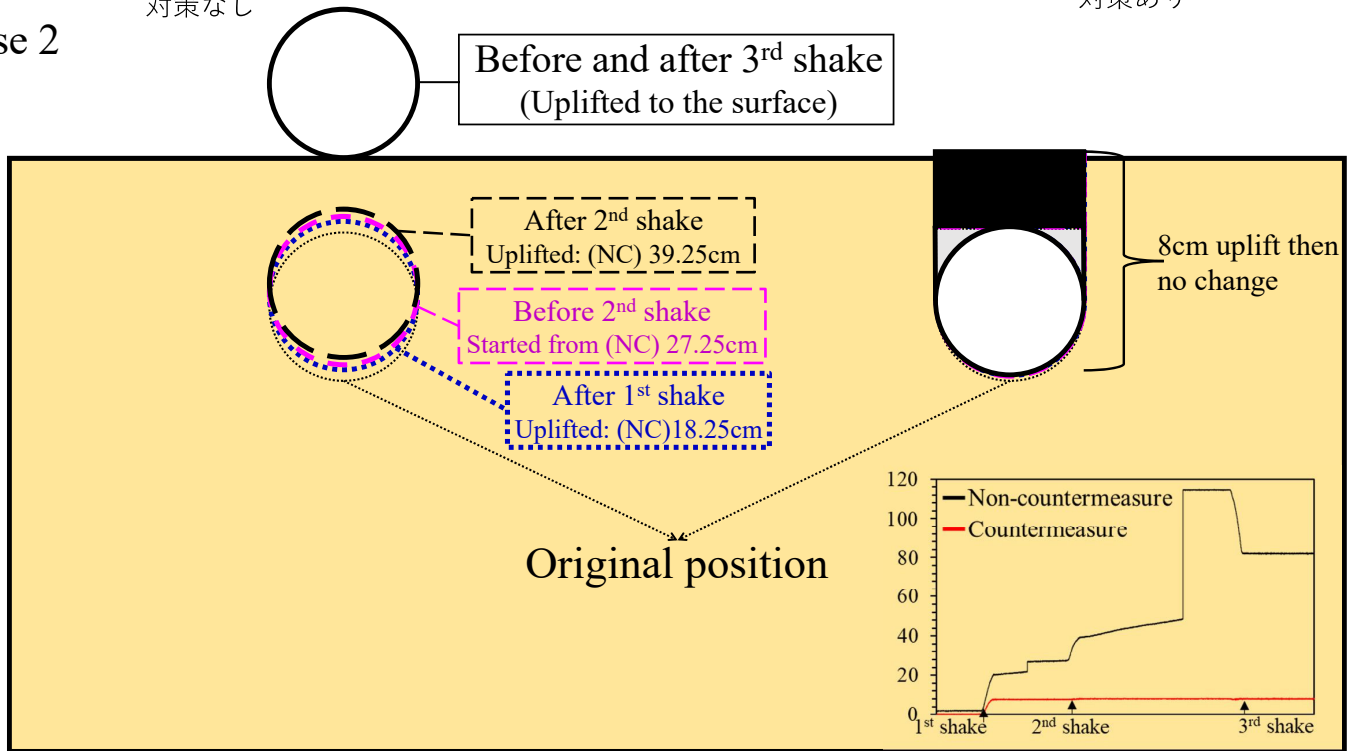




Case 2

対策なし

対策あり

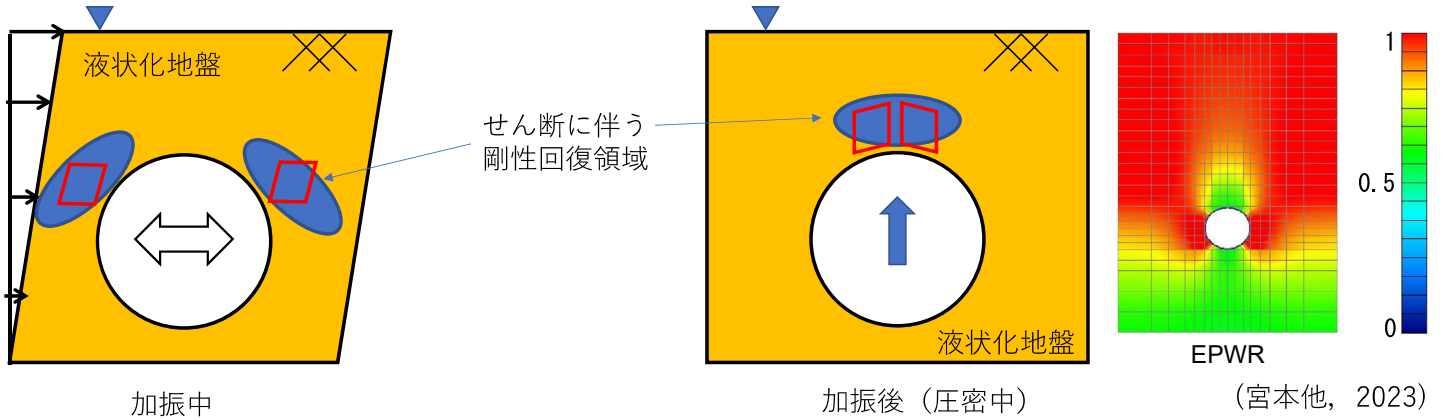


Summary

Case	Content	Advantage	Disadvantage
1	Stone column	EPWP mitigation	Decreased suction force might have caused larger uplift
2	Added weight	Reducing the uplift especially shallow condition	Rotation of the pipe observed
3			Not significant in deep condition
4			

**考察1：液状化地盤中の管路が浮上しにくい理由**

1. トレンチ内ではせん断変形が拘束される
2. 加振中は、管路肩部の地盤がせん断変形、その結果体積膨張し、過剰間隙水圧が低下、地盤の剛性が回復する。
3. 間隙水圧消散時（圧密中）は、管路直上の地盤の剛性が同様に回復する。



**考察2：管路が浮上し、地表面に被害が発生する場合 ⇒ 地表付近は不飽和（非液状化）のケースが多い**

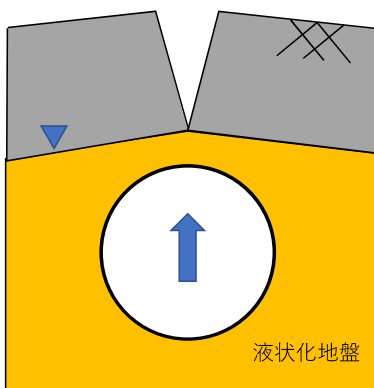


Fig. 34 パイプ敷設道路の亀裂（矢吹南第2空気弁工周辺）  
Cracks on the road around Yabukiminami No.2 air valve



Fig. 35 パイプ敷設道路の亀裂（矢吹南第2空気弁工周辺）  
Cracks on the road around Yabukiminami No.2 air valve

(写真：有吉他, 2012)

## まとめ

- 砕石柱による間隙水圧抑制効果は認められるものの、浮上抑制効果は小さい。
- 浮上抑制としておもりを用いた場合、浮上量は、対策なしと比較してほぼ半分になり抑制効果は認められたが、管路が回転するなどした。
- 液状化地盤中の管路が浮上しにくいのは、管路変位に伴い周辺地盤がせん断変形に伴って体積膨張するためだと推察される。
- 実被害事例から、管路が浮上するのは、地表付近に非液状化層が存在する場合であると推察される。これについては、今年度追加で検討中。

# 加振方向による 液状化時の埋設管浮上への影響 (管軸方向と管軸直角方向にそれぞれ加振したときの影響)

神戸大学大学院工学研究科  
元神戸大学工学部  
神戸大学大学院工学研究科

○ 鍬田 泰子  
八上 晃  
大室 秀樹

1

## 研究の背景

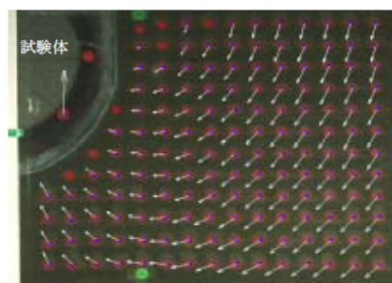
■ 1964年の新潟地震での液状化被害を受けて、埋設管や地下構造物の液状化時の浮き上がりに関する研究は多く行われてきた。

■ とくに、地盤工学会の「液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する研究委員会」では、浮き上がりの被害分析、浮き上がりのメカニズムと設計法、対策工など様々な項目について研究成果が挙げられてきた。

### ■ 埋設管の浮上メカニズム

発生要因: 液状化による浮力の増大

浮上りの継続: 構造物側面地盤が構造物下へ回り込むことによるもの

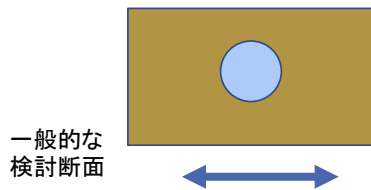


管路下半分の砂の移動(中瀬ら, 2003)

2

## 研究の目的

- 既往の研究は構造物断面に対して水平加振して地盤の回り込みに着目した研究がほとんど
- 従来の構造物断面方向の加振に加えて、管軸方向への加振によって地下構造物の浮上りに差異があるのか確認する余地がある



一般的な  
検討断面

被害が出る場合は管  
軸方向での不等沈下

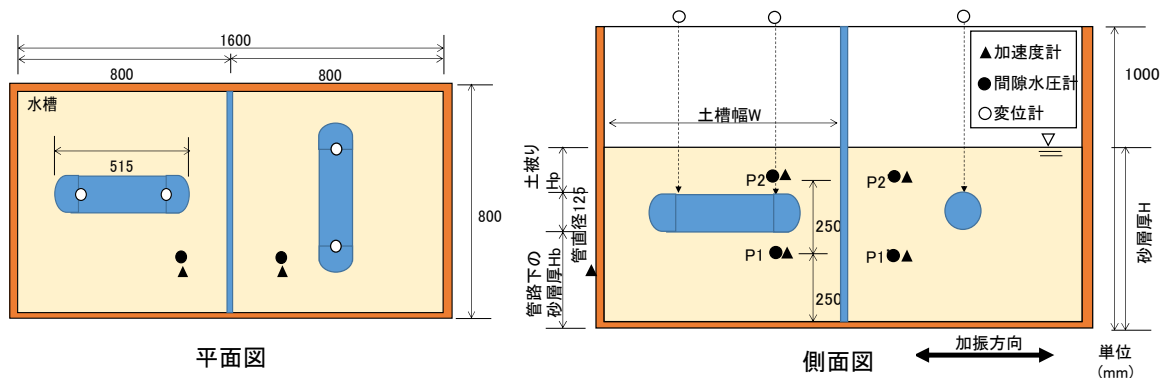
水道用管路を用いた振動台実験から、加振方向によって液状化時に地盤が埋設管下へ回り込み、管(地下構造物)が浮上ることへの影響を明らかにする



3

## 実験装置の概要

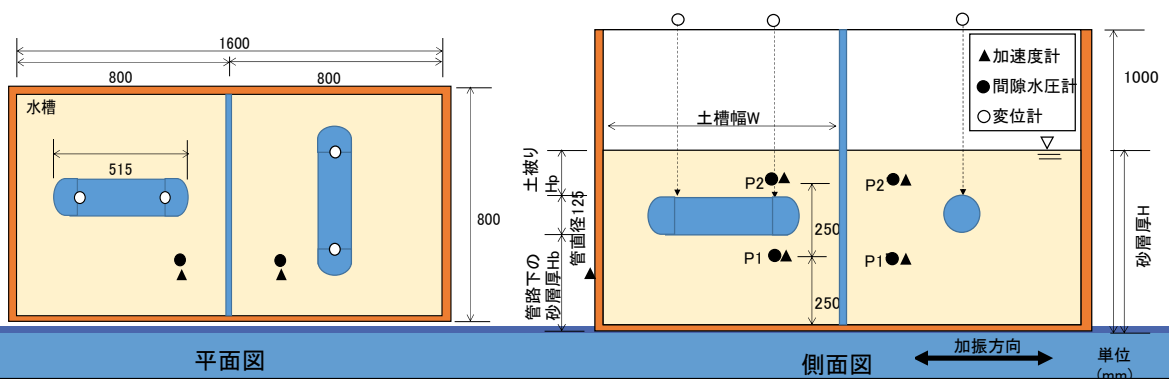
- 剛体土槽: 幅1600mm, 奥行800mm, 深さ1000mm  
厚さ10mmの内壁を挿入することで800mm四方の土槽2つにすることが可能



4

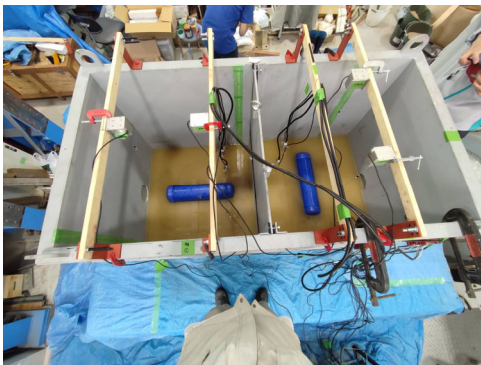
## 計測方法

- 計測項目: 間隙水圧, 加速度, 浮き上がり量
- 土槽上部から張ったワイヤーに底部から250mm, 500mmの位置に間隙水圧計, 加速度計を設置
- 加速度計は土槽外側にも設置
- 土槽上部に設置したフレームに変位計を設置し, 管の2箇所を変位を計測



5

## 土槽の様子



土槽内の様子



計測装置の様子

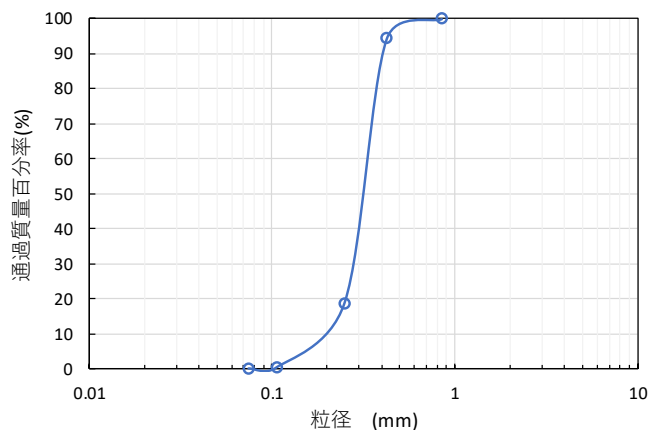
6



## 砂の物理特性

粒径調整した掛津珪砂を使用  
 相対密度は $Dr=71.5\%$

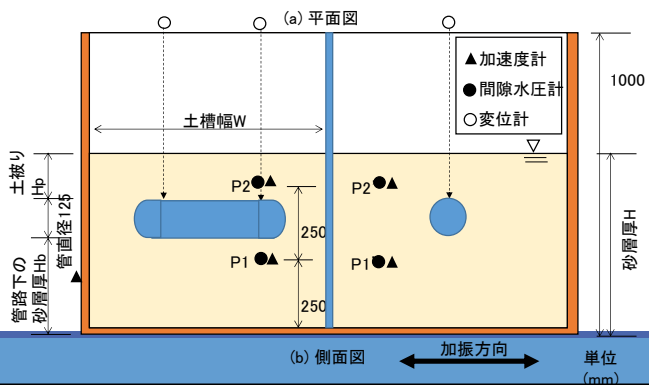
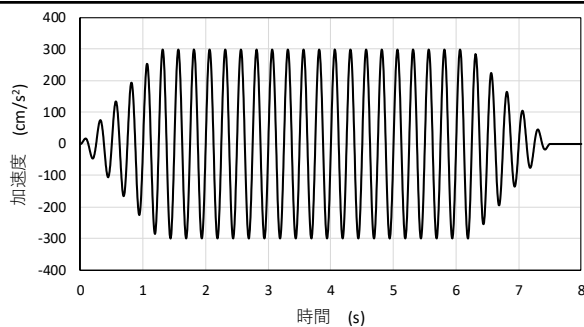
最大間隙比 $e_{max}$	0.92
最小間隙比 $e_{min}$	0.62
最大粒径 $D_{max}$ (mm)	0.85
50%粒径 $D_{50}$ (mm)	0.31
均等係数 $U_c$	1.6
曲率係数 $U_c'$	1.23



7

## 加振条件

- 振幅: 300gal ( $cm/s^2$ )
- 振動数: 4Hz
- 加振回数: 30回, 正弦波  
 (主要20回, 前後テーパー5回)
- 加振方向:  
 土槽長手方向に水平加振



8

## 供試管

- 水道配水用ポリエチレン管(呼び径100)使用  
(外径125mm, 厚さ11.4mm, 長さ515mm)
- 両端はポリエチレンキャップを熱融着
- 満水・空水状態のケースを実施



	見かけの比重	質量(kg)	体積 (cm <sup>3</sup> )
空水状態	0.36	2.2	6194
満水状態	0.95	5.9	

9

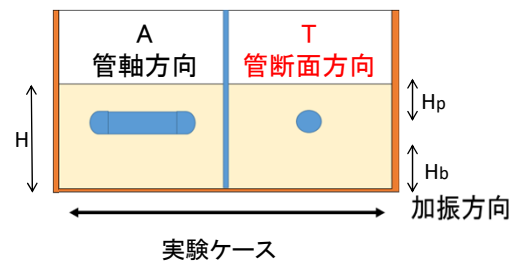
## 実験ケース

管路下層厚や土被り厚, 土槽幅を変化させながら同一埋設条件で管軸方向と管断面方向の実験ケースを設定

### ■ 管軸方向(A)

### ■ 管断面方向(T)

case5については内壁を外して土槽幅を1600mmに設定して実施



	層厚 H(mm)	土被り Hp(mm)	管路下層厚 Hb(mm)	土槽幅 W(mm)	加振方向	管路の状 態
case1-A	700	375	200	800	管軸	満水
case2-A	700	375	200			空水
case3-A	550	225	200			空水
case4-A	550	25	400			空水
case5-A	600	25	450	1600		空水
case1-T	700	375	200	800	管断面	満水
case2-T	700	375	200			空水
case3-T	550	225	200			空水
case4-T	550	25	400			空水
case5-T	600	25	450	1600		空水

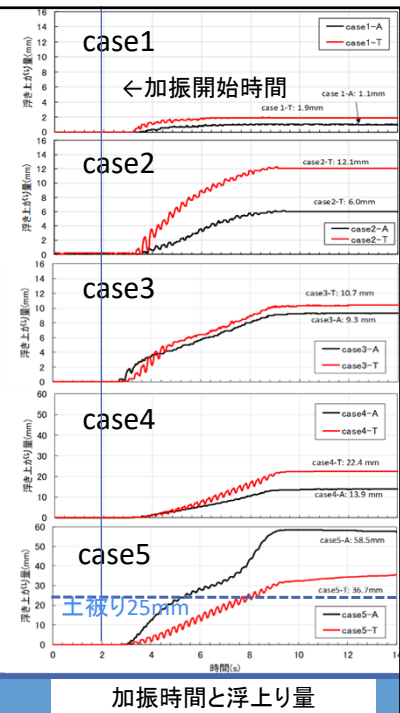
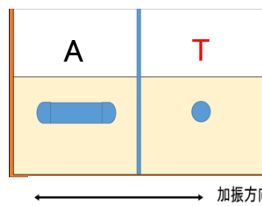
10

## 実験結果

- 5つの実験ケースの多くが、加速度のテーパー部では浮上らず、主要部の300galが入力されると同時に浮上り始める
- 時間に比例しながら浮上り量が増加
- 加振終了とともに浮上り量は一定値に収束する

実験ケース

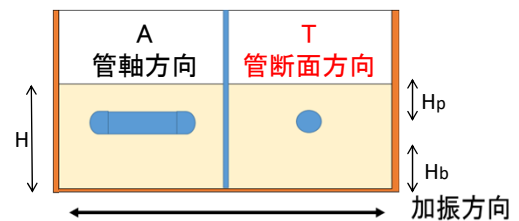
	H	Hpc	管路	土槽長さ
	(mm)	(mm)		
case1	700	450	充水	800
case2	700	450	空水	800
case3	550	300	空水	800
case4	550	100	空水	800
case5	600	100	空水	1600



11

## 実験結果

- case1~4は管断面方向(T)加振の浮上り量に対して、管軸方向(A)加振の浮き上がり量の比(A/T)は0.50~0.87となった
- A/Tの変位量比の値は、地盤が管路下に回り込みにくくなったことへの浮き上がり低減の影響を示している



実験ケース

	H	Hpc	管路	土槽長さ	変位T	変位A	A/T
	(mm)	(mm)					
case1	700	450	充水	800	1.9	1.1	0.58
case2	700	450	空水	800	12.1	6	0.50
case3	550	300	空水	800	10.7	9.3	0.87
case4	550	100	空水	800	22.4	13.9	0.62
case5	600	100	空水	1600	36.7	58.5	1.59

12

## 考察 管路比重による浮き上がり (case1とcase2の比較)

過剰間隙水圧の値と振幅の低減の様子から、管路上部は液状化しており、管路付近は液状化には至っていない

case1(満水)とcase2(空水)の浮上り量の差は見かけの管の密度の差によるもの

case1は土槽幅も施工時の掘削幅程度で実埋設環境に近い状態。

→埋め戻し土が液状化しても周辺の原土が液状化せず、管路下に液状化地盤がなければ浮上り量は僅か

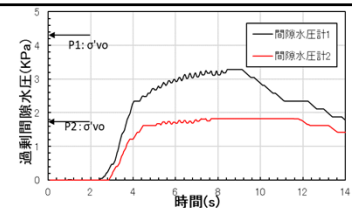
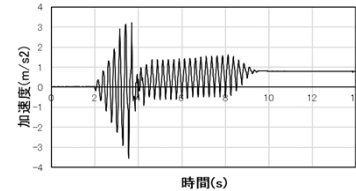
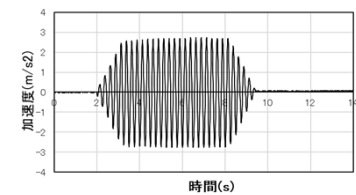


図5 (a)間隙水圧case1



(b)加速度計 case1(底面から500mm)



(c)加速度計 case1(底面から250mm)

13

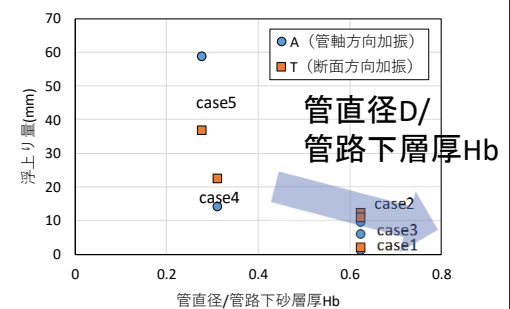
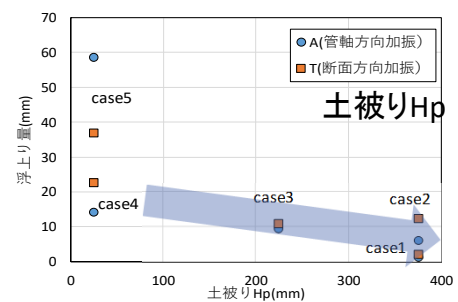
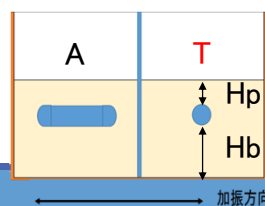
## 考察 浮上り要因と浮上り量

■ case2~4では土被り厚 ( $H_p$ ) が小さくなれば浮上りが大きくなっている

→浮上りの抵抗として、上載圧のせん断抵抗はそれほど大きくない

■ 管直径/管路下液状化層厚 ( $D/H_p$ ) が大きいほど浮上り量は小さい

→  $D/H_p$  が大きいほど地盤が回り込みにくい



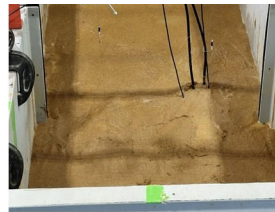
14

## 考察 case5の液面揺動の可能性

case1~4とは異なり、管軸方向(A)に加振した場合の方が浮き上がり量が大きくなった

←液状化によって液面揺動が励起。

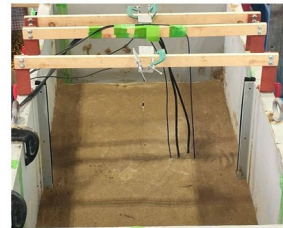
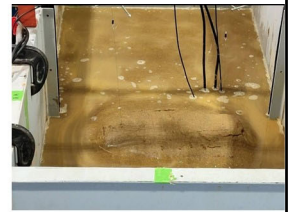
加振方向に対して管路長が長い方が両端の鉛直変位差が生じやすく管軸が傾くため、地盤が回り込みやすかった



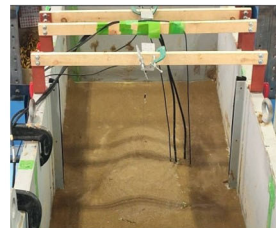
T: 加振前



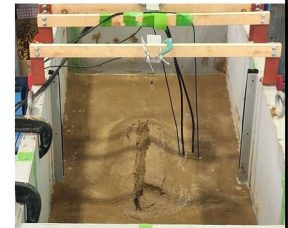
加振中



A: 加振前

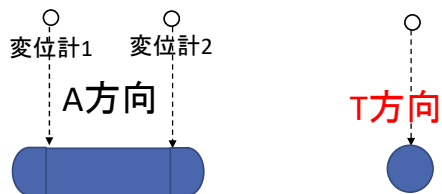


加振中

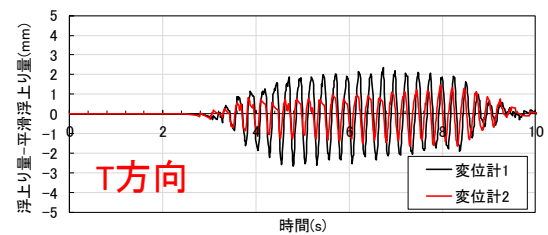
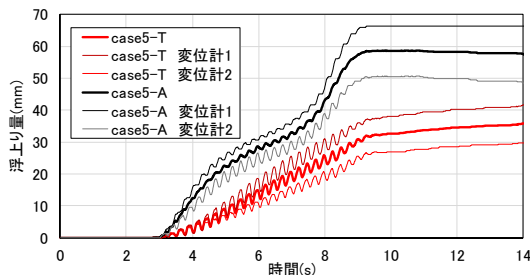


15

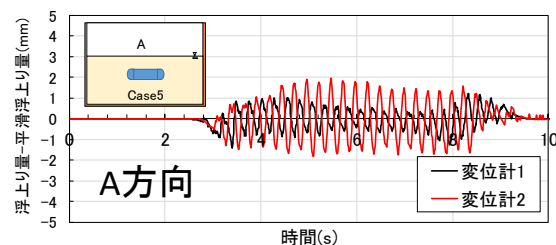
## case5の液面揺動について



浮上り量は2点のワイヤー変位計での計測値の平均水平加振時の水平移動分も含まれるため、浮上り量に時間変動がみられる。



T方向では、2つの変位計は同位相で振動している。



各変位計の変位量を移動平均で引いたもの。A方向では、2つの変位計が逆位相になっている。変位計の両側で揺動していることが確認された。

16

## まとめ

- 管断面に水平加振した浮上り量よりも管軸方向に水平加振した浮上り量の方が0.5~0.87倍小さい
- 供試体は無限長ではなく、両側の壁の拘束の影響を考慮して壁から離して設置されている
  - 浮上り量の低減は管路から側壁までの距離によるものなのか検討する必要がある
- case1のような実埋設環境下では埋め戻し土が液状化しても、原土が液状化しない限り、管路下に液状化層がほとんど無いために浮上り量は僅かである
- case5のように、側壁による拘束条件が緩く、地表付近に設置した埋設管の場合は管断面方向よりも管軸方向の加振の方が浮上り量大きい
  - 液状化によってスロッシングが励起され、地表面の上下振動により管軸が傾き、土が管路下に回り込みやすい状況になったため

17

ご清聴ありがとうございました

18



水循環施設の合理的な地震・津波対策  
研究小委員会 活動報告会

## 液状化による埋設管路の浮上事例 の再現解析と対策の研究

2023年11月17日（金）

（株）日水コン

○小西康彦・高橋直樹

1

1

## 説明内容

1. 埋設管の浮上事例
2. 埋設管が浮上する条件
3. 浮上抑制対策の検討
4. 数値解析による検証
5. まとめ

2

2

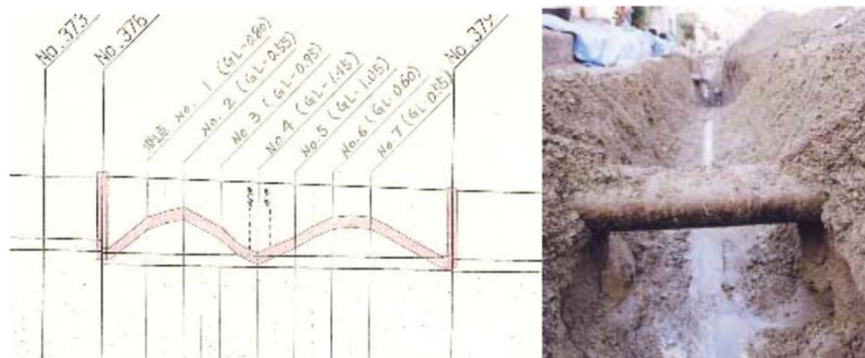
# 1. 埋設管の浮上事例

3

3

## 2004年中越地震における長岡市の管の被災状況

### 長岡市の応急復旧工事に見る下水管被害状況



塩ビ管内径250mm、路線延長約38m、土被が1.5m程度の路線で、人孔は浮上してないが、管が液状化で浮上している。中間のますが2箇所取り付けいているところで、取り付け管が支えとなって浮上していない。

4

4

## 2004年中越地震における長岡市の管の被災状況



(左)人孔周囲に亀裂は入っているが、浮上はしていない。(右)取り付け間は垂直に取り付いており、埋め戻しは発生土(?)なのか、液状化の痕跡は見られない。

5

5

## 2004年中越地震における長岡市の管の被災状況



6

6

# 数値解析モデル（縦断面図）

下水道本管の液状化による浮上解析（長岡市の事例）

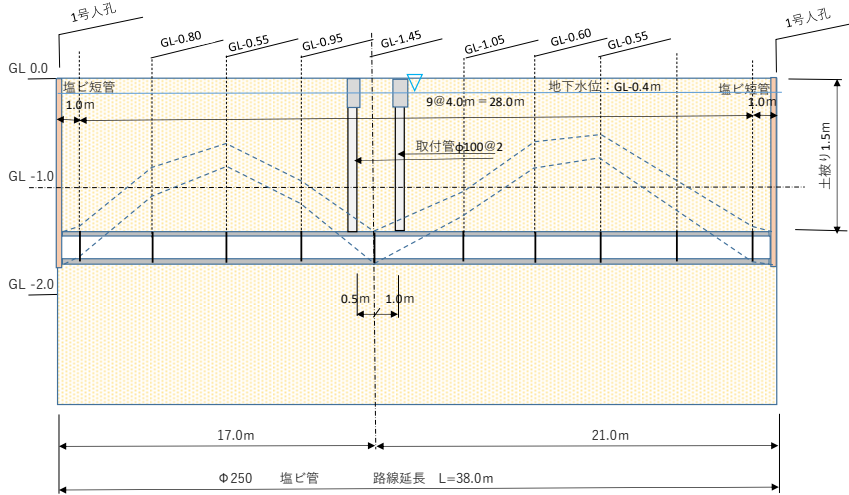


図-1

7

7

# 数値解析モデル（横断面図）

横断面図

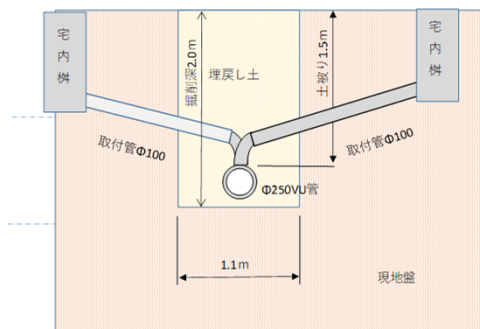


図-2

取付管2か所



8

8

## 2. 埋設管が浮上する条件

9

9

### 本管が浮上する条件

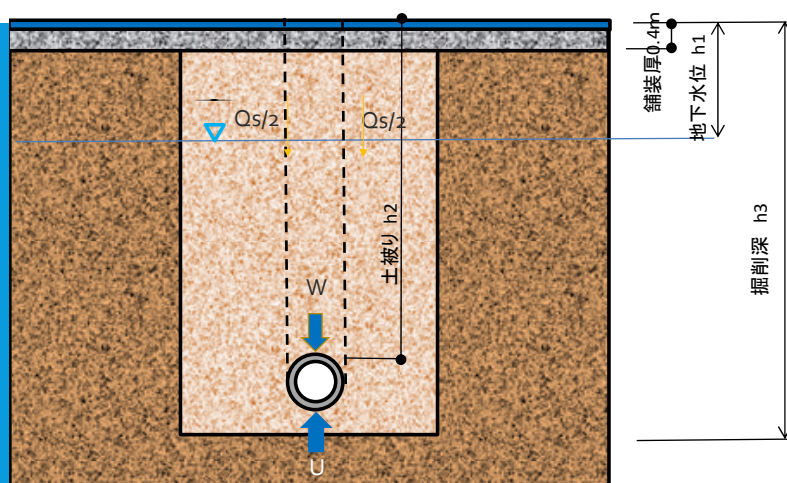


図-3

10

10

## 浮上安全率

$$\text{安全率 } F = \frac{\text{浮上抵抗力: } W}{\text{揚圧力: } U} = \frac{(W_1+W_2) \times D + Q_s}{U \times D}$$

ここに、 $W_1$ : 上載荷重、 $W_2$ : 自重、 $D$ : 管外径、 $Q_s$ : せん断抵抗  
 $U = U_1 + U_2$   $U_1$ : 静水圧、 $U_2$ : 過剰間隙水圧

重量バランスによる安全率はかなり安全側と考えられるので、安全率  $F = 1$  とする。  
 (ここで、土荷重は直土圧としている)

11

11

## 共同溝設計指針 (日本道路協会)

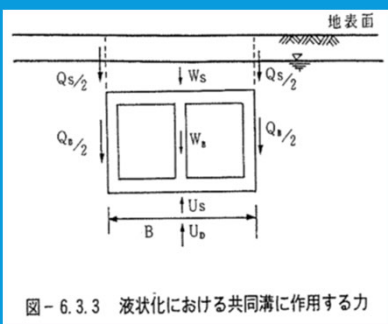


図-6.3.3 液状化における共同溝に作用する力

② 浮上に対する安全率  $F_s$  は、式(6.3.8)により算出するものとする。

$$F_s = \frac{W_s + W_b + Q_s + Q_b}{U_s + U_o} \dots \dots \dots (6.3.8)$$

ここに、

- $W_s$ : 上載土の荷重 (水の重量を含む) (t/m)
  - $W_b$ : 共同溝の自重 (取付物及び捨てコンの重量を含む) (t/m)
  - $Q_s$ : 上載土のせん断抵抗 (t/m)
  - $Q_b$ : 共同溝側面の摩擦抵抗 (t/m)
  - $U_s$ : 共同溝底面に作用する静水圧による揚圧力 (t/m)
  - $U_o$ : 共同溝底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力 (t/m)
- で、③項の規定による。

ただし、液状化に対する抵抗力  $F_L$  が 1.0 以下の土層における  $Q_s$ 、 $Q_b$  は考慮してはならない。なお、共同溝に作用する力は共同溝縦断方向の単位長さあたりの値である。

12

12



# 計算式

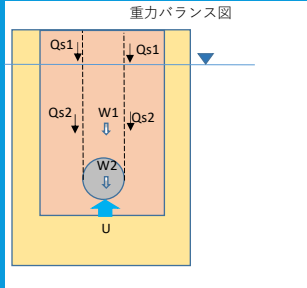


図-4

【管底部の有効上載圧】

地下水以浅  $U_{d1} = \gamma_1 \cdot (h_1 - h_2 - h_3) + \gamma_2 \cdot h_2 + \gamma_3 \cdot h_3$   
 地下水以下  $U_{d2} = (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot (h - h_1 + D')$

【静水圧】

$U_s = (h + D - h_1) \cdot \gamma_w$

【過剰間隙水圧】

$U_d = U_{d1} + U_{d2}$

【揚圧力：U】

$U = U_s + U_d$

【上載荷重】

$W1 = \gamma_1 \cdot (h - h_2 - h_3) + \gamma_2 \cdot h_2 + \gamma_3 \cdot h_3$

【管自重】

$W2 = w/D$

【せん断抵抗力】

地下水以浅  $Q_{s1} = k (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) / 3 \cdot h_1 / 2 \cdot \tan(\phi) \cdot 2h_1$   
 地下水以下  $Q_{s2} = 0$

# 浮上安全率の計算

表-1 塩ビ管の計算条件

順号	本管の条件					土質条件			表層		路盤		砕石柱の条件		
	管内径	管外径	管種	土被り	管自重	地下水位	埋戻し土	内部摩擦角	厚	単位体積重量	厚	単位体積重量	径	長さ	単位体積重量
	D(mm)	D'(mm)	HP、VU	h(m)	kN/m	GL-h <sub>1</sub> (m)	$\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	h <sub>2</sub> (m)	$\gamma_2$ (kN/m <sup>3</sup> )	h <sub>3</sub> (m)	$\gamma_3$ (kN/m <sup>3</sup> )	(mm)	h <sub>4</sub> (m)	$\gamma_4$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	200	0.216	VU	1.5	0.066	0.4	17	30	0.1	23	0.3	21	420	1.1	22
2	250	0.267	VU	1.5	0.098	0.4	17	30	0.1	23	0.3	21	420	1.1	22

表-2 塩ビ管の安全率計算結果

番号	揚圧力：U					浮上抵抗力：W						安全率	浮上力	
	管底有効上載圧		静水圧	合計	上載荷重			せん断抵抗力：Qs	合計	W/U	U-W			
	地下水以浅	地下水以下			舗装路盤	埋戻し土	管自重					地下水以浅	地下水以下	
	⑮	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗・㉘	㉙・㉚	㉛・㉜・㉝・㉞
1	8.6	10.528	13.16	32.288	8.6	18.7	0.306	27.606	0.9392	0.0	0.9392	0.99	0.0723	
2	8.6	10.936	13.67	33.206	8.6	18.7	0.367	27.667	0.9392	0.0	0.9392	0.94	0.5397	

### 3. 浮上抑制対策の検討

15

15

#### 砕石柱による浮上抑制対策

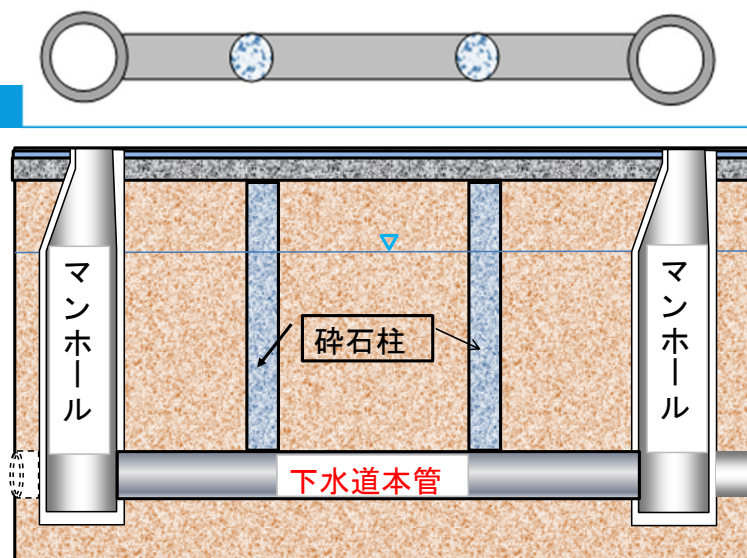
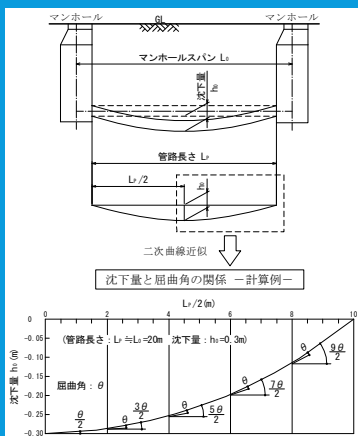


図-5

16

16

## ①管と管の継手の抜出し量・屈曲角の許容値から決まる浮上量の限界値



(下水道施設耐震対策指針と解説2014年版)

液状化による地盤沈下は継手の抜出しと屈曲を発生させる。左図より、抜出し量と屈曲角は次式にて求められる。

$$\text{抜出し量: } \delta_{s \max} = \frac{\ell}{\cos\left(\frac{n-1}{2}\theta\right)} - \ell$$

$$\text{屈曲角: } \theta = 2 \tan^{-1}\left(\frac{4 h_0}{L_p^2} \cdot \ell\right)$$

最大抜出し量と屈曲角を管の許容値とした時の沈下量（浮上量）が限界値となる。

17

17

## 曲げ角度・抜出し量から決まる限界浮上量

砕石柱スパン  $\ell = 6.0 \text{ m}$

【VUの許容抜け出し量から決まる限界浮上量】

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= \frac{\ell}{\cos\left(\frac{(n-1)}{2} \cdot \theta\right)} - \ell \\ &= \frac{6.0}{\cos\left(\frac{(9-1)}{2} \cdot \theta\right)} - 6.0 \\ &= -1.960705787 > 0.028 : \text{NG} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta &= 2 \tan^{-1}\left(4 \cdot h_0 / L_p^2 \cdot \ell\right) \\ &= 2 \tan^{-1}\left(4 \cdot h_0 / 38.0^2 \cdot \ell\right) \end{aligned}$$

$\theta$ の限界値  $= 2^\circ = 2 \cdot 3.14 / 180 = 0.034907$  ラジアン  
 $\theta_{\max}$ となる最大浮上量を求める。

$$h_{0\max} = 1.05 \quad \theta = 0.0349$$

したがって、許容抜け出し量0.028mmからきまる屈曲角を求める。

$$\theta = 0.0242 \quad \leftarrow \delta_{\max} = 0.028221$$

$$h_0 = 0.729 \quad \theta = 0.024232$$

曲げ角度・抜け出し量から決まる限界浮上量は 0.729 mとなる。

浮上量95cmは限界浮上量を超えている  
→ 継手の最大抜出し量と屈曲角の限界を超えているため、漏水や砂の流入がある。

18

18

## ②災害復旧時における管路復旧の判定基準

別紙1

管路復旧判定基準

区分	種別	細目	判定基準	
スパン全体の評価	管路向配	埋設0.6m以下(汚水管)		
		埋設0.8m以下(雨水管又は合流管)並列配		
管路のたわみ		管径の1/5以上(φ250未満)		
		5cm以上(φ250以上)		
管路のたわみ		管径の1/5以上(φ250未満)		
		5cm以上(φ250以上)		
管本体	ヒューム管・ボックスカルバート	亀裂・破損	内側方向 欠陥 浸入水	
			亀裂が管半分以下で幅5mm以上	
		管軸方向	欠陥 浸入水	
			亀裂が管半分以下で幅5mm以上	
		変形	5%以上の変形・扁平があるもの	
			管に亀裂が入っているもの	
	埋設管	破損	2cm以上の抜け出し	
			縦溝 浸入水	
		継手のずれ	亀裂	
			幅2mm以上 浸入水	
		破損	埋設(埋設管は上下のずれを含む)	
			縦溝	
蓋・受弁	小型マンホール	防護蓋		
		破損		
	内蓋	破損		
		あり		
	1号マンホール以上	防護蓋		
		破損		
斜壁・直壁	斜壁・直壁	破損	ずれ 埋没の1/5以上 浸入水	
			亀裂	
		破損	幅1mm以上(はく離を含む) 浸入水	
			あり	
		直壁・インバート	破損	幅1mm以上 浸入水
				あり
	本管接続部	破損		
		突出 あり		
		抜け あり		

出典「下水道の地震対策マニュアル 2014年版 公益社団法人日本下水道協会」

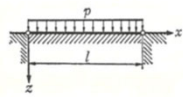
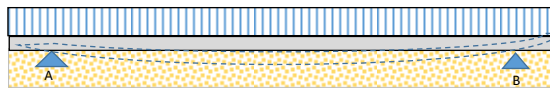
φ200 : 4cm  
φ250以上 : 5cm

地震による被害が上記数値を上回る路線が災害復旧路線の対象となる。  
言い換えれば、上記数値以下の路線は復旧対象とならず継続して使用することとなる。  
本条件ではφ250のため、浮上量の許容値は50mmとなる。

19

## ③弾性支承上の梁理論によるたわみ量

wL



$$w = \frac{p}{k} - \frac{p}{k(C+c)} [G_2(x, l-x) + G_1(l-x, x)]$$

$$\theta = -\frac{p\beta}{k(C+c)} [G_1(x, l-x) + G_2(x, l-x) - G_1(l-x, x) - G_2(l-x, x)]$$

$$M = \frac{p}{2\beta^2(C+c)} [G_1(x, l-x) + G_1(l-x, x)]$$

$$Q = -\frac{p}{2\beta(C+c)} [G_1(l-x, x) - G_2(l-x, x) + G_2(x, l-x) - G_1(x, l-x)]$$

$$\left. \begin{aligned} S &= \sinh \beta l, \quad C = \cosh \beta l, \quad s = \sin \beta l, \quad c = \cos \beta l \\ G_1(\xi, \eta) &= \sin \beta \xi \cdot \sinh \beta \eta, \quad G_2(\xi, \eta) = \cos \beta \xi \cdot \cosh \beta \eta \\ G_3(\xi, \eta) &= \sin \beta \xi \cdot \cosh \beta \eta, \quad G_4(\xi, \eta) = \cos \beta \xi \cdot \sinh \beta \eta \end{aligned} \right\} \dots (5.33)$$

たわみ量  $\delta$  maxは  $x = l/2$

$$G_2(x, l-x) = G_2(l/2, l/2) = \cos \lambda l/2 \cdot \cosh \lambda l/2$$

$$G_2(l-x, x) = G_2(l/2, l/2) = \cos \lambda l/2 \cdot \cosh \lambda l/2$$

(構造力学公式集より)

$$\delta = w/k - w/\{k(C+c)\} \cdot 2 \cdot \cos \lambda l/2 \cdot \cosh \lambda l/2$$

20

20

## 長岡事例の浮上量0.95Mとするには

- ・ 浮上量95cmとするには、地盤反力を0.58 (kN/m<sup>2</sup>)とする必要がある。  
→ 液状化により地盤反力がほぼゼロの状態

表-3 弾性支承上の梁とした場合の地盤反力と浮上量

VU	w	$\beta = \lambda$	$\ell$	C	c	$\cos(\beta \ell / 2)$	$\cosh(\beta \ell / 2)$	k(kN/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)
200	0.0723	2.5427405	38.0	4.5952E+41	-0.72122	-0.3733489	4.7933E+20	4,120	0.018
250	0.5397	2.096621	38.0	1.9948E+34	-0.42505	-0.5361683	9.9871E+16	0.58	930.517

21

21

## ④ 砕石柱による浮上抑制対策

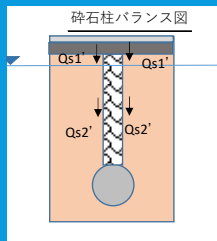


図-7

【上載荷重の控除：砕石柱分】

$$W1- = \pi / 4 \cdot D^2 \cdot \gamma_1 \cdot h_4$$

【上載荷重の増分：砕石柱分】

$$W1+ = \pi / 4 \cdot D^2 \cdot \gamma_4 \cdot h_4$$

【せん断抵抗の増分：砕石柱分】

$$\text{地下水以上} \quad Q_{S1} = k (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) / 3 \cdot h_1 / 2 \cdot \tan(\phi) \cdot \pi D \cdot h_1$$

$$\text{地下水以下} \quad Q_{S2} = k \{ \gamma_1 (h_1 - h_2 - h_3) + \gamma_2 \cdot h_2 + \gamma_3 \cdot h_3 + (\gamma_1 - \gamma_w) (h - h_1) / 2 \} \cdot \tan(\phi) \cdot \pi D \cdot (h - h_1)$$

【安全率：F】

$$\text{揚圧力} \quad U = U_s + U_d$$

$$\text{浮上抵抗力} \quad W = W1 + W2 + Q_{S1} + Q_{S2} + Q_{S1}' + Q_{S2}'$$

$$F = \frac{W}{U} = \frac{(W1+W2) D + Q_{S1}+Q_{S2}+Q_{S1}'+Q_{S2}'}{(U_s+U_d) D}$$

22

22

## 砕石柱対策の安全率

表-4 砕石柱による対策後の浮上安全率

砕石柱		浮上抵抗力: W1				砕石柱の効果 (増分)						Qs	安全率	
間隔: $\phi$ (m)	面積: A (m <sup>2</sup> )	自重 (kN/本)	埋戻し控除		上載荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	周長 (m)	液化化時の 低減係数DE	せん断抵抗力: Qs'		増分計		合計 (kN/m)	⑳・㉑+㉒ (kN/m)	㉒・㉑
			(kN/本)	(kN/m <sup>2</sup> )				地下水以下	地下水以下	(kN/本)	(kN/m)			
7.0	0.13854	3.35277	1.21919	0.17417	27.910	1.31947	0.6667	0.61959	3.63141	4.251	0.60729	1.5464	1.09	
6.0	0.13854	3.35277	1.21919	0.2032	28.023	1.31947	0.6667	0.61959	3.63141	4.251	0.7085	1.6477	1.03	

### 計算結果

砕石柱を6mピッチに築造することで、重量バランスによる浮上安全率は1.03>1.0となり浮上を抑制する結果となった。

23

23

## 4. 数値解析による検証

24

24



# 解析条件および解析モデル

表-5 解析条件

解析コード	汎用有限要素解析ソフト NX-NASTRAN
非線形性	幾何学的非線形考慮
管体 (VU管)	梁要素
継手部・地盤ばね	バイリニア
MH部および取付管部	ピン支承

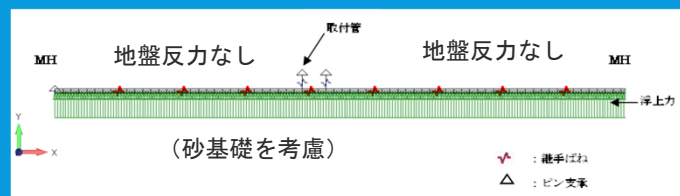


図-8 解析モデル (対策無し)

25

25

# 砕石柱による浮上抑制対策

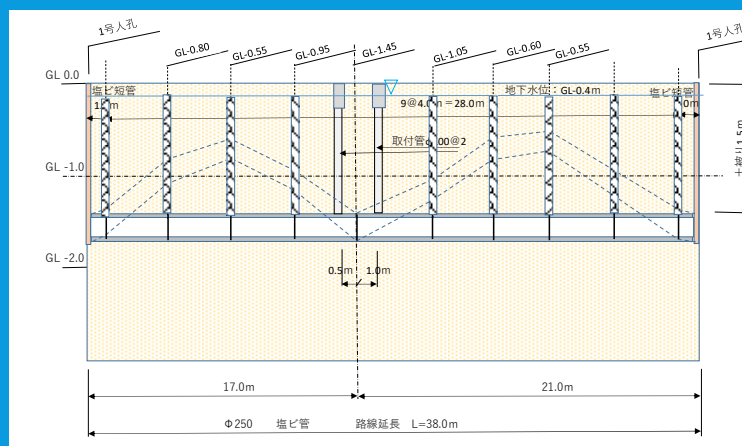
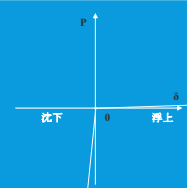
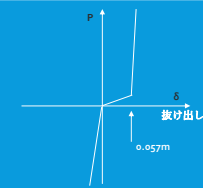
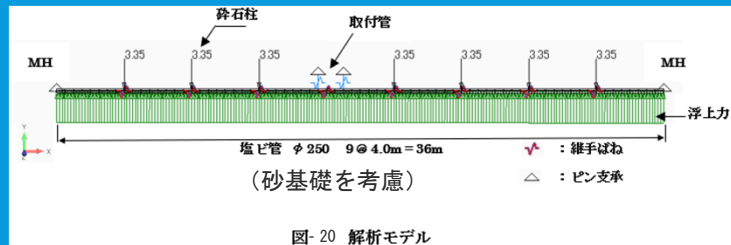


図-9 砕石柱配置図

26

26

## 砕石柱による解析モデル



27

## 解析結果

図-6 対策有無の解析結果

			CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
管体断面積	A	m <sup>2</sup>	0.00635	0.00635	0.00635	0.00635
管体断面二次モーメント	I	m <sup>4</sup>	5.34E-05	5.34E-05	5.34E-05	5.34E-05
継手軸方向ばね	K	kN/m	200	500	750	1000
継手回転ばね	K <sub>R</sub>	kN・m/rad	1.68E+00	4.20E+00	6.30E+00	8.41E+00
砕石柱なし	浮上量	m	1.33	1.07	0.95	0.88
	継手最大屈曲角	°	9.54	6.69	5.59	4.88
	継手最大抜け出し量	mm	57	33.67	25.31	20.57
砕石柱あり	浮上量	m	0.01	0.01	0.01	0.01
	継手最大屈曲角	°	1.01	0.96	0.93	0.89
	継手最大抜け出し量	mm	0.08	0.07	0.06	0.05

28

28

## 解析結果の比較

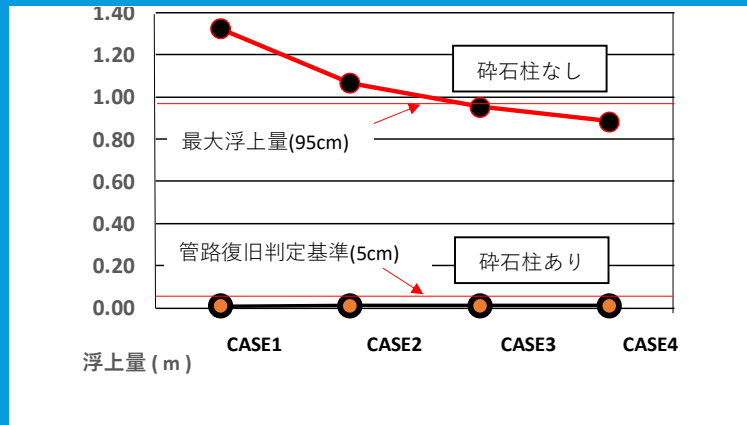


図-23 解析結果の比較図

29

29

## 鉛直変位コンター図の比較

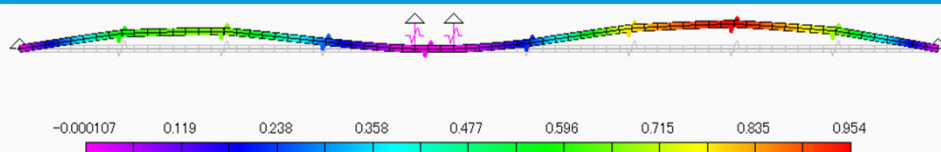


図-24 対策無しの鉛直変位コンター図

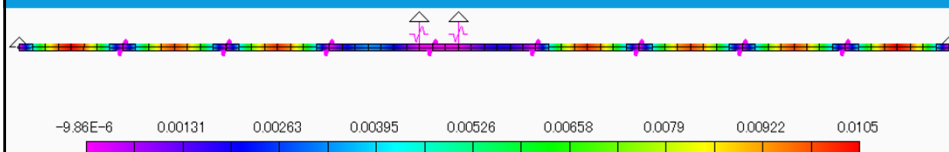


図-25 対策有の鉛直変位コンター図

30

30

## 5. まとめ

- ◆長岡市の埋設管浮上事例を例に、重量バランスによるつり合いの考え方により浮上安全率を計算すると浮上する結果となった。
- ◆砕石柱を6mピッチに埋設管の直上に築造することで、浮上安全率を1以上とすることができた。
- ◆弾性支承上の梁理論により、長岡市の浮上事例の最大値0.95mになる地盤反力はほぼゼロとなった。
- ◆汎用有限要素解析ソフトを用いて0.95mになる条件をパラメトリックに変化させて、継手軸方向ばねと継手回転ばねを算出した。
- ◆同条件で、砕石柱の自重による支点効果を考慮した解析により浮上量を災害時の管路復旧判断基準の5cm以下にすることができた。

31

31

ご清聴ありがとうございました

32

32

## 液状化に伴う埋設管路の浮上挙動の特性と 砕石材による浮上対策の研究

地震工学委員会：水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会

令和5年11月

株式会社日水コン 宮本 勝利

0

### 1. はじめに

- 日本の上下水道施設の埋設管路は、これまで多くの地震によって機能が失われ断水被害や使用制限を招いている。
- 上水道：主要管路の耐震化率：41%
- 下水道：重要な幹線等の耐震化率：50%
- 既設の有効活用として、既設の埋設管路等を対象とした液状化による浮上の評価方法や対策の検討も重要。



#### 【解析的研究の実施（各種実験結果も踏まえ）】

- 浮上現象に関する特性の分析  
⇒埋設管路がどのようなメカニズムや要因で浮上するか。
- 浮上対策の研究  
⇒管路上部に砕石材を設置し過剰間隙水圧の消散を促進する方法の効果は？

過剰間隙水圧の消散過程を考慮

地盤の透水性を考慮

1

1

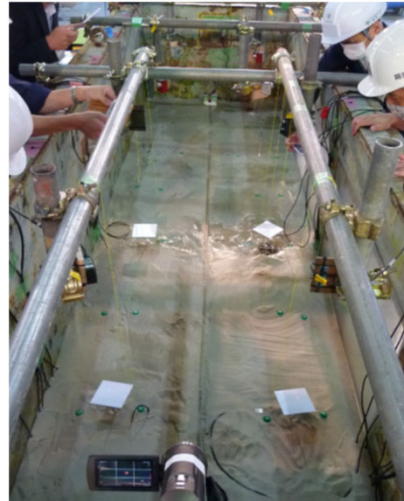
## これまでの本小員会活動より

- 埋設管路の液状化による浮上と対策工法の研究を目的とした防災科学研究所などで実験より

⇒簡便な浮上判定式では浮上する条件であっても、各種実験では、埋設管路は浮上しなかった。

- これまでの地震工学委員会総会などでの本研究報告に対して

⇒内水が充足された埋設管路の浮上は問題とならないとの指摘。



2

2

## 茨城県鰐川浄水場での被害

- 地震後の液状化現象や共同溝の浮上現象の長時間継続
  - 余震の影響による被害の拡大
- ⇒過剰間隙水圧の消散過程考慮



3

3



## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (1)

### ○分析方針

管路条件、埋設条件、地震条件に関するパラメータを対象として、これらの多数の組み合わせケースの解析を行う。

表 各解析条件のパラメータ

管路条件		塩ビ管φ400、ダクタイル鋳鉄管φ800・φ2000 満水・空水
埋設条件	土被り	1D・2D・3D・4D・800mm
	管路下部地盤	液状化地盤、非液状化地盤
	周辺地盤の液状化範囲	管周辺の埋戻材のみ液状化、管周辺一様地盤の液状化 
地震条件	加速度	100gal、150gal
	周波数	4Hz、5Hz
	継続時間	10秒、200秒
	加振方向	水平、水平+鉛直（水平の1/2振幅）

代表ケース：地盤の透水性の有・無

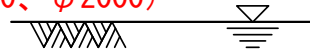
4

4

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (2)

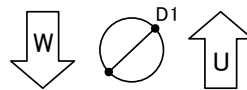
### ○管路条件

- 実際に埋設管路の浮上被害報告が多い下水道管路  
⇒塩化ビニル管（φ400）
- 水道の耐震基準類の浮上判定式による評価では浮上する結果を確認している上水道管路  
⇒ダクタイル鋳鉄管（φ400、φ800、φ2000）



### 【耐震基準類の浮上判定式】

- 浮上に対する安全率  $F$   
 $F = \text{浮上抵抗力} / \text{管底に作用する揚圧力} = W/U$
- 管底に作用する揚圧力  $U$   
 $U = (\text{静水圧} + \text{過剰間隙水圧}) \cdot D1$
- 浮上抵抗力  $W$   
 $W = (\text{管路自重} + \text{上載土重量} + \text{内水重量}) \cdot D1 + \text{せん断抵抗 (非液状化層)}$

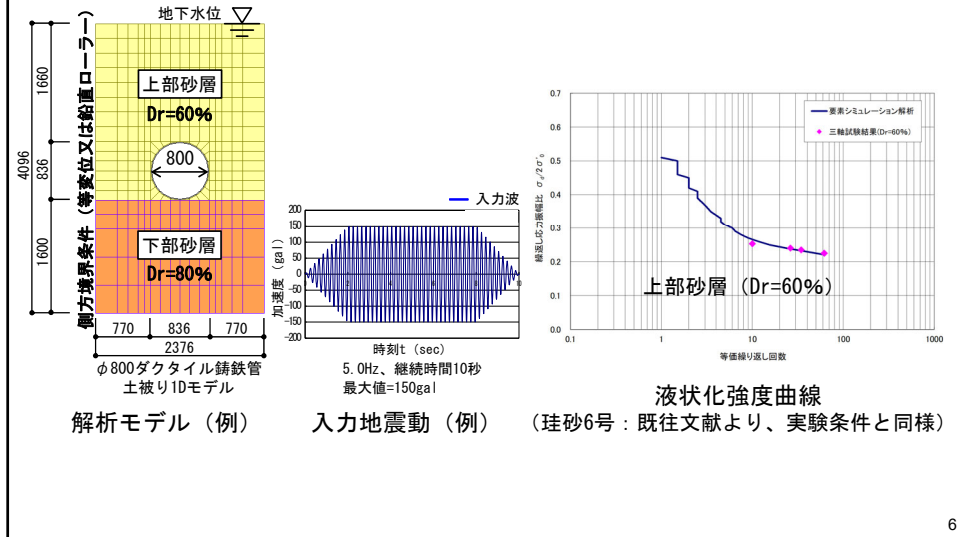


5

5

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (3)

### ○解析条件、モデルなど



6

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (4)

### ○解析方法など

- 地盤の弾塑性モデル：岡モデルを適用  
⇒地盤の透水性、過剰間隙水圧の消散過程の考慮
- 解析コード：LIQCA
- 初期条件として自重解析  
+地震時の解析として動的解析 (直接積分法)  
+地震後の過剰間隙水圧の消散過程を評価するために圧密解析
- 液状化試験結果を用いた要素シミュレーション解析を実施し各種地盤のパラメータを設定。
- 数値積分の計算法：ニューマークのβ法 ( $\beta=1/4$ )
- 解析時間間隔：0.001秒

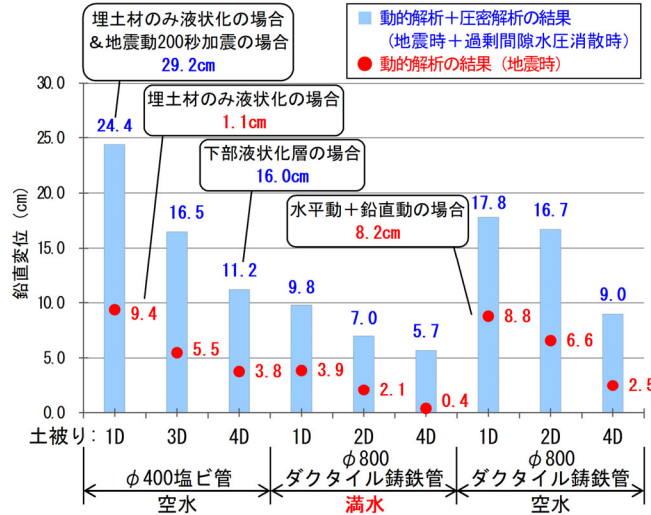
7

7

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (5)

### ○解析結果【代表的な結果】

- 埋設条件 (周辺一様地盤液状化、管路下部：非液状化)
- 地震動条件 (水平動、150gal、10秒、5Hz波)

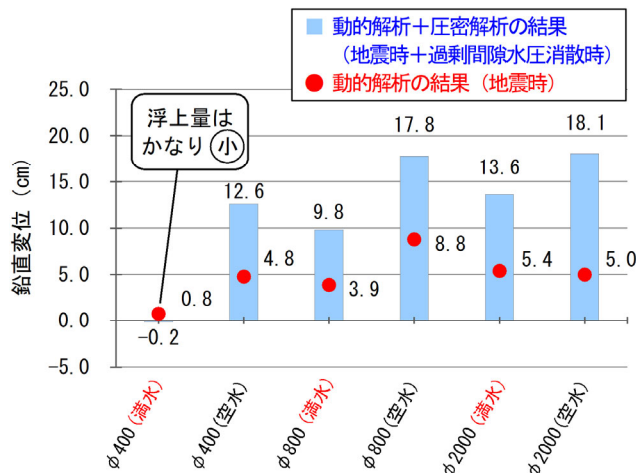


8

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (6)

### ○解析結果【口径比較の結果】

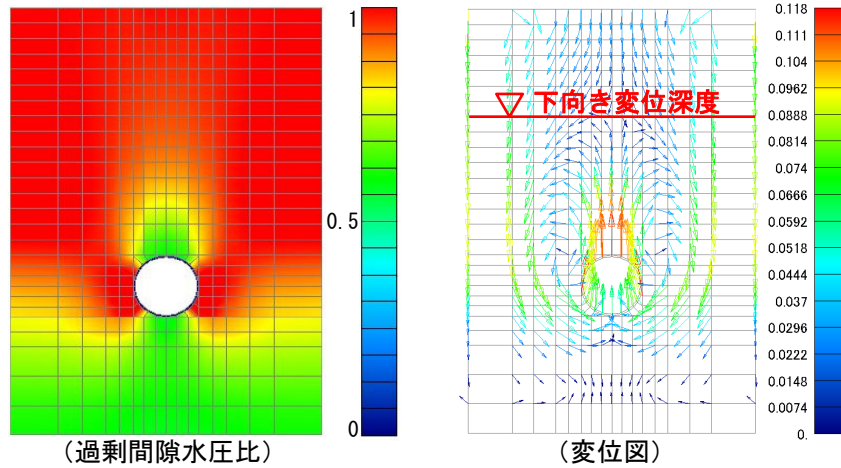
- 管路条件 (ダクティル鑄鉄管)
- 土被り (800mm)
- 地震動条件 (150gal、5Hz水平動)



9

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (7)

### ○解析結果



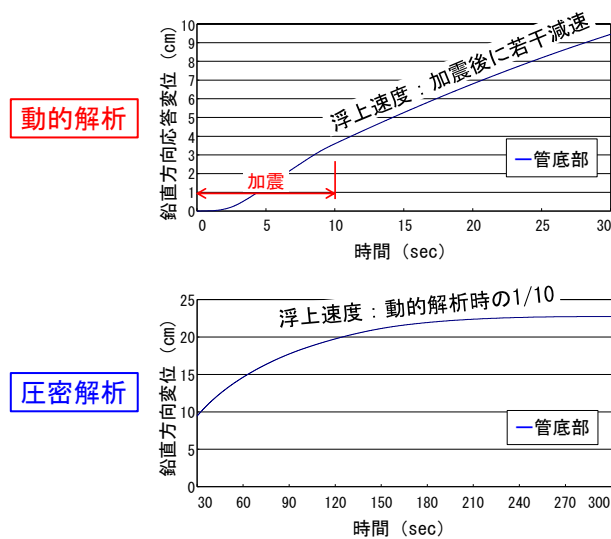
解析結果・無対策  
 (φ400塩ビ管・空水・土被り4D・側方等変位境界・水平動150gal・圧密解析終了時)

10

10

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (8)

### ○解析結果【鉛直変位量、地盤の透水性(有)】



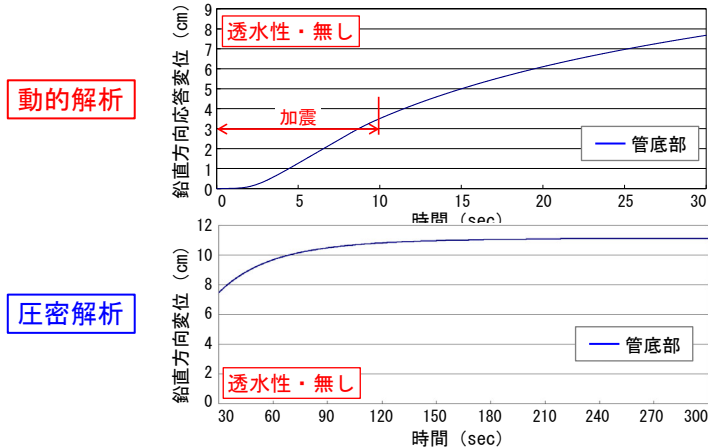
(φ400塩ビ管・空水・土被り1D・側方等変位境界・水平動150gal・時刻歴図)

11

11

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (9)

### ○解析結果【鉛直変位量、地盤の透水性無し】



(φ400塩ビ管・空水・土被り4D・側方等変位境界・水平動150gal・時刻歴図)

#### 【既往文献の指摘を確認】

透水性を考慮しない場合、管路直下の過剰間隙水圧が低くなる  
(場合によっては負圧) ⇒剛性が回復した浮上量が小

12

12

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (10)

### ○考察

- 管路浮上は、見かけ上、液状化による管路下部地盤への周辺地盤の潜り込みによるもの。
- 地震中と地震後の過剰間隙水圧が大きい状態や浮上は継続する。  
⇒地盤条件や舗装等の影響により、水圧が消散しにくい条件にも配慮  
⇒余震などの影響に留意することも重要

#### 【浮上しやすい要因について】

- 土被りが浅く、口径が大きく、空水など見かけ比重の小さい管路は特に浮上しやすい。  
⇒これに該当する管路は、一般的な下水道管路に加えて、上水道施設であれば、2,000mm程度の大口徑で比較的土被りが浅く施設の使用状況によっては空水状態となる耐震性貯水槽が該当する。  
⇒内水の有無の影響は特に大きく、下水道管路は、水道管路に比べてかなり浮上しやすい。

13

13

## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (11)

### ○考察

#### 【浮上しにくい要因について】

- 水道のダクタイル鋳鉄管路においては、管路浮上の評価式では浮上する結果となる条件であっても、今回の解析結果で400mm（満水）では**浮上量は非常に小さい**。  
 ⇒ 過去の地震被害報告と整合する。  
 ⇒ **充水された比重の大きい中小口径（φ400mm程度以下）の水道管路は浮上しにくく、浮上してもその量はかなり小さい可能性があると考えられる。**
- **トレンチタイプの埋戻材のみ液状化のケース**においても浮上しにくいですが、埋戻材側面の地盤を剛性の大きい地盤と想定し、見かけ上解析では**剛土層**となり、せん断ひずみが生じにくくなっていた。【防災科研での実験と整合】  
 ⇒ ただし、**地震の継続時間が長い**場合は浮上が大きくなることから、**余震の影響が顕著な場合**や、埋戻材の側方地盤の剛性が小さい**軟弱地盤の場合**は、せん断ひずみ量も大きくなり、**浮上量が大きくなる**ことが推測される。

14

14

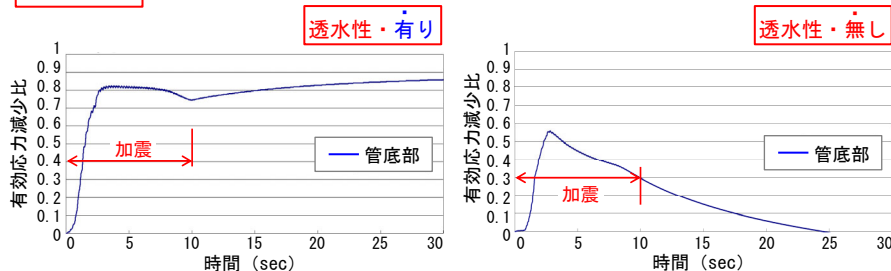
## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (12)

### 【地盤の透水性の考慮について】

(地盤の透水性を考慮しない場合)

- 管路下部地盤に引張ひずみ
- ↓
- 有効応力減少比が回復しない（局所的な水の移動ない）
- ↓
- 地盤の剛性が回復し、浮上しにくくなる

#### 動的解析



15

15

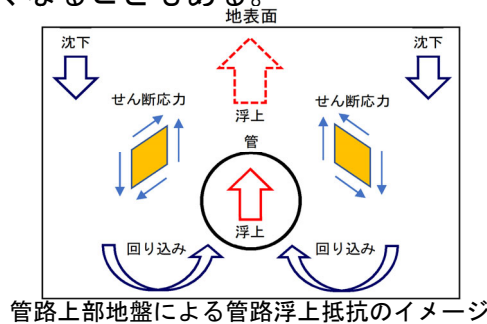


## 2. 液状化現象に伴う管路浮上の特性分析 (13)

### ○考察

#### 【管路上部の液状化地盤による浮上抵抗について】

- 管路上部地盤のせん断応力や剛性などの分布状況を整理した結果
  - ⇒特に過剰間隙水圧の消散に伴う水圧低下によって、管の浮上に抵抗する地盤のせん断剛性が徐々に回復している。
  - ⇒この効果が大きい場合、浮上しても浮上量はかなり小さくなることもある。



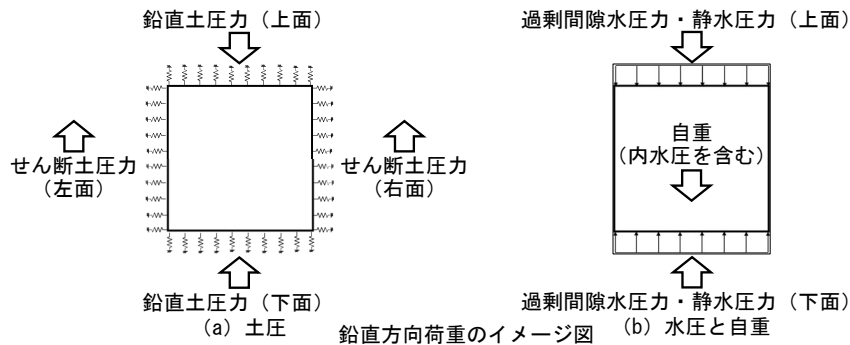
16

16

## 3. 管路浮上作用の分析 (1)

### ●鉛直方向合力

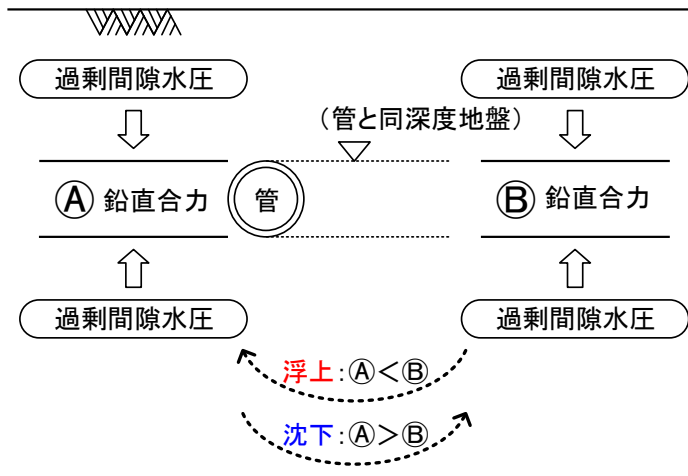
- =鉛直土圧力：構造物上面または下面に作用する有効鉛直土圧の合力
- せん断土圧力：構造物左面または右面に作用するせん断土圧の合力
- 過剰間隙水圧力：構造物上面または下面に作用する過剰間隙水圧の合力
- 静水圧合力：構造物上面または下面に作用する静水圧の合力
- 鉛直方向合力：構造物に作用する鉛直方向力の合力



17

17

### 3. 管路浮上作用の分析 (2)



浮上の有無 : 主に水圧、耐震基準類の浮上判定式とおおむね整合  
 浮上量を左右 : 土被りによる浮上抵抗も影響など (上記とは別メカニズム)

18

18

### 3. 管路浮上作用の分析 (3)

		構造物の見かけ比重 $\rho$	備考
埋設管モデル	ケース①	1.1	上水埋設管VP250満水相当
	ケース②	0.2	下水埋設管VU250空水相当
	ケース③	2.0	地盤よりも重い仮想条件

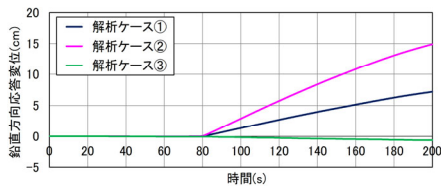


図 解析結果 (管路の鉛直変位量)

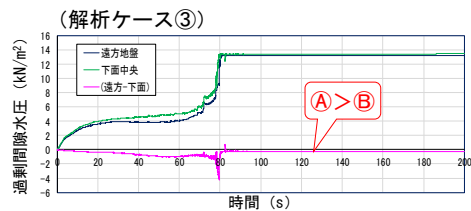
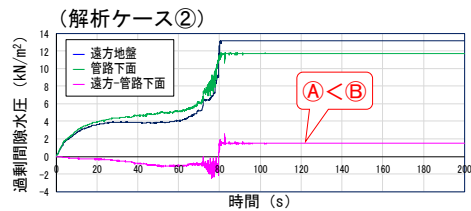


図 管路上下面の深度に作用する過剰間隙水圧の時刻歴

19

19

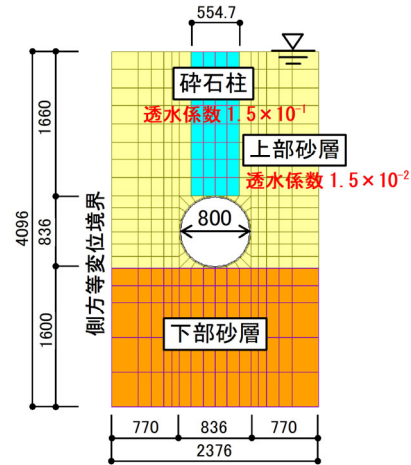
#### 4. 砕石層による既設管路浮上対策に関する分析 (1)

##### ○分析の方針

- 過剰間隙水圧の消散を砕石層による排水ドレーン効果で促進させ、管路上部地盤における浮上抵抗力を増大させる効果に期待。
- 前章で用いた解析モデルに砕石層（管路上部全延長）を追加することにより解析を行う。

##### ○解析条件

- 砕石層の地盤条件は、砂層の透水係数の10倍とした。  
⇒砕石層の透水係数が粗粒砂レベルの条件とした。  
⇒ここでの解析結果に比べて、さらに効果が期待できる可能性はある。

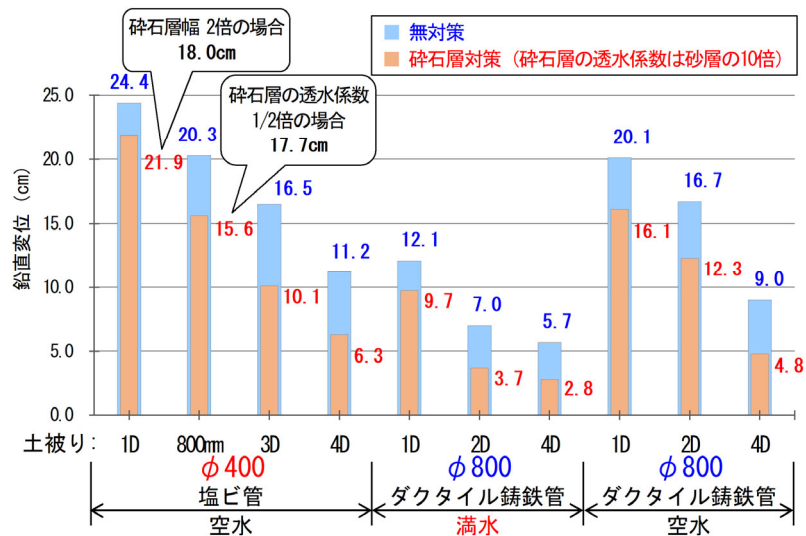


Φ800ダクタイル鋳鉄管土被り2Dモデル 20

20

#### 4. 砕石層による既設管路浮上対策に関する分析 (2)

##### ○解析結果【砕石層による対策の浮上量低減効果量】



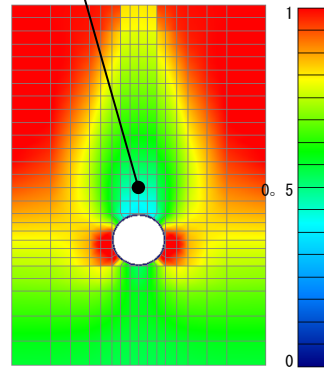
21

21

#### 4. 碎石層による既設管路浮上対策に関する分析 (3)

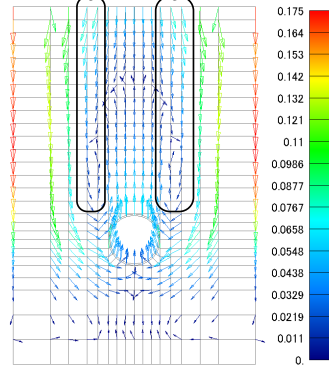
##### ○解析結果

碎石層による  
水圧消散の  
促進が確認



過剰間隙水圧比

この辺の変位方向が  
無対策と大きく異なる



変位図

解析結果・**碎石層有**

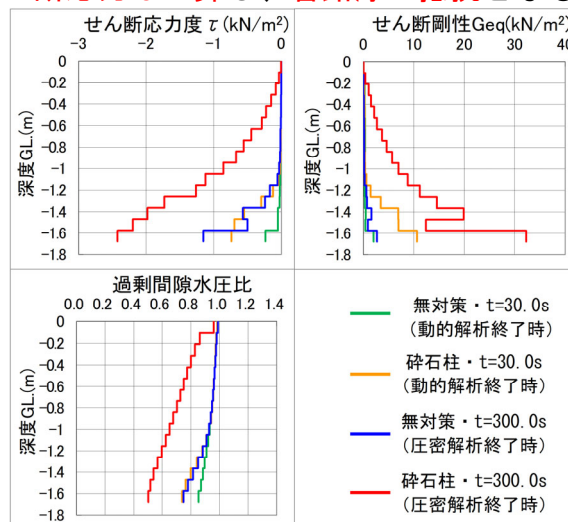
(φ400塩ビ管・空水・土被り4D・側方等変位境界・水平動150gal・圧密解析終了時)

22

22

#### 4. 碎石層による既設管路浮上対策に関する分析 (4)

碎石層による過剰間隙水圧の消散効果により、管路上部地盤のせん断応力は上昇し、**管路浮上抵抗**となる。



碎石層隣接地盤の応答値深度分布

23

23

## 4. 砕石層による既設管路浮上対策に関する分析 (5)

### ○考察

浮上量の削減率は、**最大50%程度**となり、**万全な耐震性を確保するための効果**としては、**不十分**である。

#### (対策効果の傾向)

- 砕石層の対策効果は、土被りが大きくなると現れやすくなる傾向が確認されたが、そもそも土被りの大きい管路は、浮上しにくいことから、**対策の要求度は低い**傾向。

#### (砕石層による対策の実用化に向けて)

- 今回の解析条件では、砕石層による対策は、様々な管路条件や埋設条件への適用というよりも、**効果が大きい条件に限られる**。  
⇒例えば、特に**浮上しやすい管路条件**（**空水状態**、**土被りが口径に比べて比較的浅い等**）にあり、かつ、ある程度過剰間隙水圧の**消散効果が高い**（深い）、さらに過剰間隙水圧の**消散時間が長い**など。
- **ある程度の浮上量を削減**することを目的とした場合への適用は考えられる。
- さらに、**複合的な効果**として、砕石層を**反力材**（**路盤を反力点**）とする**効果**や、**荷重としての浮上抑制効果**を合わせて対策方法を検討する余地はある。

24

24

## 5. まとめ (1)

### 【上下水道管路の浮上挙動の特性】

- 埋設管路の浮上は、過剰間隙水圧の消散状況によっては、地震後も継続し、それによって、浮上量がかなり大きくなる場合がある。
- 埋設管路が浮上しやすい条件としては、管路の見かけ比重が小さいこと（**充水されていない**、**口径が大きい**など）、**土被りが小さい**こと、**管路下部地盤の液状化層が大きい**こと、**管路周辺が一様に液状化すること**、及び**地震の継続時間が長くなる**こと。
- 管路上部から地表面に向かって生じる過剰間隙水圧の消散により、**液状化地盤の剛性回復が進展し**、**管路浮上の直接的な抑止力**となる。  
⇒**上水道管路は**、**充水状態**にあり**下水道管路に比べて比重が大きい**こと、**中小口径以下の管路においては**、**口径に対して土被りが数倍以上ある**ことなどから、**浮上しにくく**、**浮上したとしても浮上量はかなり小さい**傾向である。  
⇒**水道施設耐震工法指針に示された浮上判定において浮上する**との**評価結果となった管路条件であっても**、**詳細に解析することにより**、**ほとんど浮上しない**場合がある。
- **液状化における管路浮上の有無は**、**水道耐震指針の浮上判定式**とおおむね整合した。
- **浮上量は**、**多くの要因が複雑に関係している**ことから、**浮上量を簡便に評価することは困難**である。

25

25

## 5. まとめ (2)

---

### 【砕石材による対策効果】

- この工法単独では、万全な対策であることは確認できなかったが、ある程度の浮上量を削減することを目的とした場合への適用や、複合的な効果として、砕石層を反力材（路盤を反力点）とする効果や、荷重としての浮上抑制効果を合わせて対策方法を検討する余地はある。

26



# 粒状体中の剛体の 浮上と沈下のメカニズム (DEMによる解析結果の紹介)

鳥取大学工学部 小野祐輔  
E-mail: ysk@tottori-u.ac.jp

1

1

## 背景と目的

- 液状化した地盤中の埋設管の浮上・沈下は重要な課題となっている。
- 通常、液状化した地盤を流体とみなし、浮力と重力のバランスで管の浮上の可能性の有無を判定する。
- 浮上量、沈下量の予測は未だ難しい。
- やはり液状化した地盤であっても粒状体としての性質が関係しているのではないか。
- DEM（個別要素法）解析により粒状体中で振動を受けて管が浮上、沈下する力学メカニズムを調べる。

2

2

## リサーチ・クエスチョン

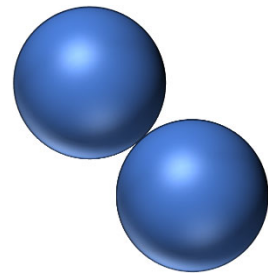
- 地盤の見かけの密度に対する管の見かけの密度の比は管の浮上, 沈下にどう影響するのか?
  - 密度比 = 管の見かけの密度 ÷ 地盤の見かけの密度
  - 液体であれば
    - 密度比 < 1.0 : 浮上する
    - 密度比 = 1.0 : 浮上も沈下もしない
    - 密度比 > 1.0 : 沈下する
- 水平方向の加振振動数は管の浮上, 沈下にどう影響するのか?
- 水平方向の加振振幅は管の浮上, 沈下にどう影響するのか?

3

3

## DEM (個別要素法)

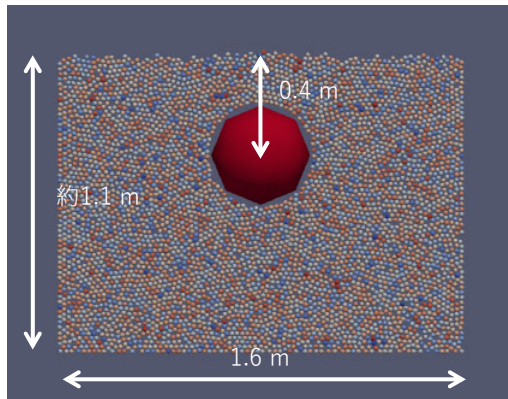
- 地盤を剛体粒子の集合とモデル化し, 剛体粒子間の接触力を時々刻々求め, 地盤の挙動を数値的に求める.
- 剛体粒子の並進運動と回転運動を求める.
- 剛体粒子間の接触力は, 接触点における法線方向力と接線方向力に分けて求める.
  - 法線方向力は, 剛体粒子同士が接しているときだけ反発力作用する.
  - 接線方向力では, 最大摩擦力を考慮する.
  - いずれの力もばねを用いて計算する. 粒子同士の若干の重なりは許容する.



4

4

## 解析モデル



### 地盤に用いた粒子（円板）

- 直径：0.02 m
- 密度：4.0E+03 kg/m<sup>3</sup>
- ヤング係数：3.0E+08 Pa
- ポアソン比：0.20
- 粒子間の接触の摩擦角：20.0°
- 約4500個

### 管に見立てた粒子（円板）

- 地盤に用いた粒子の20倍の直径
- 密度比が指定の値になるように質量を設定
- ヤング率，ポアソン比，摩擦角は地盤に用いた粒子と同じ

5

5

## 解析条件

- 水平方向に正弦波を10秒間加えた。
- 容器に変位波を与えた。

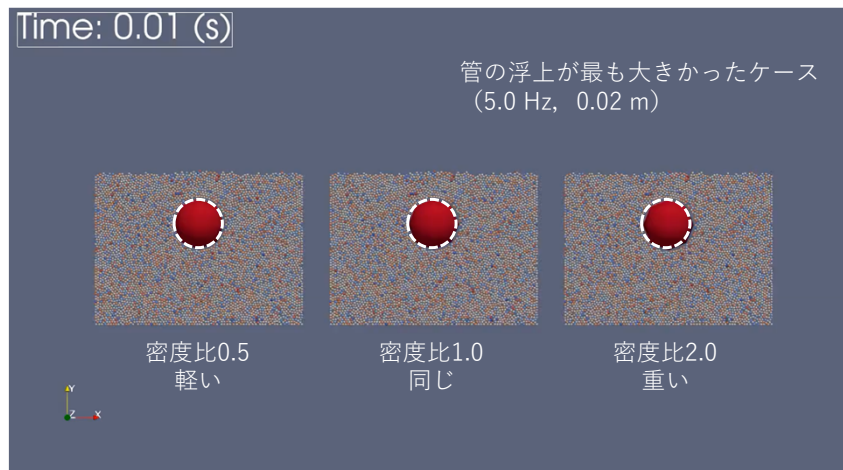
密度比	0.5, 1.0, 1.5 (3 ケース)
加振振動数	5.0 Hz, 10.0 Hz, 20.0 Hz (3 ケース)
加振振幅	0.02 m, 0.01 m (2 ケース)

全18ケース

6

6

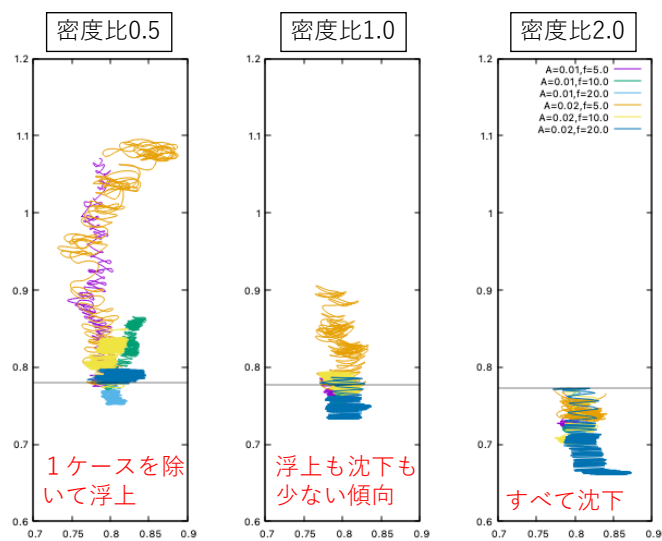
# 解析結果：浮上と沈下の様子



7

7

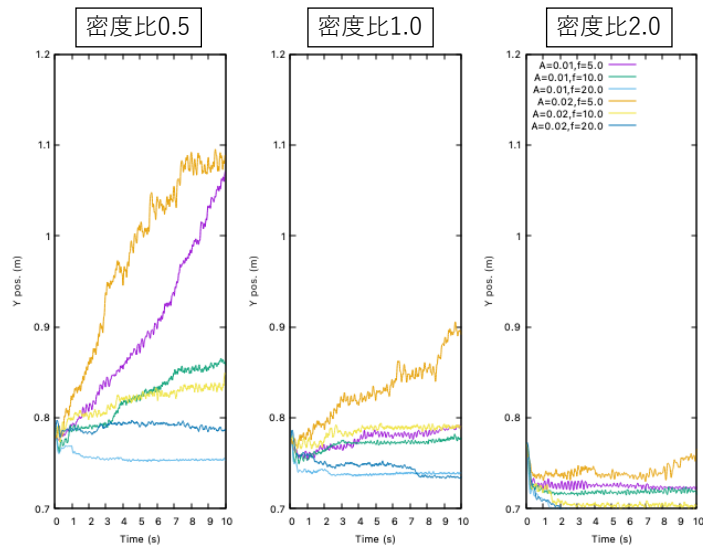
# 解析結果：管の移動の軌跡



8

8

## 解析結果：管の浮上・沈下の時刻歴



9

9

## 解析結果：管の浮上量・沈下量

管の浮上量（正の値）と沈下量（負の値）

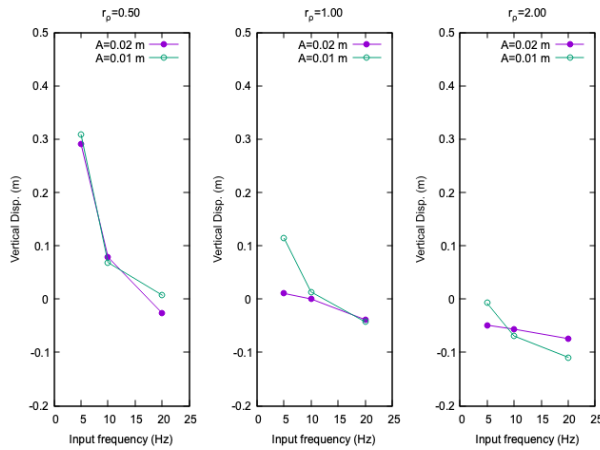
密度比	振幅	振動数		
		5.0 Hz	10.0 Hz	20.0 Hz
0.5	0.01 m	0.291 m	0.079 m	-0.026 m
	0.02 m	0.309 m	0.069 m	0.007 m
1.0	0.01 m	0.011 m	0.000 m	-0.038 m
	0.02 m	0.114 m	0.013 m	-0.043 m
2.0	0.01 m	-0.049 m	-0.056 m	-0.074 m
	0.02 m	-0.007 m	-0.069 m	-0.109 m

浮上の最大値：0.309 m  
沈下の最大値：0.109 m

10

10

# 解析結果：振幅と振動数の影響



## 密度比0.5

- 振幅が大きいほど浮上しやすい
- 振動数が小さいほど浮上しやすい

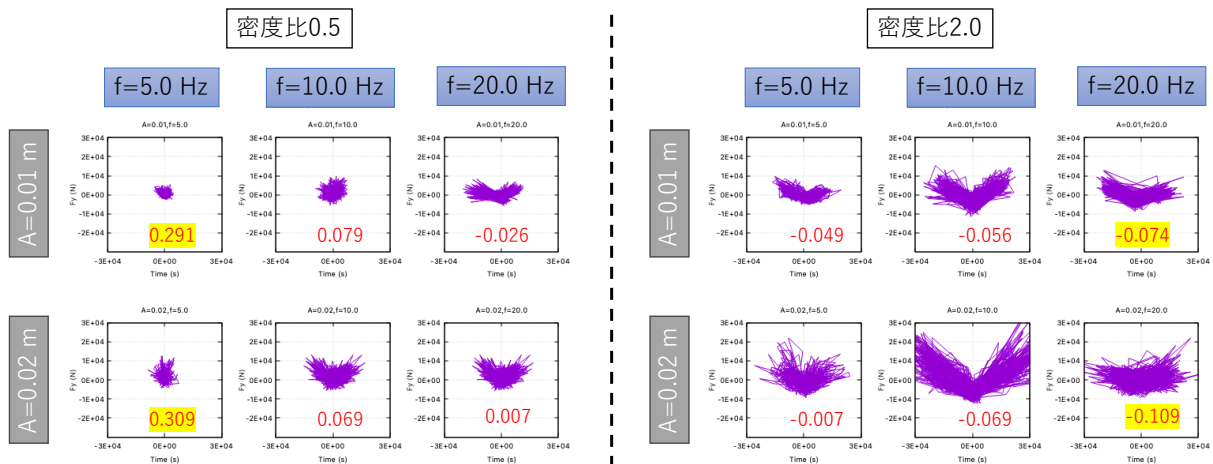
## 密度比1.0

- 振幅、振動数によって浮上したり沈下したりする

## 密度比2.0

- 振幅が小さいほど沈下しやすい
- 振動数が大きいほど沈下しやすい

# 解析結果：管に作用する力の軌跡

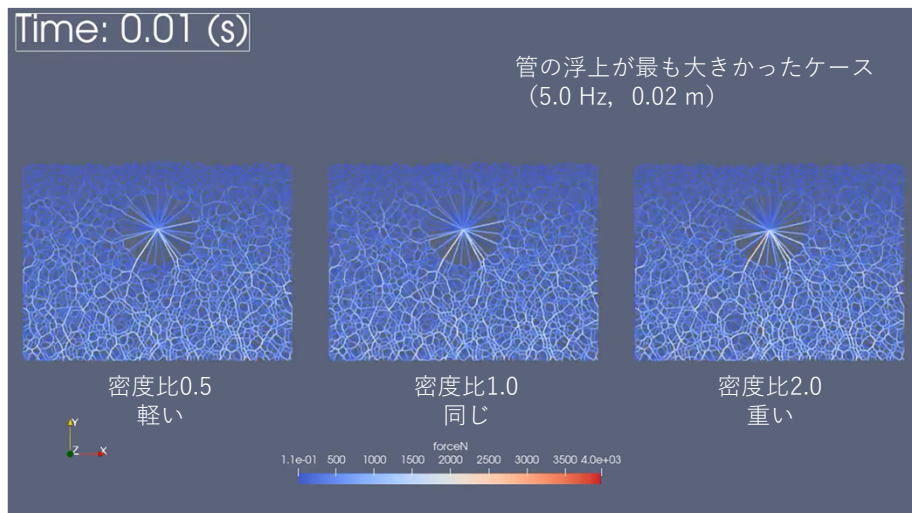


浮上量大きいケースでは鉛直方向に比べて水平方向の力の作用が小さい

沈下量大きいケースでは鉛直方向に比べて水平方向の力の作用が大きい



## 解析結果：力の伝達の様子



13

13

## まとめ

- **密度比**
  - 管の見かけの密度が周辺地盤より小さい：浮上しやすい
  - 管の見かけの密度が周辺地盤と等しい：浮上したり沈下したりする
  - 管の見かけの密度が周辺地盤より大きい：沈下しやすい
- **振動数の影響**
  - 管の見かけの密度が周辺地盤より小さい：振動数が小さいほど浮上しやすい
  - 管の見かけの密度が周辺地盤より大きい：振動数が大きいほど沈下しやすい
- **振幅の影響**
  - 管の見かけの密度が周辺地盤より小さい：振幅が大きいほど浮上しやすい
  - 管の見かけの密度が周辺地盤より大きい：振幅が小さいほど沈下しやすい
- **その他**
  - 浮上量が大きくなるケースでは、水平方向の力の作用が小さい。
  - 沈下量が大きくなるケースでは、水平方向の力の作用が大きい。
  - 振動中に地盤が下方から締め固められることが浮上・沈下に影響している？

14

14