

地震工学委員会 R5年度第2回研究会

「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

◆対象施設

水循環施設（主に上下水道施設）

◆目的

“津波（高潮）” “液状化” 被害に着目し、専門領域を超えて研究・技術情報の交流を図り、より合理的な対策方法の研究を行い、その手法や設計手法の確立を行う。

◆活動期間等

2018年11月～ 2024年3月（5年4ヶ月）

（再実験などによる延期）

◆補助費用

予定なし

◆主な検討内容

- WG 1 : 強震動と津波に対する構造物の合理的対策技術の開発
 - WG 2 : 液状化地盤にある構造物の合理的な地震対策技術の開発
 - 全 体 : 水道施設耐震工法指針（日本水道協会）の改訂作業支援
- ⇒ ・ 検証実験や数値シミュレーションなど実施による具体的な評価方法や対策方法の検討。
- ⇒ ・ 耐震設計実務レベルの検討に反映できる具体的な対策方法の提案。

◆コアメンバー

■委員長：飛田哲男（関西大学）〔副委員長：有賀義明（弘前大学）〕

■幹事長：宮本勝利（日水コン）〔幹事長代理：小野祐輔（鳥取大学）〕

■オブザーバー：宮島昌克（金沢大学）

■主査：

【WG 1】 有賀義明（弘前大学）

【WG 2】 中澤博志（静岡理工科大学）

■委員数：26名

令和4年度・小委員全体の活動報告概要（1 / 2）

◆委員会・WG活動等

委員会 : 3回開催

WG活動 : WG 1 5回協議

WG 2 4回協議

液状化実験の見学会

◆論文発表等

● WG1

1) 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, 土木学会77回年次学術講演会, 2022年9月

2) 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, 2022年10月

3) 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, 2022年10月

4) 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有効性, 日本地震工学会・大会ー2022, 2022年12月

5) 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, 2022年12月

6) 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, 2023年1月

◆論文発表等

7) 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、2023年1月

8) 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.

●WG 2

水道施設耐震工法指針・解説 (2022年版) 改訂作業における執筆活動支援

WG1の2022年度活動報告および2023年度活動計画

1. WG1の研究テーマ

強震動と津波の双方に対する合理的な対策技術の開発

2. 研究目的

- ◆沿岸域の構造物の防災・減災に役立てるため
- ◆強震動と津波の双方に有効な対策技術の開発
- ◆耐震・耐波ではなく「免震・免波」という対策技術の開発

【研究の特徴】

- 強震動対策と津波対策を別々の方法で行うのではなく、剛性の低い緩衝材を活用することによって、**強震動の影響の低減(免震効果)**と**津波の影響の低減(免波効果)**を**同一の方法**で実現するという考え方に特長がある

地上部の緩衝材
◆クッション効果
による津波波圧の
吸収/低減

津波

地上部
緩衝材

地下部
緩衝材

地震動

地下部の緩衝材

- ◆構造物の回転・水平移動を発生し易くする
- ◆津波に対しては津波波圧の吸収/低減効果（免波材）
- ◆強震動に対しては地震動の吸収/低減効果（免震材）

3. 2022年度の研究成果

(1) 実施した研究項目

- ①免波構造に関する津波模型実験
- ②SPH法による津波模型実験の再現解析
- ③免震・免波材料の簡易評価法の検討
- ④三次元FEM解析による免波構造の解析評価の検討
- ⑤三次元FEM解析による構造物内の応力に対する波圧の影響の評価

(2) 主な研究結果

- ◆**津波模型実験**: 緩衝材による波圧の低減効果について5種類の材料を用いて実験を行った。その結果、低反発で変形しやすいEPDM(エチレプロピレンゴムスポンジ)等で想定したような低減効果を確認できた。
- ◆**SPH法による流体解析**: 構造物の側面勾配による波圧低減効果に関する津波模型実験の再現解析を行い、実験結果と符合する解析結果を得た。
- ◆**緩衝材の簡易評価法**: 重錘落下による衝撃試験を実施し、緩衝材の変位、緩衝材を介した時の伝達圧力等を計測し、計測結果について考察した。
- ◆**三次元FEM解析**: 免波構造の解析評価および波圧の分布形状を考慮した場合の構造物内の応力解析を実施した。

4, 2023年度のWG1活動計画

(1) 概要

昨年に引き続き、下記の事項について研究活動を行う。

(2) 予定研究内容

①免波構造に関する津波模型実験の実施

- ・計測法、相似則等のチェック
- ・これまでの実験結果を踏まえた最適材料の選定および検証実験
- ・構造物用緩衝材としての新しい構造の可能性の検証実験

②SPH法による津波模型実験の再現解析の実施

- ・緩衝材を配置した場合の流体解析

③免震-免波材料の簡易評価法の検討

- ・地震工学研究発表会での研究成果発表
- ・模型実験に適した材料の選定法の検討(要求される材料特性等)
- ・実物への活用に適した材料の選定法(要求される材料特性等)

④三次元FEM解析による免波構造の解析評価法の検討

- ・動的な載荷による解析法の可能性の検討
(緩衝材を介して構造物に衝撃圧が作用した時の解析法の検討)

⑤三次元FEM解析による波圧設定の影響の解析評価

- ・波圧の分布形状、地盤と構造物の非連続性の影響等の検討

⑥研究成果のとりまとめ

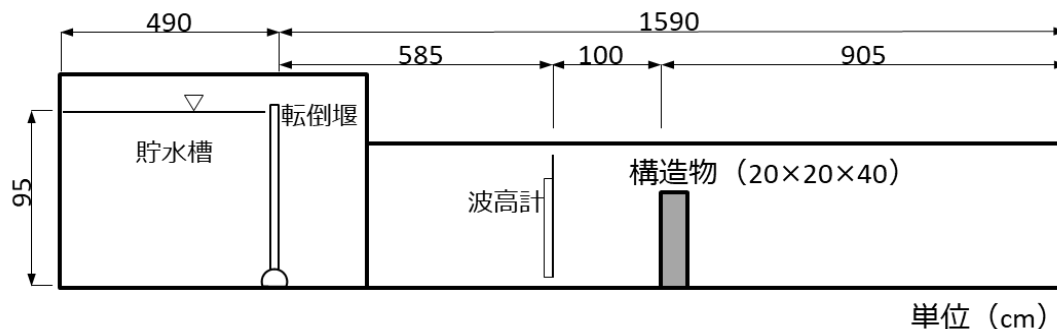
- ・報告書の作成

【参考】 2022年度 WG1の研究結果概要

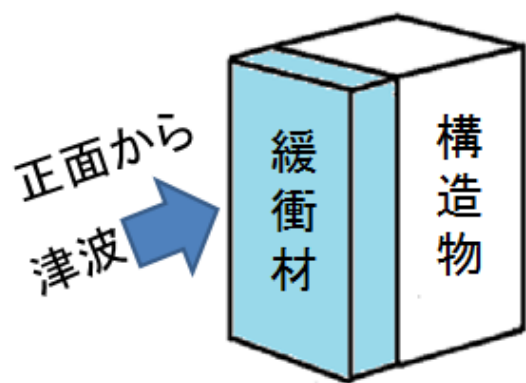
2022年度のWG1の研究結果概要として、各研究項目の概要と成果を示す。

- ①免波構造に関する津波模型実験
- ②SPH法による津波模型実験の再現解析
- ③免震・免波材料の簡易評価法の検討
- ④三次元FEM解析による免波構造の解析評価の検討
- ⑤構造物内に発生する応力に対する波圧の低減効果の影響に関する三次元FEM解析

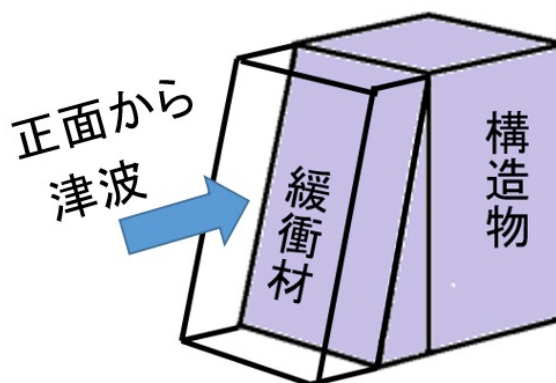
①-1 免波構造に関する津波模型実験



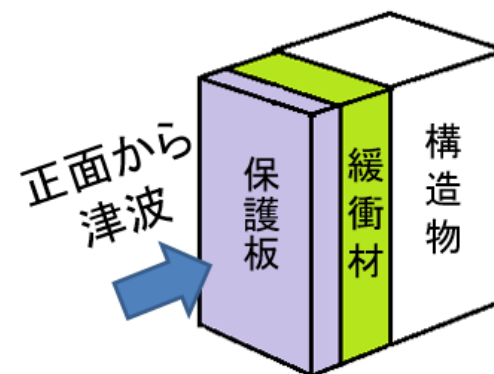
津波模型実験を行った二次元水路



(a) 緩衝材を鉛直側面の前面に配置



(b) 緩衝材を斜面側面に配置



(c) 緩衝材の前面に保護板を配置

津波模型実験の構造部と緩衝材の配置

①-2 免波構造に関する津波模型実験

SPH法による再現解析に使用する“二次元条件の実験”(表-1)、津波波圧を計測するために構造物を薄く(1.2cm)した実験(表-2)、緩衝材の“材質や厚さの違い”による波圧低減効果の実験(表-3)を実施した。

表-1 実験条件(2次元実験)

目的・着目点	Case	津波高(cm)	入射角	側面勾配	緩衝材	構造物模型H=20cm
(0) 二次元条件	0-11	17.5	0度	鉛直	なし	構造物幅＝水路幅
	0-12	17.5	0度	鉛直	EPDM	構造物幅＝水路幅

表-2 実験条件(基本ケース)

目的・着目点	Case	津波高(cm)	入射角	側面勾配	緩衝材	要点
(1) 基本ケース		25	0度	鉛直	なし	波圧の測定

表-3 実験条件(緩衝材の低減効果実験)

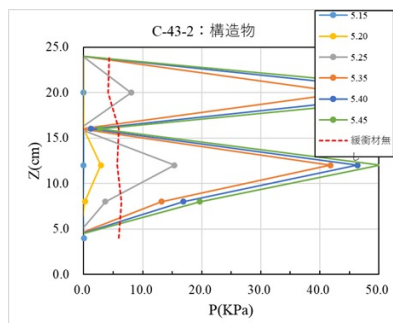
目的・着目点	Case	津波高 (cm)	入射角	側面勾配	緩衝材		
					種類	保護板	厚さ
(2) 構造物の鉛直側面の緩衝材の低減効果	41	25	0度	鉛直	EPDM	有り	5cm
	42	25	0度	鉛直	ウレタンスポンジ	有り	5cm
	43	25	0度	鉛直	ゴムチップ	有り	5cm
	44	25	0度	鉛直	軟質ウレタンフォーム	有り	5cm
	45	16	0度	鉛直	EPDM	有り	5cm
	46	16	0度	鉛直	ウレタンスポンジ	有り	5cm
	51	25	0度	鉛直	EPDM	有り	10cm
	52	25	0度	鉛直	ウレタンスポンジ	有り	10cm
	53	25	0度	鉛直	ゴムチップ	有り	10cm
	54	25	0度	鉛直	軟質ウレタンフォーム	有り	10cm
	55	16	0度	鉛直	EPDM	有り	10cm
	56	16	0度	鉛直	ウレタンスポンジ	有り	10cm

①-3 免波構造に関する津波模型実験

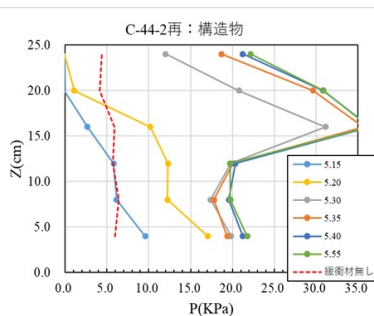
- 5種類の緩衝材について、厚さ5cmと10cmの場合の波圧の鉛直分布を調べた。
- EPDMとウレタンスポンジを緩衝材として使用するケースにおいて、緩衝材の無い場合に比べて構造物面の波圧が低減しており、免波効果が認められた。

緩衝材厚
5cm

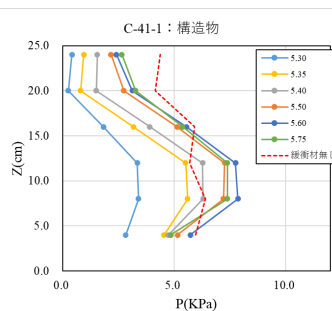
ゴムチップ



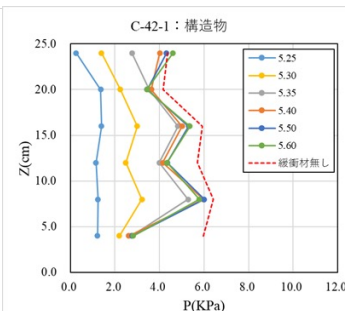
軟質ウレタンフォーム



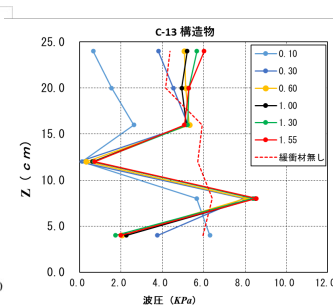
EPDM



ウレタンスポンジ

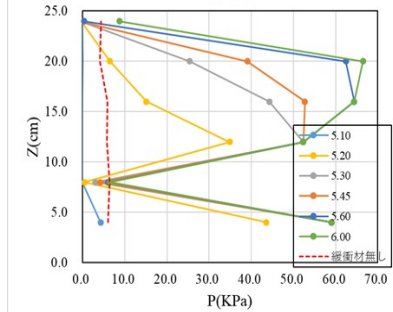


グラスウール

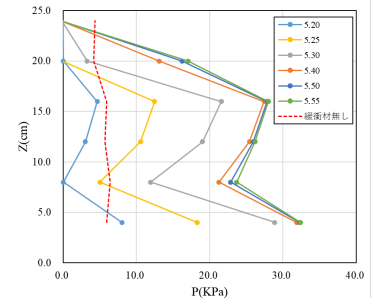


緩衝材厚
10cm

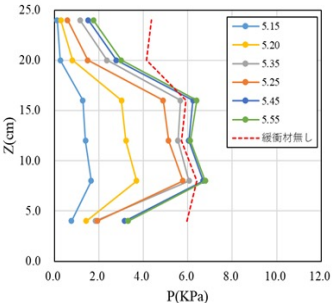
C-53-2：構造物



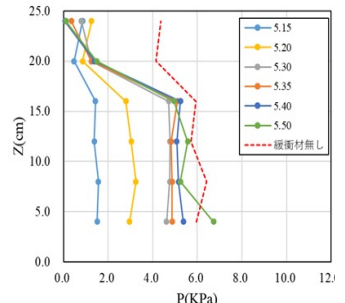
C-54-2：構造物



C-51-1：構造物



C-52-1：構造物



C-23 構造物

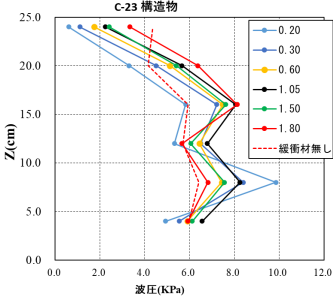


図-1 波力発生から最大までの波圧鉛直分布

②-1 SPH法による津波模型実験の再現解析(1/2)

目的：数値解析の妥当性確認を行い、設計に資する検討手法を確立する。
(実規模条件の検討では相似則の考慮が不要となるため有利である。)

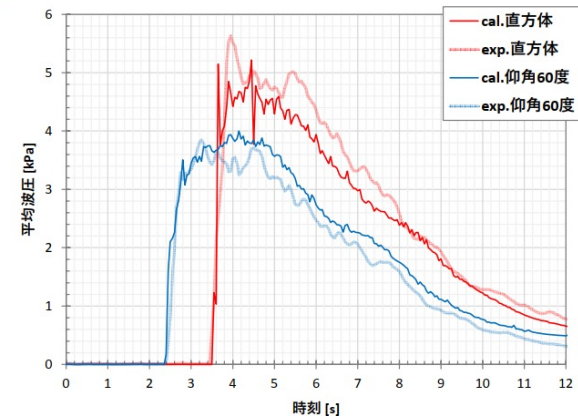
(1) 緩衝材のない実験条件に対する解析



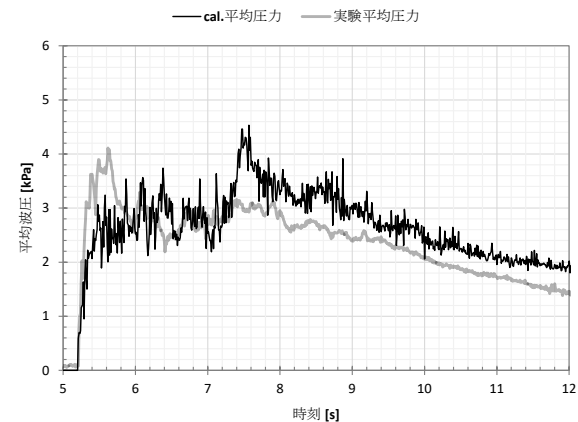
構造物の3次元性を考慮した検討については、建物形状等による効果を含めて衝突時の圧力など比較的整合した結果が得られている。

しかしながら、3次元解析であるため計算負荷が大きく、条件を振った検討を進めることに困難がある。

一方で、緩衝材による影響評価を効率的に進めるために実施した2次元衝突条件による解析結果と実験結果の比較では、衝突直後の波圧が小さい傾向にあり、また以降の波圧傾向にも違いが見られており、流速以外の要因についても検討が必要であると考えられる。(3次元条件に比べて空気巻き込み等の影響が大きいと考えられる。課題事項である。)



建物壁面の勾配を考慮した3次元解析結果

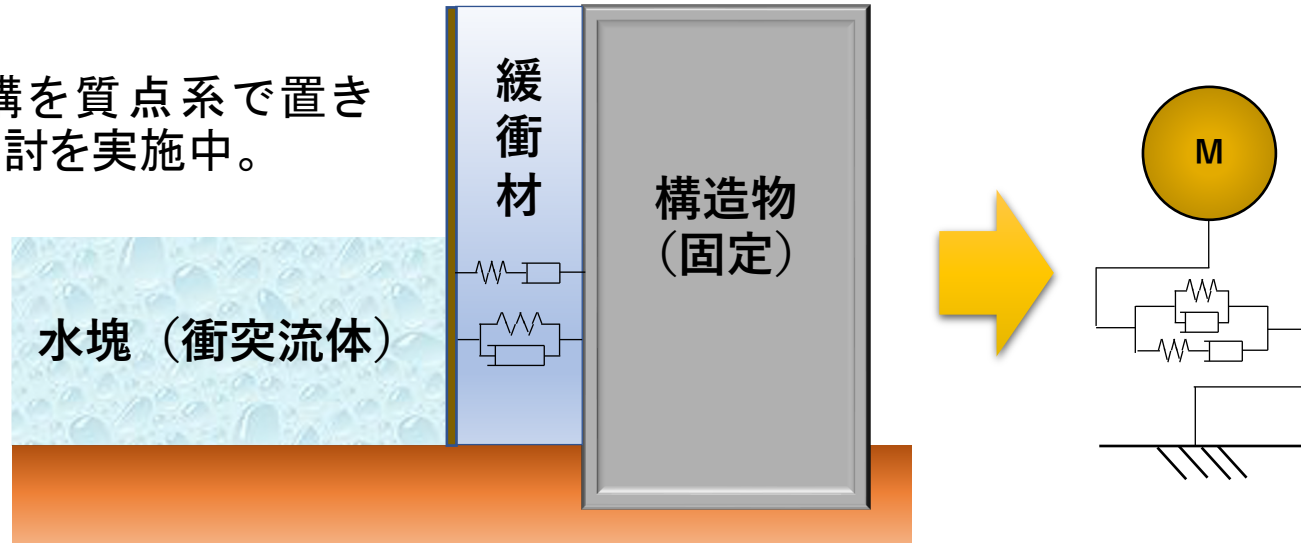


2次元衝突条件における2次元解析結果

②-2 SPH法による津波模型実験の再現解析(2/2)

(2) 緩衝材を考慮した実験条件に対する解析

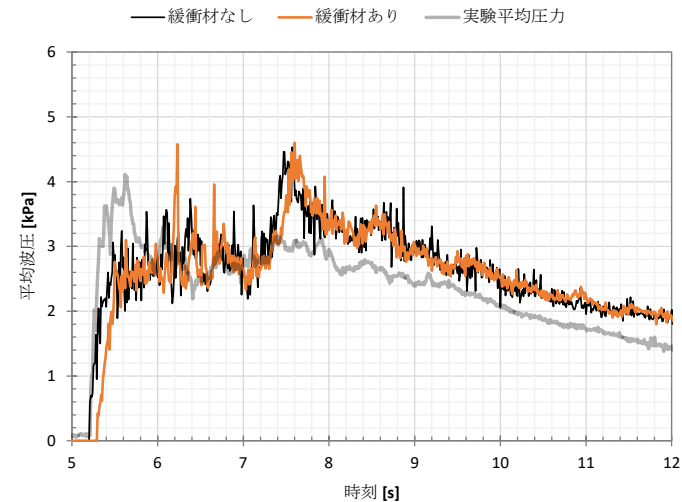
緩衝機構を質点系で置き換えた検討を実施中。



緩衝材の衝撃試験結果を参考に、モデル化を行い、検討を実施中である。過去に実施した3次元解析事例に比べて緩衝材が剛であるため、効果はあまり確認出来ていない。

表-1 緩衝材モデルの設定条件

項目	設定内容
緩衝材厚さ	100 mm
緩衝材密度	200 kg/m ³
ばね定数	170 kN/m
減衰比	0.15



2次元的な衝突条件における2次元解析結果

③-1 免震・免波材料の簡易評価法の検討

1) 目的

津波模型実験に使用した緩衝材の落錘式衝撃実験を実施することで、緩衝材の特性から簡易評価法の検討とSPH法による解析へのフィードバックを行う。

2) 落錘式衝撃実験

落錘式衝撃実験装置を用いて、重錘100kgを任意の高さから落下させ、緩衝材背面への衝撃伝達荷重、応力分布、重錘の時刻歴変化を計測した。

3) 試験体

ゴムチップ、ウレタンゴムスポンジ、EPDMゴムスポンジ

4) 载荷条件

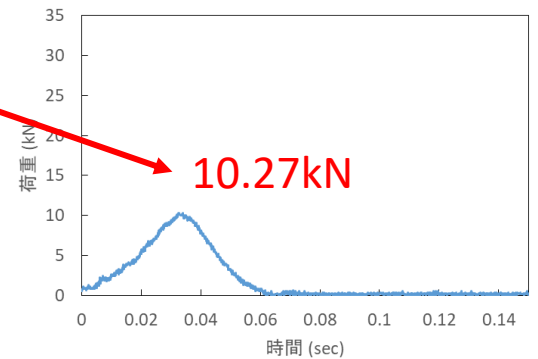
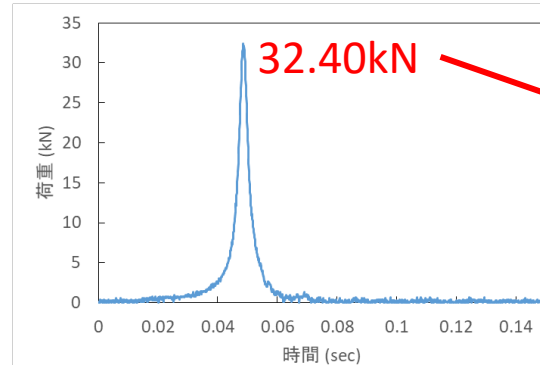
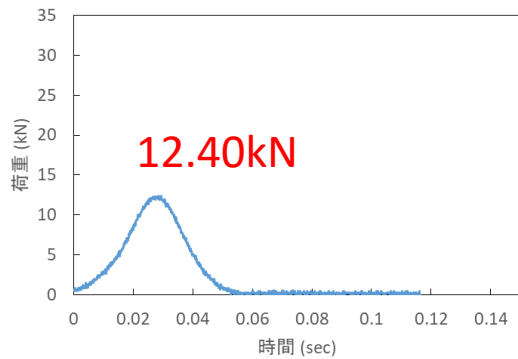
全面圧縮、局所载荷、局所载荷＋試験体に鋼板設置



③-2 免震・免波材料の簡易評価法の検討

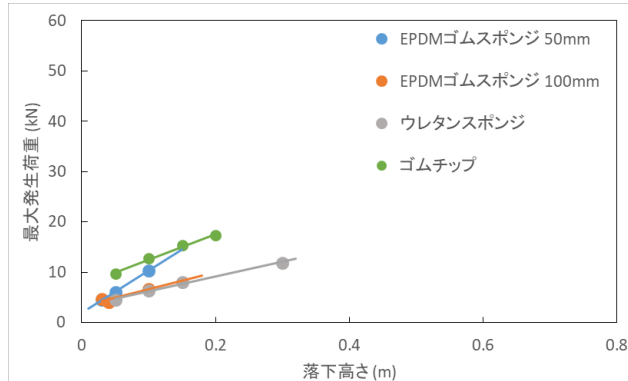
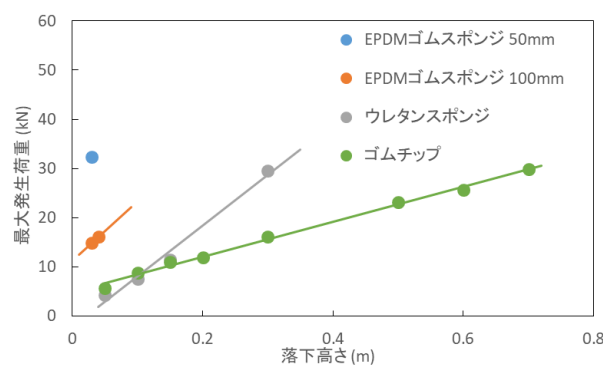
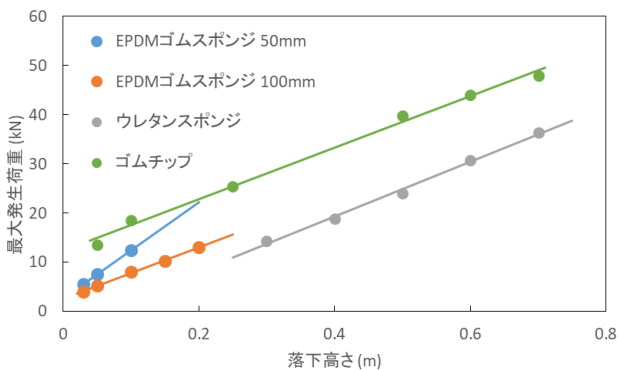
4) 実験結果の一例 (EPDMゴムスポンジ厚さ50mm)

- ・前面に剛性のある板を設けることで全面圧縮に近い形となり伝達荷重が低減される。
- ・力積などの考察も行い、運動量保存則の成立による実験の妥当性も評価した。



5) 考察

- ・緩衝材の剛性により、緩衝材として効果的に機能する範囲が存在する。
- ・津波波圧は、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評価が可能⇒静的な荷重～変位関係で評価できる可能性もある。



全面載荷

局所載荷 (φ100mm)

局所載荷+鉄板1.6mmt

④-1 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

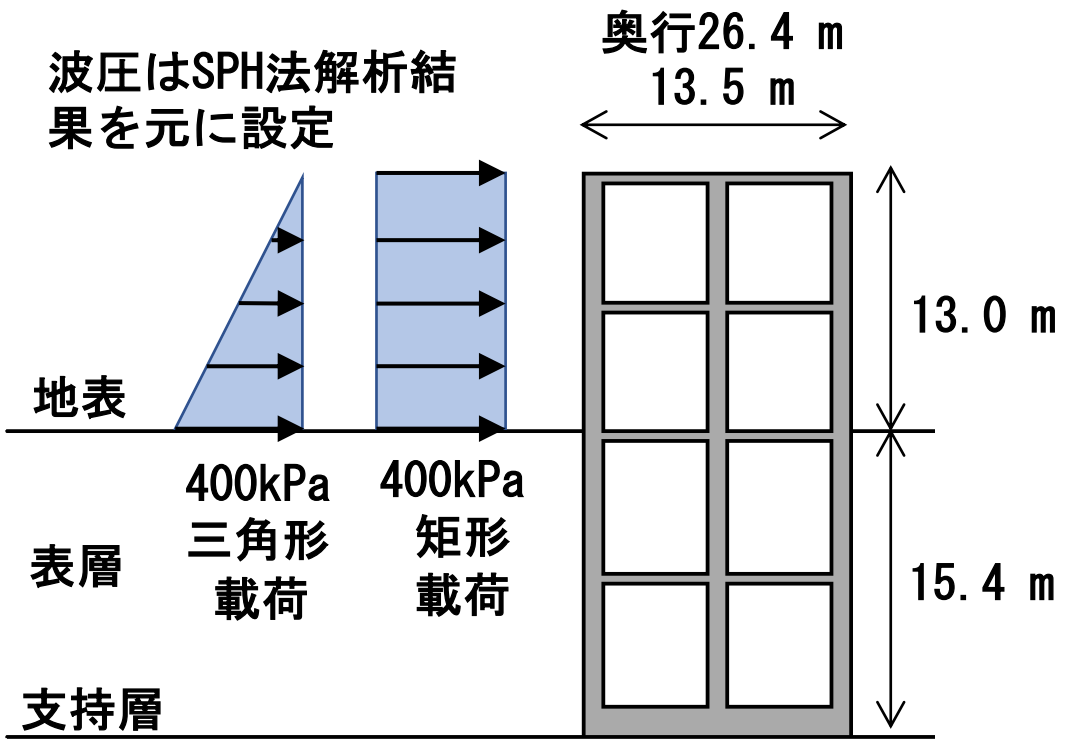
検討目的：

下水処理施設内の半地下構造物を想定し、地盤－構造物一体三次元FEM解析により、壁面に津波荷重が作用した場合の構造物の挙動を評価し、津波波圧形状や時間効果が結果に与える影響について検討する。

検討内容：

解析ケース

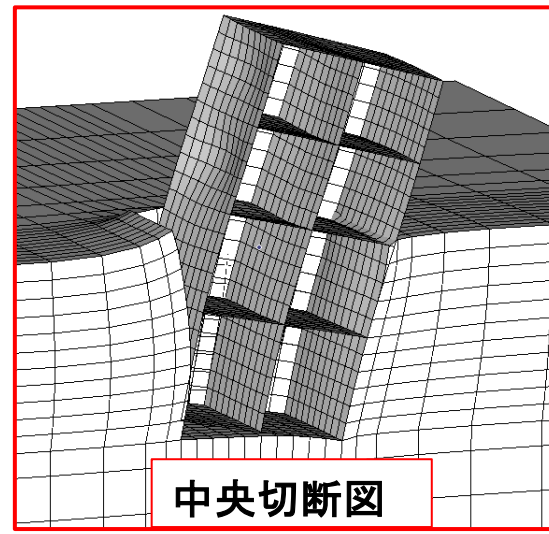
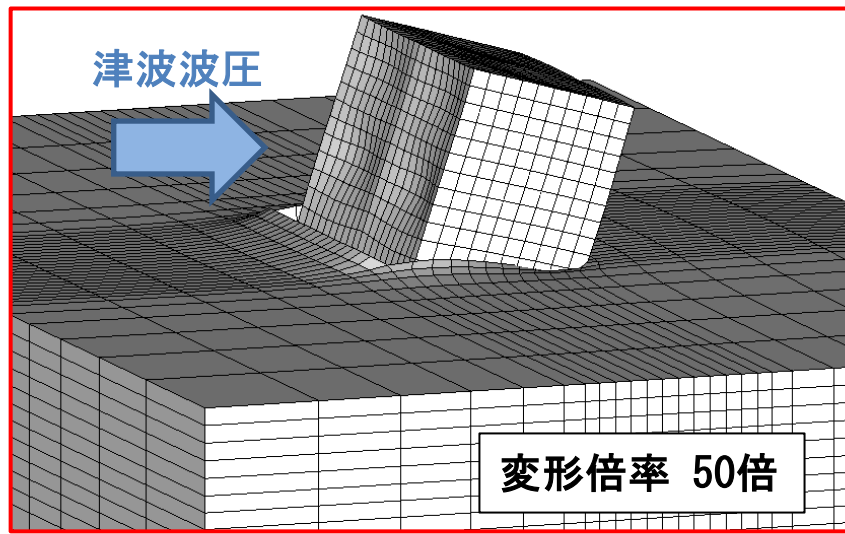
	波圧形状	動的静的
Case1	矩形	静的
Case2	三角形	静的
Case3	三角形	動的



④-2 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

検討結果： Case1（矩形载荷 静的）の例

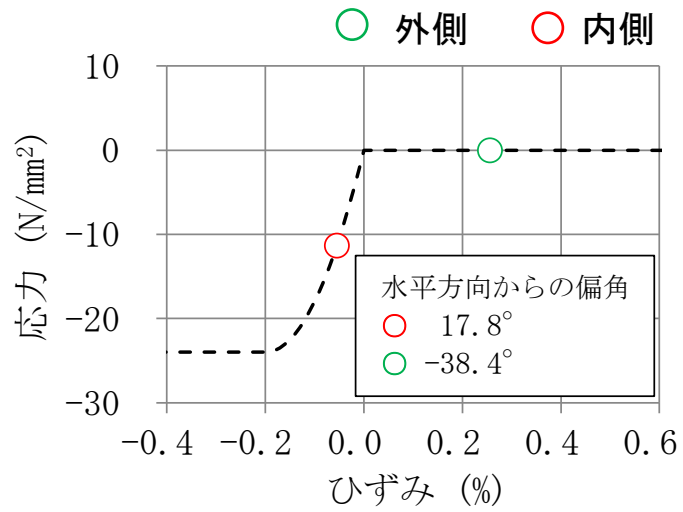
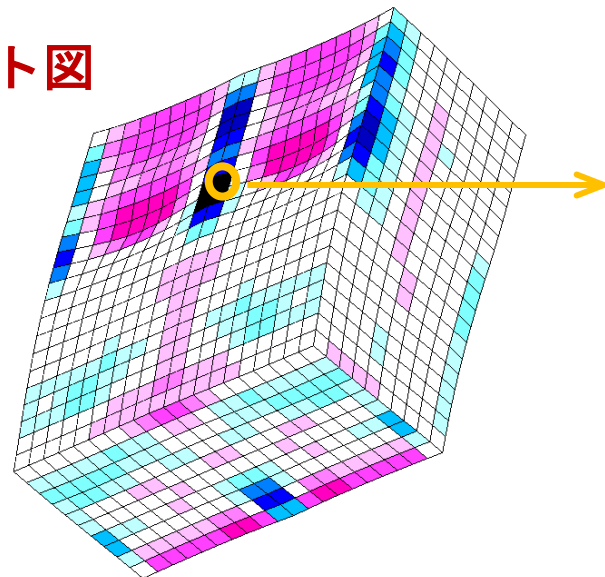
変形図



曲げモーメント図

側壁：水平方向
底版：長辺方向

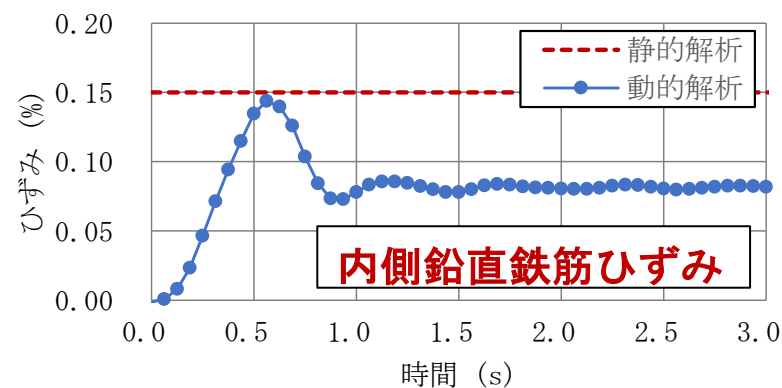
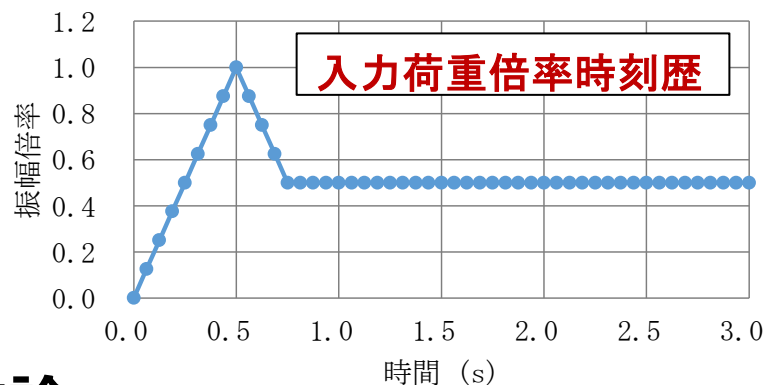
斜め下から
見上げた図



コンクリート水平方向 応力～ひずみ

④-3 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

検討結果： Case2（静的）とCase3（動的）の比較例



結論：

○三角形载荷は矩形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。

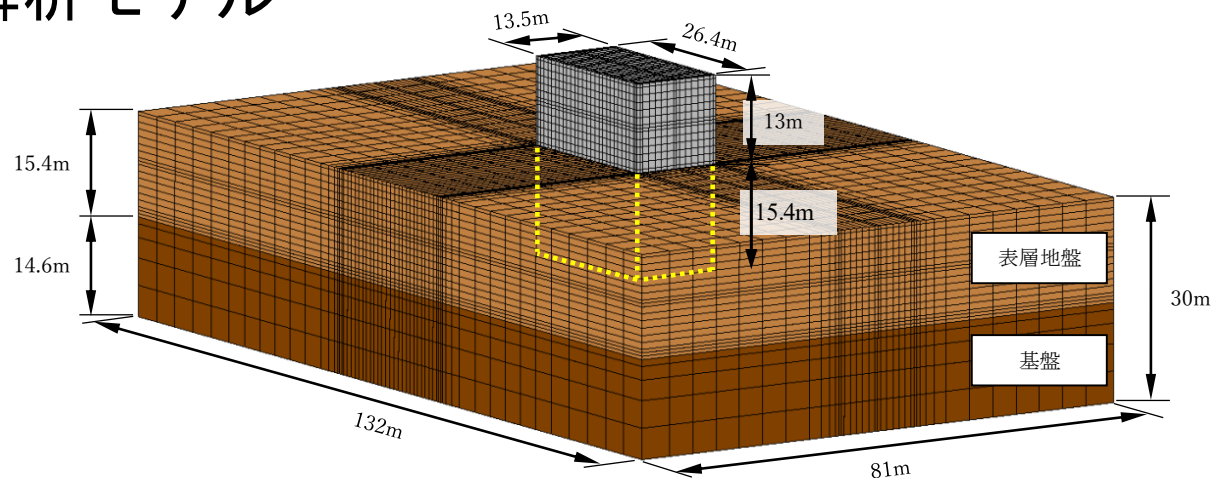
○津波衝突直後の衝撃的な波圧の後に定常的な波圧となる状態を想定した荷重を与えた動的解析結果は、慣性力や減衰の影響で、構造物の応答値は静的解析結果と比較してわずかに低下するが、その低下の程度は顕著ではない。したがって津波衝突直後の衝撃的な波圧をやわらげる緩衝材の開発が有効となると考えられる。

⑤-1 波圧の分布形状の影響に関する三次元FEM解析

目的

- ◆津波に対する構造物の安全性を合理的に評価するための評価法の検討
- ◆津波波圧の分布形状が構造物内に発生する応力に対してどのような影響を及ぼすかを解析評価する

解析モデル



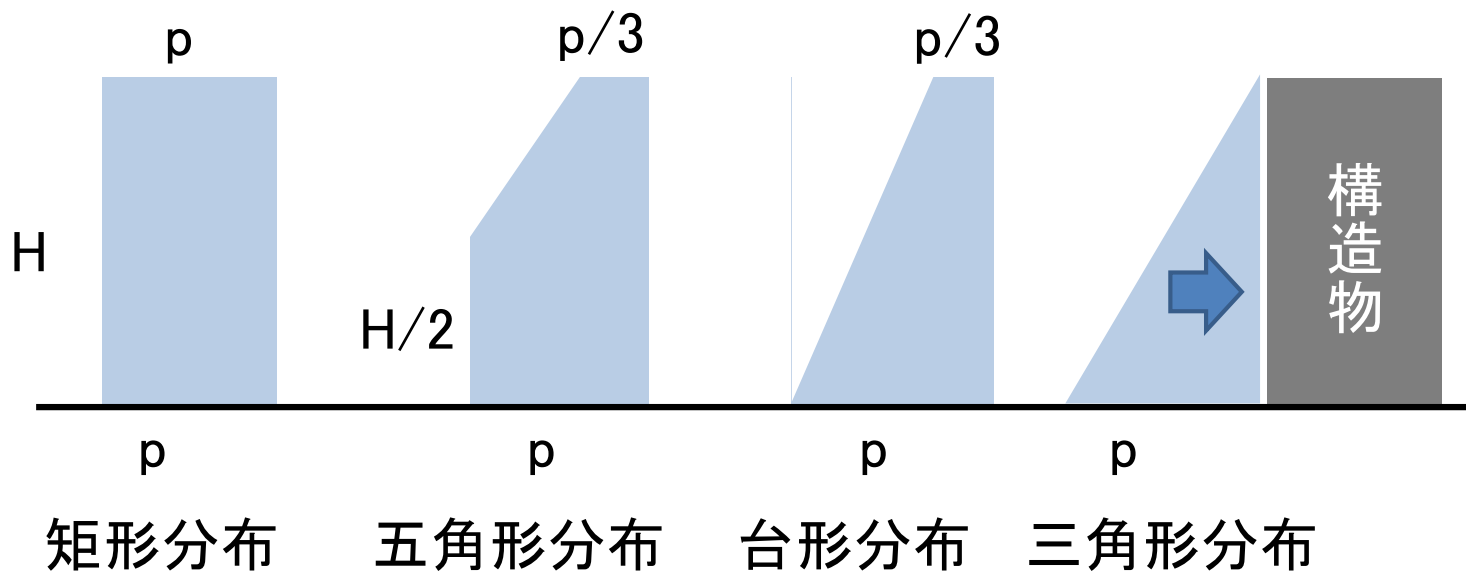
- ・ 3. 11に甚大な津波被害を受けた仙台市南蒲生浄化センターを基に解析モデルを設定
- ・ 構造物は地上2階・地下2階（側壁、床、底版、天井で構成）

⑤-2 波圧の分布形状の影響に関する三次元FEM解析

構造物に作用させる波圧の分布形状と大きさ

H : 構造物の高さ

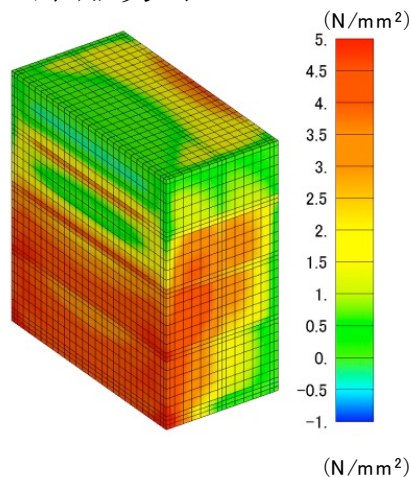
p : 波圧の大きさ



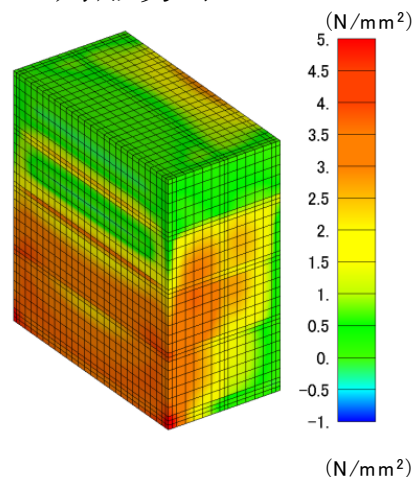
- ・ 波圧の分布形状は、津波模型実験の結果を参考に矩形(四角形)、台形、三角形、五角形を設定
- ・ 津波波圧は静的荷重として作用させる

⑤-3 波圧の分布形状の影響に関する三次元FEM解析 解析結果（構造物における最大主応力分布）

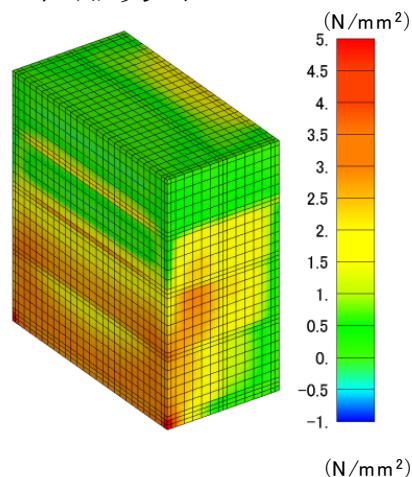
矩形分布



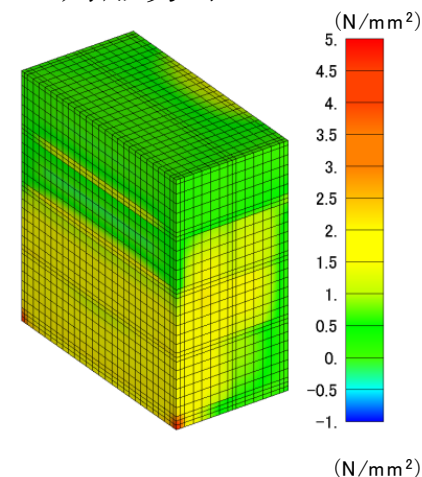
五角形分布



台形分布



三角形分布



- ・ 分布形状の設定は評価結果に大きな影響を及ぼす
- ・ 三角形の設定は安全性評価では危険サイドの設定になるリスクがある
- ・ 精度/信頼性の高い安全性評価を行うためには波圧の大きさのみならず分布形状を適正に設定することが必要

令和4年度・WG2の活動報告

1. 研究テーマ

液状化地盤にある構造物の合理的な地震対策技術の開発

2. 研究概要

- ①上水道・下水道既設管路の浮上対策工法の開発に向けた数値解析と実験の実施
- ②水道施設耐震工法指針の改定作業における技術的支援作業
⇒水道施設耐震工法指針・解説（日本水道協会）の改定作業。

3. 2022年度の研究成果

(1) 実施した研究項目

- ①既設管路の浮上抑制対策に関する実験的研究
(関西大学 飛田研究室)
- ②既設管路の浮上抑制対策に関する数値解析
(日水コン 宮本委員)
- ③DEMによる液状化地盤中の管の浮上メカニズム解析
(鳥取大学 小野委員)
- ④加振方向による液状化時の管浮上への影響
(神戸大学 鋤田委員)

(2) 主な研究結果

1. 既設管路の浮上抑制対策に関する 実験的研究(飛田研究室)

目的

遠心力载荷模型実験により,

- ・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

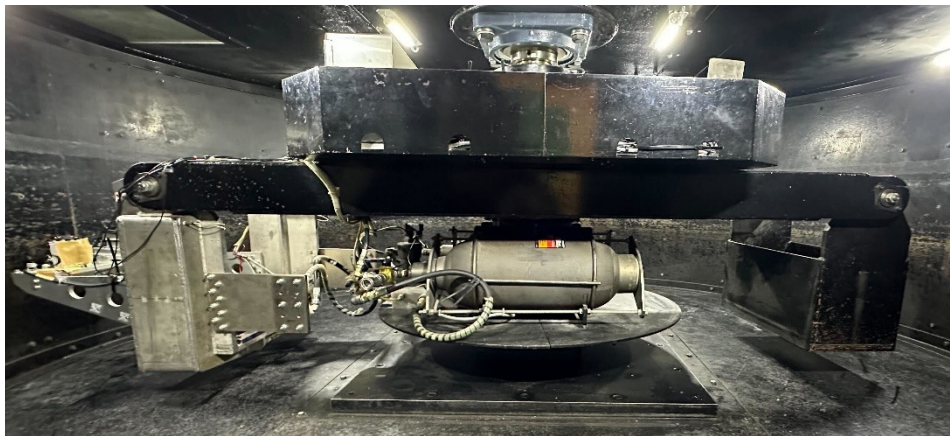
50Gの遠心場

相似則

遠心模型実験における相似則

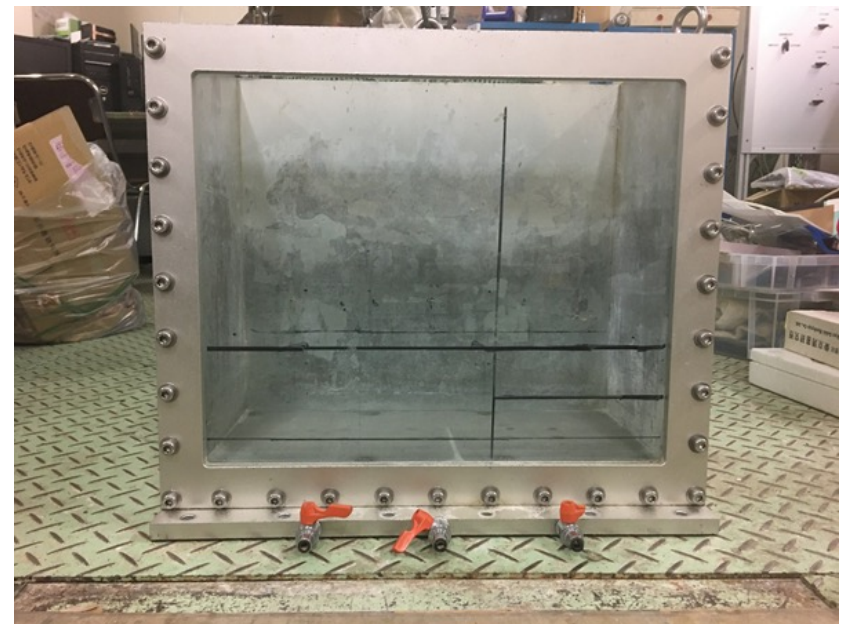
項目	実物	模型
密度	1	1
長さ	1	1/N
変位	1	1/N
速度	1	1
加速度	1	N
重力加速度	1	N
質量	1	1/N ³
力	1	1/N ²
応力	1	1
ひずみ	1	1
時間(動的)	1	1/N
時間(静的)	1	1/N ²

実験装置



関西大学所有のビーム型遠心力載荷装置

半径: 1.5m



土槽

幅: 450mm
高さ: 400mm
奥ゆき: 200mm

実験の手順

模型・粘性流体作成

飽和

圧密(5分)

加振

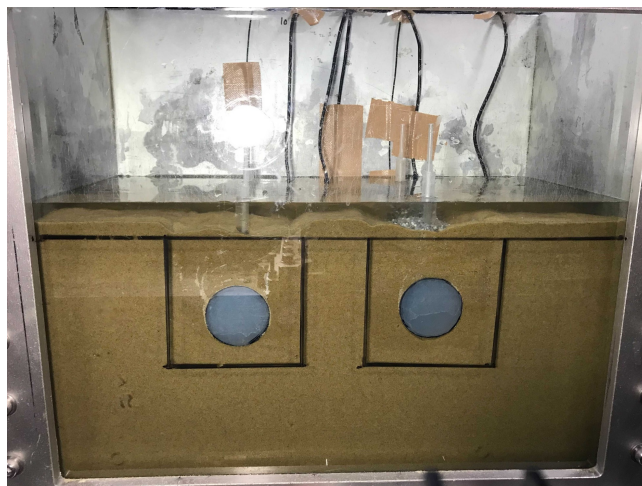


飽和



Case4

加振後



実験ケース (1)

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	30
Case2	5.0	0	1.5	18708	水	
Case3	5.0	1.0	1.0	6167	メトローズ	200
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	12071	メトローズ	

実験ケース (2)

実スケール

片振幅	12.5cm
振動数	1.6Hz
サイクル	320
振動時間	200s

Case3

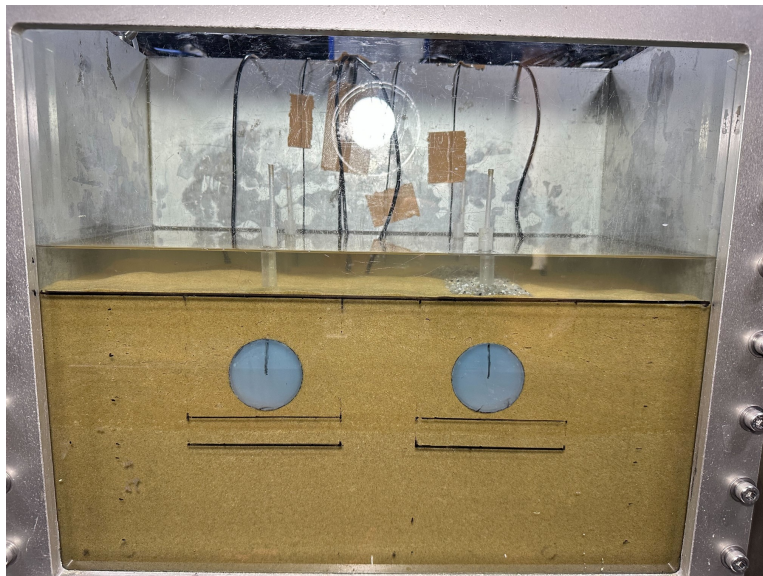


Case4

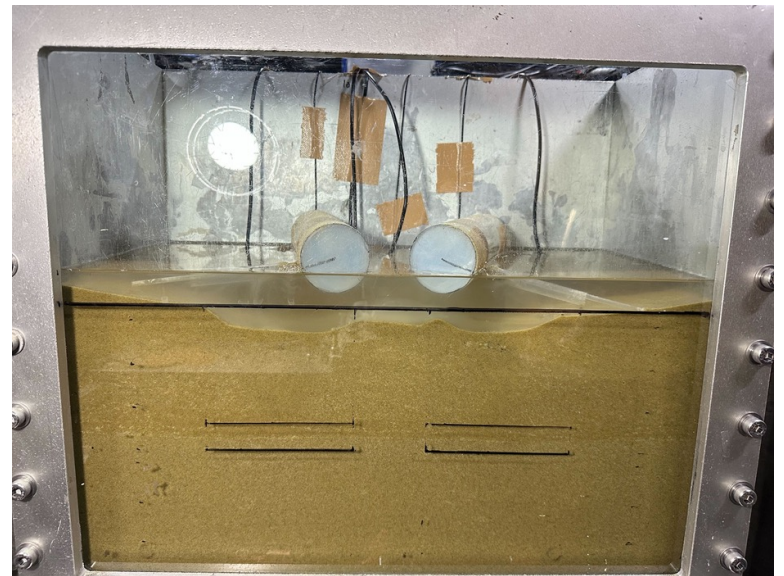


実験ケース (3)

Case 5



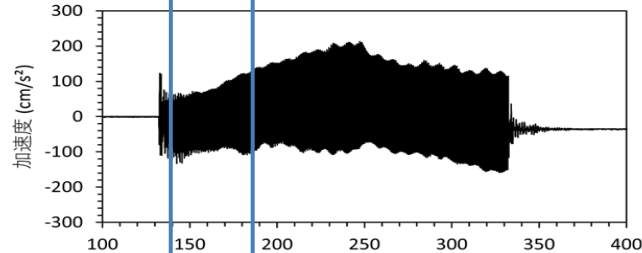
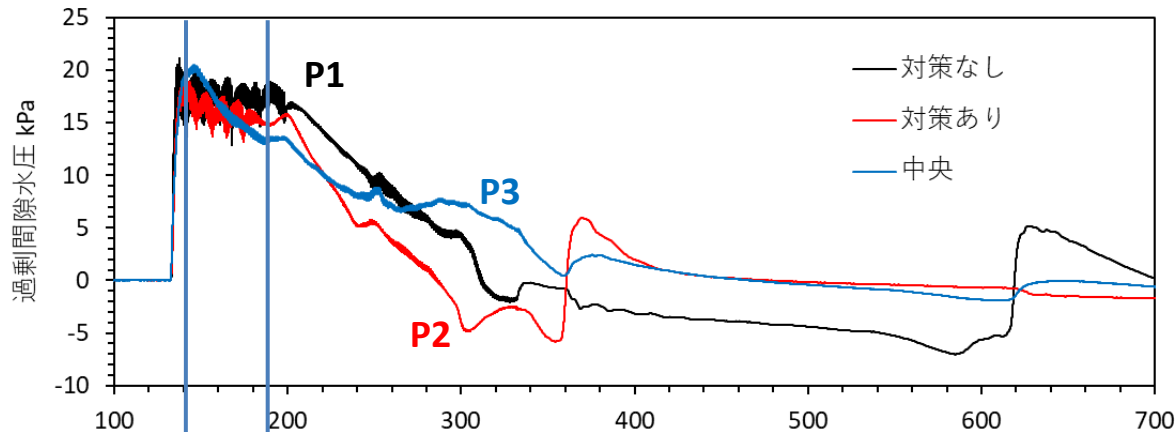
加振後



トレンチがない場合、管路は完全に浮上した

実験ケース (5)

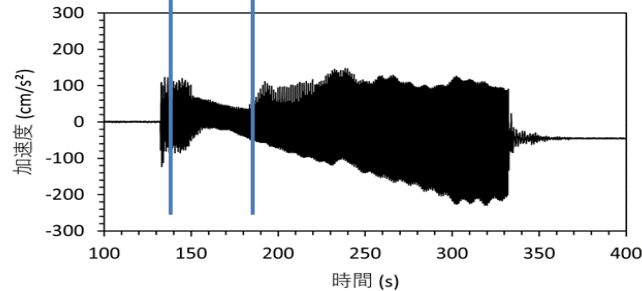
Case 5



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

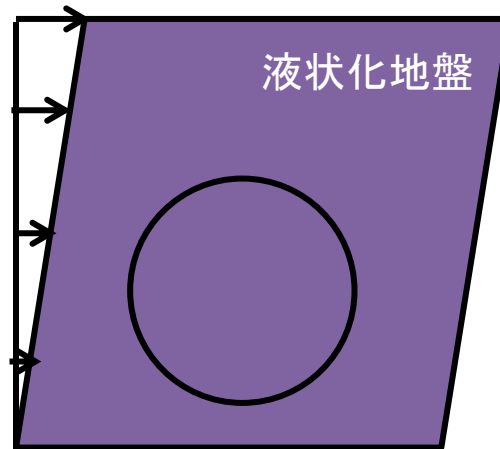


A4: 対策あり

P2(対策あり)の方が早く浮上

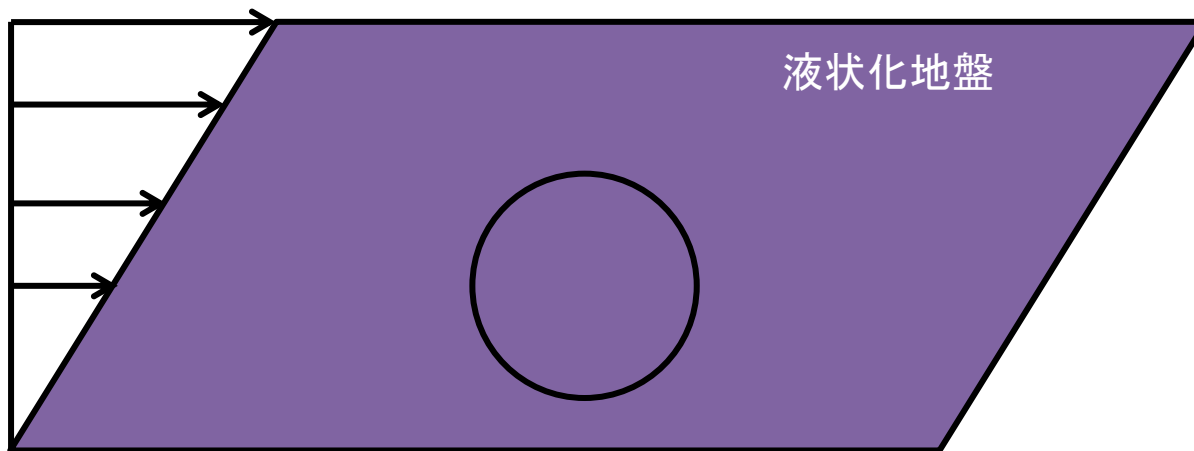
トレンチ幅の違い

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



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

—— 浮上量が大きい方

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 0.21g/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

以上より、碎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。
また、トレンチ幅の有無が管路の浮上に影響することがわかった。

しかし、実験では碎石柱の剛性が小さいため変形しやすく、管路の浮上を抑えることができなかった。

⇒剛性を上げると、多少の浮上抑制効果は得られたが、過剰間隙水圧の消散効果は得られなかった。(Case6)

検討すべきパラメータ

碎石柱:剛性, 重量(高さ), 管路の単位長さ当たりの設置数など

トレンチ:形状, 管路の埋設深度

2. 既設管路の浮上抑制対策に関する

数値解析（宮本委員）

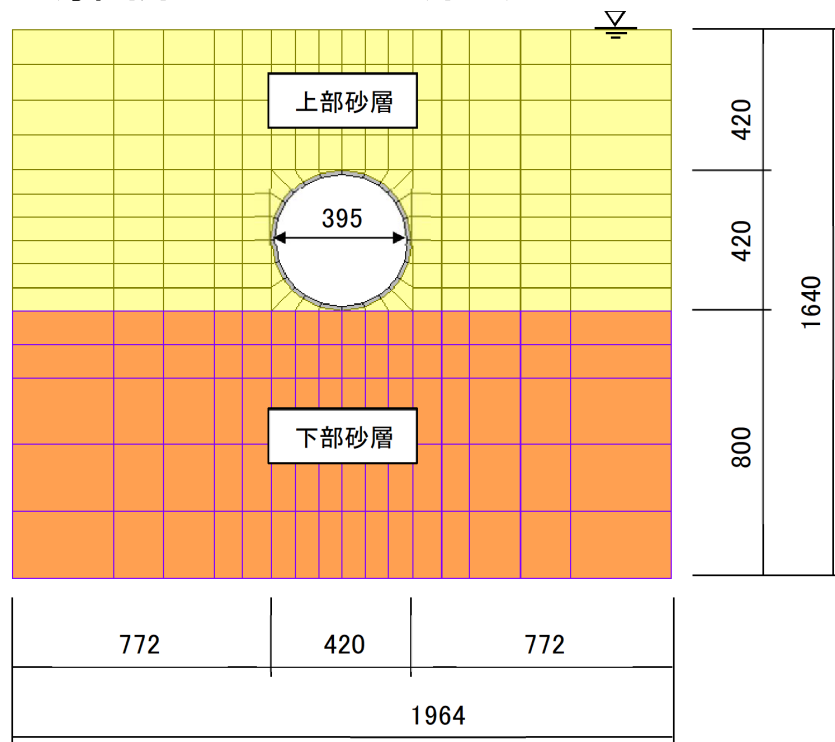
解析条件など (1)

○ 解析ケース 【自重解析+動的解析+圧密解析】

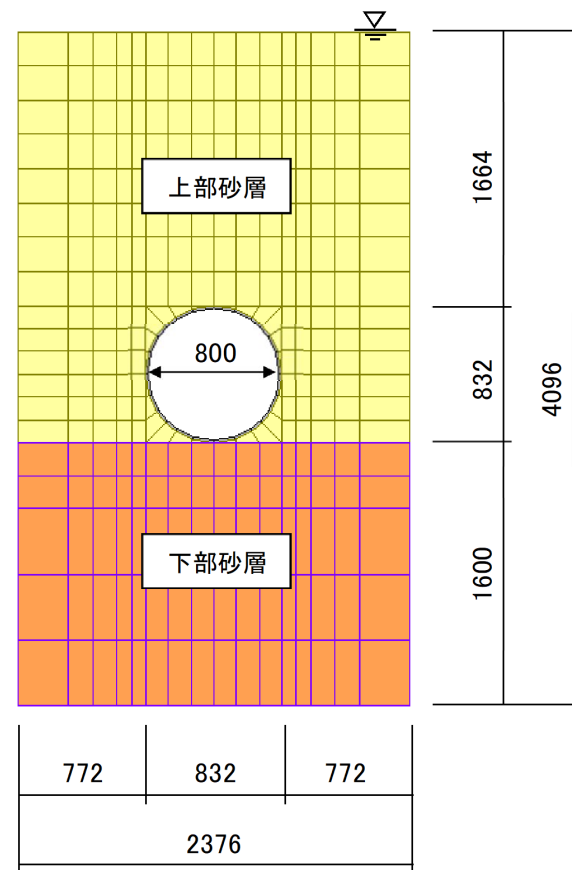
- 管
 - ⇒塩ビ管 $\phi 400$ (下水管路、空水)
 - ⇒鋼管 $\phi 800$ (上水管路、満水 & 空水) + 追加 $\phi 2000$
- 土被り
 - ⇒ $\phi 400$ (1D、3D、4D)
 - ⇒ $\phi 800$ (1D、2D、4D)
- 側方境界条件
 - ⇒半無限相当タイプ (等変位境界)
 - ⇒トレンチタイプ (鉛直方向ローラ)
- 解析の次元
 - ⇒2次元モデルにて無対策の解析と連続柱対策の検討
 - ⇒3次元解析の実施により対策の研究【現時点では未実施】
- 入力地震動
 - ⇒水平方向、水平方向+鉛直方向 (水平方向1/2)
 - ⇒地盤の周期特性を考慮した周期特性ケースなど
+ 長時間加震

解析条件など (2)

○ 解析モデル (例)



(a) $\phi 400$ 塩ビ管・土被り1Dモデル

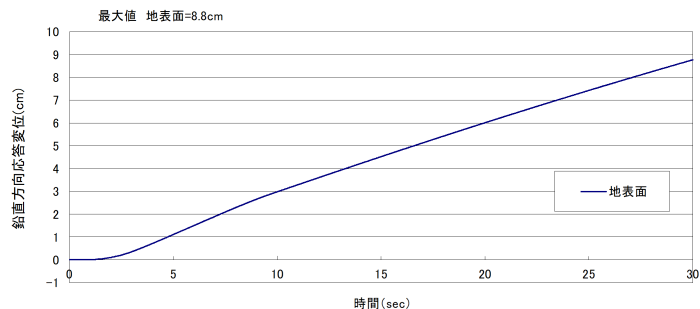


(e) $\phi 800$ 鋼管・土被り2Dモデル

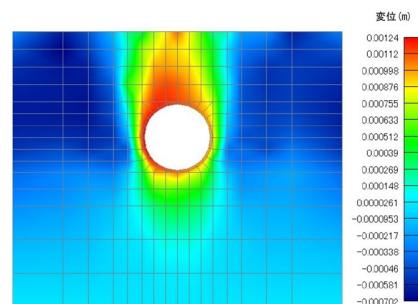
- 地下水位：地表面
- 側方クリアランス：60cm程度
- 管底地盤：非液状化層（代表解析ケースについて液状化層）

解析結果（一例）（2）

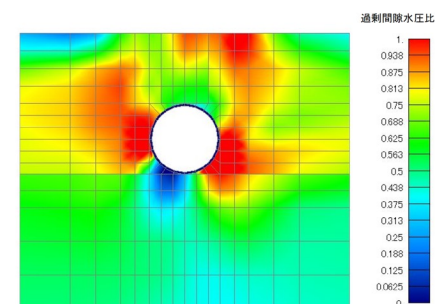
○動的解析結果【対策無】（φ400塩ビ管 1D 5.0Hz波）



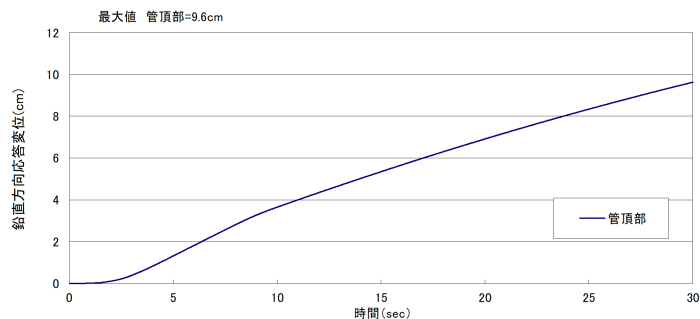
(a) 地表面



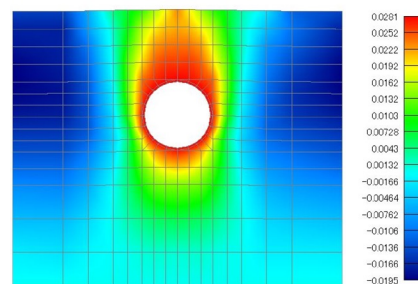
(a) 定常波開始時：t=2.0(s)



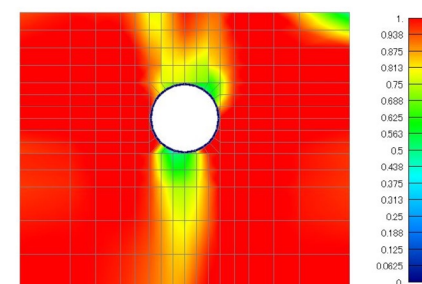
(a) 定常波開始時：t=2.0(s)



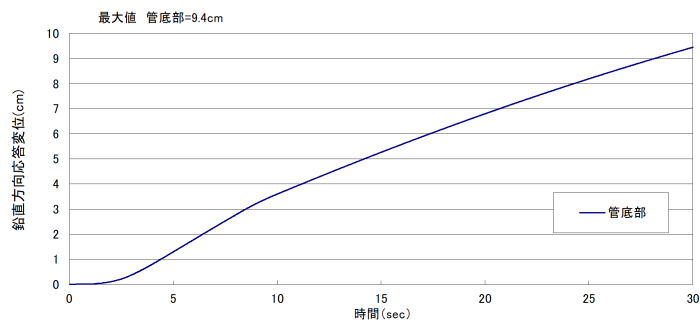
(b) 管頂部



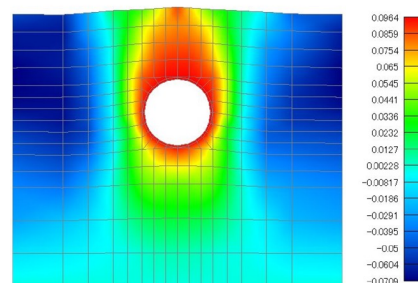
(b) 定常波終了時：t=8.0(s)



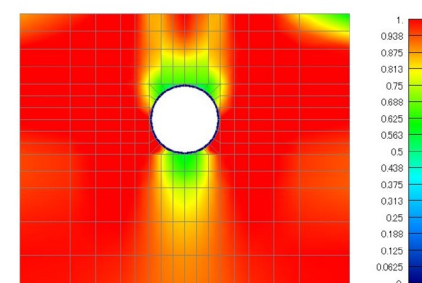
(b) 定常波終了時：t=8.0(s)



(c) 管底部



(c) 動解終了時：t=30.0(s)



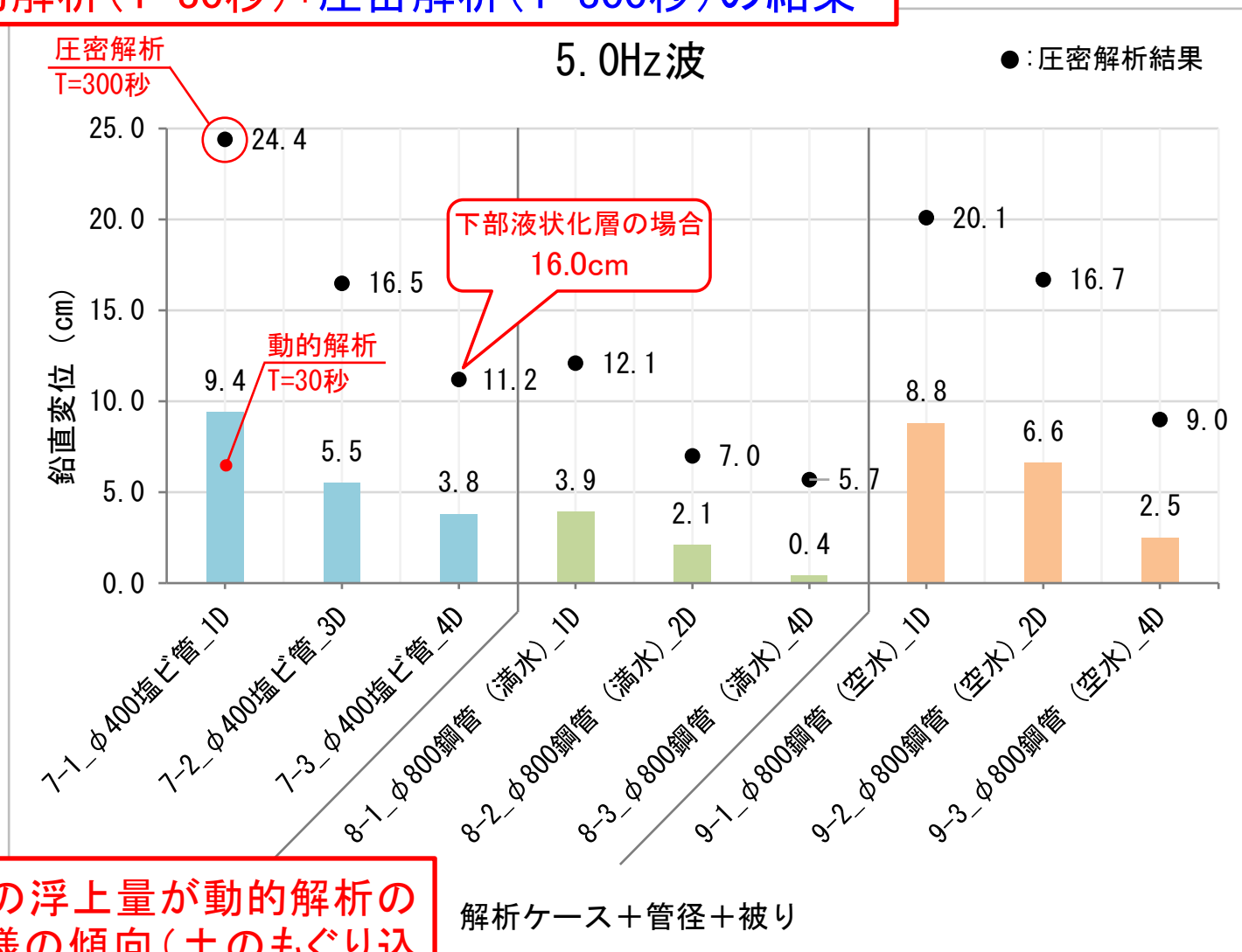
(c) 動解終了時：t=30.0(s)

鉛直方向変形図
過剰間隙水圧比の分布図

鉛直方向応答変位波形（φ400塩ビ管・土被り=1D・側方等変位）（φ400塩ビ管・土被り=1D・側方等変位）（φ400塩ビ管・土被り=1D・側方等変位）

解析結果一覧【無対策】 (5.0Hz)

動的解析 (T=30秒) + 圧密解析 (T=300秒) の結果



圧密解析の浮上量が動的解析の結果と同様の傾向 (土のもぐり込み) で大きい。但し、浮上速度は動的解析 (振動中) がかなり大きい。

図 グラフ (5.0Hz波)

圧密解析においても下部液状化層の場合が浮上量大きい。

解析結果の考察【無対策】 (1)

○地震動について

- 鉛直方向の地震動の影響は確認されない。
- 地震の継続時間の影響はかなり大きい（圧密解析と同様に地盤もぐり込みによる管浮上）。

○側方境界条件

- トレンチタイプ（鉛直ローラ）では、殆ど浮上しない。
⇒管周辺地盤のせん断ひずみが小さく水圧上昇小さい。
⇒但し、鉛直ローラの場合でも、地震の継続時間が長くなれば大きく浮上。
- 等変位境界において、顕著な浮上が見られる。

○土被り

- 土被りと管浮上量は相関がある。（土被り小：浮上大）
- 土被りの違いは簡易式による浮上評価の安全率の違い以上に浮上量への影響がある。
- 上載土は液状化しても浮上に抵抗する作用がある？
⇒メカニズム？

解析結果の考察【無対策】 (2)

○浮上の状況

- 加震後や主要動後（僅かな揺れ）にも浮上傾向は長く継続する。
- 浮上は周辺土の管下面への潜り込みによるもの。
- 浮上速度は、動的解析（振動中）がかなり大きい。
- 無対策は、過剰間隙水圧の顕著な低下は見られず、管周辺地盤のせん断ひずみの増加が継続（せん断応力や剛性も小のまま）

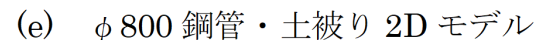
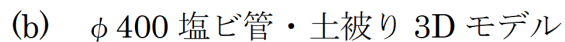
○管下面の地盤

- 管下面を液状化層とする場合の方が浮上量が大。
- 加震後に管の浮上に大きな違いが現れる。

○管浮上のメカニズム

- 200秒加震時の結果からも、加震時の浮上も、加震後の浮上も同じメカニズム
⇒周辺地盤のもぐり込みによる浮上

○2次元モデルにより、連続柱の効果について確認する



46

解析結果の一覧【対策有】

動的解析(T=30秒)+圧密解析(T=300秒)の結果

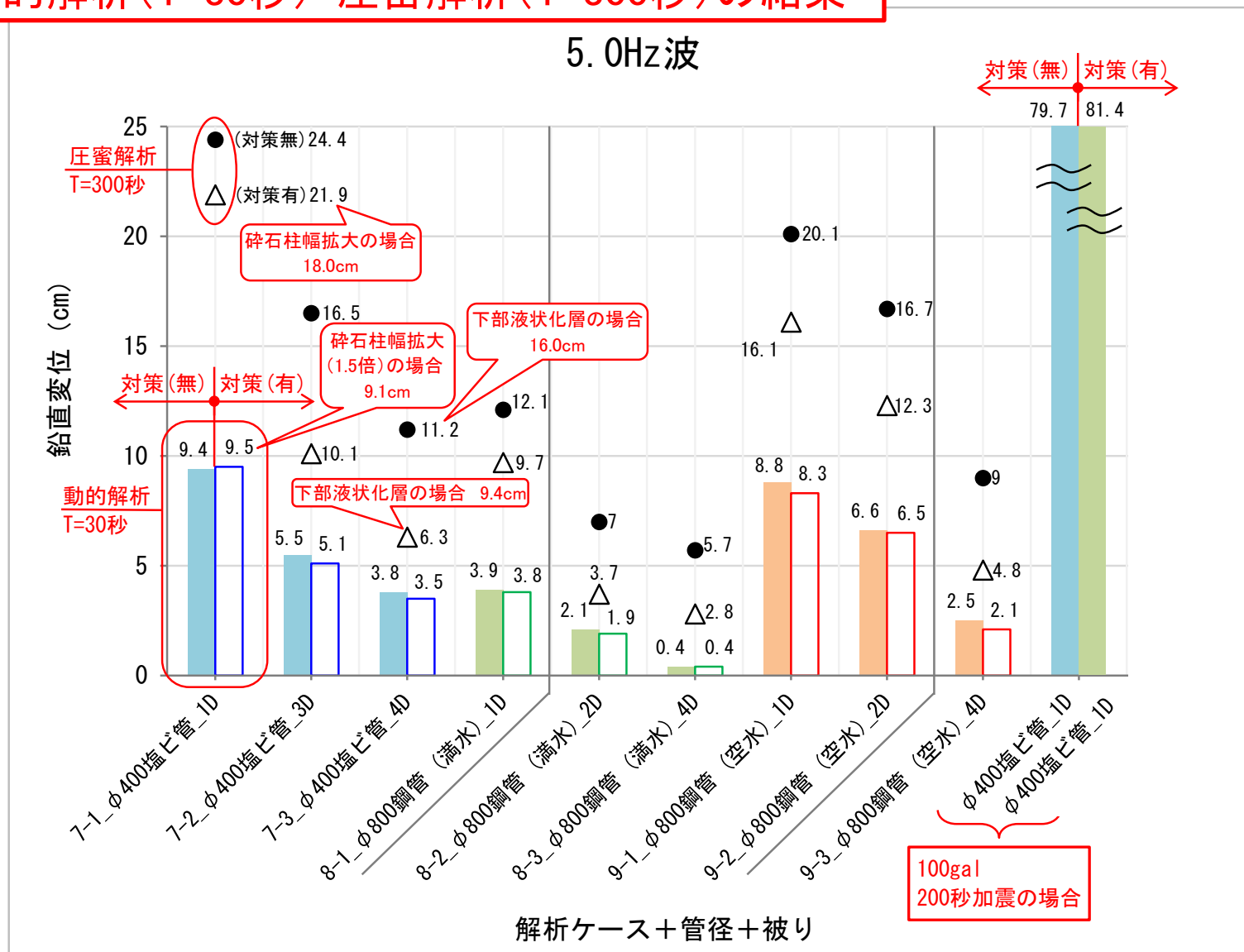
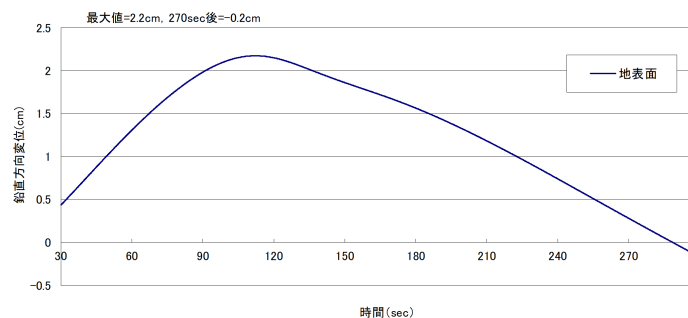


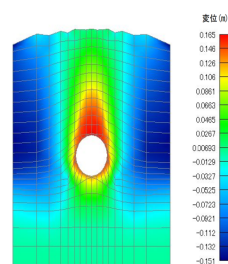
図 グラフ (5.0Hz波)

解析結果（一例）（対策有）

○圧密解析結果【対策有】（ $\phi 400$ 塩ビ管・5.0Hz波）



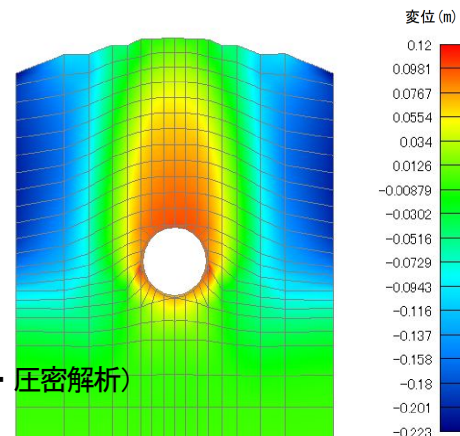
(a) 地表面



(a) 圧密解析終了時: t=300.0(s)

鉛直方向変形図

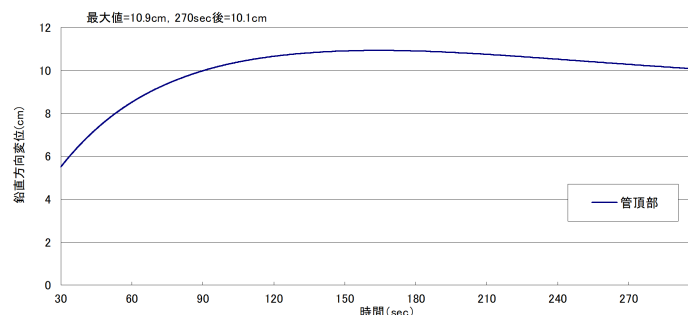
($\phi 400$ 塩ビ管・土被り=3D・側方等変位・圧密解析)



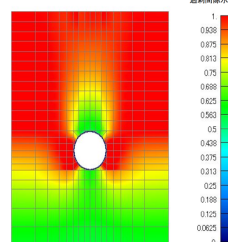
(a) 圧密解析終了時: t=300.0(s)

鉛直方向変形図

($\phi 400$ 塩ビ管・土被り=3D・側方等変位・圧密解析)



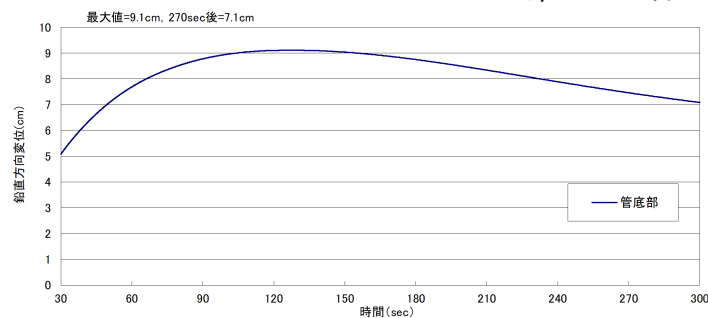
(b) 管頂部



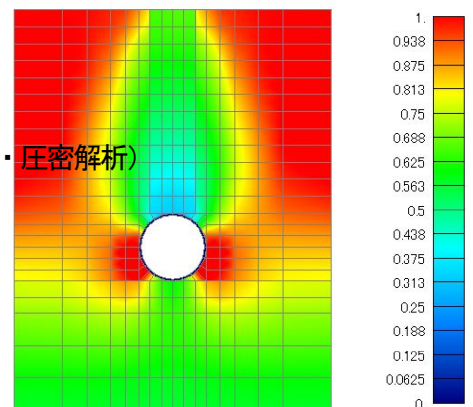
(a) 圧密解析終了時: t=300.0(s)

過剰間隙水圧比の分布図

($\phi 400$ 塩ビ管・土被り=3D・側方等変位・圧密解析)



(c) 管底部



(a) 圧密解析終了時: t=300.0(s)

過剰間隙水圧比の分布図

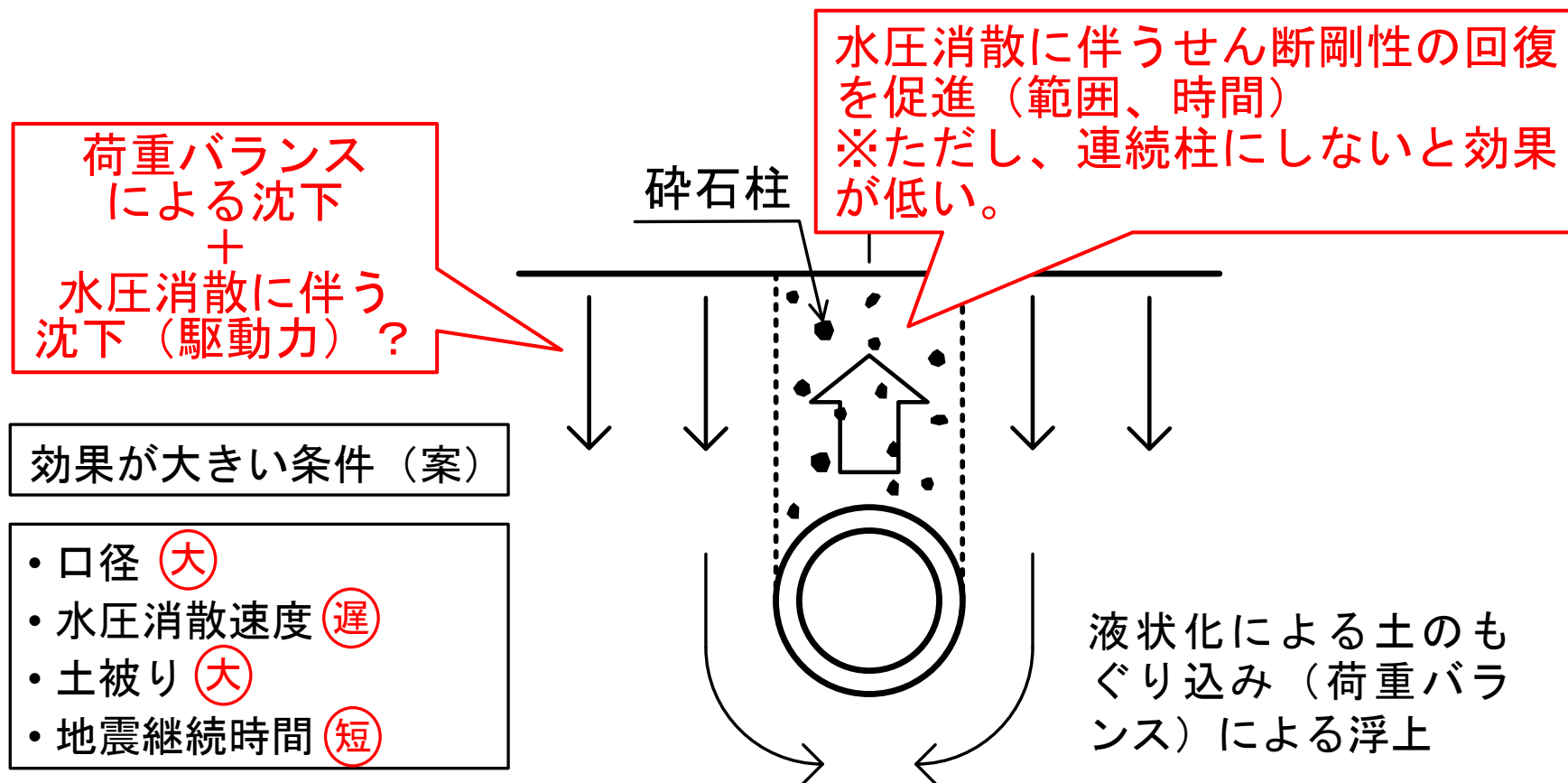
($\phi 400$ 塩ビ管・土被り=3D・側方等変位・圧密解析)

鉛直方向変位波形 ($\phi 400$ 塩ビ管・土被り=3D・側方等変位・圧密解析)

○効果について

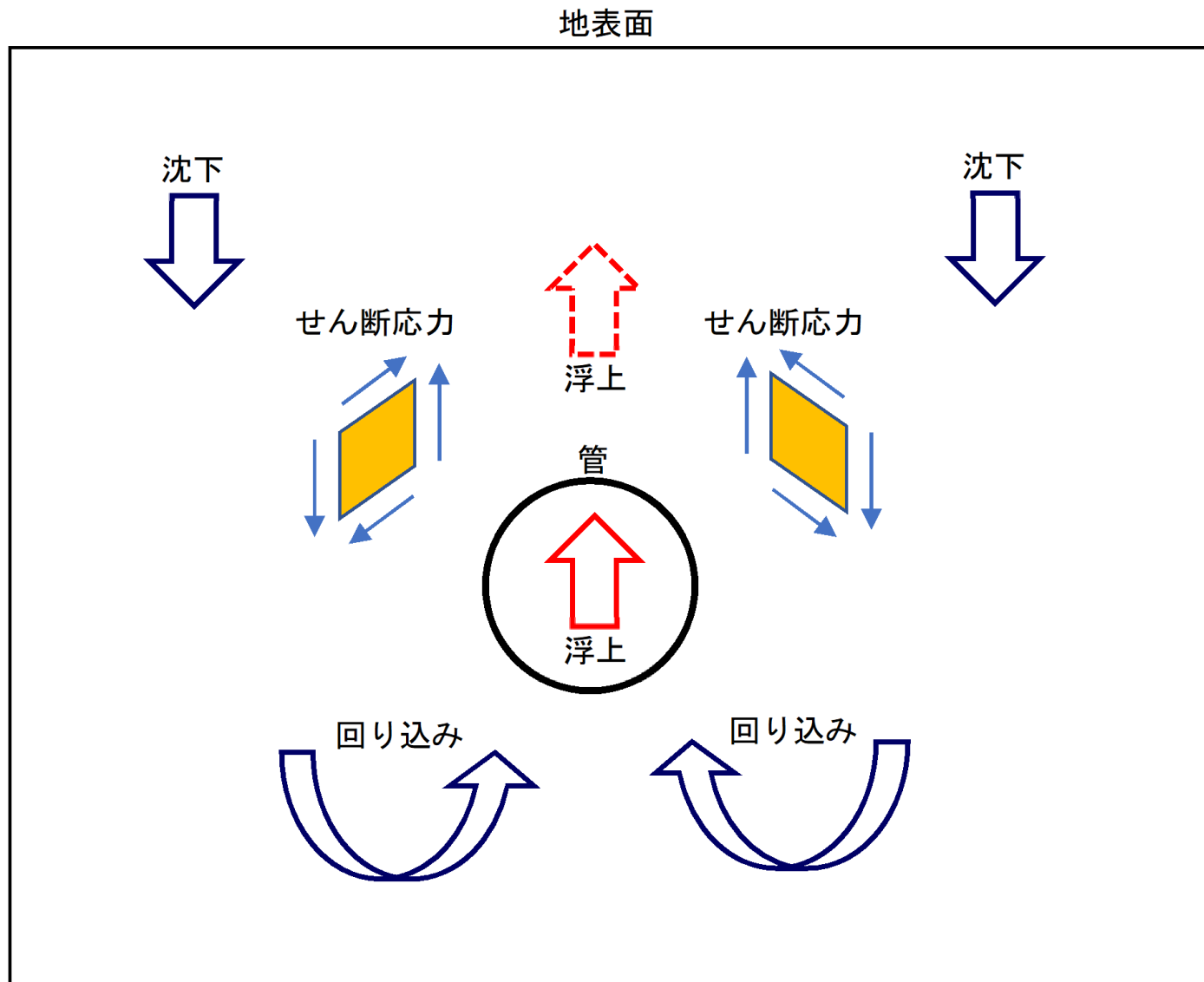
- 条件にあまり関係なく、碎石柱を連続設置しないと効果が期待できない
- 土被り小の場合、連続柱としても浮上量を無くするような効果は確認されない。
- 土被り寸法が大きくなりやすく、浮上しやすい大口径管路には連続柱効果期待！
- 対策効果は過剰間隙水圧消散促進効果として現れ浮上抑制作用が働く。
- 対策効果は、加震時には見られず、加震後の圧密時に見られる。
⇒ここまでの解析（地震継続時間）では、水圧消散時に効果が大きく確認される。
- 碎石柱の幅を多少大きくしても効果は 小 。

砕石柱効果のイメージ？



➡ 砕石柱の透水効果高めれば、さらに効果が期待できる？

まとめ (2)



砕石柱効果の分析(1)

○ 過剰間隙水圧の抑制？や消散促進？に伴う砕石柱の効果は確認できるが、その程度についての評価は難しい。

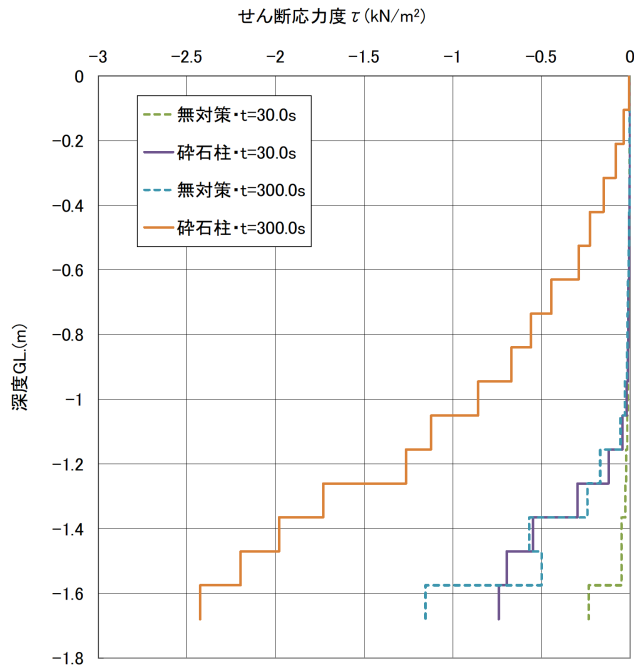


図 せん断応力度の深度方向分布
(圧密解析： $t=30\text{s}$, 300s)

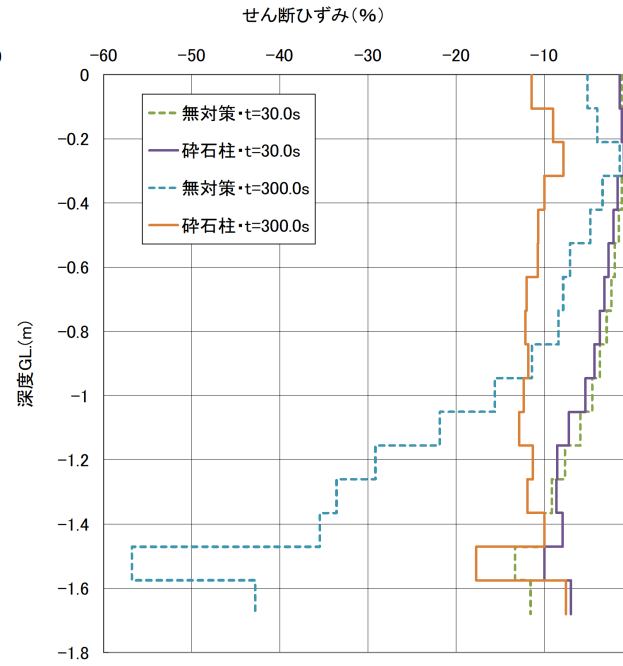


図 せん断ひずみの深度方向分布
(圧密解析： $t=30\text{s}$, 300s)

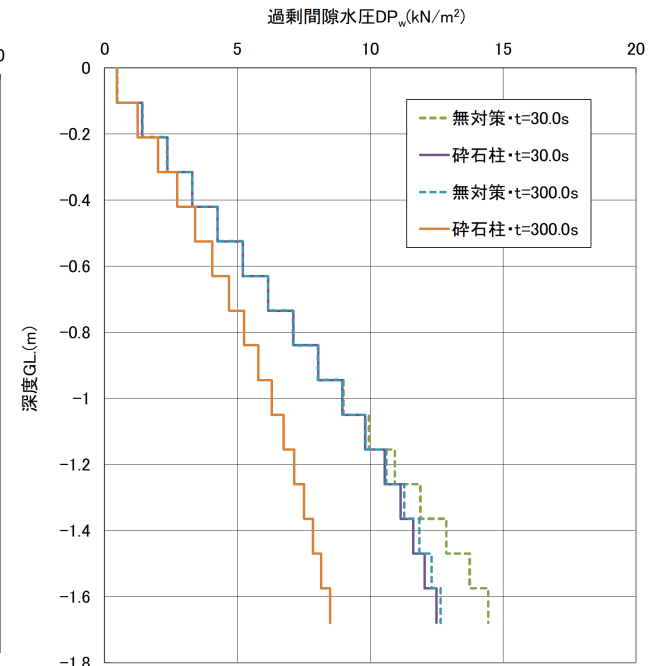


図 過剰間隙水圧の深度方向分布
(圧密解析： $t=30\text{s}$, 300s)

まとめ (1)

○ 碎石柱による液状化対策効果に関する考察

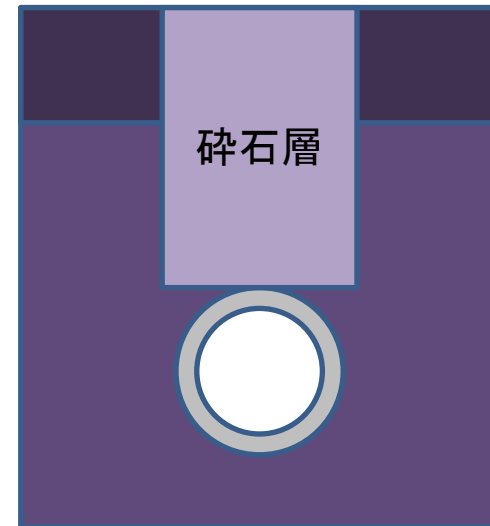
- 碎石柱が管の浮上量に及ぼす影響は、特に過剰間隙水圧の消散過程において浮上量を低減させる作用が明瞭に認められる。
- 過剰間隙水圧の消散過程において碎石柱は排水ドレン材となり、碎石柱周辺地盤の過剰間隙水圧の消散速度を高める作用が認められる。
- 管側部等の地盤には浮上と沈下に起因するせん断応力が発生する。今回の解析では、このせん断応力が管の浮上に抵抗するものと考えられる。
- 管の浮上に抵抗する地盤のせん断応力は、地盤が液状化した後の過剰間隙水圧の上限状態ではほぼ0であるが、過剰間隙水圧の消散に伴って管頂部から地表面に向けて徐々に増大する結果になっている。これは、過剰間隙水圧の消散に伴って管の浮上に抵抗する地盤のせん断剛性が徐々に回復したことが要因と考えられる。

3. DEMによる液状化地盤中の管の 浮上メカニズム解析（小野委員）

液状化地盤中の管の浮上メカニズム



浮上の条件：
管の浮力 > 管の自重



浮上の条件：
管の浮力 + 碎石層の浮力
> 管の自重 + 碎石層の自重
+ 碎石層と非液状化層のせん断力

液状化地盤中の物体が受ける浮力 = 液状化地盤の単位体積重量（液状化前の飽和単位体積重量） × 物体の体積

DEMによる埋設物の浮上解析

- 手法 1
 - 土粒子と間隙水をモデル化
 - Microscopicな間隙の変化に応じて過剰間隙水圧を計算
 - 間隙の変化の計算コストが高い
- 手法 2
 - Macroscopicな体積変化から平均過剰間隙水圧を計算
 - 非排水状態の供試体の体積変化は間隙の変化に等しい
 - 平均過剰間隙水圧の増加に応じてすべての粒子間接触摩擦力が低下
 - 要素試験の再現に成功した事例
- 手法 2 に類する考え方で埋設物の浮上が再現できないか？
 - 完全液状化を仮定→粒子間の摩擦ゼロ

解析モデル (1)

粒子サイズ : 5mm

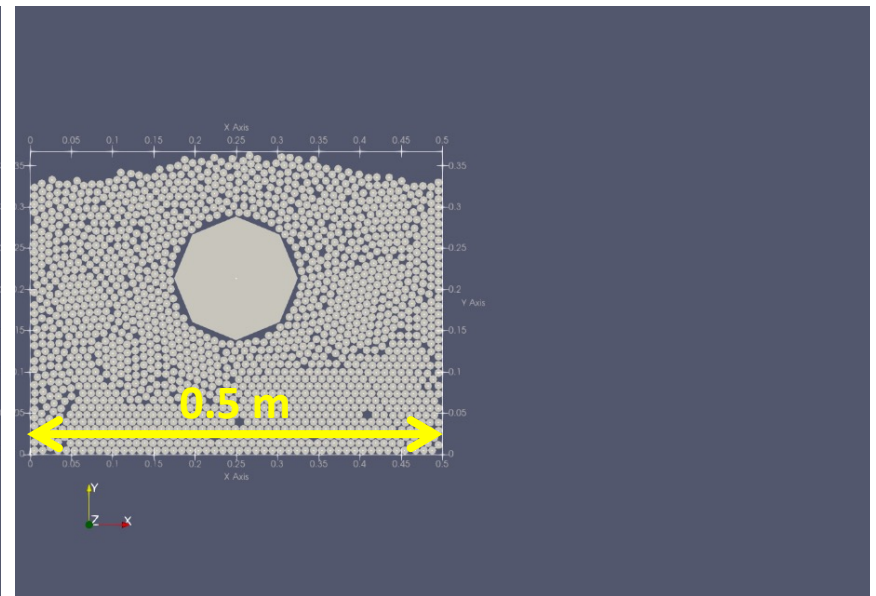
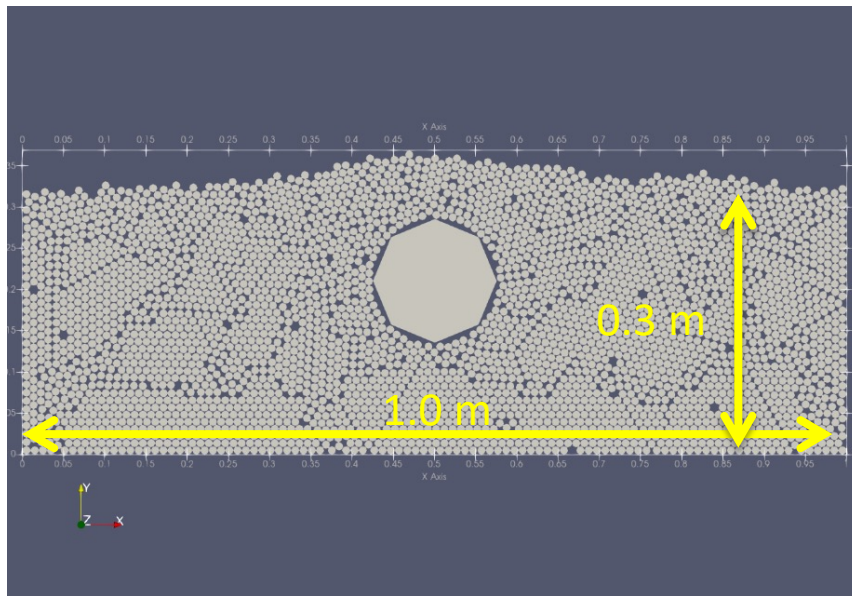
土粒子の密度 : $3.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

管の外径 : 75 mm

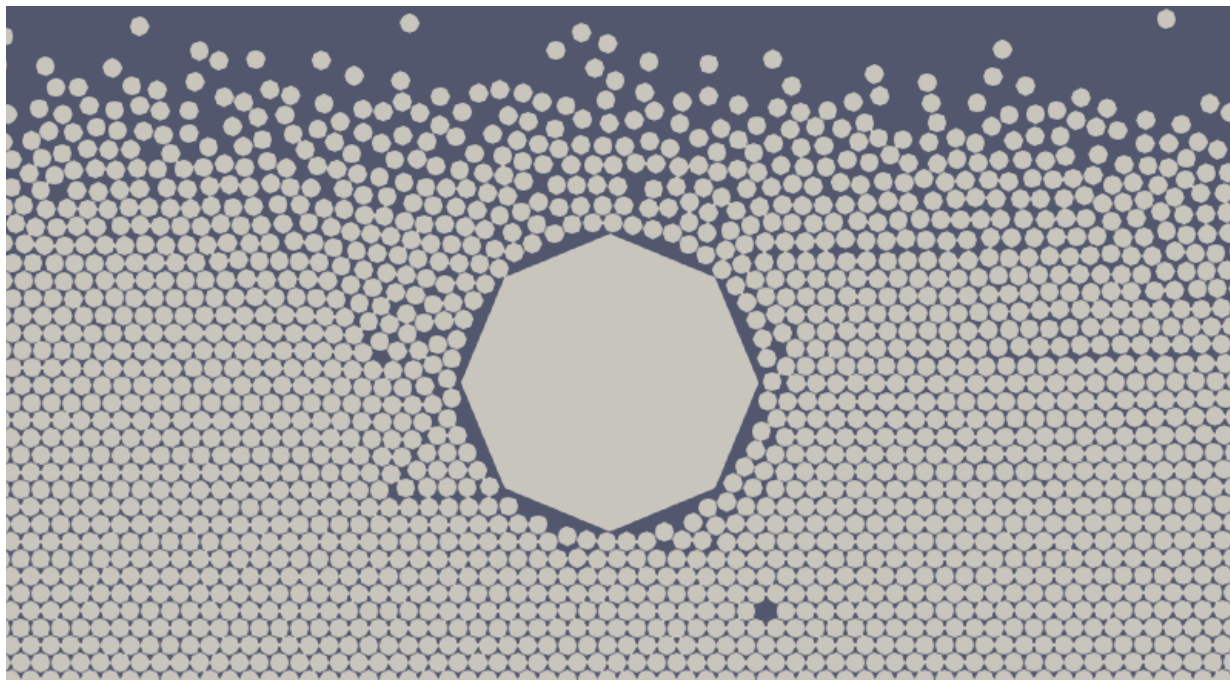
管の密度 : 90.0 kg/m^3

入力地震動 : 正弦波 3 Hz, 20 mm

境界条件 : 左右底面は剛



解析モデル (2)



**管路下面の粒子モデルが整列し、移動できなくなっており、
管路下面への土の潜り込みが上手く表現できていない。**

4. 加振方向による液状化時の管浮上 への影響（鋤田委員）

研究の目的

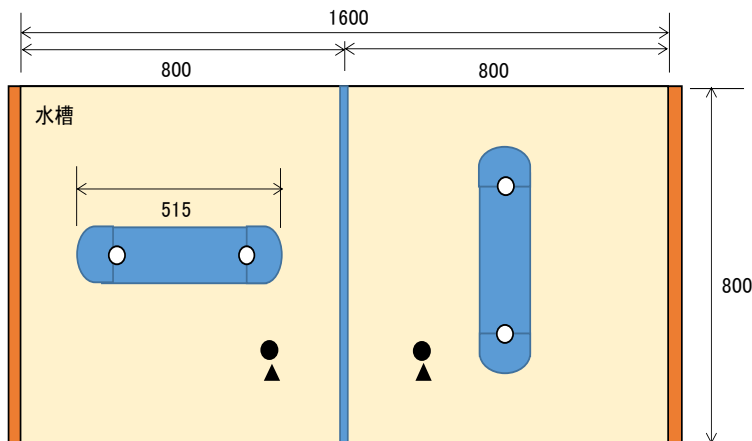
- 既往の研究は構造物断面に対して水平加振して地盤の回り込みに着目した研究がほとんど。
- 従来の構造物断面方向の加振に加えて、管軸方向への加振によって地下構造物の浮き上がりに差異があるのか確認する余地がある。



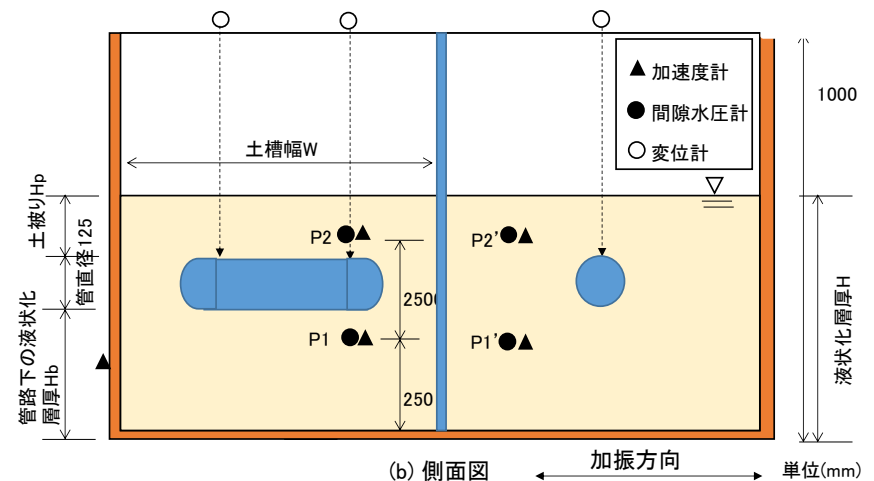
水道用管路を用いた振動台実験から、加振方向によって液状化時に地盤が埋設管下へ回り込み、管(地下構造物)が浮き上がることへの影響を明らかにする。

実験装置の概要

- 剛体土槽：幅1600mm、奥行き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

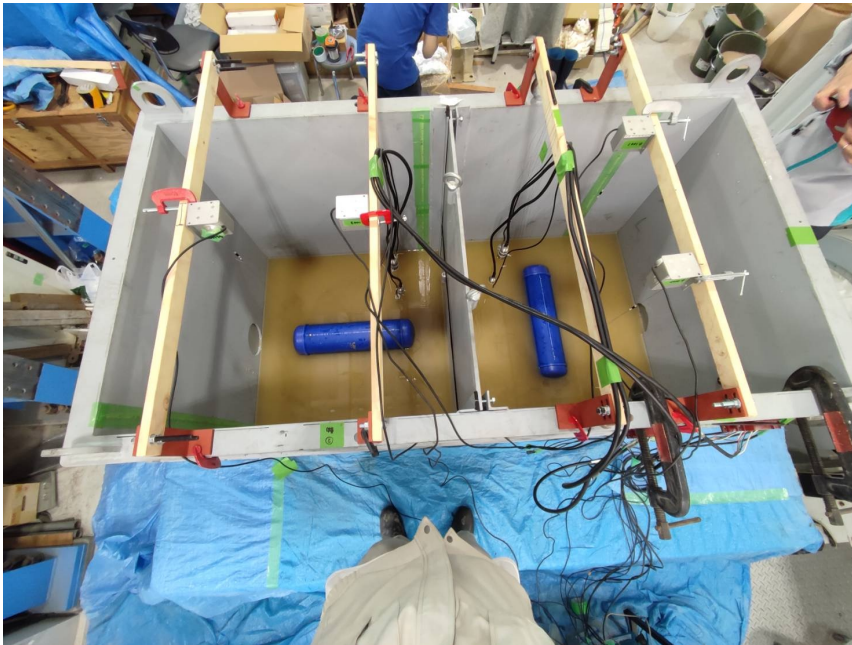


(a) 平面図



(b) 側面図

土槽の様子



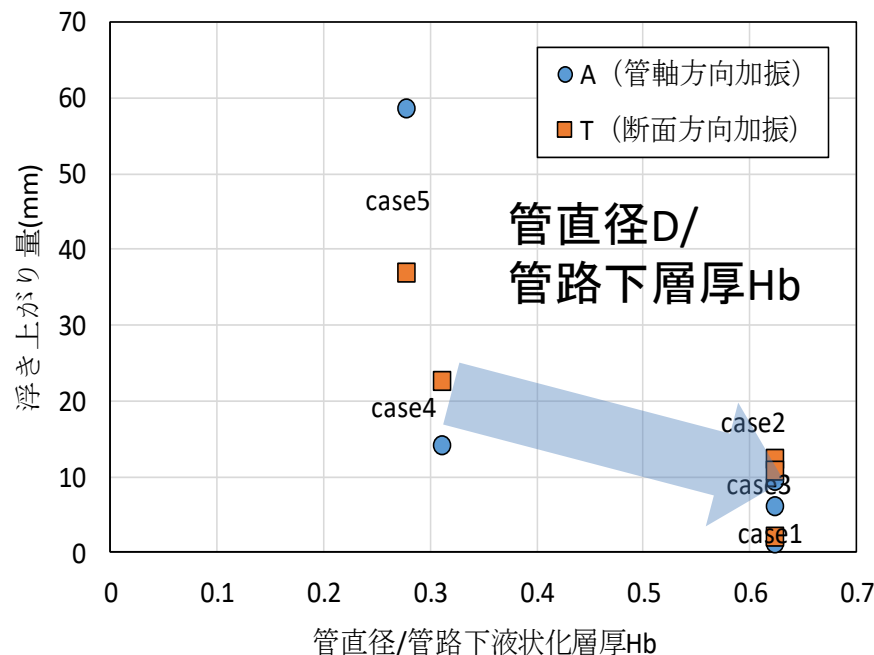
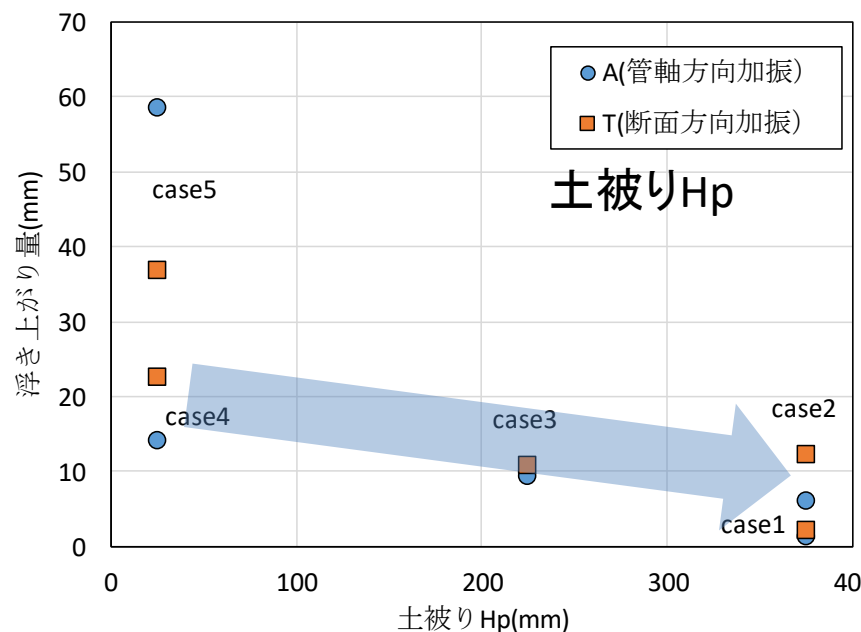
土槽内の様子



計測装置の様子

考察 浮き上がり要因と浮き上がり量

- case2～4では土被り厚(H_p)が小さくなれば浮き上がりが大きくなっている
→浮き上がりの抵抗として、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_b)が大きいほど浮き上がり量は小さい
→この値が大きいほど地盤が回り込みにくい。



まとめ

- 管断面に水平加振した浮き上がり量よりも管軸方向に水平加振した浮き上がり量の方が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。
→浮き上が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き上がり量は僅かである。
⇒解析と同様の傾向
- 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き上がり量が大きい。
→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

水道施設の耐震工法指針の改定作業における技術的支援

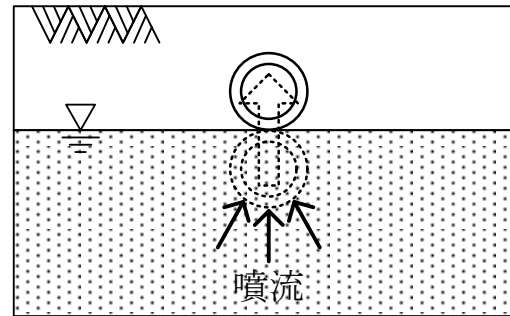
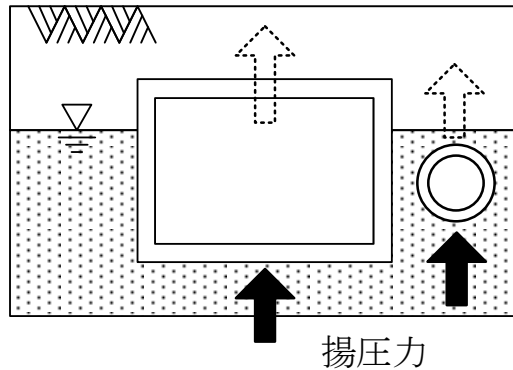
- ⇒ 水道施設耐震工法指針・解説（日本水道協会）の改定作業を担当
- ⇒ 令和4年6月未発刊
- ⇒ 主に液状化対策とステンレスパネルタンクに関する内容について支援【これまでの研究実績を活用】



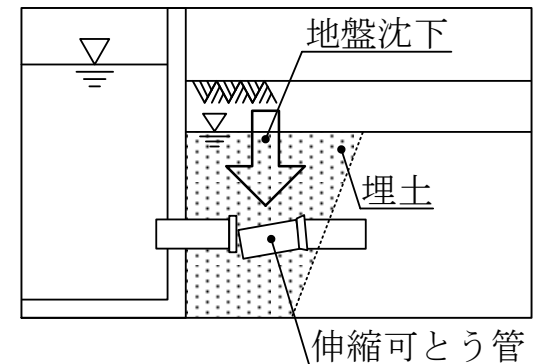
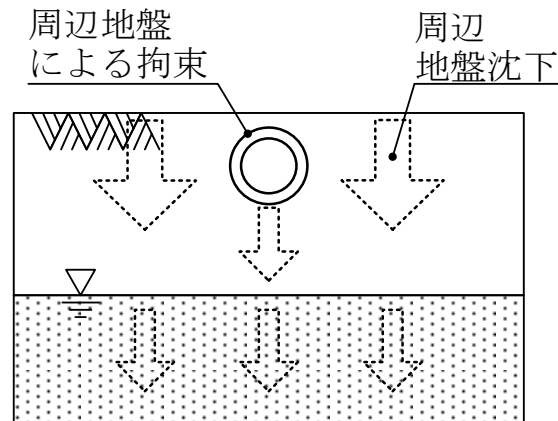
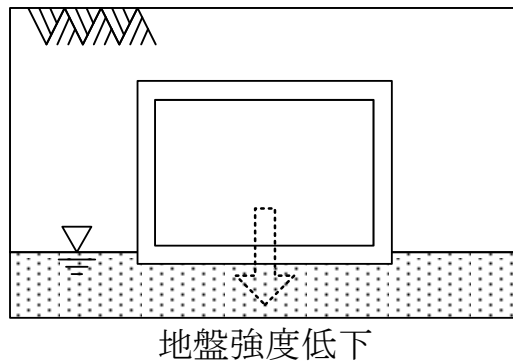
液状化についての記述例

これまで網羅できなかった液状化に伴う水道施設の様な被害について記述。

【浮上】



【沈下】



 : 液状化層

4. 2023年度の活動方針(WG2)

各条件（管路・埋設条件など）に応じた複数の管路浮上対策を研究する。また、管路の浮上メカニズムや要因を整理する。

【研究1】下水道管路の浮上対策に関する研究

長岡市の被害事例に着目し、埋戻し材の液状化による下水管路（塩ビφ250mm、土被り7D程度）の浮上対策の研究

⇒（対策）砕石柱（反力伝達材料として設置）

⇒解析と実験

【研究2】上水道管路（緊急貯留槽含む）の浮上対策に関する研究

管路の浮上メカニズムが説明しやすい（実験や解析で再現できる傾向にある）周辺一様地盤の液状化による上水管路（鋼管2000mm、土被り1D程度）の浮上対策（新設と既設に区分）の研究

⇒（対策）砕石（水圧消散効果材として上面や側面設置）や矢板

⇒解析と実験

【研究3】管路の浮上メカニズムや要因に関する研究

⇒浮上しやすい（しにくい）管路の条件の整理、これまでの実験結果や解析結果の活用、実際に浮上被害のあった共同溝との比較を含む比較解析の実施。

⇒あらたな管路浮上評価方法の提案（動的解析などによる）

⇒被害分析（地盤調査済み）、解析

令和5年度小委員会全体の活動計画

1) 委員会・WG活動等の予定

委員会 3回（5月（実施済み）、8月、11月）

WG協議 各4～5回（随時）

2) 行事等の予定

2023年11月に関西ライフライン研究会と共催で、本小委員会の最終報告会をシンポジウム形式で実施決定

【論文発表など】

① 第16回日本地震工学シンポジウム 2編, 2023年11月23～25日

② 土木学会第43回地震工学研究発表会（3編程度）, 2023年10月頃（予定）

③ 土木学会第14回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム（3編程度）, 2024年1月頃（予定）

④ 関西ライフライン研究会・水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会共催シンポジウム（6編程度）, 2023年11月予定

3) 出版物等の予定

活動報告書の発刊を予定

4) その他の企画等の予定

なし