

地震工学委員会 第1回定例委員総会

「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

25万円

◆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3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 : 2回開催

WG活動 : WG 1 5回協議

WG 2 3回協議

津波模型実験の見学会

液状化実験の見学会

◆行事等

・現場視察会

[滋賀県企業庁吉川浄水場更新工事現場（液状化対策工事）]



【主な液状化対策】

- 構造物基礎
- 場内道路
- 構造物取合い管路
- 施設配置

令和3年度・小委員全体の活動報告概要（2/2）

◆論文発表等

- シンポジウム論文集（第12回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム）
 - 1) 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
 - 2) 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
 - 3) 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

- 土木学会論文集 A 1
 - ⇒ 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

令和3年度・WG1の活動報告（1/13）

1. 研究テーマ

強震動と津波に対する構造物の合理的対策技術の開発

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」という考え方に基づく対策技術の開発

【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。

3. 研究結果のまとめ

免波構造に関する津波模型実験を実施した結果、構造物の側面勾配を工夫することによって、そして、構造物の周囲に剛性の低い緩衝材を配置することによって、構造物に作用する津波波圧を低減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。

また、SPH法により津波模型実験の再現解析を行った結果、実験結果と符合する解析結果を得ることができた。

令和3年度・WG1の活動報告（2/13）

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）

津波波圧の吸収・低減のイメージ

令和3年度・WG1の活動報告（3/13）

4. WG1の研究結果概要

津波模型実験とSPH法による再現解析の結果の一例を示す。

（1）津波模型実験の結果

構造物の側面勾配による波圧の低減に関する実験結果

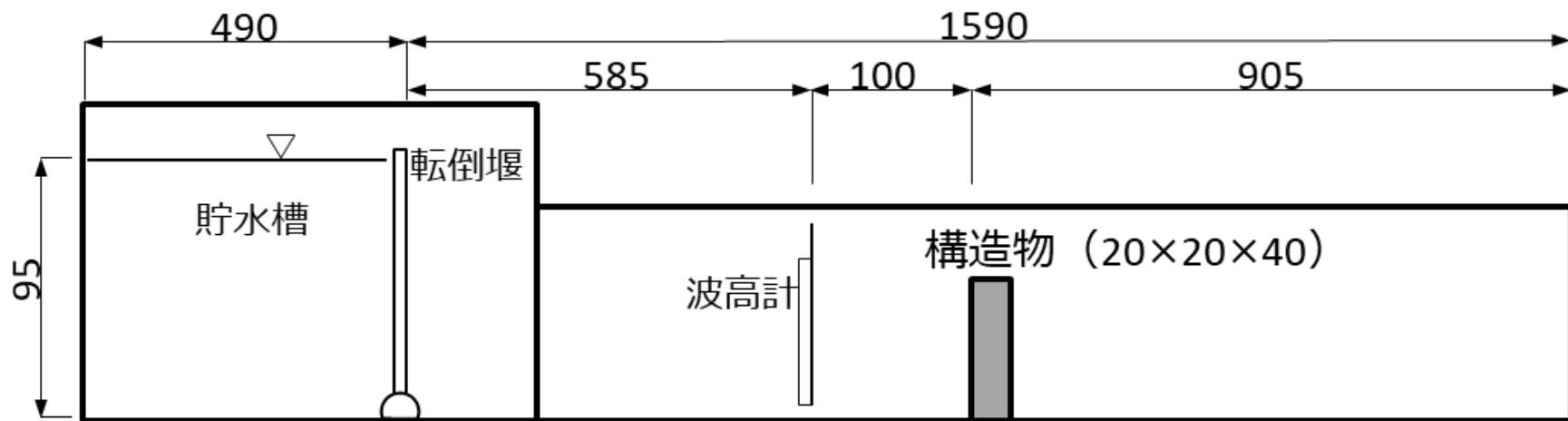
（2）SPH法による津波模型実験の再現解析の結果

構造物の側面勾配による波圧の低減に関する再現解析結果

（3）津波模型実験の結果

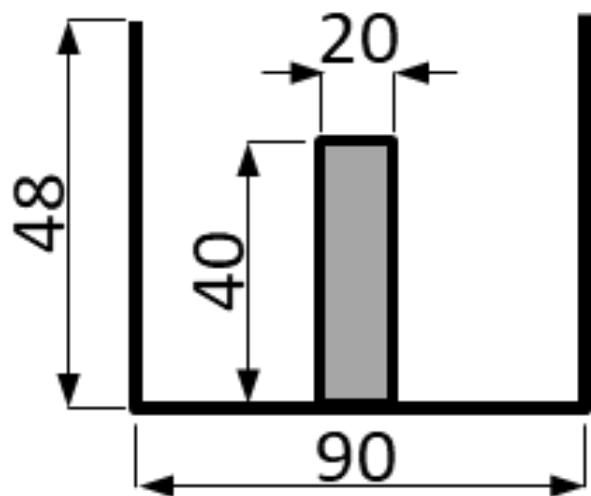
緩衝材による波圧の低減に関する模型実験結果

令和3年度・WG1の活動報告（4/13）

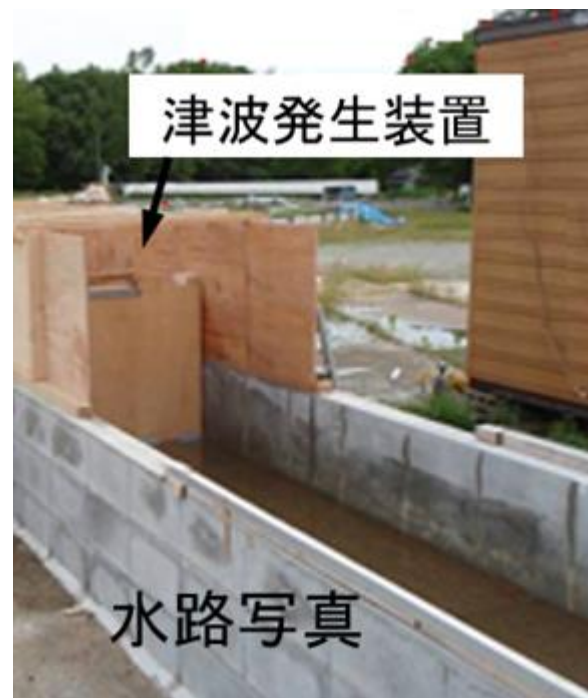


実験水路の縦断面

単位 (cm)

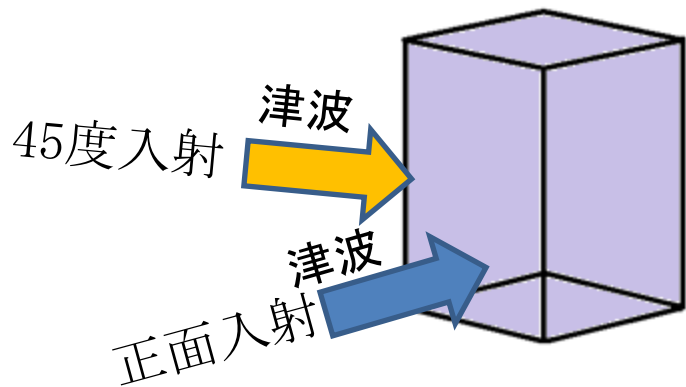


実験水路の横断面

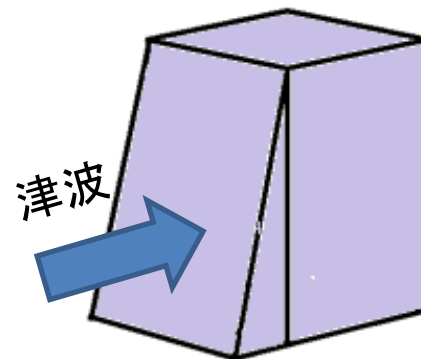


津波模型実験を行った二次元水路

令和3年度・WG1の活動報告（5/13）

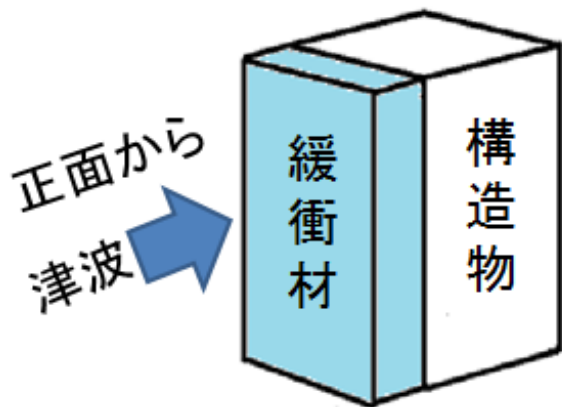


(1) 入射方向の影響

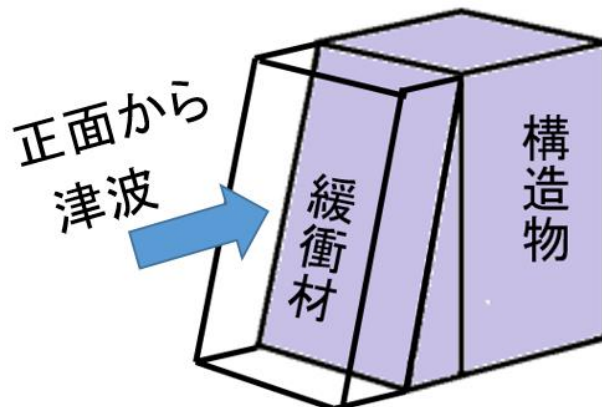


(2) 構造物の側面勾配の影響

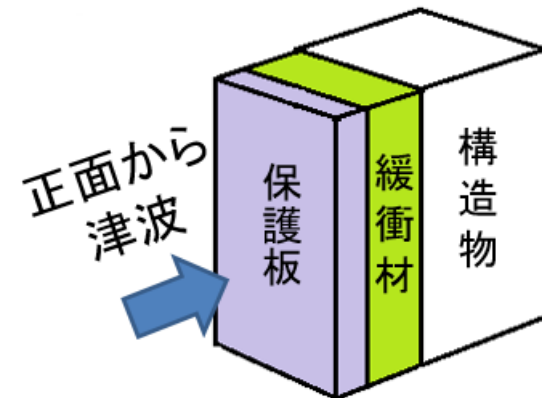
(I) 構造物の表面形状による津波波圧の低減効果の検討



(3) 緩衝材を鉛直側面の前面に配置



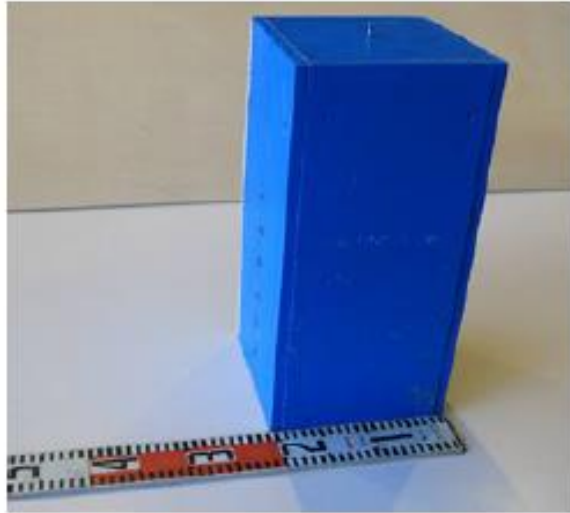
(4) 緩衝材を斜面側面に配置



(5) 緩衝材の前面に保護板を配置

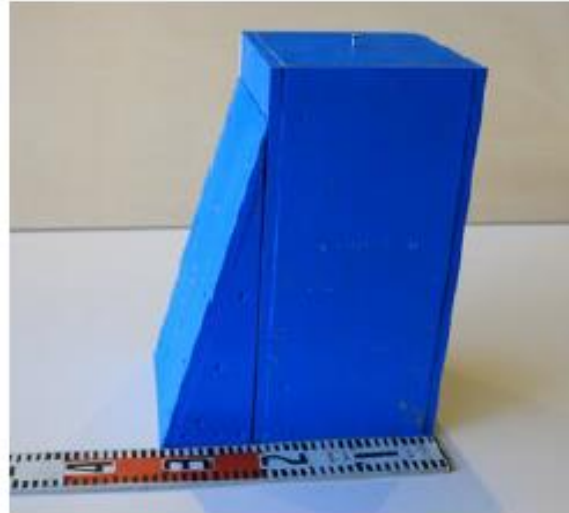
(II) 緩衝材による津波波圧の低減効果の検討

津波模型実験の目的と実験ケース



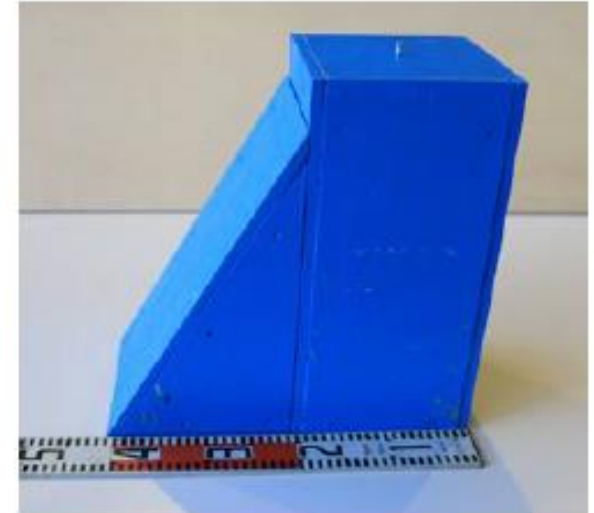
(a)基本形

Case-1



(b) 仰角 75 度

Case-2



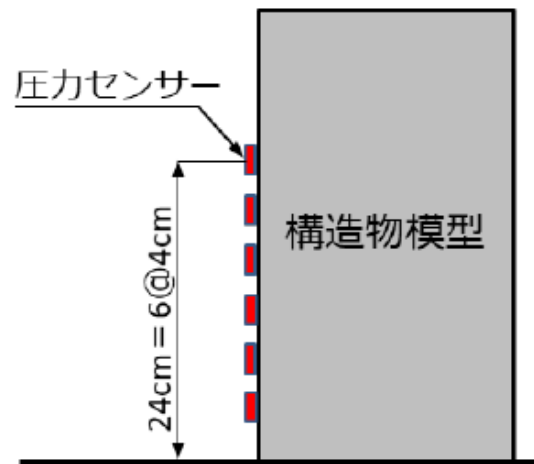
(c) 仰角 60 度

Case-3

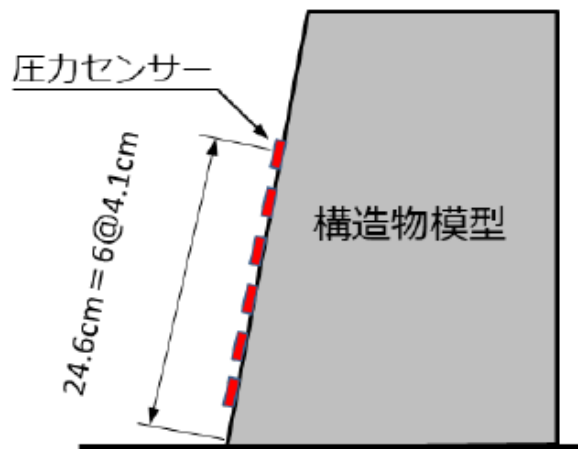
(基本形：仰角90度、入射角：正面入射、波高：25cm)

構造物の側面勾配による波圧の低減効果に関する
津波模型実験の実験ケース

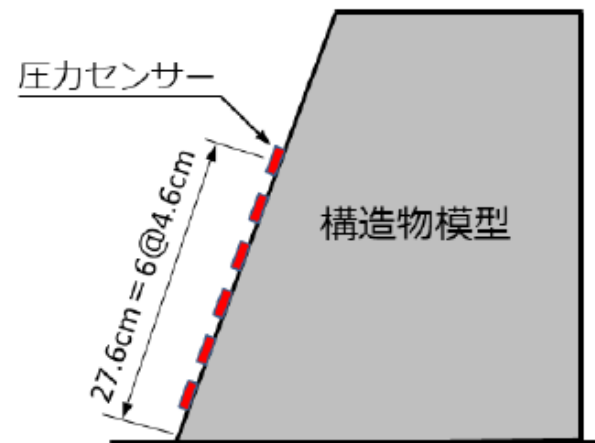
令和3年度・WG1の活動報告（7/13）



(Case1 : 90度)



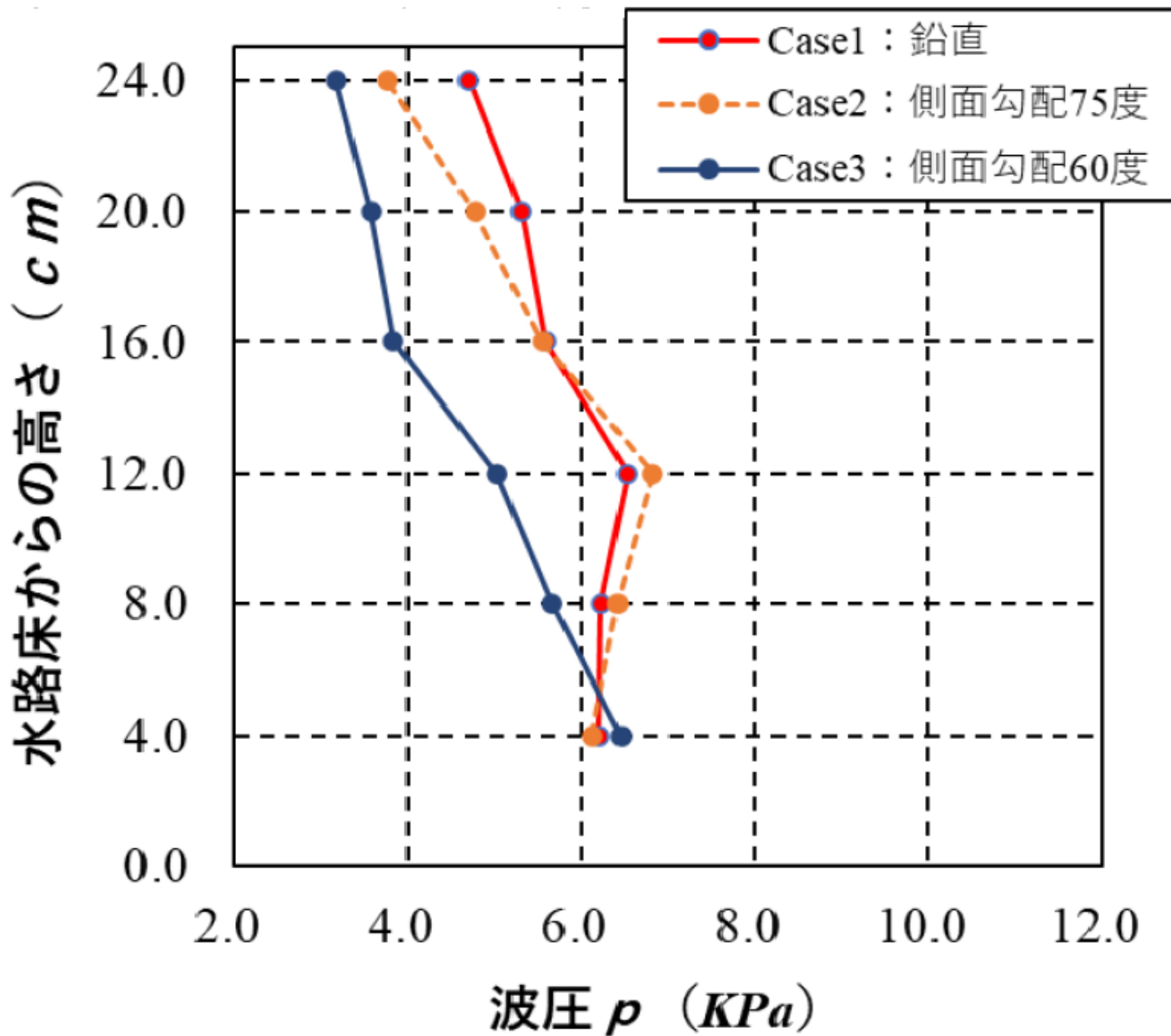
(Case2 : 75度)



(Case3 : 60度)

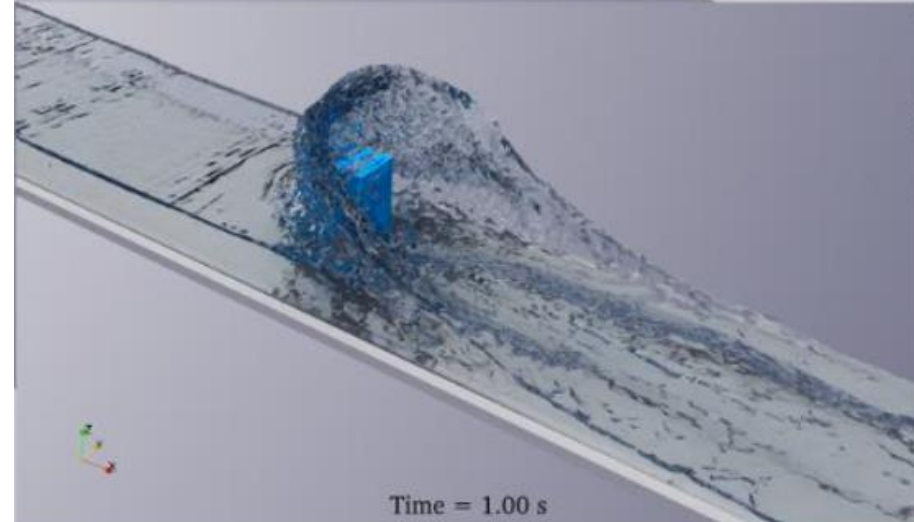
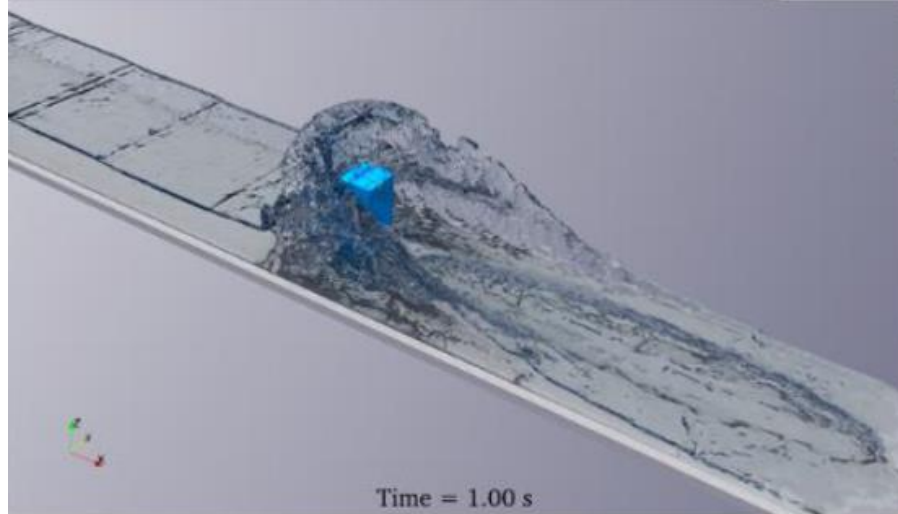
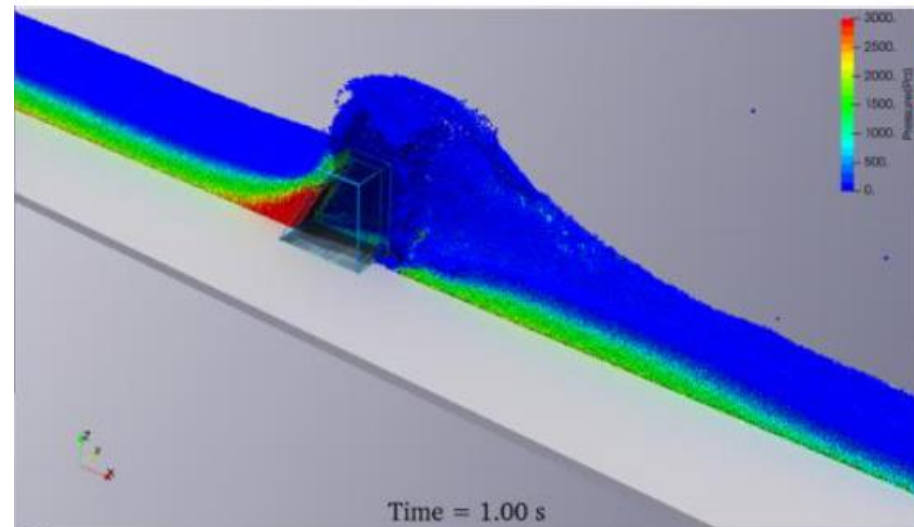
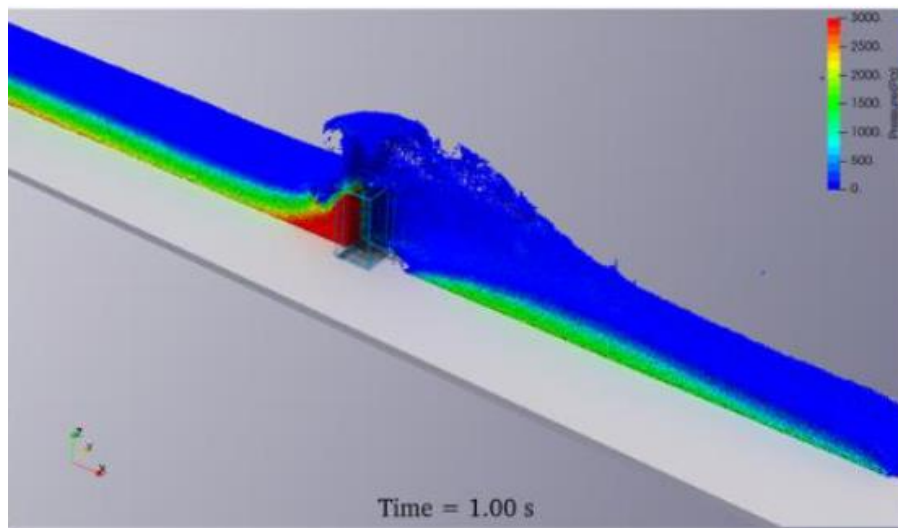
構造物の側面勾配による波圧の低減効果の
検討のための構造物模型と圧力センサーの配置

令和3年度・WG1の活動報告（8/13）



構造物の側面勾配による最大波圧分布の比較結果

令和3年度・WG1の活動報告（9/13）



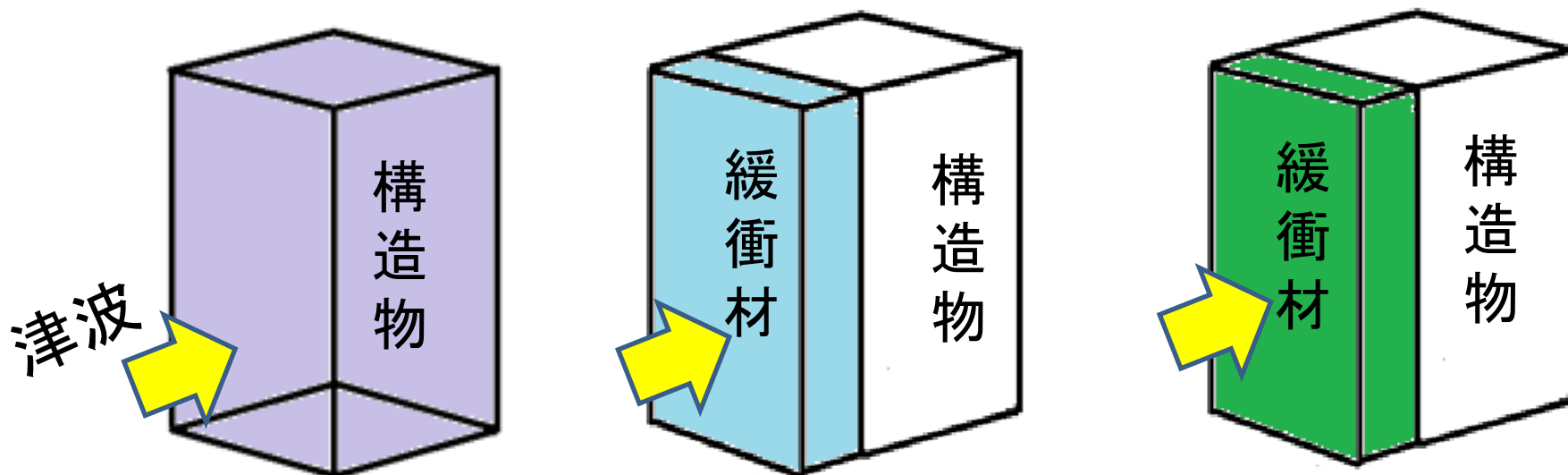
(1) 仰角90度（鉛直）

(2) 仰角60度

側面勾配による圧力分布と液面変化の状況

SPH法による津波模型実験の再現解析結果

令和3年度・WG1の活動報告（10/13）



津波：正面入射。
構造物側面：鉛直

構造物底面：固定
緩衝材底面：可動

(1) 緩衝材なし

Case-1

(2) 緩衝材あり
EPDMスポンジ

Case-2

(3) 緩衝材あり
グラスウール

Case-3

緩衝材による波圧低減に関する実験ケース

(EPDMスポンジ：エチレンプロピレンゴムスポンジ)

令和3年度・WG1の活動報告（11/13）



EPDMスポンジ



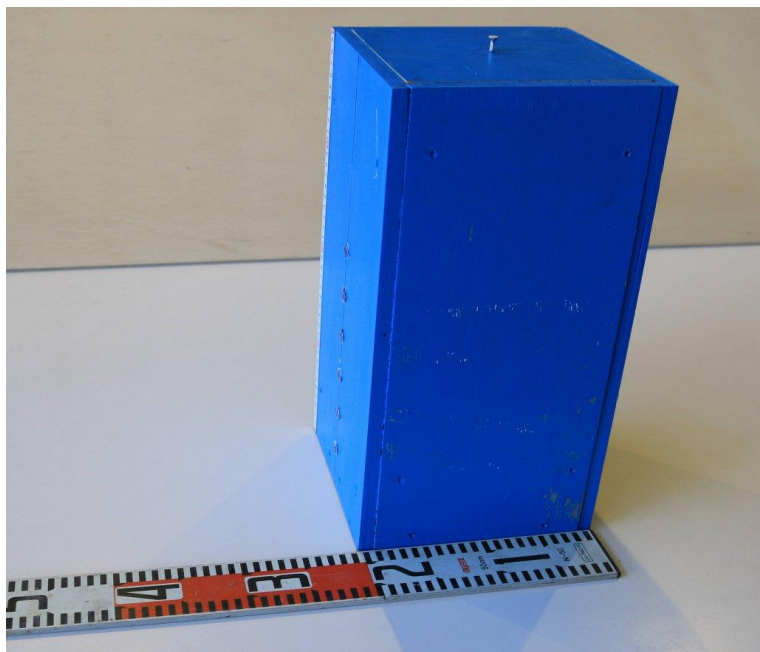
グラスウール

津波模型実験に使用した緩衝材

(備考) EPDMスポンジ：エチレンプロピレンゴムスポンジ

令和3年度・WG1の活動報告（12/13）

（構造物側面：仰角90度、入射角：正面入射、波高：25cm）



緩衝材なし

(a) 構造物模型

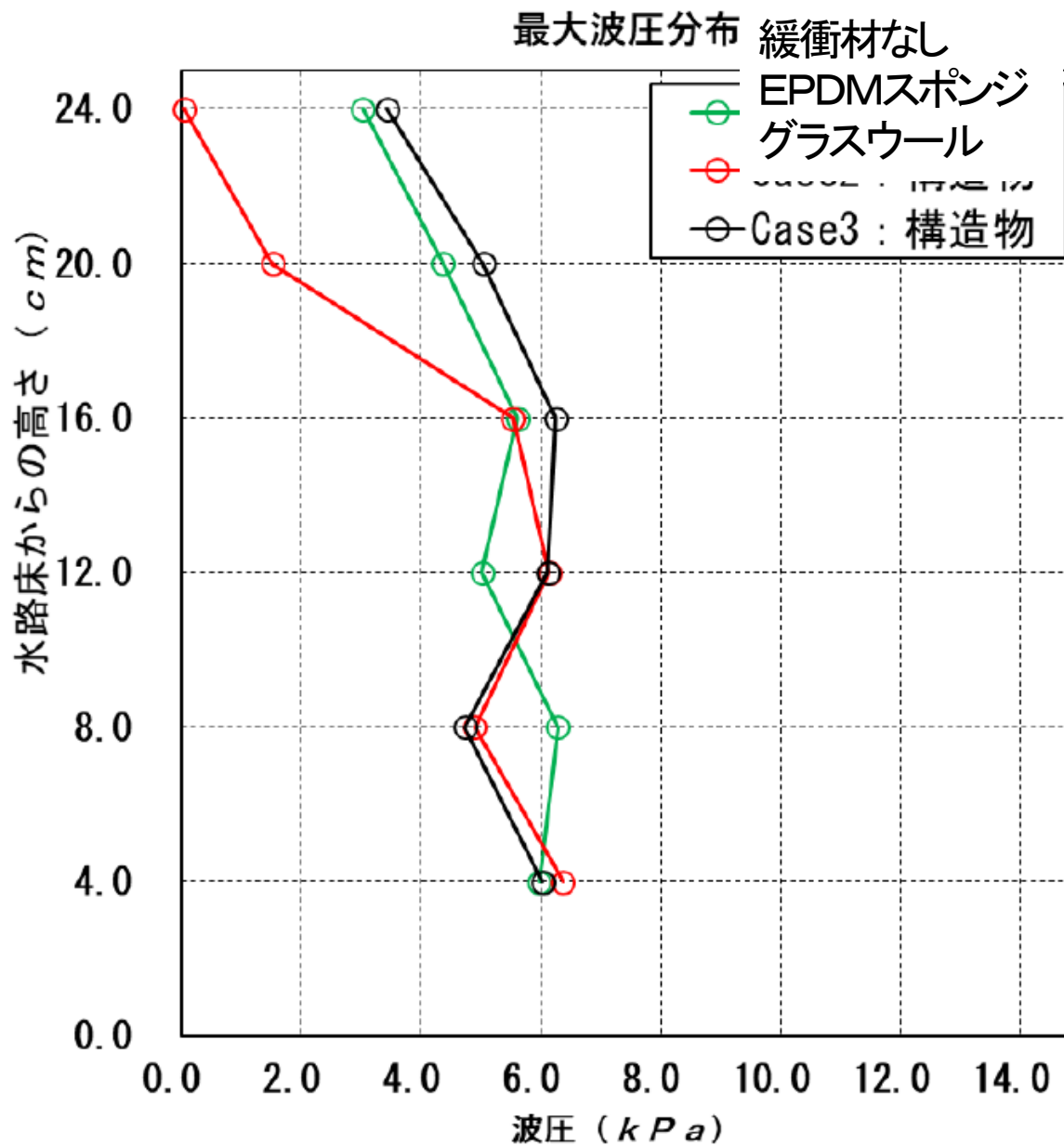


EPDMスポンジ

(b) 緩衝材の設置状況



令和3年度・WG1の活動報告（13/13）



緩衝材の有無・種類による最大波圧分布の比較結果

令和4年度のWG1活動計画（1/1）

（1）活動計画

これまでの研究結果を踏まえ、次の事項について研究を推進する。

- ・ 免波構造に関する津波模型実験の実施
- ・ SPH法による津波模型実験の再現解析
- ・ 免震・免波材料の簡易評価法の検討
- ・ FEM解析による構造物に作用する津波波圧の評価
- ・ 免震免波構造の解析評価法の検討

（2）論文発表（予定）

- 1) 土木学会77回年次学術講演会（1編）2022年9月14日～16日（予定）

（題目：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、投稿済）

- 2) 土木学会第42回地震工学研究発表会（2編程度）、2022年10月頃（予定）

（仮題：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）

（仮題：構造物に発生する応力に対する津波波圧の分布形状の影響）

- 3) 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（3編程度）、2023年1月頃（予定）

令和3年度・WG2の活動報告（1/16）

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

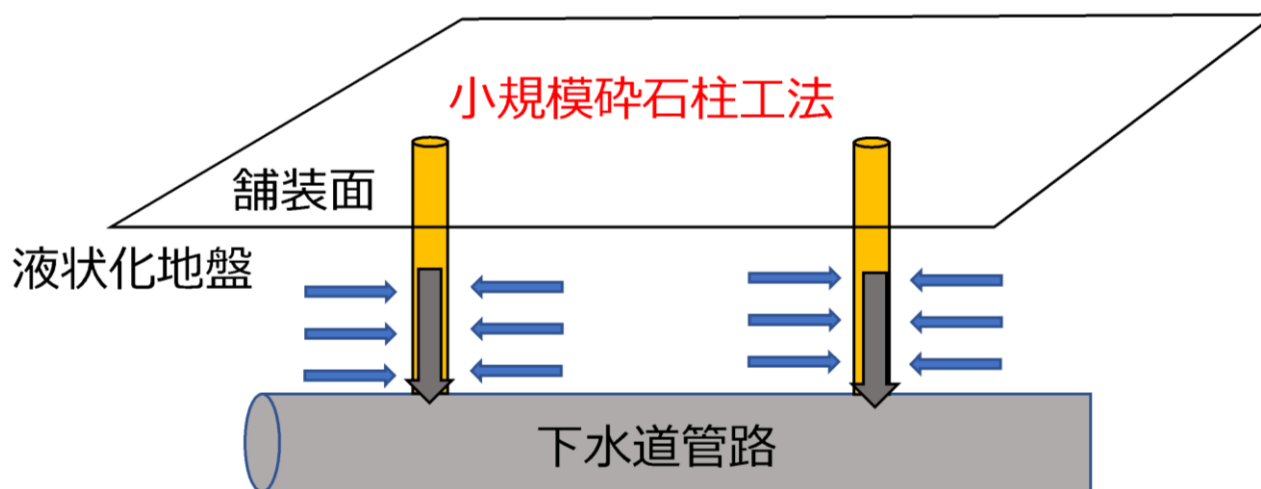
- ②水道施設耐震工法指針の改定作業における技術的支援作業
⇒水道施設耐震工法指針・解説（日本水道協会）の改定作業。

令和3年度・WG2の活動報告（2/16）

3. 研究結果① [実験]

研究目的

大地震時における下水道管路の耐震性を向上させるための**小規模砕石柱工法**の対策効果について遠心模型実験を行い検討する。



砕石柱による対策原理

1. 間隙水圧消散効果
2. 自重による押さえ込み

令和3年度・WG2の活動報告（3/16）

3. 研究結果① [実験]

[令和3年度実験計画]

令和2年度に防災科研で実施した1G場の実験結果を踏まえ、令和3年度に関西大学において遠心模型実験計画を実施した。実験のモデルは防災科研で行った実験模型を概ね踏襲することとした。

（令和2年度実験の考察結果）

防災科研で実施。対策有と無とで浮上量に有意な差が確認されなかった原因について、管の下部地盤を締固めたため揚圧力が作用しない、加振の方法により管回り及び上部地盤が先行して締固まってしまう、局所的な液状化に留まったことが考えられる。

3. 研究結果① [実験]

実験の流れ

空中落下法による給砂で相対密度50%の地盤作製



脱気槽で粘性流体を注入しながら飽和地盤作製

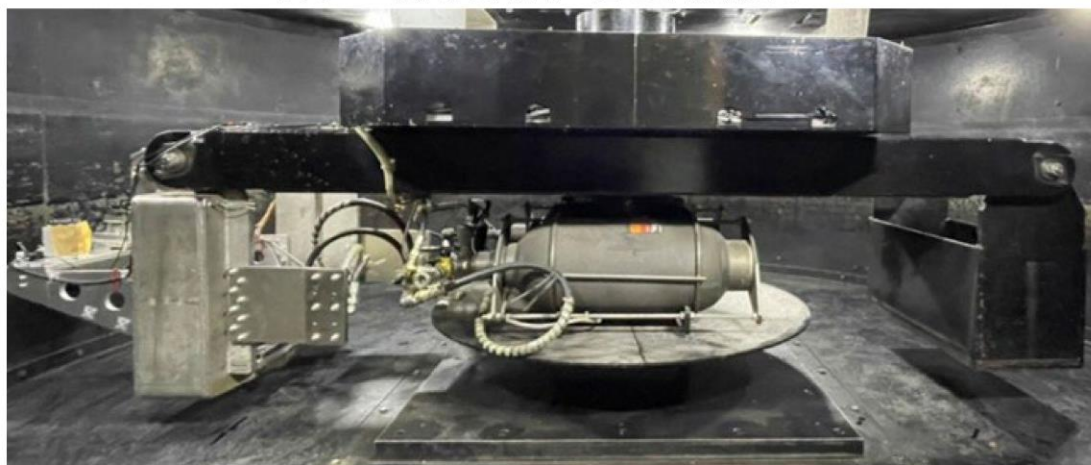


50Gの遠心载荷による圧密，加振

令和3年度・WG2の活動報告（5/16）

3. 研究結果① [実験]

写真2-1 関西大学所有の遠心力载荷装置



剛土槽：幅450mm，高さ400mm，奥行き200mm

駆動方式	電動モータ，三相，200V，15kW
遠心加速度	最大：200G，傾斜使用时最大：100G
有効半径	1.5m
スリップリング	動力用11極，計測用36極
スィベルジョイント	4ポート，耐圧：10kgf/cm ²
防護ドラム	鋼鉄製，厚さ：150mm，鉄板の肉厚：16mm
振動台	油圧式，最大圧：20MPa

使用した砂 豊浦標準砂

最大間隙比 e_{\max} 0.989

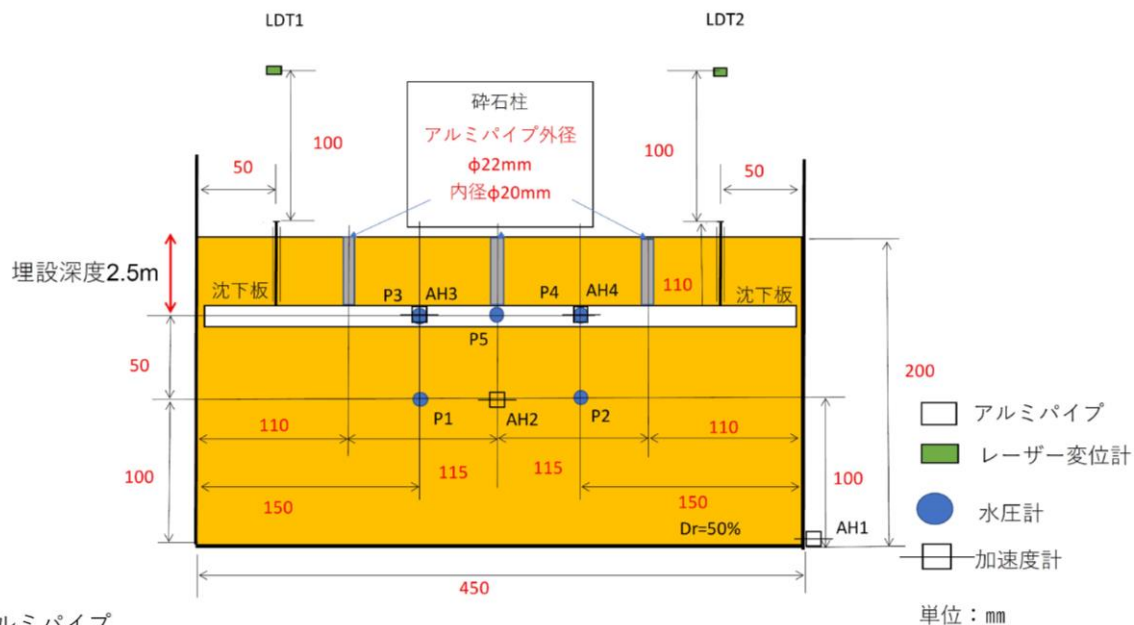
最小間隙比 e_{\min} 0.614

土粒子密度 $G_s(\text{g/cm}^3)$ 2.656

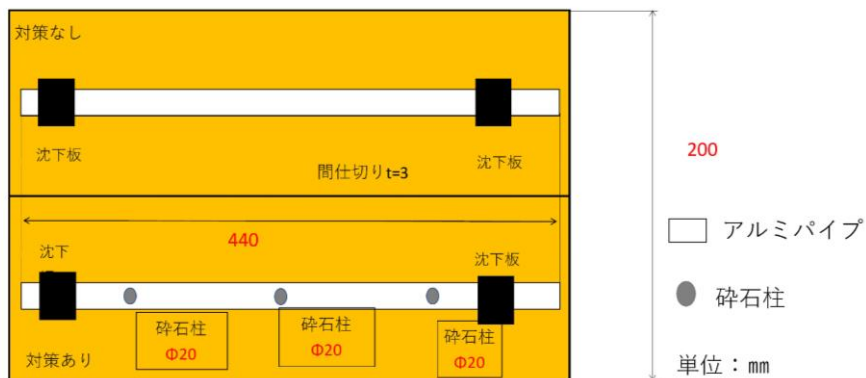
令和3年度・WG2の活動報告（6/16）

3. 研究結果① [実験]

対策あり 断面図 (Case 4~Case 6)



平面図 (Case 4~Case 6)

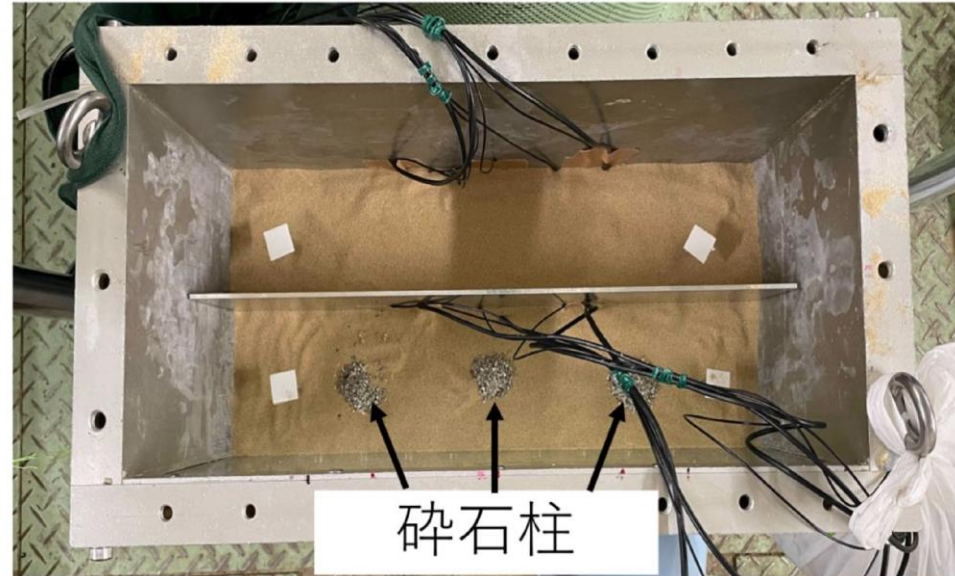
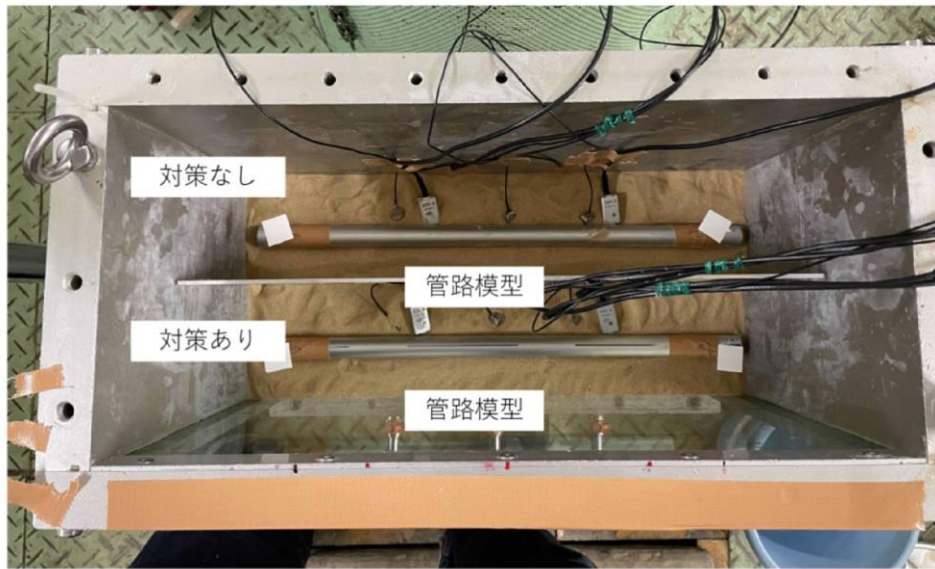


模型概要

実験ケース	管路模型	管路長さ(mm)	管径(mm)	見かけの密度(g/mm ³)
Case 4	アルミパイプ	440	20	600
Case 5	アルミパイプ	440	20	600
Case 6	アルミパイプ	440	20	600
Case 7	バルサ材	420	15	149
Case 8	アクリル円柱	410	20	386

令和3年度・WG2の活動報告（7/16）

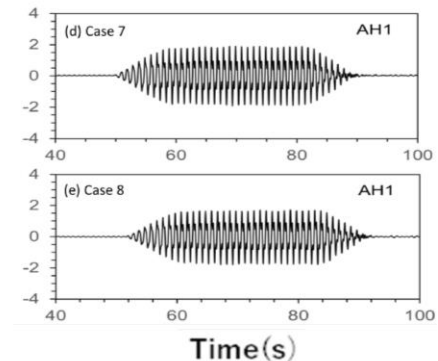
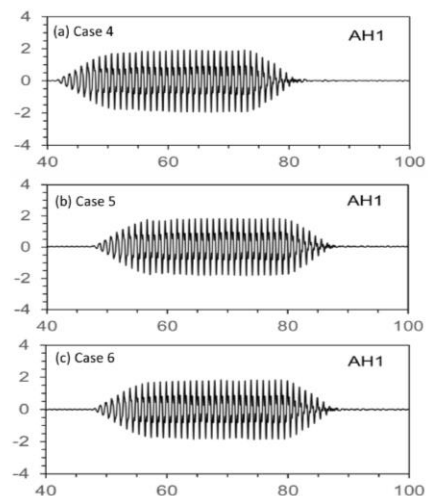
3. 研究結果① [実験]



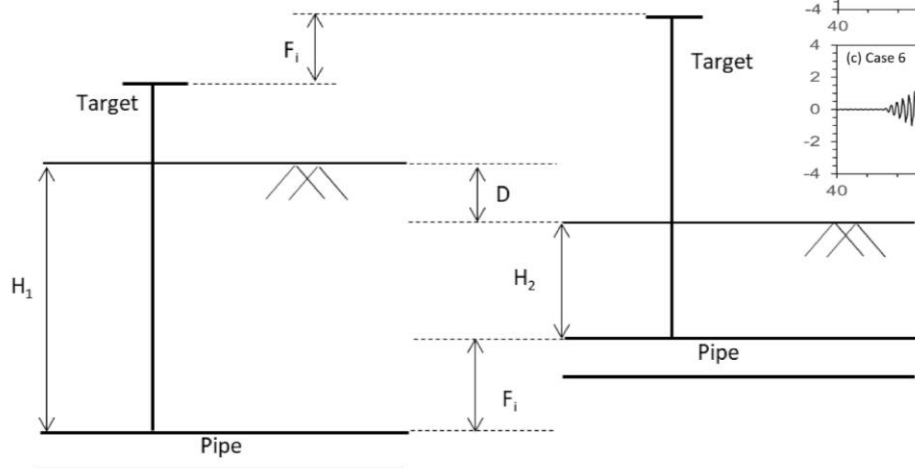
令和3年度・WG2の活動報告（8/16）

3. 研究結果① [実験]

入力加速度時刻歴：(a) Case 4, (b) Case 5, (c) Case 6, (d) Case 7, (e) Case 8,



管路の浮上量の定義



H_1 : 加振前の土被り

H_2 : 加振後の土被り

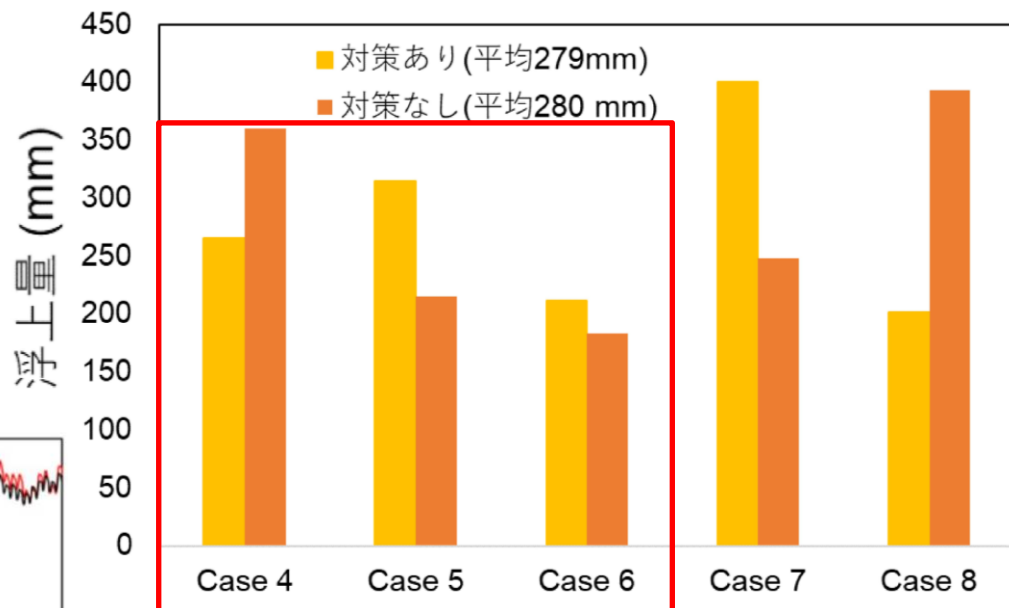
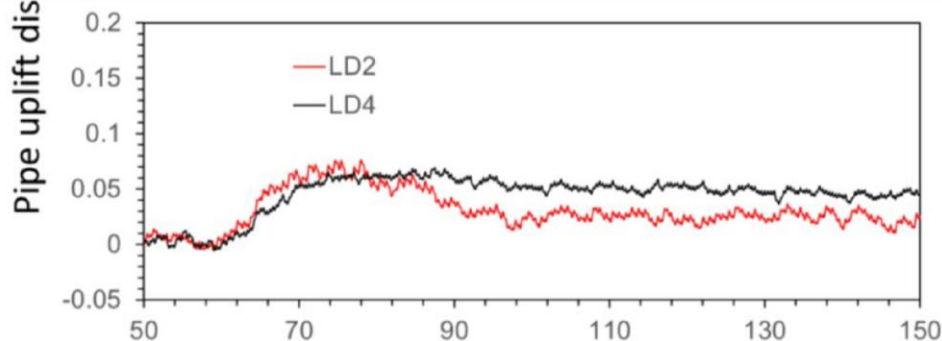
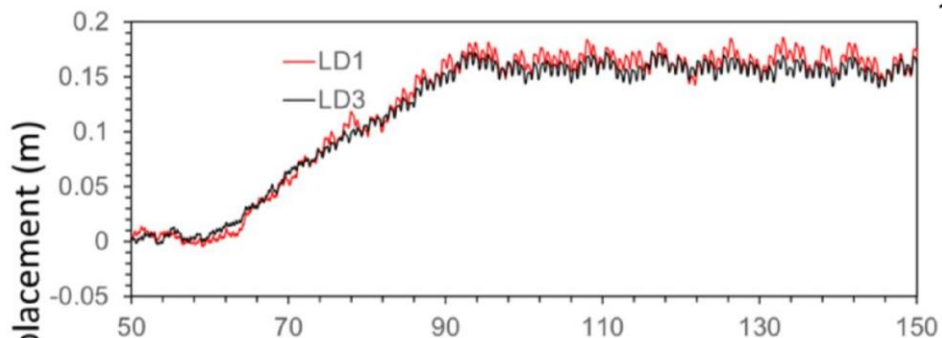
D : 模型管路上付近の地表面測定点の平均沈下量

F_i : 加振前を基準とする管路の浮上量(ターゲットiの変位量, $i=1, 2$)

$H_3 = H_1 - H_2 = H_1 - (H_1 - (D + (F_1 + F_2)/2))$: 管路の見かけの浮上量

令和3年度・WG2の活動報告（9/16）

3. 研究結果① [実験]



模型管路鉛直変位時刻歴

(Case8) : 対策あり (LD1, LD3)、対策なし (LD2, LD4)

令和3年度・WG2の活動報告（10/16）

3. 研究結果① [実験]

まとめ

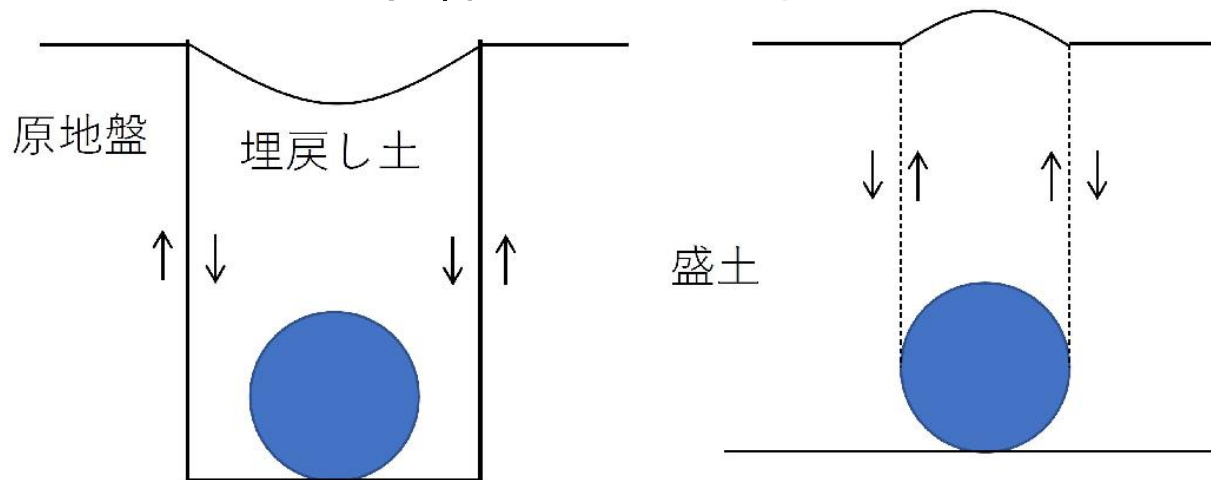
- 遠心模型実験により，埋設深度2.5mに設置した外径1.0mの管路について，液状化地盤中の挙動を調べた。
- 直径0.5mの碎石柱による浮上対策を施したケースと無対策のケースについて同時に加振を行い，対策効果として主に浮上量に着目した。
- 液状化による管浮上は確認できた。
- 碎石柱による管路の浮上抑制効果は確認できたケースも見られた。
- しかし，対策効果は小さく解析ケースのばらつきも大きい。



- 実験の条件（トレンチの形状による影響など）や対策方法について見直し必要⇒再実験



- 管が浮上する要因の影響度合いも分析



(a) 溝形変形

(b) 突出型変形

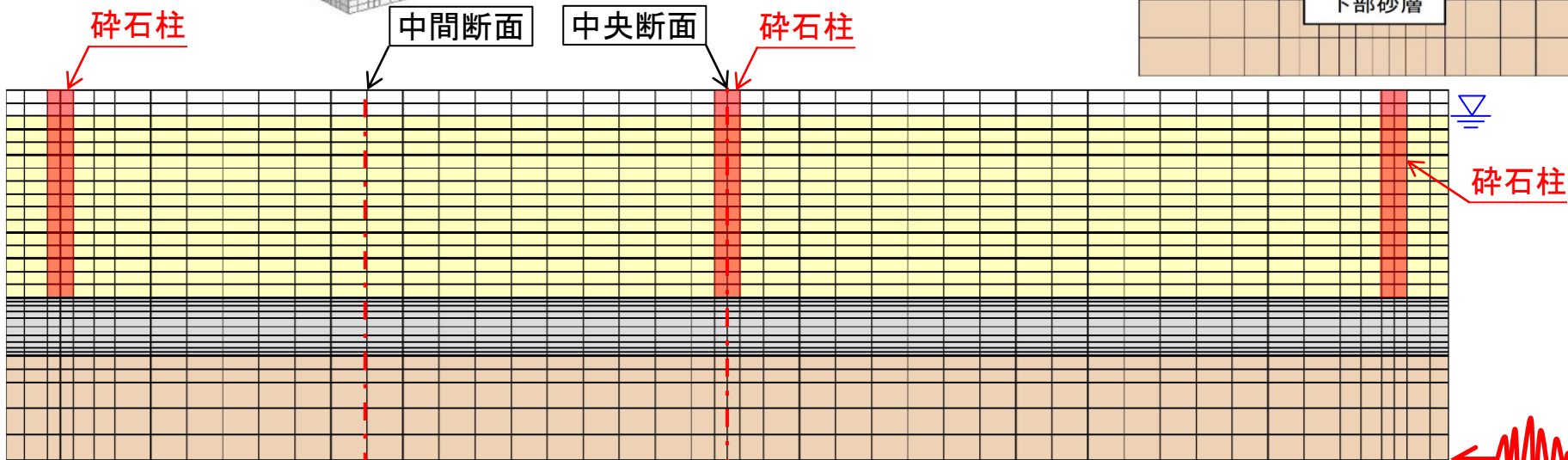
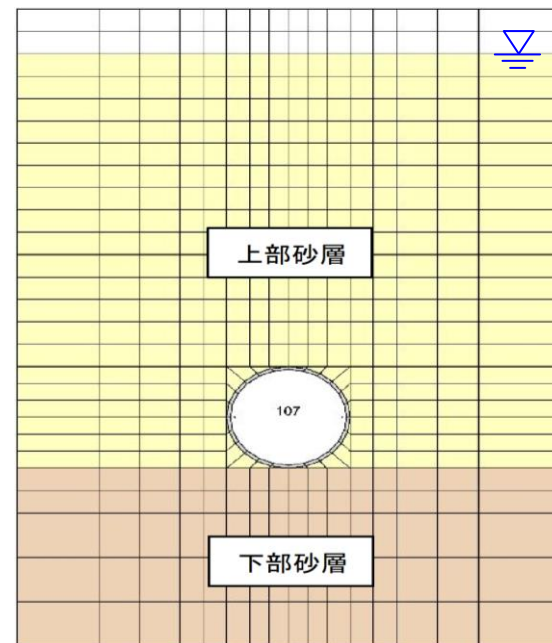
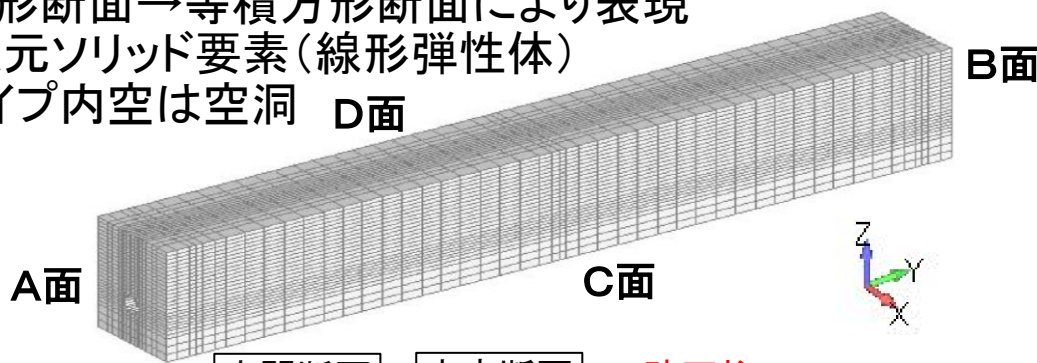
令和3年度・WG2の活動報告（11/16）

4. 研究結果② [解析]

目的: 実験結果と整合する解析モデルや解析方法などを設定し, 実験では確認できない様々なパラメータと砕石柱の効果の関係などを分析する.

[解析モデル]

- ・上部砂層 (Dr=60%) : 3次元ソリッド要素 (繰返し弾塑性モデル)
- ・下部砂層 (Dr=80%) : 3次元ソリッド要素 (繰返し弾塑性モデル)
- ・砕石柱 : 3次元ソリッド要素 (繰返し弾塑性モデル)
円形断面 → 等積方形断面により表現
- ・パイプ : 3次元ソリッド要素 (線形弾性体)
パイプ内空は空洞 D面



[解析ケース] ケース1: 砕石柱無し ケース2: 砕石柱有り

令和3年度・WG2の活動報告（12/16）

研究成果②[解析]

- 研究当初は、本研究の前提条件である無対策ケースにおける液状化による顕著な管路浮上を表現できなかった。そこで、WGでの協議を重ね試行錯誤した結果、地盤モデルや境界条件などの設定方法を適性化することで、想定に近い液状化地盤の挙動や管路の浮上が確認できる解析モデルを構築できた。

⇒実験方法・条件の事前検討や対策工法の理論的研究に活用できる。

- ただし、本解析結果からは、砕石柱による液状化浮上対策効果は確認されず、これまでの実験結果も踏まえ、今後、液状化対策工法の研究について方針見直しの検討が必要と考えている。

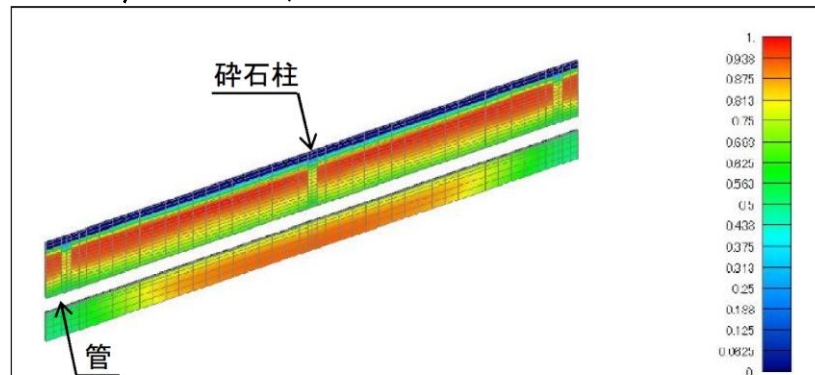
令和3年度・WG2の活動報告（13/16）

研究成果②[解析]

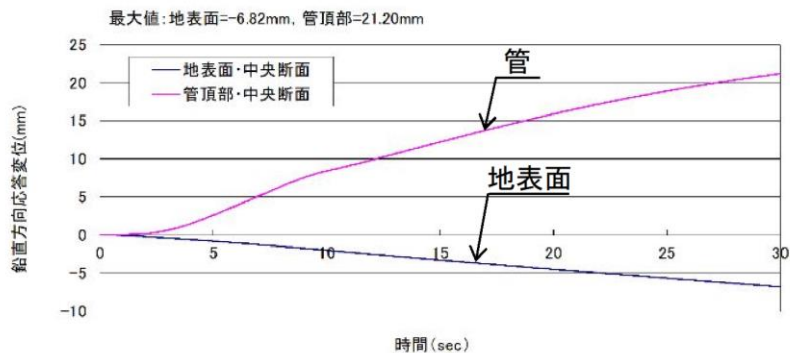
解析モデルの境界条件

境界	変位成分	境界条件① (半剛壁)	境界条件② (せん断壁)	備考 前回(完全剛壁)
側面 A面・B面	壁面法線方向(δy)	固定	等変位*	固定
	壁面接線方向($\delta x \cdot \delta z$)	自由	自由	固定 δx , 自由 δz
	回転($\theta x \cdot \theta y \cdot \theta z$)	固定	固定	固定
側面 C面・D面	壁面法線方向(δx)	固定	固定	固定
	壁面接線方向($\delta y \cdot \delta z$)	自由	自由	固定 δy , 自由 δz
	回転($\theta x \cdot \theta y \cdot \theta z$)	固定	固定	固定
底面	全成分	固定	固定	固定

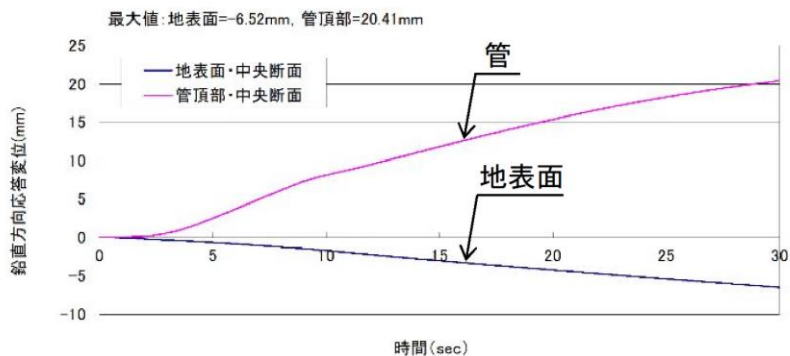
注) * : 等変位境界は1次元自由地盤の地震時応答を模擬する設定を適用



過剰間隙水圧の状況（対策有）



鉛直方向応答変位波形（対策無）



鉛直方向応答変位波形（対策有）

令和3年度・WG2の活動報告（14/16）

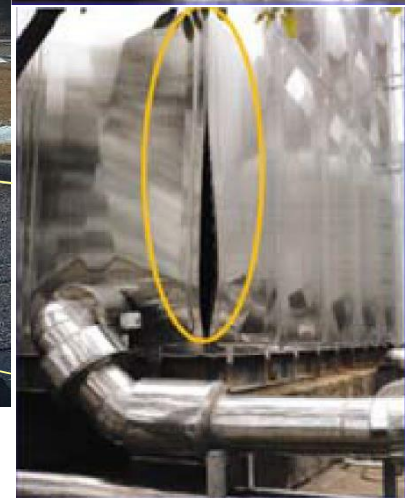
【水道施設の耐震工法指針の改定作業における技術的支援】

⇒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月未発刊予定

⇒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】

3月11日15時25分

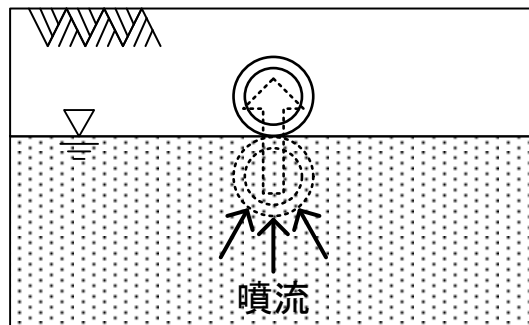
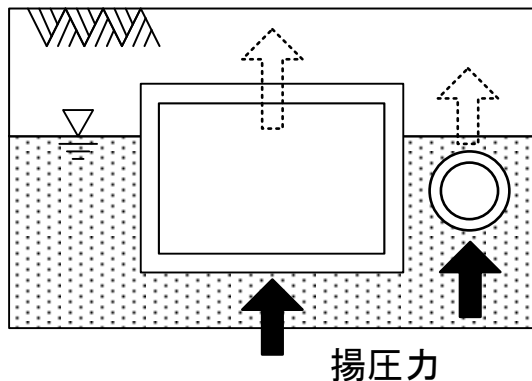


令和3年度・WG2の活動報告（15/16）

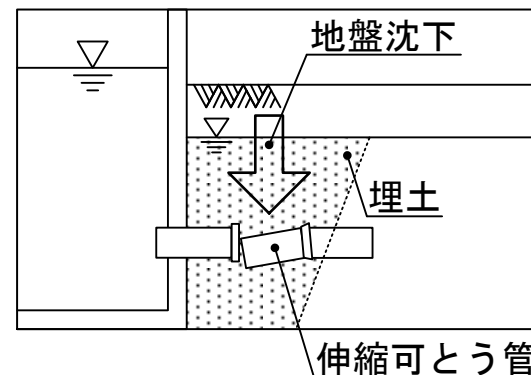
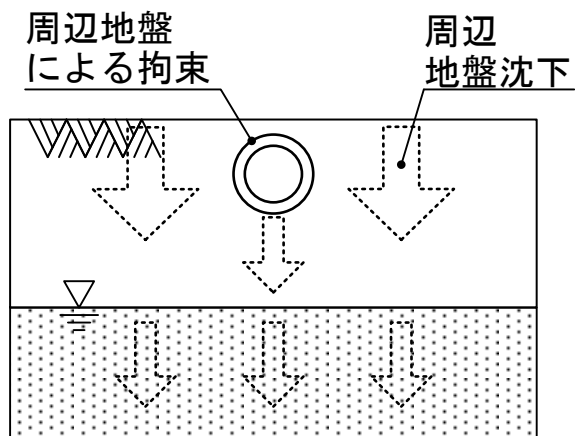
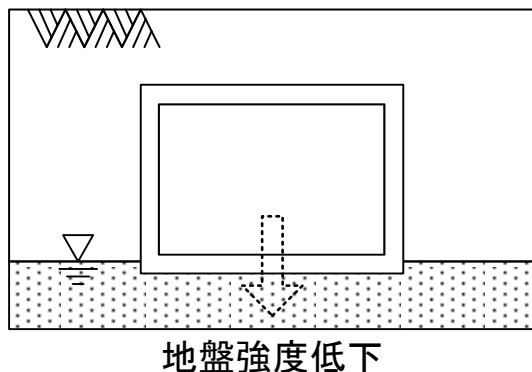
【液状化についての記述例】


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

令和3年度・WG2の活動報告（16/16）

鋼製タンクの種類を明確に記述し、バルジングの影響が大きいタンクの設計法の大幅な見直しを記述。

種類	形状	母材	側板の構造	側板の溶接形状	参考指針				
					日本建築学会：容器構造設計指針・同解説、2010年3月	日本水道鋼管協会：WSP063-2018 鋼製配水池設計指針、平成30年2月	日本水道鋼管協会：WSP073-2010 ステンレス鋼製角形配水池設計指針、2011年3月	日本ステンレスタンク工業会：波形鋼板（剛性側板）形式 ステンレス鋼板製矩形配水池設計指針、2018年10月	日本ステンレスタンク工業会：ステンレス鋼板製パネルタンク配水池設計指針、平成24年12月
鋼製水槽	円筒形	SS	円筒シェル	突合せ溶接	○	○			
ステンレス鋼製水槽		SUS			○ (強度等除く)	○ (強度等除く)			
ステンレス鋼板製一体形タンク	矩形	SUS (ss ※)	縦波板	・突合せ溶接 ・両面すみ肉溶接			○		
			縦波板または横波板				○		
ステンレス鋼板製パネルタンク		SUS	薄板性成形パネル(柱材補強)	・突合せ溶接 ・へり溶接 ・すみ肉溶接					○

令和4年度活動計画（WG2）（1/2）

1) 概要

上・下水道既設管路の浮上対策工法に関する代表的モデルによるの再実験と、数値解析における最適な実験条件の設定及び様々な対策工法の研究を行う。

2) 遠心載荷実験

- ・数値解析の結果を基に、昨年度は土槽全体が液状化するという条件であったが、（管外径+1 m）程度のトレンチの埋戻し土が液状化することとして、管下面に過剰間隙水圧が集中するような土槽モデル（管路周辺の液状化した土が管の移動とともにより動きやすくなるモデル）を構築し、再実験を行う。
- ・遠心載荷実験は9月以降実施の予定。

【要点】（管浮上が生じやすい要因のさらなる研究）

- ・モデルの寸法による影響、土粒子の大きさや挙動、入力加速度
- ・浮くためには、下に砂を回り込ませる必要。下部土層は十分な厚みが必要？
- ・浮きやすいトレンチの形状は？
- ・ある程度の管断面が必要。細いと浮かない？茶筒程度。

令和4年度活動計画（WG2）（2/2）

3）数値解析

- ・遠心載荷実験に先立ち、数値解析（FEM）によって液状化対策無しが浮上し、対策有が浮上を抑制できる条件を探す。
- ・粒子法（DEM）によって管軸方向及び管軸直角方向に揺らし浮上の有無を調べることで、土粒子の挙動を詳しく評価することにより条件を模索する。
- ・これらの数値解析について8月頃を目処に実施する。

【要点】

- ・全体の再現解析はFEMで抑えておいて、FEMが直接的に扱えない粒状体としての地盤の特徴的な挙動について、詳細に粒子法で分析することとする。
- ・最終的には、FEMで実用十分な検討ができる、という結論につながることを目標とする。

4）水道施設耐震工法指針・改訂版について勉強会

令和4年6月に改訂予定の標記指針について、主に液状化に関する内容の勉強会を行い、今後の水道施設の設計実務の在り方に関する意見交換を行う。

◆令和4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(4月(実施済み)、6月、12月)

WG協議 各4~5回(随時)

2) 行事等の予定

【現場視察会(場所:未定)】

【水道施設の液状化対策に関する勉強会(場所未定)】

【論文発表などの予定】

① 土木学会77回年次学術講演会(1編)

2022年9月14日~16日(予定)

(題目: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、投稿済)

② 土木学会第42回地震工学研究発表会(2編程度)

2022年10月頃(予定)

(仮題: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)

(実験&SPH法解析結果)

(仮題:構造物に発生する応力に対する津波波圧の分布形状の影響)

③ 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(5編程度)、

2023年1月頃(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