

遠心載荷実験・再現解析に関する 照査例・技術資料の概要

小委員会幹事

永井秀樹, 高田祐希 (大林組)

※本日、高田の代理説明：堤内隆広

1

遠心載荷実験とその再現解析に関する 照査例・技術資料

照査例

- I 二次元部材非線形の地震応答解析を用いた照査例
- II 三次元材料非線形のプッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査例
- III 三次元材料非線形の地震応答解析を用いた照査例

技術資料

- I 液状化に関する既往文献調査
- II 密な地盤に埋設された円形立坑模型の載荷実験
- III 密な地盤に埋設された円形立坑模型実験の再現解析
- IV 密な地盤に埋設された円形立坑模型実験の三次元材料非線形解析
- V 地盤の液状化を考慮した実規模立坑の二次元有効応力解析
- VI 地盤の液状化を考慮した実規模立坑の三次元材料非線形解析

2

技術資料

II 密な地盤に埋設された円形立坑模型の載荷実験

pp.157~187

遠心載荷実験の目的

(課題) 密な地盤中のRC円形立坑については、検討事例が少なく、有効応力解析を用いた損傷評価手法の妥当性検証は十分とは言えない。



(目的) RC円形立坑の損傷や、作用する荷重などを把握し、損傷評価手法の妥当性検証用の実験データを取得する。

主な成果

- RC円形立坑の損傷モードを確認した。
- 妥当性検証に有用な実験データを取得した。
 - ・ RC円形立坑の変位・加速度
 - ・ RC円形立坑に作用する土圧
 - ・ 地盤の変位・加速度
 - ・ 地盤中のせん断応力(ペアの土圧計から推定できることも確認)

3

技術資料

II 密な地盤に埋設された円形立坑模型の載荷実験

pp.157~187

目次

- 1. はじめに
- 2. 実験概要
 - 2.1 実験方法と計測機器
 - 2.2 地盤材料
 - 2.3 立坑模型
 - 2.4 加振条件
- 3. 実験結果
 - 3.1 地盤の挙動
 - 3.1.1 過剰間隙水圧比
 - 3.1.2 地盤の水平加速度
 - 3.1.3 地盤の水平変位
 - 3.1.4 加振時の立坑に作用する荷重の分担割合
 - 3.2 立坑の挙動
 - 3.2.1 立坑の損傷状況
 - 3.2.2 鉄筋の降伏状況
 - 3.2.3 立坑の水平加速度
 - 3.2.4 立坑内の変位
 - 3.3 土圧計によるせん断応力評価



遠心載荷装置 (株大林組)

4

2. 実験概要

pp.157~180

2.1 実験方法と計測機器

- 密な地盤中にある円形立坑を対象に、遠心重力30Gの遠心載荷実験を実施
- 立坑模型の種類、支持条件、地盤条件を変えて4ケース実施

実験ケース

ケース	模型	支持条件	地盤条件	備考
1	非線形 (RC模型)	岩盤上に設置	成層地盤	基本ケース
2	弾性 (3DP模型)	岩盤上に設置	成層地盤	非線形模型との比較検討
3	非線形 (RC模型)	岩盤上に設置	立坑の片側に盛土を設置	盛土荷重による偏土圧の影響検討
4	非線形 (RC模型)	岩盤に根入れ	成層地盤	支持条件の影響検討

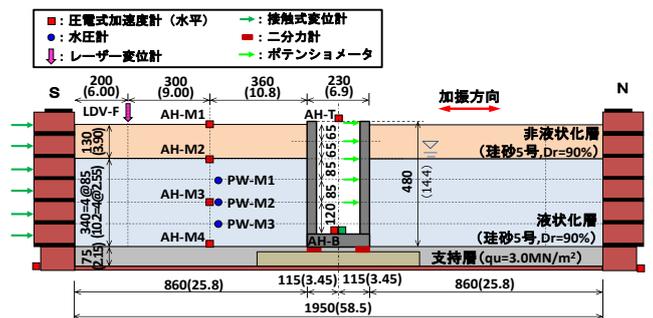
5

2. 実験概要

pp.157~180

2.1 実験方法と計測機器

- 模型：断面外径6.9m、内径5.4m、壁厚0.75m、高さ14.4mのRC円形立坑を想定
- 地盤：相対密度Dr=90%、地下水位は地表から3.9m下

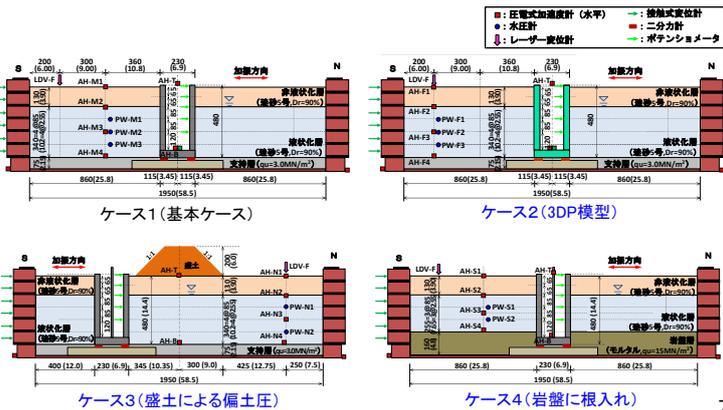


ケース1 (基本ケース)

単位: mm
 () 内はm (実物換算値)

6

2.1 実験方法と計測機器



2.3 立坑模型

2.3.1 RC模型

- コンクリート: 実物の骨材径を縮小したマイクロコンクリート
- 鉄筋: D2鉄筋を側壁は単鉄筋、底板は複鉄筋で配置



RC模型

材料試験結果(ケース1, 3, 4:RC)

材料	CASE	ヤング係数 kN/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
マイクロ	1	29.9	29.3		1.8
コング	3	34.9	40.5		2.2
リート	4	32.9	36.8		2.1
縮小鉄筋	1, 3, 4	183		320	329



3DP模型

2.3.2 3DP模型

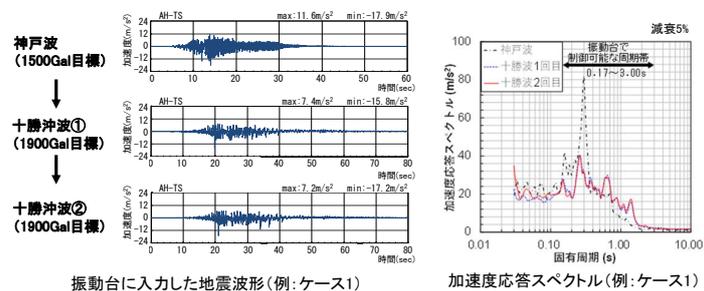
- 材料: 3DP (ナイロン12) で造形した円筒部+補強ボルト、バンド
- 全体重量を概ねRC模型と同等とし、剛性をRC模型の1/2程度に調整

材料試験結果(ケース2:3DP)

密度 (g/cm ³)	0.99
引張強度 (N/mm ²)	29.1
弾性係数 (N/mm ²)	1,710
降伏ひずみ (μ) (0.2%オフセット値)	10,924

2.4 加振条件

- 神戸波加振 → 十勝沖波加振① → 十勝沖波加振② の順で振動台から入力
- 神戸波: 1995年兵庫県南部地震の観測波を、目標1500Gal になるよう調整して入力
- 十勝沖波: 2003年十勝沖地震の観測波を、目標1900Gal になるよう調整して入力

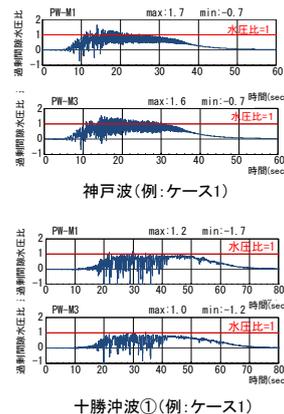
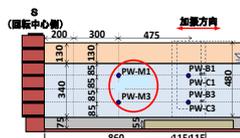


3.1 地盤の挙動

3.1.1 過剰間隙水圧比

- 神戸波加振:
 - 過剰間隙水圧比=1に到達
 - 加振終了時には過剰間隙水圧がほぼ消散
 - 十勝沖波加振:
 - 神戸波と比較すると負の水圧が卓越するサイクリックモビリティ現象が卓越
 - 地盤が密実化したため
- ⇒これらの現象は、全ケースで確認された。

※過剰間隙水圧比 = 過剰間隙水圧 ÷ 初期鉛直有効応力



3.1 地盤の挙動

3.1.2 地盤の水平加速度

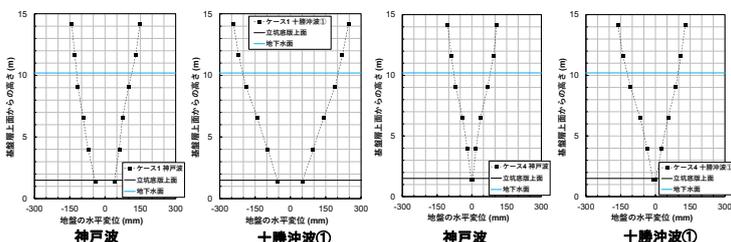
- 神戸波加振:
 - 短周期のスパイク状の波形が卓越
 - スパイク状の波形を除けば応答はやや低減
 - 十勝沖波加振:
 - 神戸波と比較してスパイク状の波形がより顕著に表れている(地盤密実化の影響)
 - 加速度応答からもサイクリックモビリティ現象が確認できた
- ⇒これらの現象は、全ケースで確認された。



3.1 地盤の挙動

3.1.3 地盤の水平変位

- 土槽せん断枠の最大水平変位を基に深度分布を整理
- 地下水位以深で水平変位が大きく、以浅では水平変位増分が小さい
- ケース4のみ、せん断枠下段まで岩盤層があるため、最大変位が小さい



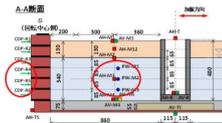
ケース1(基本ケース) ケース4(岩盤根入れ)

土槽せん断枠の最大水平変位深度分布図

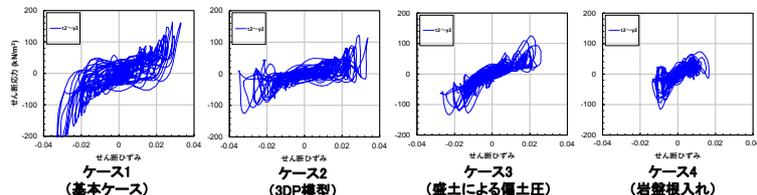
3.1 地盤の挙動

3.1.3 地盤の水平変位(せん断応力評価)

- 液状化層中央部地盤におけるせん断応力-せん断ひずみ関係を算出
- 密地盤特有の逆S字カーブを描くことがわかった
- 片振幅せん断ひずみの最大値は、ケース4を除き約3%であった



※せん断ひずみ…(土槽せん断枠の変位) ÷ (土層高さ)
 ※せん断応力…(単位面積当たりの土塊質量) × (土塊直下の加速度)

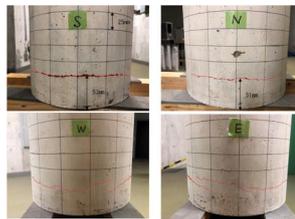


液状化層中央部における「せん断応力-せん断ひずみ」関係 (十勝沖波①)

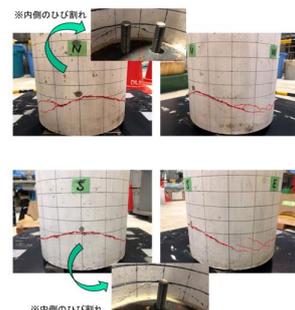
3.2 立坑の挙動

3.2.1 立坑の損傷状況

- 損傷形態は、基部(底版と側壁の接合部)にひび割れが多く集中する曲げ破壊
- ケース1に比較してケース3では、ひび割れ本数が多いことやひび割れ幅が大きい
- ケース2(3DP模型)で、損傷は生じていない



ケース1(基本ケース)

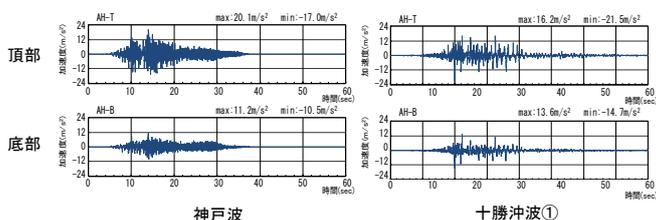


ケース3(盛土による偏土圧)

3.2 立坑の挙動

3.2.3 立坑の水平加速度

- 加速度応答は、頂部の方が応答が増幅し、底部に対して約1.5~2倍の応答
- ケース間の差異はほとんどない

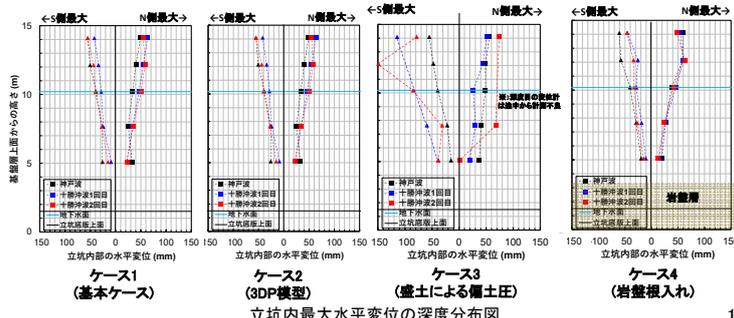


ケース1(基本ケース)

3.2 立坑の挙動

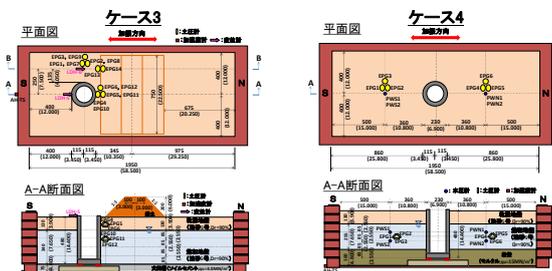
3.2.4 立坑内の変位

- 立坑上部ほど変位が大きくなる挙動を確認
- ケース3では盛土の偏土圧が作用することにより、S側の最大変位量がN側のそれよりも大きい

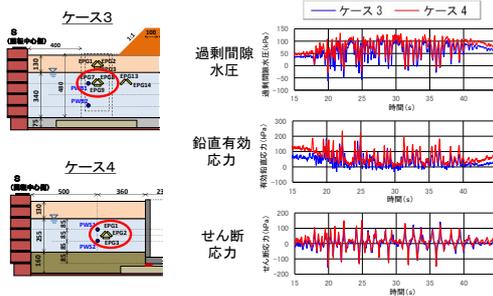


立坑内最大水平変位の深度分布図

3.3 土圧計によるせん断応力評価 (主な計測機器配置)



3.3 土圧計によるせん断応力評価 (ケース3, 4の比較: 十勝沖波1回目)



- ケース3のEPG8-7と、ケース4のEPG2-1は、設置深さの違いから、過剰間隙水圧、鉛直有効応力が異なる。
- 一方で、せん断応力は良く一致している。

立坑および盛土が、地盤のせん断応力に影響を与える範囲は限定的。

土圧計によるせん断応力評価のまとめ

- 水平面から±45°傾けて設置したペアの土圧計から、地盤せん断応力を推定可能。
- 密な地盤を対象とした数値解析の検証に資する有用なデータが得られた。
- 今回の実験条件では、立坑および盛土が、地盤のせん断応力に影響を与える範囲は限定的。

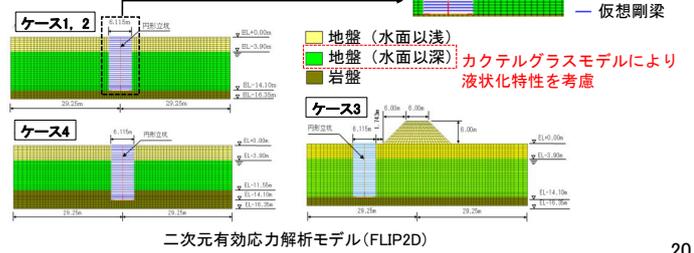
【目次】

1. はじめに
2. 再現解析の概要
3. 再現解析結果
 - 3.1 ケース1-1
 - 3.2 ケース1-2
 - 3.3 ケース2-1
 - 3.4 ケース3-1
 - 3.5 ケース3-2
 - 3.6 ケース4-1
 - 3.7 ケース4-2
 - 3.8 パラメータ解析
4. 三次元再現解析
 - 4.1 はじめに
 - 4.2 三次元再現解析の概要
 - 4.3 三次元再現解析結果
5. まとめ

2. 再現解析の概要

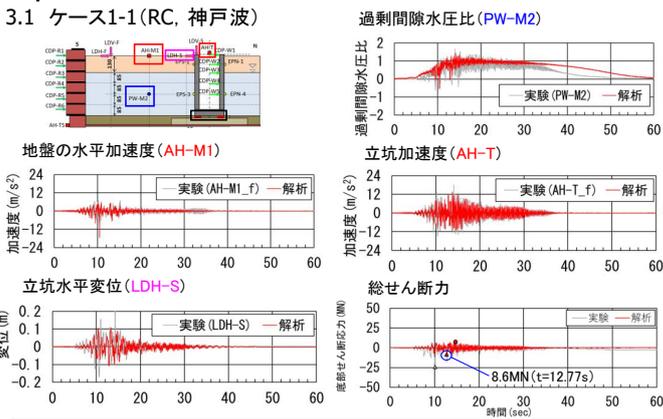
再現解析(ケース1~4) □: 本講習会で説明するケース

解析ケース	模型	入力地震波	備考
1-1	非線形 (RC)	神戸波	基本ケース
1-2		十勝沖波	
2-1	弾性 (3DP)	神戸波	盛土ケース
3-1	非線形 (RC)	神戸波	
3-2		十勝沖波	
4-1		神戸波	
4-2	十勝沖波	岩盤根入ケース	



3. 再現解析結果

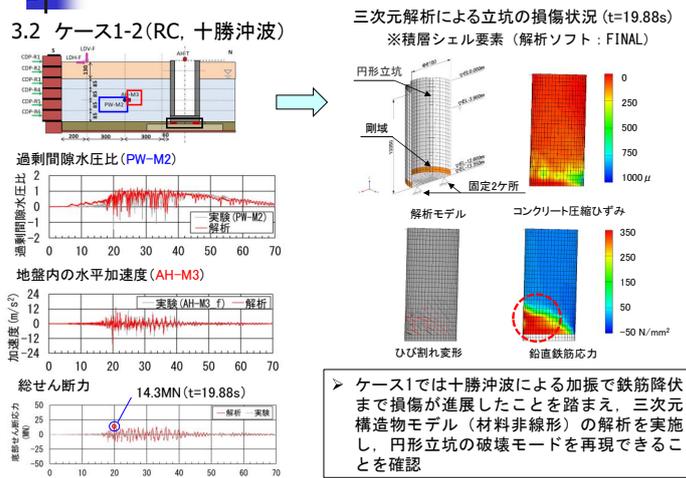
3.1 ケース1-1 (RC, 神戸波)



二次元有効応力解析により、実験の再現解析を行い、密な地盤の挙動および円形立坑の応答を再現できることを確認

3. 再現解析結果

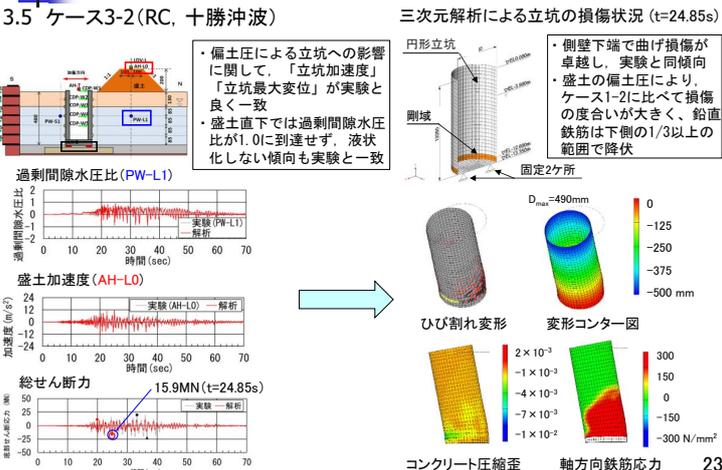
3.2 ケース1-2 (RC, 十勝沖波)



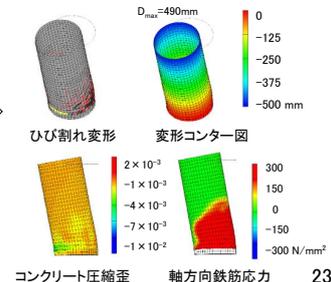
ケース1では十勝沖波による加振で鉄筋降伏まで損傷が進展したことを踏まえ、三次元構造物モデル(材料非線形)の解析を実施し、円形立坑の破壊モードを再現できることを確認

3. 再現解析結果

3.5 ケース3-2 (RC, 十勝沖波)

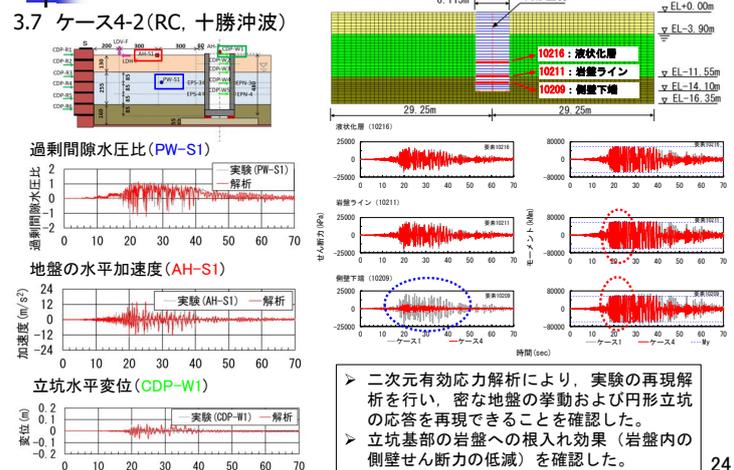


側壁下端で曲げ損傷が卓越し、実験と同傾向
 「立坑最大変位」が実験と良く一致
 盛土直下では過剰間隙水圧比が1.0に到達せず、液状化しない傾向も実験と一致



3. 再現解析結果

3.7 ケース4-2 (RC, 十勝沖波)

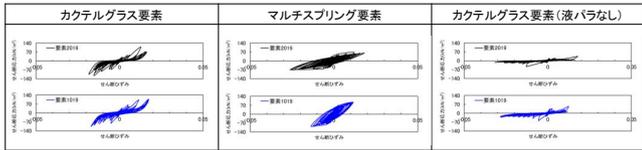
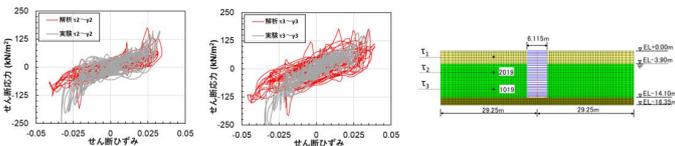


二次元有効応力解析により、実験の再現解析を行い、密な地盤の挙動および円形立坑の応答を再現できることを確認した。
 立坑基部の岩盤への根入れ効果(岩盤内の側壁せん断力の低減)を確認した。

3.8 パラメータ解析

ケース	パラメータ	基本ケースの条件	地震波
(a)~①~④	液状化具合	水平成層モデル (ケース1)	神戸波・十勝沖波
(b)~①~③	レーリ-減衰	水平成層モデル (ケース1)	十勝沖波
(c)~①, ②	盛土剛性	盛土モデル (ケース3)	十勝沖波
(d)~①~④	岩盤強度	岩盤根入モデル (ケース4)	十勝沖波

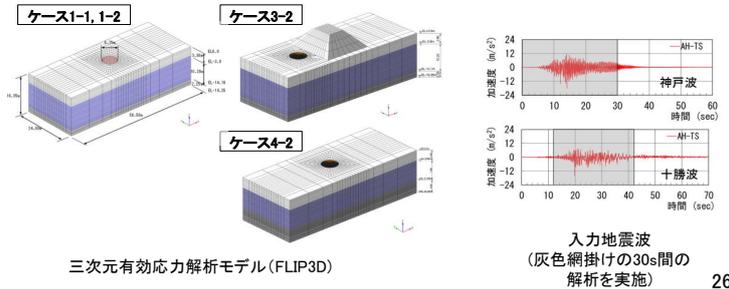
十勝沖波



4.2 三次元再現解析の概要

再現解析(ケース1~4)

解析ケース	模型	入力地震波	備考
1-1	弾性(RC)	神戸波	基本ケース
1-2	非線形(RC)	十勝沖波	
3-2	弾性(RC)	神戸波	盛土ケース
4-2	非線形(RC)	十勝沖波	岩盤根入ケース



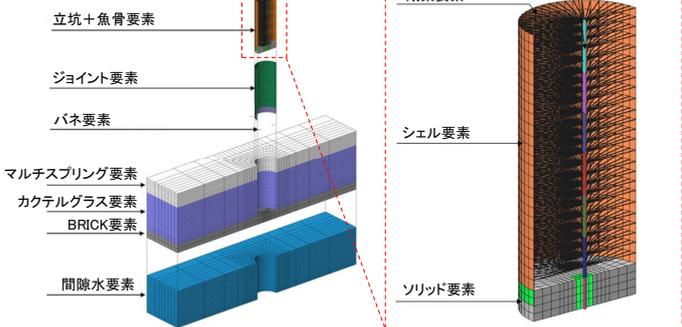
三次元有効応力解析モデル (FLIP3D)

入力地震波 (灰色網掛けの30s間の解析を実施)

4. 三次元再現解析

4.2 三次元再現解析の概要

ケース1-2, 3-2, 4-2(魚骨モデル)

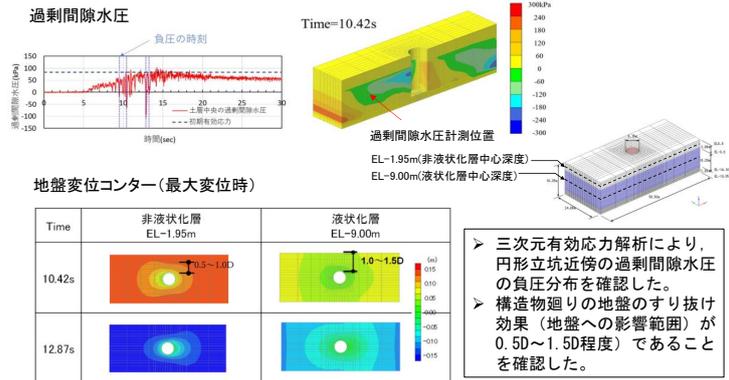


- モデル長手方向のメッシュサイズを立坑から遠方に向かって徐々に粗くしている。
- t=30s・Δt=0.002sの解析で、実行時間は約30日(Windows11, Intel Corei9-12900K)

4. 三次元再現解析

4.3 三次元再現解析結果

(1)ケース1-1

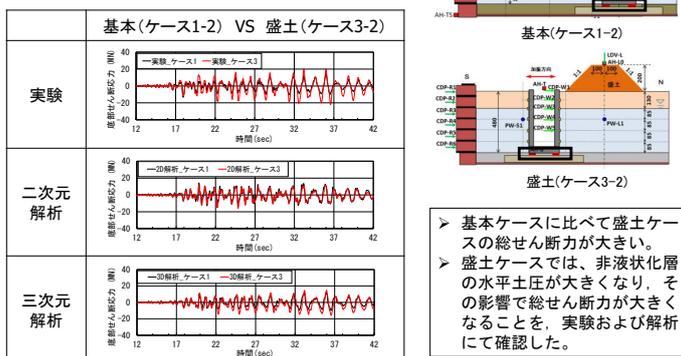


- 三次元有効応力解析により、円形立坑近傍の過剰間隙水圧の負圧分布を確認した。
- 構造物周りの地盤のすり抜け効果(地盤への影響範囲)が0.5D~1.5D程度であることを確認した。

4. 三次元再現解析

4.3. 三次元再現解析結果

立坑下面の総せん断力の比較



- 基本ケースに比べて盛土ケースの総せん断力大きい。
- 盛土ケースでは、非液状化層の水平土圧が大きくなり、その影響で総せん断力が大きくなることを、実験および解析にて確認した。

5. まとめ

密な地盤中に構築される構造物のうち、円形立坑に対する液状化の影響について、遠心載荷実験および再現解析を行い、構造物の耐震性能に及ぼす影響を評価した。

再現解析では、**構造物-地盤連成二次元FEM有効応力解析による作用荷重の算定と三次元鉄筋コンクリート非線形FEM解析による円形立坑の損傷評価の2段階の評価手法を提案し、実験の結果と比較検証**することで、評価手法の構築を行った。また、三次元FEM有効応力解析との比較検証も実施した。

今後の展開として、

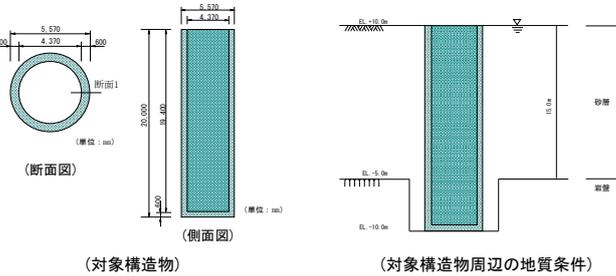
- 本検討ケースについて多くのパラメータ解析を実施してきたが、更に様々な地盤を対象にパラメータ設定の妥当性を確認していく必要がある。
- 三次元FEM有効応力解析については、解析例が少ないため、様々な構造物に対する適用性を検証していく必要がある。
- 地盤の液状化が構造物の耐震性能に及ぼす影響について、引き続き継続した研究が必要であると考えられる。

<照査例>

II 三次元材料非線形のプッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査例

【概要】

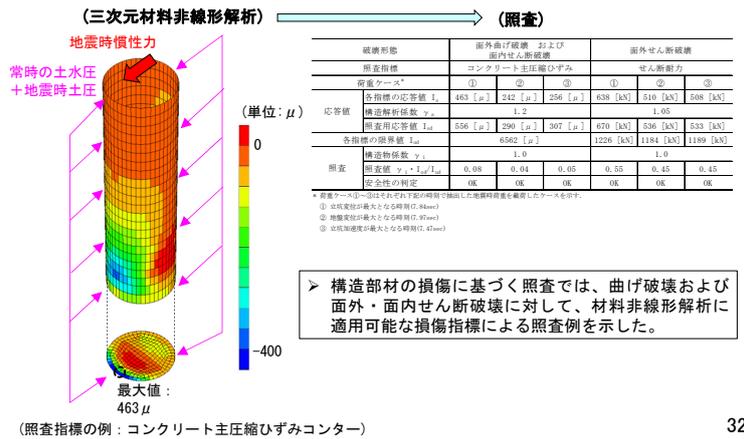
- 海水管を間接支持する立坑に対し、「基準地震動 S_g に対して**構造物が崩壊しない**」という目標性能（耐震性能）に関する照査を実施
- 解析は、地盤-構造物連成計の二次元有効応力解析による作用荷重評価 → 構造物の三次元材料非線形解析による**損傷評価の2段階**で実施
- 材料非線形解析で適用可能な**損傷指標による構造部材の損傷に基づく照査**と、**構造物全体での変形に着目した全体系の挙動に基づく照査**を実施



<照査例>

II 三次元材料非線形のプッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査例

【構造部材の損傷に基づく照査】

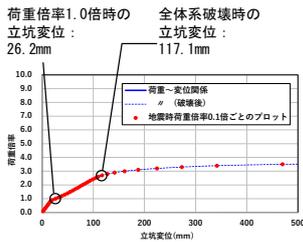


<照査例>

II 三次元材料非線形のプッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査例

【全体系の挙動に基づく照査】

(三次元材料非線形解析) → (照査)



照査指標	全体系の破壊		
	①	②	③
照査用立坑水平変位 δ_{ij}	26.2 [mm]	117.7 [mm]	107.4 [mm]
構造解析係数 α_{ij}	1.2		
照査用立坑水平変位 δ_{ij}	31.4 [mm]	141.5 [mm]	128.7 [mm]
境界水平変位 δ_{lim}	117.1 [mm]	145.3 [mm]	129.9 [mm]
照査	OK	OK	OK

*荷重ケース①～③はそれぞれ下記(4)の時刻に地震動を最大としたケースを示す。
 ① 立坑変位が最大となる時刻(7.84sec)
 ② 地震動が最大となる時刻(7.85sec)
 ③ 立坑加速度が最大となる時刻(7.47sec)
 ** 図-2に示す地震動によって生じる地震動時最大1.0倍を乗じた時の値を示す。
 *** 図-2に示す地震動による時刻に依存して変化する。

➤ 全体系の挙動に基づく照査では、プッシュオーバー解析で得られる、地震時荷重倍率1.0倍時と全体系破壊時の立坑変位の比率による照査例を示した。