

【原子力土木委員会】



地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会

- 1.小委員会の活動状況
- 2.研究概要(2024年度の活動状況)
- 3.耐震性能照査技術の追補

2024年12月20日
小委員会幹事

1-1 小委員会(3期目)の構成

2024年7月31日時点

委員長	前川宏一(横浜国立大学)	常時参加者 17名	星 秀樹(北海道電力)
委員 9名	中村 光(名古屋大学) 古関潤一(東京大学) 牧 剛史(埼玉大学) 斉藤成彦(山梨大学) 海野寿康(宇都宮大学) 三木朋広(神戸大学) 野城一栄(鉄道総合技術研究所) 小川健太郎(東京電力HD) 遠藤大輔(中部電力)		西本真也(北陸電力) 吉次真一(中国電力) 西坂直樹(四国電力) 福田 穰(九州電力) 中村洋一(電源開発) 坂上武晴(日本原電) 大館隼一(日本原燃) 松田周吾(関西電力) 井澤 淳(鉄道総合技術研究所) 新美勝之(清水建設) 井上智之(鹿島建設) 三島徹也(前田建設) 島端嗣浩(東電設計) 松本敏克(ニュージエック) 青柳恭平(電力中央研究所) 石丸 真(電力中央研究所)
幹事長	河井 正(東北工業大学)	事務局	保科 涼子(土木学会)
幹事 13名	熊田広幸(東北電力) 永井秀樹(大林組) 高田祐希(大林組) 畑 明仁(大成建設) 渡辺和明(大成建設) 渡部龍正(東電設計) 三橋祐太(構造計画) 松尾豊史(電力中央研究所) 山口和英(電力中央研究所) 宮川義範(電力中央研究所) 永田聖二(電力中央研究所) 小松怜史(横浜国立大学) 山野井悠翔(電力中央研究所)		

※委員長+委員9名(うち電気事業者委員2名)

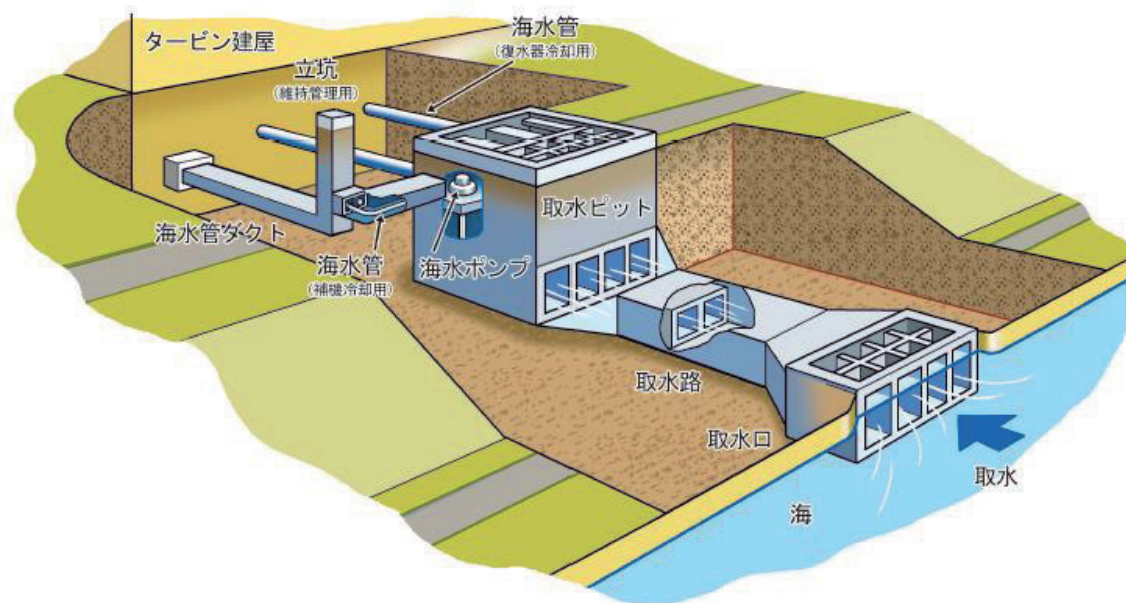
1-2 小委員会の活動計画

	上期 (4月~9月)	下期 (10月~3月)
2022年度	<ul style="list-style-type: none"> ✓小委員会設立承認(5/20) ✓第1回小委員会(6/13) (全体計画&2022計画) ✓実験見学(7/29) ✓技術文書内規制定(8/29) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓小委員会(12/9) (途中経過&標準化工程等)
2023年度	<ul style="list-style-type: none"> ✓小委員会(4/12) (2022成果&2023計画) ✓技術文書審議タスク(5/15) ✓実験見学(6/15) ✓技術文書審議タスク(6/20) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓現場見学(8/30,31) ✓小委員会(11/14) (途中経過&標準化方針等)
2024年度	<ul style="list-style-type: none"> ✓小委員会(4/18) (2023成果&2024計画、追補版ドラフト) ✓技術文書審議タスク(7/29) ✓小委員会(7/31) (追補版初稿) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓技術文書審議タスク(12/26) ✓小委員会他(未定) (修正意見対応・校正確認) ✓追補版講習会 (2025年3月→6月?)

※技術文書審議タスクの審議時期などについては要請に応じて適宜対応する

2-1 本研究で扱う屋外重要土木構造物

- 耐震重要度分類におけるSクラスの機器・配管系の間接支持機能が求められる鉄筋コンクリート構造物
- 非常時における海水の通水機能が求められる鉄筋コンクリート構造物
- 上記と同等の耐震安全性が要求される鉄筋コンクリート構造物



屋外重要土木構造物の配置例



配管ダクトの例



取水路(取水時)

特徴：

- ・ 地中
- ・ ボックスカルバート
- ・ 臨海部
- ・ 岩盤に直接支持

2-2 研究の全体概要

目的:鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査手法を高度化するとともに、屋外重要土木構造物に対する標準的な方法を構築する。

今回は、以下の①②を主に検討する。

①液状化地盤中の三次元構造物の地震応答評価
砂質土等の地盤を想定
応答値側を検討
遠心载荷実験他

②破砕帯に埋設されたRC構造物の耐震性能評価
概ね硬岩サイトを想定
主に限界値側を検討
静的载荷実験他

+

標準化

⇒2024年度に成果報告書(追補版)を刊行予定

与条件とする範囲

<原子炉設置(変更)許可段階>

地質・地盤の調査

断層等(破碎帯含む)の分布・性状など
地盤試験や地盤物性値の設定など

断層活動性評価

非活断層と判定されたものが評価対象

地盤の安定性検討

滑り・支持力, 液状化判定など

与条件の確認

基準地震動 S_s など

構造物の条件設定

構造物の性能設定, 構造諸元など

構造物の耐震性能照査

今回の主たる対象

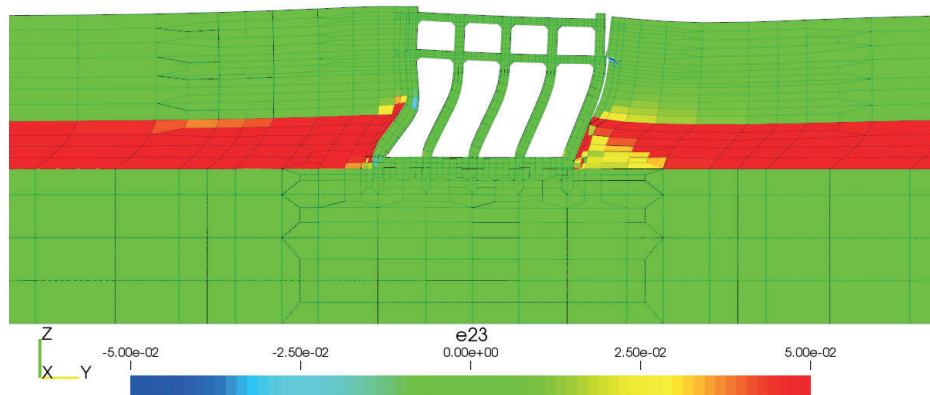
本研究で扱う範囲

<工事計画認可段階>

①液状化地盤中の三次元構造物の地震応答評価

前フェーズ(2018-2020年度)

取水ピット構造物を対象とした検討



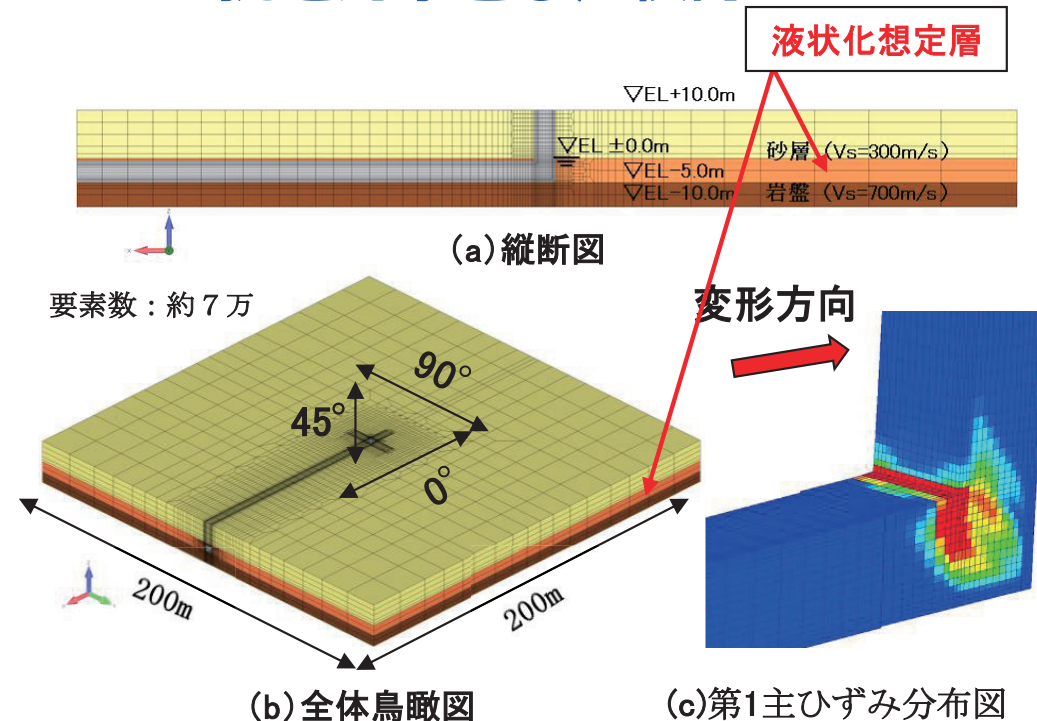
変形+せん断ひずみ分布図
(構造物変位最大時, 変形倍率:10倍)

解析メッシュ例 (解析コード:COM3)

- 一部の層が液状化する場合や三次元条件での検討
- 有効応力解析による影響評価と全応力解析の適用性

今フェーズ(2022-2024年度)

RC立坑を対象とした検討



要素数: 約7万

(b) 全体鳥瞰図

(c) 第1主ひずみ分布図

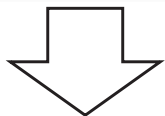
- 地盤の液状化条件や構造諸元(断面形状等)に対する検討。
- 円形断面の立坑モデルを対象とした解析も行う。
- 有効応力解析による影響評価と二次元解析の妥当性なども検討する。

①遠心模型載荷実験に基づく検討

実験ケース(円形立坑・液状化地盤)

【目的】

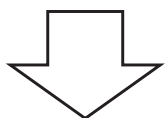
密な地盤が液状化による構造物の照査手法を構築し、追補版に記載する。



【結果】

解析の再現性が十分なことを確認した。

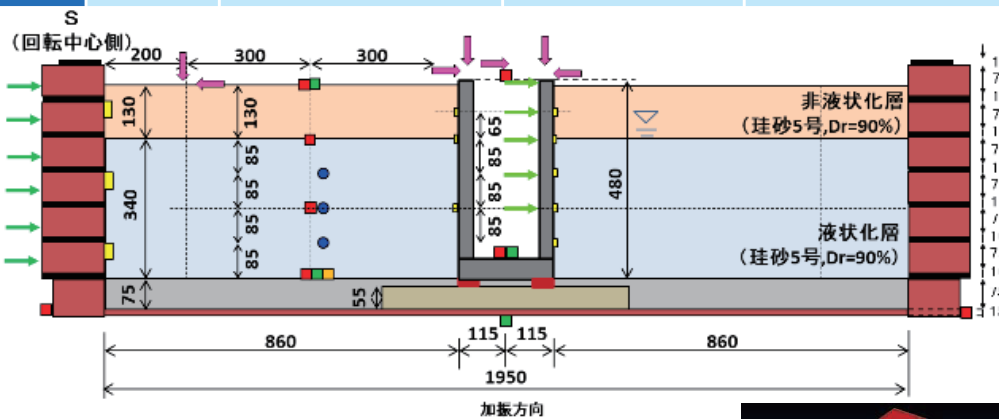
- ・密な地盤の応答と構造物に作用する荷重との関係
- ・構造物の損傷



【追補版との関連】

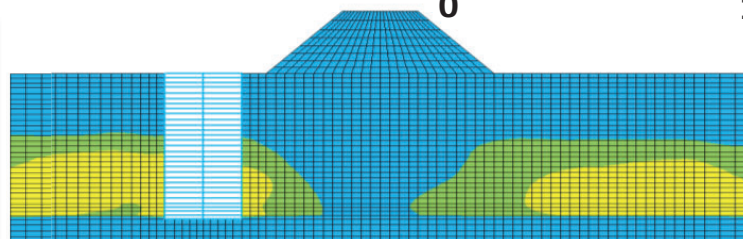
密な地盤中に構築される構造物に対する、簡易的な二次元解析、より詳細な三次元解析による照査手法を構築した。

ケース	模型	支持条件	地盤条件	目的
1	RC	岩盤上に設置	成層地盤	基本ケース
2	弾性	岩盤上に設置	成層地盤	非線形模型応答との比較検討
3	RC	岩盤上に設置	模型の片側に盛土設置	盛土荷重による偏土圧の影響検討
4	RC	岩盤に根入れ	成層地盤	支持条件の影響検討



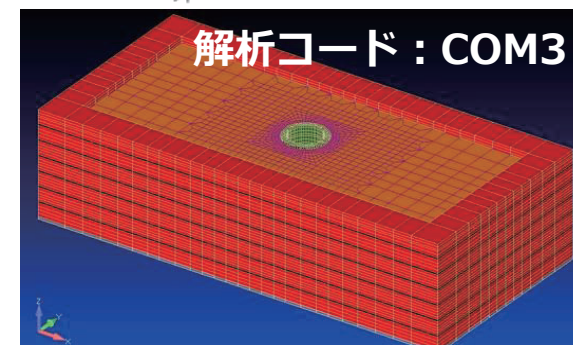
遠心模型実験の概要図
(ケース1)

解析コード：FLIP



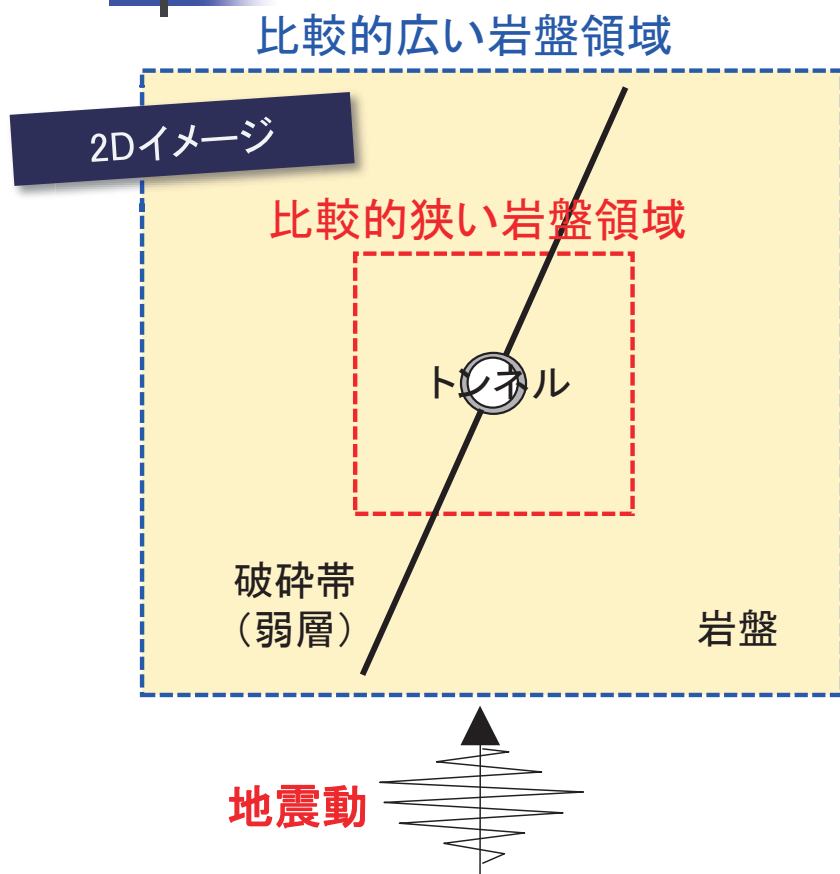
二次元解析による事後解析
(ケース3過剰間隙水圧比)

解析コード：COM3



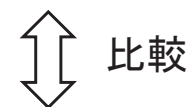
三次元解析による事後解析と
パラメータ解析(ケース1メッシュ)

② 破砕帯に埋設されたRC構造物の耐震性能評価



破砕帯(弱層)の地震応答挙動の評価

- ・ 比較的広い範囲の岩盤領域(100~150m以上)
- ・ 比較的簡易なモデル(部材非線形など)



◎弱層部での構造物の限界状態の評価

- ・ 比較的狭い範囲の岩盤領域(100m未満)
- ・ 比較的詳細なモデル(材料非線形など)

本検討では、断層調査等から破砕帯に係る条件が与えられた場合に対して、弱層を含む岩盤の地震応答変形が構造物に及ぼす影響を評価する。

本研究の対象

Point:

- ✓ 地震動による変形
- ✓ 弱層の変形(数mm)
- ✓ 正負交番

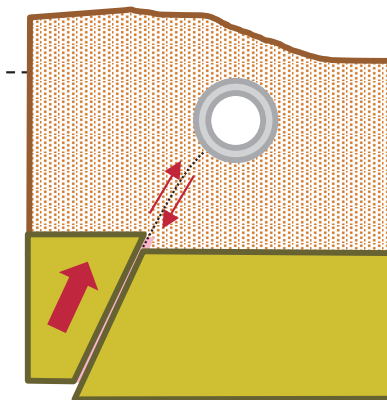


作用が異なる

断層変位の場合

Point:

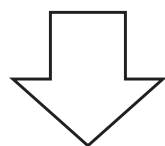
- ✓ 断層変位が直接作用
- ✓ すべり変位(数百mm~)
- ✓ 単調



② 破砕帯を交差するRC模型の構造実験

【目的】

構造物の照査に適用する指標と判定閾値を導出し追補版に記載する。



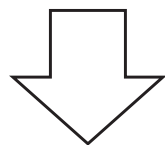
【実施項目】

载荷実験/再現解析
/補足的なパラメトリクスタディ

【結果】

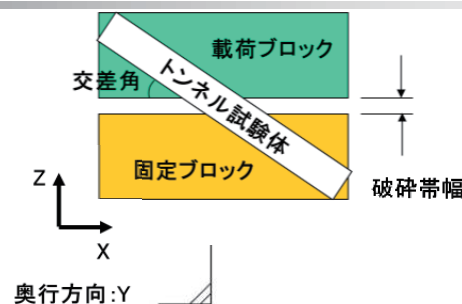
解析の再現性が十分なことを確認した。

- ・弱層に沿ったずれと構造物に作用する荷重との関係
- ・最大荷重点と局所的な最小主ひずみ値との対応関係

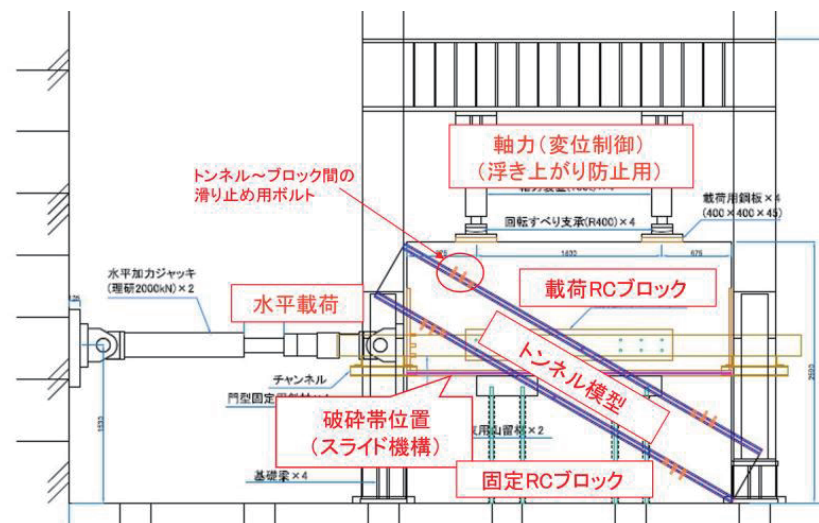


【追補版との関連】

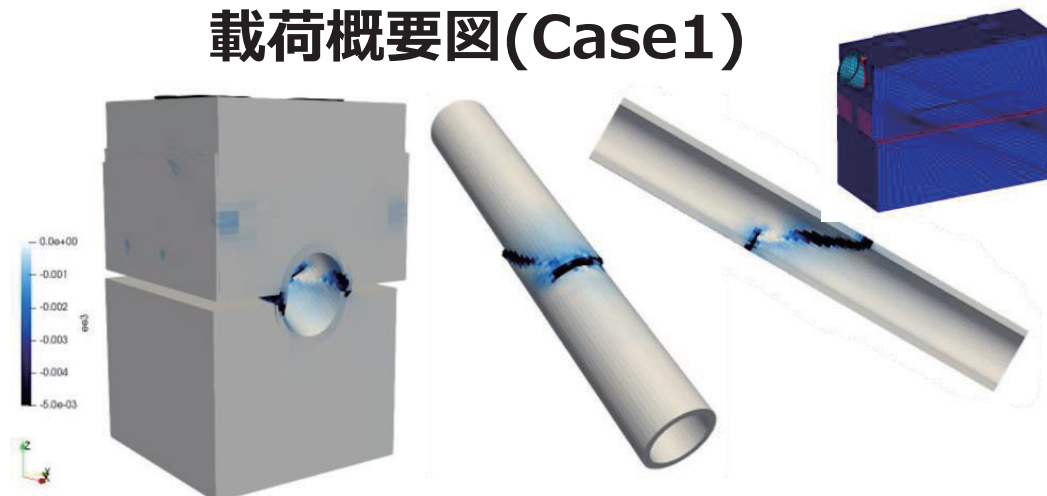
構造物の応答が最大荷重に至ったか・否かを判定する照査指標として、最小主ひずみも使用可能であることを把握した。



	交差角	载荷方向	破砕帯幅
Case1	30°	X方向	50mm
Case2	30°	Y方向	50mm
Case3	60°	X方向	50mm
Case4	60°	X方向	300mm



载荷概要図(Case1)



解析結果例(最小主ひずみ分布)

⇒各種のパラメータ解析に基づく検討を実施

3. 追補版2024の構成案

- ✓2021年版<指針・マニュアル・照査例・技術資料>は変更せず**最新版**とする。また、2021年版指針<日英版>も同時に刊行予定。
- ✓2024年追補版では、「密な地盤の液状化」および「破碎帯」に対する影響評価に特化した**事例追加**を行う。
- ⇒2021年版の必要箇所を再掲して、補足・解説するに留め、2021年版に基づく**照査例**とこれに関わる諸検討を取り纏めた**技術資料**とする。



[追補版2024] 目次構成案

◆基本事項(指針・マニュアル2021への補足・解説)

第1章 照査の基本※前提条件、共通事項、2021年版の抜粋・再掲

第2章 密な地盤の液状化に対する影響評価技術※基本事項の整理、補足説明など

第3章 破碎帯に対する影響評価技術※基本事項の整理、補足説明など

◆照査例(耐震性能照査の例示)

- ・二次元部材非線形の地震応答解析を用いた照査例
- ・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
- ・三次元材料非線形の地震応答解析を用いた照査例
- ・破碎帯を交差するRC製トンネルの耐震性能照査例

◆技術資料(関連する諸検討)

- ・液状化に関する既往文献調査(液状化被害を受けた放水路の事例など)
- ・密な地盤に埋設された円形立坑模型の載荷実験
- ・密な地盤に埋設された円形立坑模型実験の再現解析(FLIP)
- ・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(COM3)
- ・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(FLIP,COM3)
- ・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(COM3)
- ・破碎帯の影響評価に係る既往検討(アンケートや審査事例など)
- ・破碎帯を交差するRC製トンネル模型の構造実験
- ・破碎帯を交差するRC製トンネル模型実験の数値シミュレーション(COM3,DIANA)
- ・局所変形を受ける円形トンネルの限界状態(COM3,DIANA)
- ・破碎帯と交差するRC製トンネルの実用的な非線形解析手法の検討(実規模解析)

主な外部発表リスト(既報告分)

【既発表分】

- 小松他: Applicability of Deformation Indices Reasonably Evaluating Load Carrying Capacity and Failure Mode of Full-Scale RC Members Subjected to Bilateral Load, Journal of Advanced Concrete Technology(コンクリート工学会), 2023.5
- 高田他: 密な砂地盤中に構築された円形立坑の遠心載荷実験による作用外力評価/鳥巢他: 密な砂地盤中に構築された構造物の相互作用評価, 地盤工学会地盤工学研究発表会(予稿集), 2023.7
- 山口他: 密な砂地盤中に構築された円形立坑の遠心載荷実験(その1: 実験概要)/高田他: 密な砂地盤中に構築された円形立坑の遠心載荷実験(その2: 構造物の損傷評価)/堤内他: 密な砂地盤中に構築された円形立坑の遠心載荷実験の再現解析/池本他: 3Dプリンタ模型を用いた地中立坑の遠心載荷実験/小松他: 密な砂地盤中に構築された円形立坑の遠心載荷実験の3次元再現解析/渡部他: 密な地盤に液状化が生じたRC矩形立坑の地震応答に関する解析的検討/宮川他: 地震時に地盤中の弱層に生じる相対変位の解析と一考察/山野井他: トンネルと硬岩を模擬した異種コンクリート境界面の強度特性/坂下他: 破砕帯変形を受けるRCTンネル模型の構造実験-最大耐力について-/村田他: 破砕帯変形を受けるRCTンネル模型の構造実験-破壊性状について-/園部他: 破砕帯を有する岩盤内のRC 構造物の耐震性能評価に関する数値解析的検討/三橋他: 破砕帯と交差するトンネルの耐震性検討に向けた破砕帯を有する地盤の解析的検討, 土木学会年次講演会(概要集)
- 渡部他: 密な地盤に埋設されたRC立坑模型実験の二次元有効応力解析/山口他: 強地震動を受ける密な砂地盤中のRC円形立坑の遠心載荷実験と解析, 土木学会地震工学研究発表会(予稿集), 2023.9
- 松尾他: Current Status on Enhancing Seismic Performance Verification for Underground RC Structures at NPPs in Japan/永田他: Nonlinear Analysis on Experimental Response of Reinforced Concrete Underground Structure using Laminated Shell Elements /小松他: Evaluation of the applicability of seismic performance verification indices for relative displacement in reinforced concrete members /堤内他: Seismic Evaluation of Circular Shaft in Centrifugal Loading Test Using 3D Printer Model and in Reproduction Analysis, SMiRT27, 2024.3
- 坂下他: 破砕帯のずれ変形が作用するRCTンネルの模型実験, 土木学会構造工学論文集, 2024.3
- 鳥巢他: A study of the dynamic soil-structure interaction of deep shafts constructed in dense sand ground, 8ICEGE, 2024.5
- 松尾他: 鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の高度化(その6)-密な地盤の液状化を考慮した地盤・構造物連成系の三次元非線形地震応答解析手法の適用性検討-, 電力中央研究所報告, 2024.6
- 山口他: 強地震動を受ける密な砂地盤の液状化によるRC円形立坑の損傷評価手法検討/渡部他: 不飽和層を有する密な砂地盤に埋設されたRC立坑の地震応答に関する解析的検討, 土木学会論文集 Vol.80, No.13(特集号: 地震工学), 2024.6
- 山口他: Centrifugal Test of Circular RC Shaft Constructed IN Dense Sand Ground And Its Reproduction Analysis/三橋他: A Fundamental Analysis of Bedrock with Crush Zones for Seismic Evaluation of RC Tunnel Structure, WCEE2024, 2024.6
- 高田他: 密な砂地盤の基部が岩盤に根入れされた円形立坑の遠心載荷実験/鳥巢他: 密な砂地盤中の基部が岩盤に根入れされた円形立坑の再現解析/山口他: 遠心載荷実験における土圧計による地盤のせん断応力評価, 地盤工学会地盤工学研究発表会(予稿集), 2024.7
- 園部他: 破砕帯を交差するRC構造物の構造実験の挙動解析に基づく耐震性能評価/三橋他: 破砕帯と交差するトンネルの耐震性評価手法確立に向けた解析的検討(その1)/秦他: 破砕帯と交差するトンネルの耐震性評価手法確立に向けた解析的検討(その2)/堀見他: 密な砂地盤中に構築された偏土圧が作用する円形立坑の遠心載荷実験(1. 立坑損傷)/高田他: 密な砂地盤中に構築された偏土圧が作用する円形立坑の遠心載荷実験(2. 作用外力)/堤内他: 密な砂地盤中に構築された偏土圧が作用する円形立坑の遠心載荷実験(3. 再現解析)/渡部他: 密な地盤の液状化を考慮した二次元有効応力解析による立坑応答の適用性検討/島端他: 密な地盤に液状化が生じたRC円形立坑の地震応答に関する解析的検討, 土木学会年次講演会(概要集), 2024.9
- 園部他: 破砕帯と交差するRC 構造物の限界状態に対する鉄筋径と鉄筋間隔の影響の解析的検討/三橋他: 破砕帯と交差するトンネルの実用的な耐震性能照査手法に関する研究/堀見他: 密な飽和砂地盤中のRC円形立坑の損傷評価における連続加振および地盤モデルの影響検討/山口他: RC円形立坑および盛土が存在する密な地盤のせん断応力評価/小松他: 密な砂地盤のすり抜け効果が円形立坑模型の地震応答に及ぼす影響, 土木学会論文集 Vol.81, No.13(特集号: 地震工学), 2025.9

工程案

※ピンク字:原子力土木委員会・審議タスクにて判断

【当初案】

2024年度	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
2024追補版	▽小委員会(4/18)			▽小委員会(7/31)			▽小委幹事会					
	Draft作成				修正		▽審議タスクへ提出		最終稿作成		▽刊行&講習会	

【小委員会の進捗および審議タスクの状況などを踏まえた修正案】

2024年度	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
2024追補版	▽小委員会(4/18)			▽小委員会(7/31)			▽第3回審議タスク(7/29)			▽第4回審議タスク(最終)		
	Draft作成				確認・修正		▽審議タスクへ提出(9/17)		外部意見照会・公衆審査		▽小委員会 小委幹事会▽ 最終稿作成	

※ 原子力土木委員会の規定において、技術文書審議タスク(中間段階, 最終段階)の開催が必要。

※ その後, 外部意見照会および公衆審査, 原子力土木委員会の審議を経て, 刊行が可能となる。

講習会プログラム案

「鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査技術」に関する講習会 －屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針への追補－

■日 時：2025年6月? (未定) 13:30～

■実施方法：土木学会＋オンライン併用

■プログラム：

➤司会；熊田広幸(東北電力)

➤開会挨拶；小委員会委員長 前川宏一(横浜国立大学)

➤追補版の全体概要；河井正(東北工業大学)

➤耐震性能照査指針2021年日英版；松尾豊史(電力中央研究所)

➤密な地盤の液状化に対する影響評価技術；山口和英(電力中央研究所)

技術資料：高田祐希・永井秀樹(大林組)，小松怜史(横浜国立大学)

照査例：渡部龍正・島端嗣浩(東電設計)

➤破碎帯に対する影響評価技術；宮川義範(電力中央研究所)

技術資料：畑明仁・渡辺和明(大成建設)，山野井悠翔(電力中央研究所)

照査例：三橋祐太(構造計画)，永田聖二(電力中央研究所)

➤閉会挨拶；原子力土木委員会委員長