

密な地盤の液状化に対する 影響評価技術

追補の概要

小委員会幹事

山口和英（電力中央研究所）

照査例・技術資料2025<追補版>の位置付け



照査例・技術資料2025<追補版>の構成

【基本事項】

- 第1章 照査の基本
 - 第2章 密な地盤の液状化に対する影響評価技術
 - 第3章 破砕帯に対する影響評価技術
- 【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
 - IV 破砕帯を交差するRC製トンネルの耐震性能照査例

【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
- VII 破砕帯の影響評価に係る既往検討
- VIII 破砕帯を交差するRC製トンネル模型の構造実験
- IX 破砕帯を交差するRC製トンネル模型実験の数値シミュレーション
- X 局所変形を受ける円形トンネルの限界状態
- XI 破砕帯と交差するRC製トンネルの実用的な非線形解析手法の検討

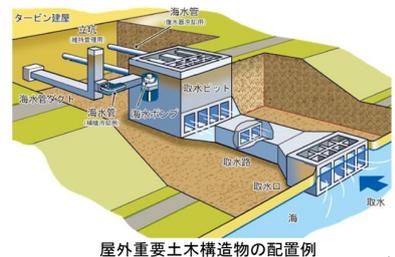
第2章 照査の前提

◆ 背景

- 原子力発電所の重要な土木構造物は、締め固め管理された密な岩ずり等で埋め戻されており、これまで液状化しにくい地盤とされてきた。
- 一方、設計用地震動は増大（加速度や継続時間）していく趨勢であり、密な地盤であっても液状化が生じる可能性が懸念されている。
- また、密な地盤中のRC円形立坑への液状化影響については、数値解析の適用性が検証されていない。

◆ 目的および対象構造物

- 密な砂礫地盤中に構築されたRC円形立坑を対象として、解析手法の選定と応答値の算出および耐震性能照査における扱いについて記載し耐震性能照査に資する。



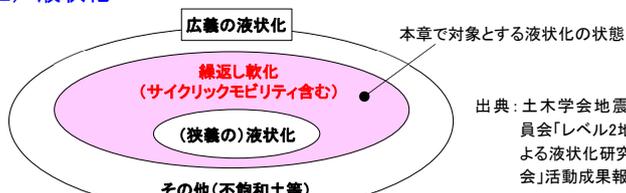
第2章 基本事項の整理

◆ 対象とする地盤と液状化

(1) 密な地盤

- 原子力発電所の屋外重要土木構造物は、その構築後、原子炉建屋等の掘削時に発生した岩ずり等を用いて、所定の締め固め度となるように施工管理されて埋め戻される。
- よって、本章で対象とする密な地盤は、締め固め度90%以上に管理された密な砂礫地盤とする。

(2) 液状化



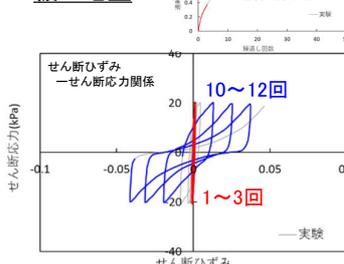
※第2章 図2.2-1 液状化の分類

第2章 基本事項の整理

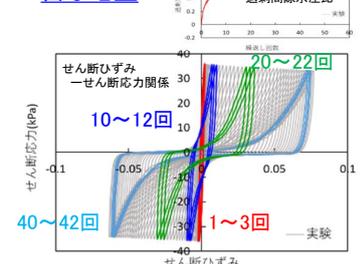
◆ 密な地盤の液状化の特徴

- 地震動による繰返しせん断によって、間隙水圧が上昇し、有効応力がゼロとなっても直ぐには破壊するには至らず、繰返しせん断の進行に伴って徐々にひずみが増大する。

緩い地盤



密な地盤



※第2章「図2.2-3 中空ねじりの室内試験結果」から抜粋

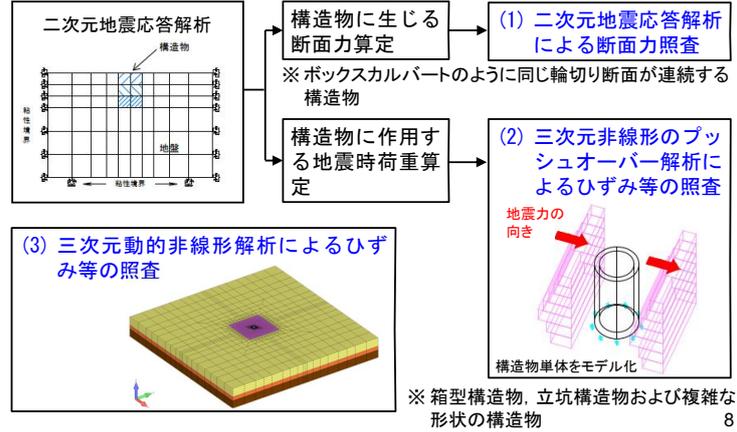
第2章 解析モデルの作成と応答値の算出

◆ 密な地盤のモデル化

- 新規基準に係わる審査では、解析コード「FLIP ROSE 2D」を用いた有効応力解析が主流。
- 地盤のモデル化方法は、
 - ✓ 間隙水圧の上昇・消散を考慮できるカクテルグラスモデル
 - ✓ 間隙水圧の上昇のみを考慮するマルチスプリングモデル
 - ✓ これらの液化化パラメータをOFFにしたモデル
- などがあり、それぞれの特徴を把握し、構造物と地盤との相互作用として保守的な評価結果になるような地盤モデルを選定する必要がある。
- 評価対象構造物の周辺に、
 - ① 不透水層など透水係数に差異がある地盤が存在する場合
 - ② 盛土などの偏荷重により地盤に残留変位が生じる可能性がある場合には、これらを適切にモデル化するなど地盤のモデル化に留意する必要がある。

第2章 解析モデルの作成と応答値の算出

◆ 応答値算出に用いる主な解析手法（3つの手法を提案）



第2章 耐震性能照査

◆ 要求性能および目標性能（2021年版などを踏襲）

対象構造物	要求性能	目標性能
非常時の通水機能が求められる構造物	冷却用水を取水・通水する機能を維持	構造物が崩壊しない
間接支持機能が求められる構造物	機器・配管の各機能を維持するように支持	機器・配管が機能維持するための制約条件を満足 構造物が崩壊しない

◆ 損傷モードの把握

- 解析モデル選定に先立ち、対象構造物の損傷モードを把握し、その損傷モードを再現できる解析モデルを採用する必要がある。
- (参考) 第2章 図2.4-1 円形立坑の損傷モード変化の一例

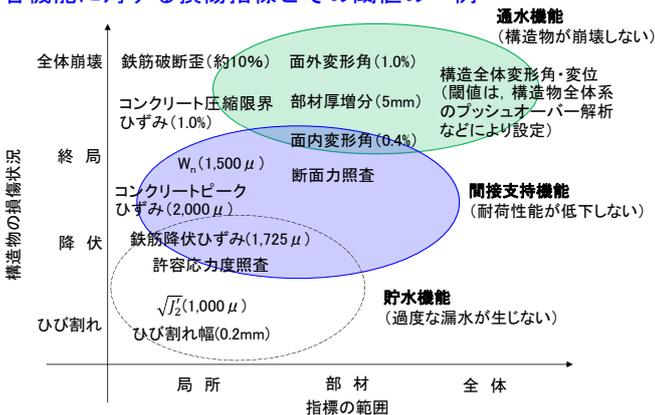
第2章 耐震性能照査

◆ 主な照査手法

- (1) 二次元地震応答解析による断面力照査
構造物-地盤連成系の二次元地震応答解析を行い、構造物の断面力により照査する（2021年版マニュアル「第2章 部材非線形解析を用いた耐震性能照査」の2.3節参照）。
- (2) 三次元非線形のプッシュオーバー解析を用いた照査
構造物を等価な剛性を有する二次元モデルに置き換えた構造物-地盤連成系の二次元地震応答解析による構造物への作用荷重（地震時荷重）の算定と、構造物単体の三次元静的非線形解析により算定されるひずみなどにより照査する（2021年版マニュアル「第4章 プッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査」の4.3節参照）。
- (3) 三次元動的的非線形解析によるひずみ等の照査
構造物-地盤連成系の三次元地震応答解析を行い、構造物のひずみなどによる照査する（2021年版マニュアルの「第3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査」の3.3節参照）。

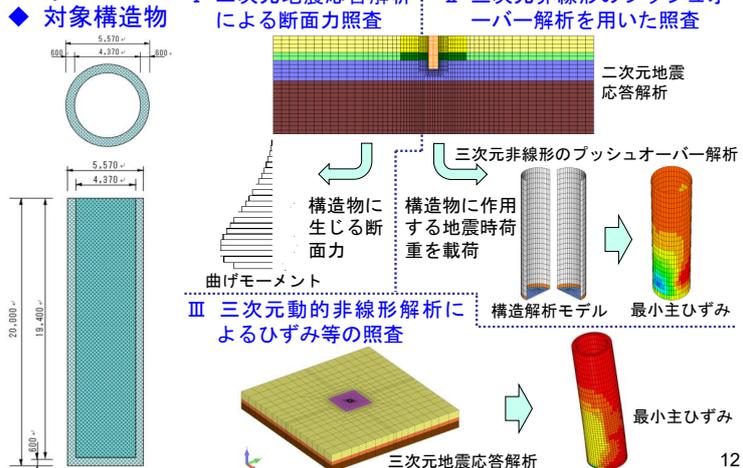
第2章 耐震性能照査

◆ 各機能に対する損傷指標とその閾値の一例



※第2章 図2.4-2 各機能に対する損傷指標とその閾値の一例 11

照査例Ⅰ～Ⅲ RC海水管立坑



技術資料Ⅰ 液状化に関する既往文献調査

p134~154

◆ 調査対象

- 鉄筋コンクリート製ボックスカルバート構造物および立坑構造物。
- 2011年度以降に公表された土木学会、コンクリート工学会等の指針・ガイドライン、論文等。

◆ 調査結果

- 地中埋設の鉄筋コンクリート構造物を対象とした液状化による影響の研究は少ない。
- ボックスカルバート構造物では、周辺地盤の液状化による目立った損傷は見られず主な変状は継手の開きであった。
- 立坑構造物では、飽和層と不飽和層との境界部で構造物に大きなせん断応力が生じる。
- 密な砂地盤では、20%傾斜地盤の1G場振動台実験により、連続したモビリティの発生によりひずみの急増が抑制されていること、1回の加振で70%もの残留ひずみが発生したケースでも滑り破壊の発生は確認されずFEM解析を用いた性能設計が可能である。



継ぎ手の開き (伊藤ら2021)

13

技術資料Ⅱ 円形立坑模型の載荷実験

p155~185

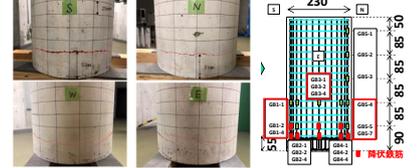
◆ 実験ケース

Case	模型	支持条件	地盤条件	備考
1	非線形 (RC模型)	岩盤上に支持	成層地盤	基本ケース
2	弾性 (3DP模型)	岩盤上に支持	成層地盤	非線形模型との比較検討
3	非線形 (RC模型)	岩盤上に支持	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

◆ 加振波および順序



◆ RC模型の損傷状況 (ケース1)

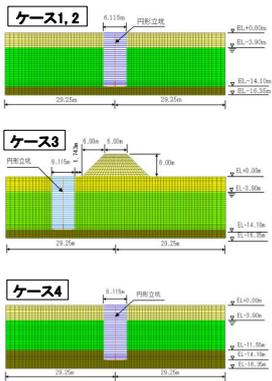


14

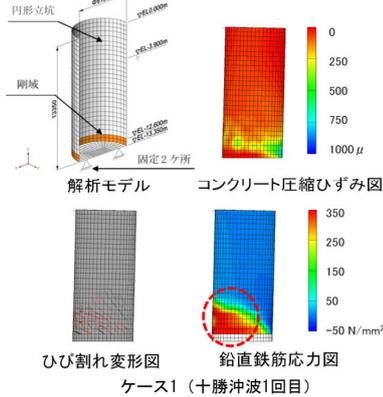
技術資料Ⅲ 円形立坑模型実験の再現解析

p186~227

◆ 二次元地震応答解析モデル (FLIP2D)



◆ 三次元構造解析モデルおよび解析結果 (FINAL)

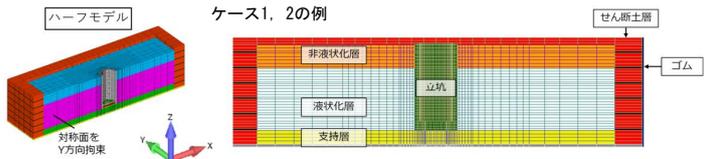


15

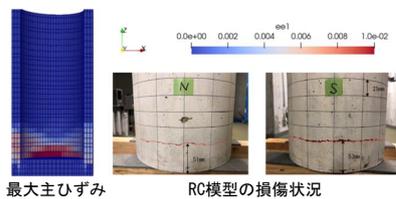
技術資料Ⅳ 円形立坑模型実験の三次元材料非線形解析

p228~244

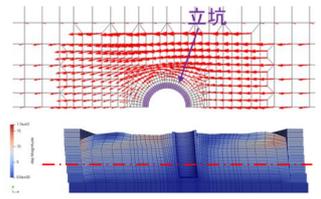
◆ 三次元地震応答解析モデル (COM3)



◆ 構造物の損傷評価 (ケース1)



◆ 地盤のすり抜け

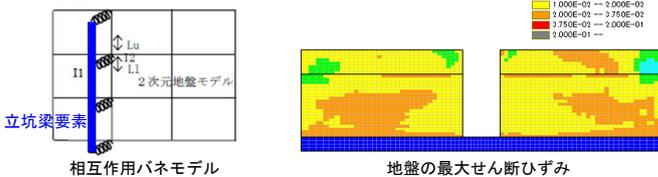


16

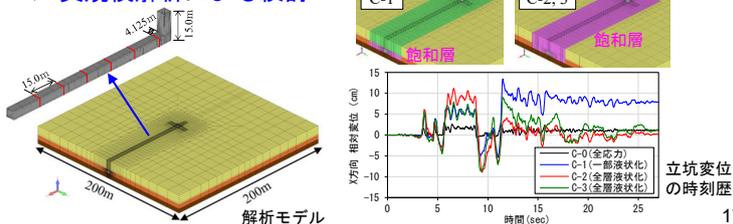
技術資料Ⅴ 実規模立坑の二次元有効応力解析

p245~258

◆ 地盤のすり抜け影響の考慮方法検討



◆ 実規模解析による検討

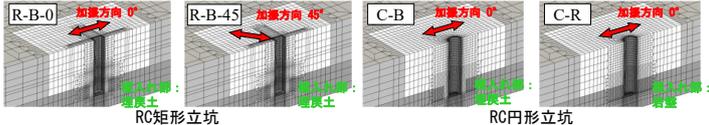


17

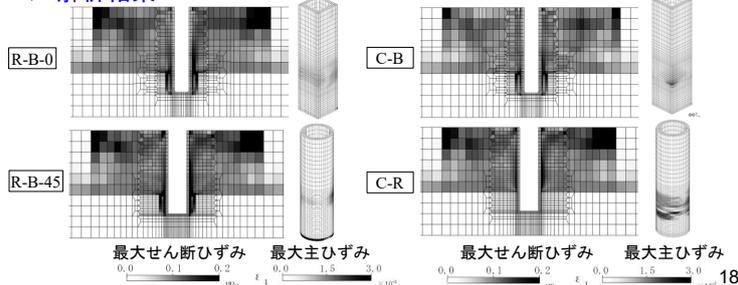
技術資料Ⅵ 実規模立坑の三次元材料非線形解析

p259~291

◆ 解析モデル (COM3)



◆ 解析結果



18

- 密な砂礫地盤中に構築される屋外重要土木構造物の耐震性能照査に関して、基本事項を整理した上で、解析手法の選定と応答値の算出および耐震性能照査における扱いを示した。
- 屋外重要土木構造物の要求性能および目標性能、一般的な耐震性能照査の流れは、本編である「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例2021」に基づくものとする。
- <基本事項> 2章では、密な砂礫地盤の液状化に対する影響評価技術の基本事項、耐震性能照査の概要を示している。
- <照査例>では、原子力発電所の海水管立坑などの地中RC円形立坑を対象として、密な砂礫地盤の液状化に対する耐震性能照査の例を示している。
- 本評価技術の適用において、境界条件に依存する排水性および地盤の細粒分に依存する透水性は、別途検討する必要がある。

◆ 遠心載荷実験および再現解析

- 山口, 高田, 永井, 堀見: 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, 土木学会論文集(特集号: 地震工学), Vol.80, No.13, 2024.6.
- 堤内, 永井, 高田, 山口: Seismic Evaluation of Circular Shaft in Centrifugal Loading Test Using 3D Printer Model and in Reproduction Analysis, SMiRT27
- 永井, 鳥巢, 高田, 山口, 堀見: VALUATION OF A CIRCULAR SHAFT BY USING 3D EFFECTIVE STRESS ANALYSIS OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION, WCEE2024
- 堀見, 永井, 高田, 山口: 密な砂地盤中の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, 土木学会論文集(特集号: 地震工学), Vol.81, No.13

◆ 再現解析およびパラメータ解析

- 小松, 松尾, 渡部, 布施, 堀見: 件名不飽和地盤を有する密な砂地盤中に埋設された円形立坑の地震応答に関する分析, 土木学会論文集(特集号: 地震工学), Vol.81, No.13

◆ 遠心載荷実験における地盤のせん断応力評価

- 山口, 高田, 永井, 堀見, 河井: ベア土圧計によるせん断応力推定法のRC円形立坑および盛土が存在する密な地盤への適用, 土木学会論文集(特集号: 地震工学), Vol.81, No.13(採択済み)

ご清聴ありがとうございました。

謝辞：本書は、主に電力8社と日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)による原子力リスク研究センター共通研究の成果を取り纏めたものである。研究を推進するにあたり、地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会メンバーはじめ多くの方々からご指導、ご協力を賜りました。関係各位に謝意を表す次第です。