

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

(株) 大林組 正会員 ○堤内 隆広 正会員 永井 秀樹

(一財) 電力中央研究所 正会員 山口 和英

東北電力(株) 熊田 広幸

1. はじめに

原子力発電所の重要土木施設として用いられる地中 RC 構造物は、一般には密な地盤中に設置されるが、近年は考慮すべき地震動の増大により、密な地盤でも液状化が発生する可能性があり、構造物の損傷や漏水等が懸念される。このような状況を踏まえ、筆者らは密な砂地盤中の RC 円形立坑を対象とした遠心載荷実験および解析による損傷評価を試みている。本報文では前編の遠心載荷実験結果の分析に引き続き、2次元有効応力 FEM による時刻歴での構造物および地盤応答の再現解析と、3次元 RC 非線形 FEM による静的載荷解析での RC 円形立坑の損傷状況の再現解析を行った結果について報告する。

2. 再現解析の手法

再現解析は以下の2段階により実施した。詳細は既報^①を参照されたい。

① 立坑及び地盤模型をモデル化した2次元有効応力 FEM 解析による時刻歴での遠心載荷実験の再現解析を行う。円形立坑は $M-\phi$ 関係により非線形特性を考慮した梁要素と剛梁による魚骨モデルによりモデル化する。解析結果より、構造物に対して最も厳しい荷重状態となる時刻の応答加速度および動土圧を作用荷重として抽出する。解析プログラムは FLIP2D を用いる。

② 円形立坑を積層シェルでモデル化し、底板下に地盤バネを配置した3次元 RC 非線形 FEM モデルに対して、①で抽出した作用荷重を静的に載荷する漸増載荷解析を行い、構造物のひび割れ分布や鉄筋応力等により損傷状況を確認する。解析プログラムは FINAL を用いる。

3. 2次元有効応力 FEM 解析による構造物および地盤応答の再現解析

遠心載荷実験の実施ケースのうち、構造物基部にひび割れが生じ鉄筋降伏も確認された、十勝沖波(1回目)による加振ケースを対象とした。解析モデルを図1に示す。

再現解析の比較結果として、図1に示す各点における加速度時刻歴と過剰間隙水圧比時刻歴、および変位分布を図2～図4に示す。加速度は、液状化層と非液状化層の境界にあたる計測点において、実験で加振後半に発生するサイクリックモビリティによるスパイク状の大きな加速度が解析ではやや小さく評価されているものの、地盤及び立坑の加速度応答を全体的に精度良く再現出来ている。過剰間隙水圧比は、水圧上昇後の負圧による振幅が解析ではやや小さくなっているものの、全体的な水圧の上昇と消散の過程を精度良く再現来ている。地盤の変位分布は、特に地表面の最大変位を解析でも精度良く再現できている。地中の変位分布がやや異なるように見えるが、実験による計測変位がせん断土層の変位を段差状に計測して繋ぎ合わせた変位分布であるため、解析で得られた地盤節点の変位から描いた分布とは若干差を生じた可能性がある。

以上より、遠心載荷実験で得られた地盤の応答が概ね精度良く再現出来たものと判断し、本解析結果から、構造物に作用する総せん断力最大および基部の曲げモーメント最大となる時刻の各作用荷重を抽出した。総せん断力時刻歴を図5に示す。

4. 3次元 RC 非線形 FEM による RC 円形立坑の損傷状況の再現解析

3. で抽出した2時刻における作用荷重を3次元 RC 非線形 FEM モデルに入力した。解析モデルを図6に示す。常時荷重として自重、常時水圧、揚水圧、および2次元有効応力解析の地盤～構造物間のジョイント反力により考慮した常時土圧を載荷したのち、地震時荷重として慣性力および地震時土圧を漸増載荷した。なお、水圧および土圧については2次元モデルで評価した荷重が円周直交方向に全周に作用するものとして荷重を

キーワード 密な地盤、液状化、円形立坑、2次元有効応力 FEM 解析、3次元 RC 非線形 FEM 解析

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 TEL 070-2459-1891

モデル化した。実験時の立坑の損傷状況写真および解析結果を図7に示す。作用荷重の抽出時刻の違いにより、立坑基部のひび割れの分布範囲や鉛直主筋に大きな引張応力が生じる範囲に若干の違いはあるものの、2ケースともに実験で確認された立坑基部のひび割れ、鉄筋降伏が解析でも再現されることを確認した。なお、実験では立坑基部に1本の曲げひび割れが集中したが、解析では2ケースともやや広範囲に分布し、また荷重方向に対して90°方向の側面では斜め方向のひび割れが発生しており、実験とはやや異なるひび割れ性状となった。これは、3次元RCモデルの鉄筋を分散鉄筋でモデル化しており完全付着の条件となっていることから、解析では応力分配が実際より広範囲で発生したためと考えられる。

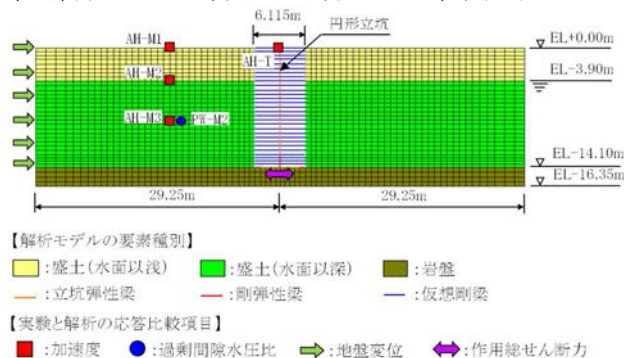


図1 2次元有効応力解析モデル図
および応答比較位置

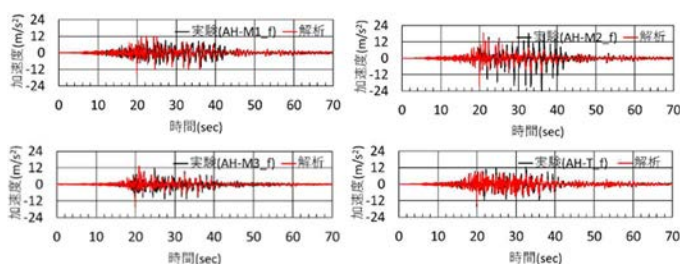
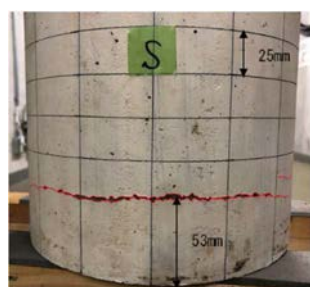
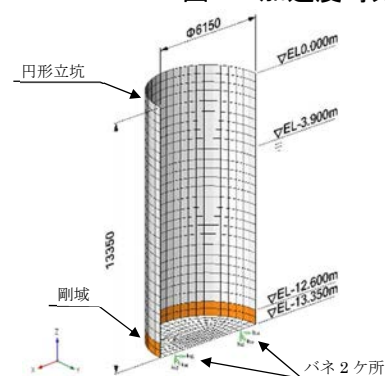


図2 加速度時刻歴比較



(実験時の損傷状況)

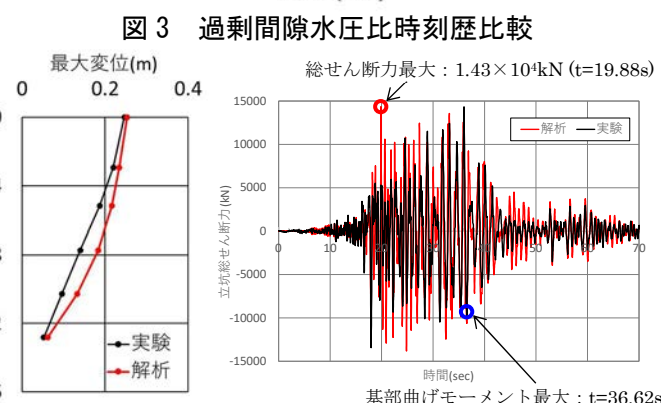


図4 地盤変位
分布比較

図5 立坑総せん断力
時刻歴比較

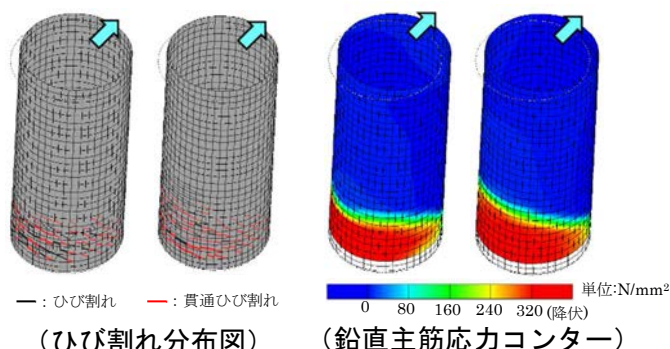


図6 3次元RC非線形FEMモデル図 図7 立坑の実験時の損傷状況および3次元RC非線形FEMによる解析結果
(解析結果は 左: 総せん断力最大時刻 右: 基部曲げモーメント最大時刻)

5. まとめ

2次元有効応力解析による荷重の抽出と3次元RC非線形FEMによる静的な荷重の漸増解析により、密な砂地盤中の立坑の地震時の損傷を概ね再現できることを確認した。3次元モデルで地盤の液状化とRC構造物の非線形を同時に扱うのは解析的な負荷が大きいため、本検討のように2段階の解析で構造物の地震時損傷を概ね表現できたのは有用と考える。今後は、解析で実験時のひび割れ性状の再現性をさらに高められるよう、付着特性を考慮可能なモデルを用いてより詳細な検討を行う予定である。

謝辞: 本研究は、電力8社と日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)が実施する研究の一環として実施した。関係各位に謝意を表す次第である。

参考文献: (1) 堤内, 永井, 山口, 熊田: 密な砂地盤中に構築された円形立坑の損傷解析, 令和4年度土木学会全国大会, 2022年9月