

3D プリント模型を用いた地中立坑の遠心載荷実験

(株) 大林組 正会員 ○池本 晃志郎 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

原子力施設の屋外重要土木構造物は、その施設の重要度により、大規模地震においても構造物が弾性状態を保つように設計されるケースがある。今回実施した遠心載荷実験では、大規模地震において模型が弾性挙動を示せるように引張強度の大きい材料であるナイロン 12 による 3D プリント模型を適用した。また再現解析を実施する中で、大規模地震時における構造物の応答変位および作用せん断力の妥当性について確認を行った。なお、遠心載荷実験における構造物周辺の地盤は、原子力施設の密に埋め戻された地盤を想定し、相対密度 90% の密な飽和砂にて模擬した。また地下水位を想定し、過剰間隙水圧が上昇する液状化地盤とした。

2. プッシュオーバー実験とその結果

3D プリント模型 (1/30) は、RC 製模型と同等の自重およびせん断剛性を持つ構造を適用するため、ナイロン 12、補強ボルトおよび補強バンドによる合成構造とした。ナイロン 12 の物性値および合成構造とした場合の重量および曲げ剛性を表 1 に示す。曲げ剛性については、RC 製模型とした場合の約 1/2 とし、RC 製模型がひび割れにより剛性低下する状況を模擬する設定とした。3D プリント模型の写真を図 1 に示す。模型は、合成構造となっていることから、模型の荷重～変位関係を確認するために、プッシュオーバー試験 (以下、P0 試験) を実施した。P0 試験は、立坑頂部が変形しないように、半割の鉄板を取り付けて、底版をボルトで固定し、側壁の頂部を引っ張ることにより実施した。

3D プリント模型を再現した FEM 解析モデルおよび解析結果として変形図を図 2 に示す。解析モデルでは、補強ボルトおよび補強バンドをモデル化し、合成構造の曲げ剛性を忠実に再現できるモデル化とした。P0 試験と FEM 解析の結果を図 3 に比較する。P0 試験により、その荷重～変位曲線は概ね線形の応答になることを確認した。また構造物と土槽との取付部の剛性も考慮して、実験結果と解析が一致することを確認した。

3. 遠心載荷実験の再現解析の結果

遠心載荷実験を再現するための 2 次元有効応力解析モデルを図 4 に示す。遠心載荷実験ではせん断土槽の中央に、円形立坑模型を設置し、30G による遠心載荷を行い、ホワイトノイズ波および神戸波 ($a_{\max}=1.9 \text{ m/s}^2$ 目標) をせん断土槽下面より入力した。構造物の支持層にはソイルセメントを用い、表層には地盤材料として栃木県産珪砂 5 号を用いた。栃木県産珪砂 5 号の相対密度を 90% とする密な砂地盤とした。地下水位は、地表より 3.9m (模型 130 mm) に設定した。解析プログラムは FLIP2D (Ver7.3.1) を用いた。地盤のモデル化はカクテルグラス要素を適用し、構造物は魚骨モデルとし、構造物ー地盤間にジョイント要素を設けた。

遠心載荷実験によるホワイトノイズ波を入力した結果より、3D プリント模型および密な砂地盤の固有周期を推定した。その結果を図 5 に示す。模型および地盤のそれぞれの FEM 解析モデルの固有周期は、遠心載荷実験でのホワイトノイズ波入力時の固有周期と概ね一致する結果を得た。このことより、P0 解析モデルおよび遠心載荷実験に対する 2 次元有効応力解析モデルの条件設定に対する妥当性を確認した。

遠心載荷実験では、立坑下面に設置したロードセルによる総せん断力 (総水平力) および立坑内部に設置した変位計による水平変位を計測した。時刻歴において遠心載荷実験の結果と再現解析の結果 (図 6) は、総せ

キーワード 3D プリント, 遠心載荷実験, 地中構造物, 液状化, 相互作用

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 TEL 080-2158-9709

ん断力および立坑変位で概ね一致している。また荷重～変位関係として纏めたグラフを、図 3 に追加して示す。P0 解析の結果による傾き（せん断剛性）に対して、遠心載荷実験およびその再現解析における荷重～変位関係は、傾きが大きくなる範囲に分布した。これは、遠心載荷実験では構造物に対して分布荷重で作用しているためである。再現解析については、荷重の最大値の時刻で、P0 解析の荷重～変位と概ね一致しており、荷重は頂部付近の土圧による荷重が変形に大きく作用したものと推測される。

6. まとめ

3D プリンタにより複雑な構造の模型であっても容易に製作でき、また補強鋼材を用いることで模型の剛性や重量も調整できることを確認した。3D プリンタ模型を用いることで、大規模地震に対する構造物と地盤の相互作用を確認でき、再現解析において2次元有効応力解析モデルで精度よく再現できることを確認した。

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。

表 1 3D プリンタ模型の重量・曲げ剛性

	コンクリート模型	ナイロン12模型	ナイロン12+ボルト補強
E	25000	2500	13750
EI	2.15E+12	2.15E+11	1.18E+12
EIの比	1.00	0.10	0.55
内径d[mm]	180	180	180
厚さt[mm]	25	25	25
壁重量(kg)	16.3	6.4	14.2
全体重量(kg)	26.3	230	20.1
備考	非線形模型	柔らかく、軽い	複合構造



図 1 3DP 模型写真

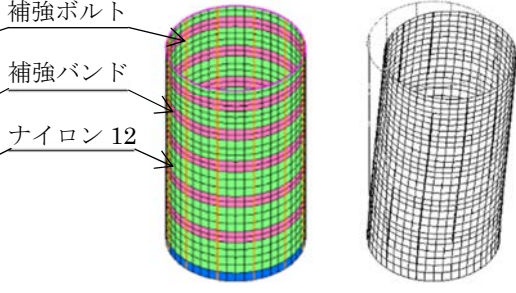


図 2 三次元解析モデルと解析結果

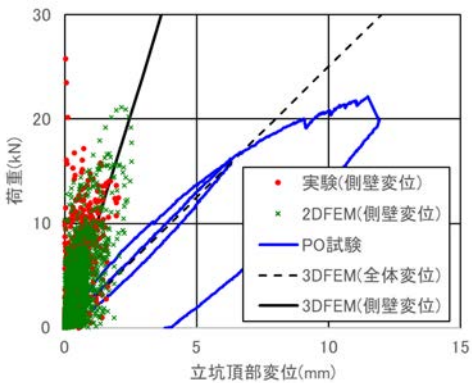


図 3 P0 試験と解析結果の比較

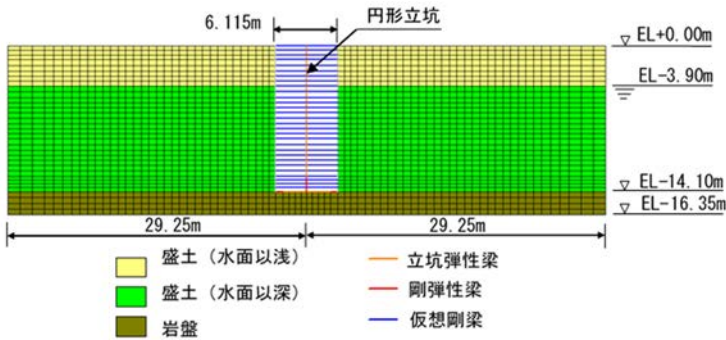


図 4 二次元有効応力解析モデル

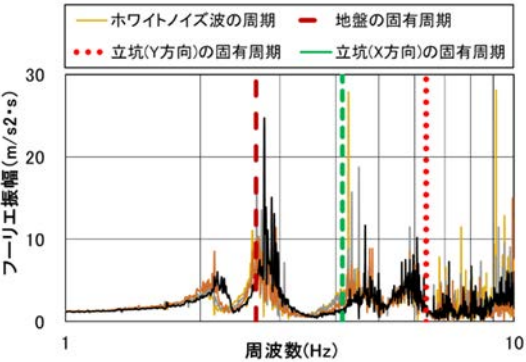


図 5 固有周期の比較（構造物、地盤）

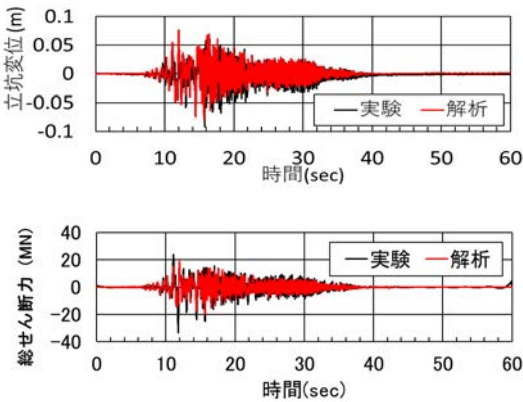


図 6 実験と解析の比較（立坑変位，総せん断力）

参考文献：山口，熊田，高田，永井：密な砂地盤中に構築された円形立坑の遠心載荷実験の計画と事前解析，令和4年度土木学会全国大会，2022 年 9 月