

地震時に塑性化する杭模型の遠心場における液状化実験と2次元・3次元有効応力解析

立石章¹・宇野浩樹²

¹大成建設（株）技術センター土木技術研究所（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

E-mail:tateishi@ce.taisei.co.jp

²大成建設（株）技術センター土木技術研究所（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

E-mail:hiroki-u@ce.taisei.co.jp

筆者らは、震動により塑性化する杭模型の遠心場における液状化実験を行い、有効応力解析の適用性について検討した。地盤模型は緩詰めと密詰めの2層地盤から成り、杭模型は2×2の4本群杭で、加振は兵庫県南部地震記録を入力した。有効応力解析は、地盤を弾塑性モデル、杭はファイバー要素でモデル化し、同一条件のもとで2次元解析及び3次元解析を実施した。その結果、2次元、3次元解析とも概ね実験結果を模擬できる結果が得られるとともに、2次元解析の問題点を明らかにできた。

Key Words : pile foundation, liquefaction, centrifuge model test, 2-dimensional FEM, 3-dimensional FEM, effective stress analysis method

1. はじめに

兵庫県南部地震による多数の被害を受けて耐震基準が整備されたが、液状化に関係する構造物の安全性および液状化対策の評価手法は十分整備されたとはいえない。これは、液状化地盤中の構造物の挙動は簡便な手法で評価することが難しく、実験的手法または有効応力解析によらざるをえないためである。

筆者らは、液状化地盤中の杭基礎の耐震性を評価する手法として有効応力解析をとりあげ、その有効性を検証してきた。遠心場において液状化地盤と塑性化する杭の振動実験を行い、これを2次元・3次元有効応力動的FEM解析によりシミュレーションを行ったので報告する。

2. 遠心模型振動実験

遠心模型実験は、遠心加速度40G場において、杭基礎模型を対象に行った。図-1に実験模型および代表的な計測器の配置を示す。

地盤材料は豊浦砂で、Dr=60%とDr=90%から成

る2層地盤とした。模型地盤は、せん断土槽内に振動締固めにより乾燥砂地盤を作製した後、脱気槽内で40cStのシリコンオイルにより飽和させた。

杭は、鋼管杭を模擬した直径9.50mm、肉厚0.25mmの鋼製パイプを用いた。引張試験による応力～ひずみ関係を図-2に示す。

杭模型は、杭間隔6cm（6D、D：杭直径）で2×2の4本群杭とし、杭頭は建屋模型と剛結、杭下

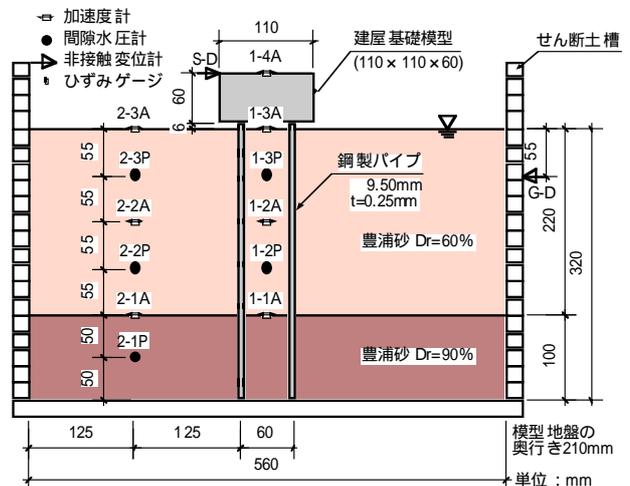


図-1 遠心実験模型と計測器配置

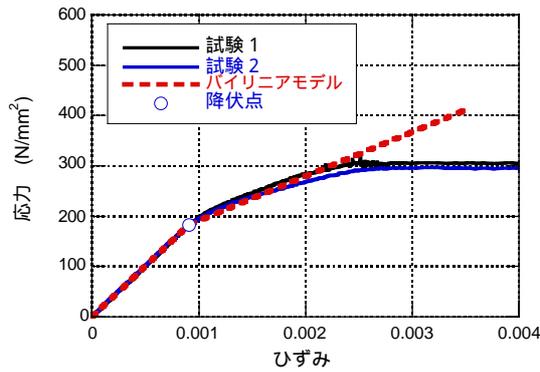


図-2 模型杭の引張試験による応力～ひずみ関係

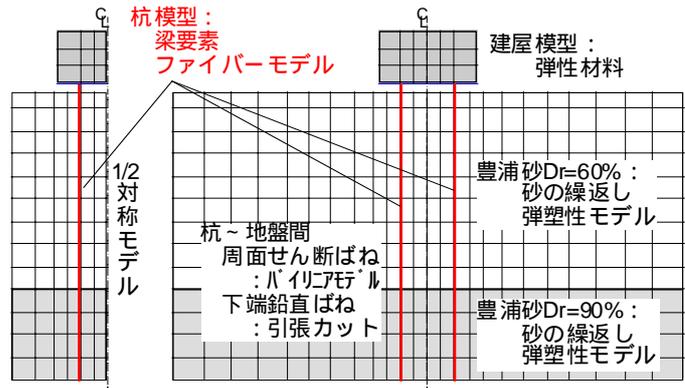


図-3 3次元有限要素モデル

端はせん断土槽に設置し、水平方向拘束、回転と引抜きは自由となる構造とした。建屋模型は、ステンレス製で、40G場における杭軸応力が一般的な建築物の鋼管杭と同程度となるような重量を与えた。

入力地震動は、レベル2地震動対応として、兵庫県南部地震におけるポートアイランドGL-83mでの観測記録のEW成分（最大加速度 3.03m/sec^2 ）とした。

実験結果は、後述するシミュレーション解析結果とともに40G場の遠心模型スケールで示す。

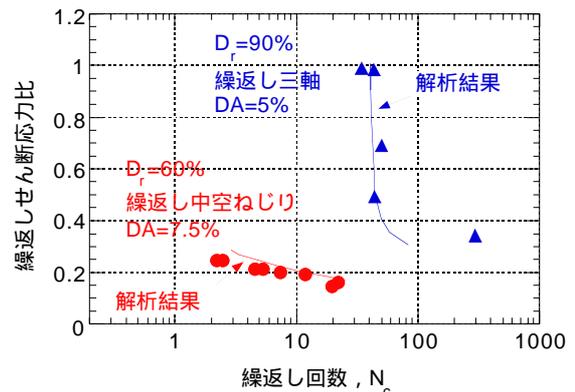


図-4 液状化強度のシミュレーション

3. シミュレーション解析

(1) 解析方法および解析条件

シミュレーション解析には、2次元・3次元有効応力動的FEM解析プログラムLIQCAを用いた。LIQCAは、場の支配方程式として2相混合体理論を用い、空間離散化は、土骨格の変位は微小変形理論に基づいた有限要素法で、間隙水圧は有限差分法で行い、時間離散化はNewmarkの法を用いている¹⁾。

3次元解析に用いた解析モデルを図-3に示す。2次元解析は3次元解析と同じ要素分割を用いた。

地盤は、Okara²⁾の繰返し弾塑性モデルとし、2次元解析では平面ひずみ要素を、3次元解析では8節点ブリック要素を用いた。パラメータの設定に用いた液状化強度とそのシミュレーション結果を図-4に示す。地盤の物性値および繰返し弾塑性モデルのパラメータは参考文献³⁾を参照されたい。

杭は、2次元解析、3次元解析とも梁要素とし、ファイバーモデルを用いた。図-2にバイリニアモデルでモデル化した鋼材の材料特性を併記している。

杭と地盤は、二重節点としてばねで結合し、杭周囲の水平方向は剛結し、せん断方向は摩擦強度を極限とするバイリニアモデルの弾塑性ばねを、杭下端の鉛直方向には引張りカットの非線形弾性ばねを挿

入した。

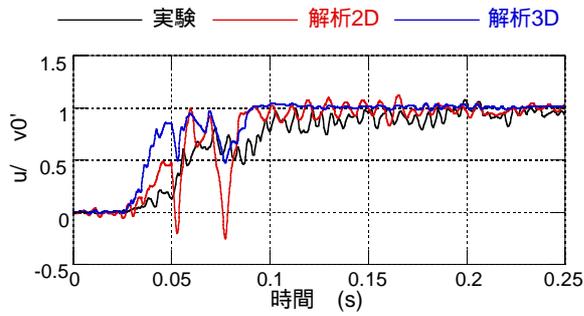
力学的境界条件としては、側面はせん断土槽を考慮して等変位境界とし、底面は完全固定とした。透水の境界条件としては、側面および底面は不透水境界、地表面は排水境界とした。

(2) 解析結果

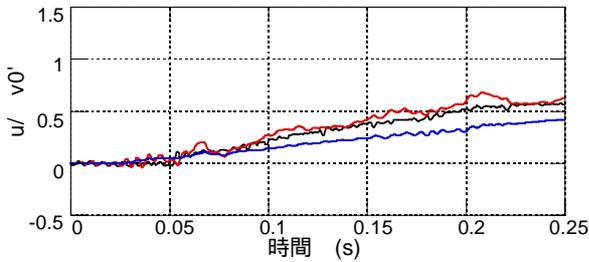
実験結果と2次元または3次元解析結果との時刻歴波形の比較を、側方地盤の過剰間隙水圧比、側方地盤と建屋の水平加速度および水平相対変位、杭頭と層境界の曲率について、図-5～図-8に示す。さらに、過剰間隙水圧上昇初期と液状化後において杭頭で曲率がピークとなった時刻での同時刻曲率深度分布を図-9に示す。以下に考察する。

1) 過剰間隙水圧比については、実験結果、2次元および3次元の解析結果のいずれも、 $Dr=60\%$ の上層では0.1秒付近で水圧比が1.0に達し、 $Dr=90\%$ の下層では水圧比0.5程度で液状化しない結果となっている。解析次元の違いに着目すると、側方地盤上層では、2次元解析結果は3次元解析結果および実験結果に比べ液状化に達する前の振幅の変動が大きいが、これは2次元解析では杭の影響が側方地盤まで及んでいるためと考えられる。

2) 水平加速度については、側方地盤および建屋と

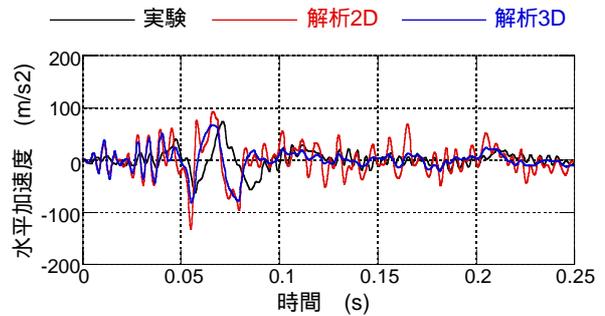


(a) 側方地盤 $D_r=60\%$ (計測点2-2P)

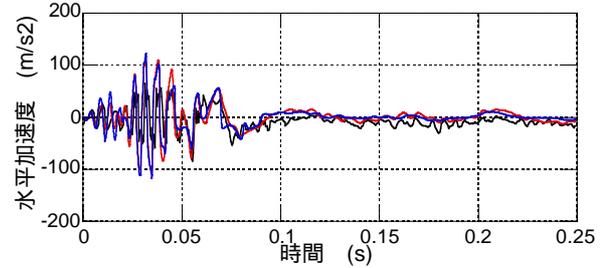


(b) 側方地盤 $D_r=90\%$ (計測点2-1P)

図-5 過剰間隙水圧比時刻歴

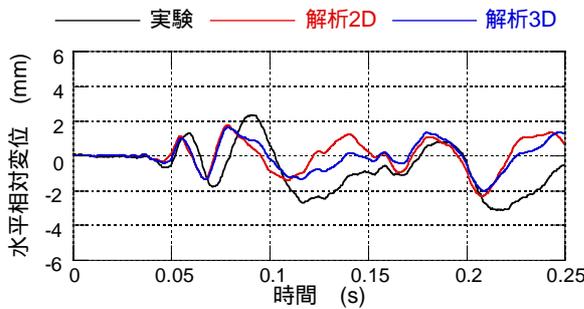


(a) 建屋頂部 (計測点1-4A)

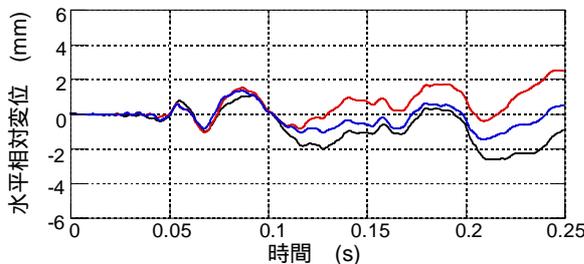


(b) 側方地盤地表 (計測点2-3A)

図-6 水平加速度時刻歴

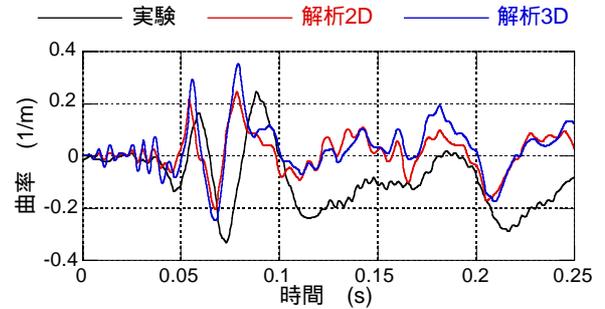


(a) 建屋頂部 (計測点S-D)

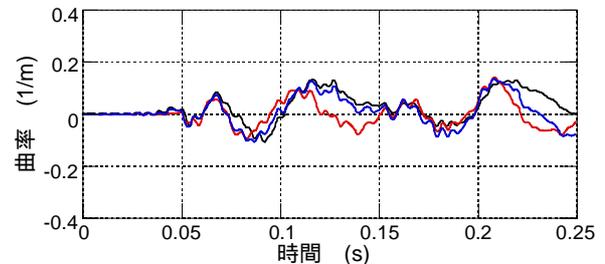


(b) 側方地盤地表 (計測点G-D)

図-7 水平相対変位時刻歴



(a) 左杭杭頭



(b) 左杭層境界

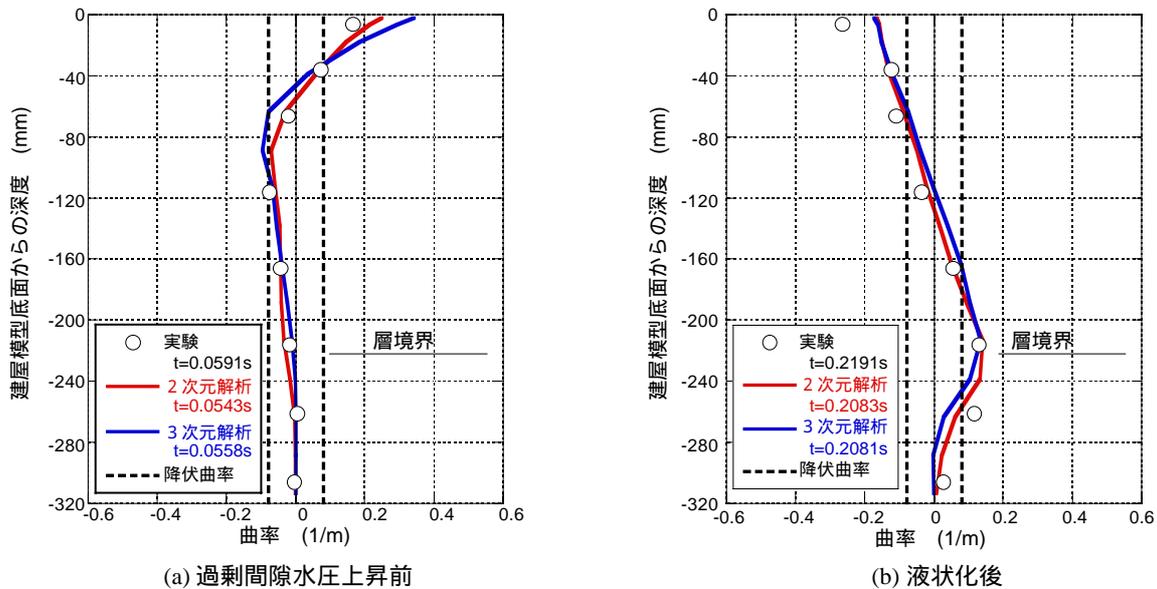
図-8 曲率時刻歴

もに、実験結果、2次元および3次元の解析結果のいずれも、水圧比が1.0に達する0.1秒付近で振幅が減衰し長周期化している。解析次元の違いに着目すると、建屋では、2次元解析結果は3次元解析結果および実験結果に比べて液状化後に短周期成分が乗っているが、これは2次元解析では杭の押し引きによるサイクリックモビリティ挙動が顕著に表れているためと考えられる。

3) 水平相対変位および杭の曲率の変形挙動については、実験結果、2次元および3次元の解析結果のいずれも、水圧比が1.0に達する0.1秒付近から長周

期化しているが、実験結果に見られる1方向へのドリフトは解析では再現できていない。解析次元の違いに着目すると、水平相対変位、杭の曲率とも、3次元解析結果は2次元解析結果に比べて実験結果と周期特性、位相特性がよく一致しているが、これは3次元解析の方が2次元解析より杭間地盤をモデル化しているなど、液状化地盤の変形特性の再現性がよいためと考えられる。

4) 曲率の同時刻深度分布を見ると、実験結果、2次元および3次元の解析結果のいずれも、過剰間隙水圧の上昇初期では、杭頭で降伏曲率をこえる最大



値が発生し、上層内で極大値が発生する分布となっているのに対し、液状化後は、杭頭だけでなく層境界でも降伏曲率をこえる大きな値が発生し、杭頭との間でほぼ直線的な分布となっている。同時刻分布については、解析次元による違いは見られない。

4. 結論

遠心場において塑性化する杭と液状化地盤の振動実験を実施し、2次元・3次元有効応力動的FEM解析によりシミュレーションを行った。

その結果、1) 2次元解析および3次元解析ともに実験結果における液状化の発生状況および杭の塑性化の程度をよくシミュレートできた、2) 3次元解析は2次元解析より液状化前、液状化後とも地盤および杭の応答が実験結果により近い結果となっていた、3) 以上より特に3次元有効応力解析の有効性が明らか

かとなった、という結論が得られた。

今後は2次元解析における杭と地盤の3次元の挙動のモデル化手法について検討していく予定である。

参考文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Shibata T., Kato M. and Uzuoka R. : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Science Research*, 52, pp.209-245, 1994.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S. : A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique* 49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 3) 立石章・宇野浩樹：3次元有効応力解析による杭模型の遠心場における液状化実験のシミュレーション，大成建設技術センター報，第36号，2003.

(2003. 10. 9 受付)

A CENTRIFUGE TEST OF LIQUEFIED SOIL AND PILES YIELDED DURING STRONG MOTION AND 2D/3D EFFECTIVE STRESS ANALYSES

Akira TATEISHI and Hiroki UNO

The authors conducted a centrifuge test of liquefied soil and piles yielded during strong motion and verified the applicability of an effective stress analysis method. The soil was 2-layered model (loose and dense sand) and the pile model consisted of 4-pipes. The input motion was the recorded time history in 1995 Hyogoken-Nanbu-earthquake. The authors also performed 2 and 3 dimensional effective stress analyses using an elasto-plastic model for soil and a fiber model for piles. As the results, the analysis results showed good agreement with the test results and clarified the problem of 2-dimensional modeling compared 3-dimensional analysis.