

曲げ耐力が異なる鉄筋コンクリート杭の液状化地盤中の挙動について (その2) 一遠心模型振動実験結果と3次元有効応力解析

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○近江健吾 高橋啓久
フェロー会員 風間基樹, 正会員 渦岡良介
東北大学工学部建築社会環境工学科 学生会員 伊藤貴晴

1. はじめに

その1では模型杭作製及びその力学的性能と遠心模型実験の概要について示した。その2では遠心模型実験の結果と3次元有効応力解析の結果について示す。

2. 実験結果

以下に示す物理量は全て実物換算したものである。

図-1に示すように、杭頭の応答加速度は若干 Case 2 のほうが大きいもののほぼ同程度の応答を示した。一方で、杭頭応答変位は時刻 A までは両杭体で同一の変位を示している。しかし、その後 Case 1 の変位が小さくなり、時刻 B から負の方向へのドリフトが見られ、最終的に変位が残留していることがわかる。図-2に深度毎の曲率時刻歴を示す。突出部分(深度-0.8 m)での曲率時刻歴は両者でほぼ一致している。しかし、Case 1 で深度 3.7 m において曲率が大きく残留している。さらに、液状化層と支持層の境界部付近では Case 1 よりも Case 2 のほうが大きい応答を示している。図-3に Case 1 での杭頭応答変位が最大となる時刻($t=4.89$ s)、次に大きくなる時刻($t=6.33$ s)での杭変位深度分布を示す。なお、杭変位は曲率を2階積分することによって求めた。 $t=4.89$ sでは Case 2 が全体として大きく変形しているが、Case 1 が液状化層中心深度から急激に変形し、杭頭変位はほぼ等しくなっている。 $t=6.33$ sでは、液状化層中心深度から Case 1 の変形が大きくなっていることがわかる。これは Case 1 で液状化層中心部付近に塑性ヒンジが形成されたためと考えられる。塑性ヒンジが中心となり、それより浅い部分が回転したため、深部では Case 2 よりも小さい変形をし、浅部では大きく変形したと言える。

3. 3次元有効応力解析

土の構成モデルには、砂の繰返し弾塑性モデル¹⁾を用いた。場の方程式の定式化には、二相混合体理論に基づいた u-p formulation²⁾を用いた。杭体はファイバー分割の手法を用い、曲げ剛性と軸力の連成を考慮でき

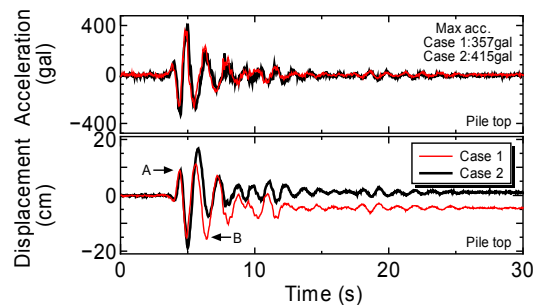


図-1 杭頭応答加速度及び応答変位の比較

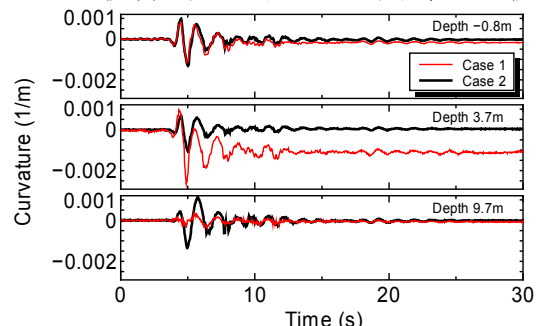


図-2 深度毎の曲率時刻歴の比較

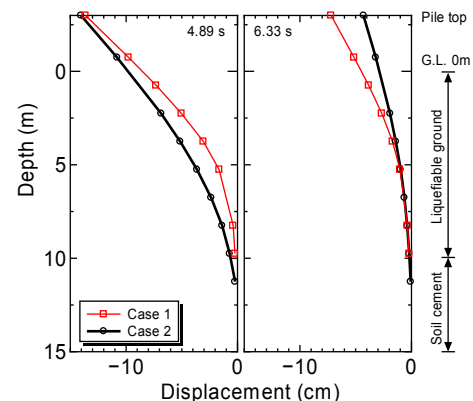


図-3 時刻 $t=4.89$ s, $t=6.33$ s における杭変位深度分布
るモデル³⁾を用いた。地盤のパラメータ及び杭体のパラメータは要素シミュレーションを行い、実験結果にフィッティングさせて設定した。

作製した有限要素モデルを図-4に示す。有限要素モデルは実験土槽をプロトスケールに換算し、モデル化を行った。全体のモデルは、奥行き方向の対象性を考慮したうえで半断面(8721 節点, 7180 要素)とした。液状化地盤は8 節点アイソパラメトリック要素、杭は梁要素でそれぞれモデル化した。杭要素は周辺地盤要

素との間に杭体積分の空間を設け、同一深度で水平方向の等変位境界条件（鉛直方向はすべりを考慮）を与えることで杭体積を表現した。土骨格に対する境界条件として、底面は水平・鉛直を固定、側方は土槽壁面法線方向を固定した。杭先端は加振方向の回転のみ非拘束とした。

各要素の初期応力は、鉛直方向に加速度を段階的に 9.8m/s^2 まで作用させて算出した。なお、プレストレスは初期応力として一定値を作用させた。入力地震動は、振動台で観測された地震波の 2-20 秒までを入力した。

数値解析上の解析条件として、計算時間増分は 0.0015 秒、Newmark 法の係数は $\beta=0.3025$ 、 $\gamma=0.6$ とした。Rayleigh 減衰として、初期剛性比例型を用いた。その係数は、地盤の 1 次固有周期 0.4 秒に減衰定数 2% を仮定して 0.003 とした。

4. 解析結果

Case 1 と Case 2 における杭頭応答加速度及び応答変位の比較をそれぞれ図-5、図-6 に示す。両ケースともに杭頭応答加速度に関してはよい一致を見せている。しかし、杭頭応答変位に関しては 4 秒後から解析が変位を過大に評価する傾向が見られる。また、実験において Case 1 で顕著だった残留変位も表れていない。これは解析での杭の履歴特性のモデル化に原因があると考えられる。両ケースで 3 秒前後までの杭頭応答変位は解析値のほうが小さい。しかし、4 秒前後から解析値のほうが実験値よりも大きな値を示している。これは繰返し荷重を受ける際に、解析モデルのほうが曲げ耐力を過小評価していると考えられる。図-7 に解析での曲率の最大値最小値の深度分布を示す。図-7 において、Case 1 では液状化層表層での曲率が大きく、Case 2 では液状化層境界部での曲率が大きくなっていることがわかる。これは、図-2 の結果と調和的であり、プレストレスの有無による杭体の挙動を定性的には表現可能であると言える。一方で、図-2 と図-7 を比較すると、それぞれの深度において解析値が実験値よりも高い値を示していることがわかる。有効応力解析を用いた更なる定量的な評価に関しては、杭体に用いたパラメータの再設定及び杭体の履歴特性の把握を行う必要があると考える。

5. まとめ

遠心模型実験の結果、高強度 RC 杭体へのプレストレスの有無によって変形モードが異なることがわかつ

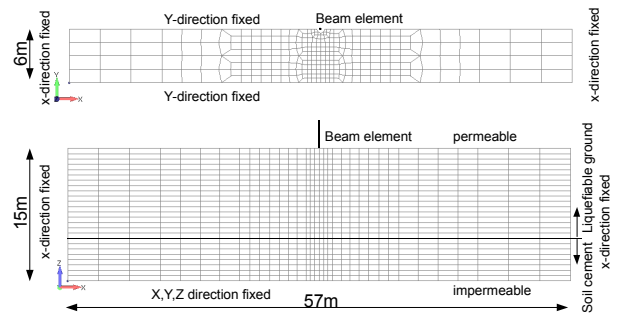


図-4 有限要素モデル（プロトスケール）

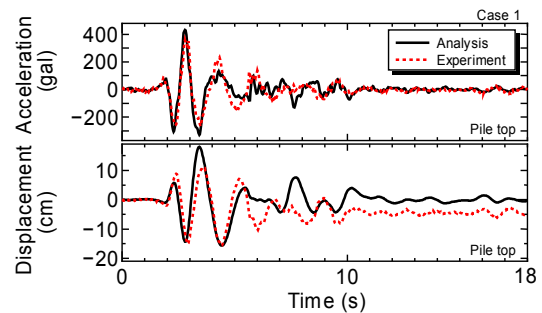


図-5 杭頭応答加速度及び応答変位の比較 (Case 1)

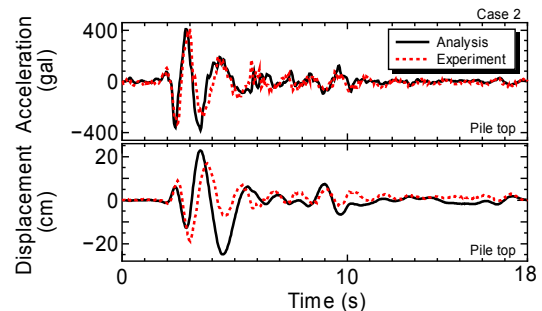


図-6 杭頭応答加速度及び応答変位の比較 (Case 2)

た。有効応力解析は概ね遠心模型実験の結果と整合したが、更なる定量的な評価にはパラメータの再設定、杭体の履歴特性の把握が必要である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金「超高耐力複合杭基礎構造の開発と液状化時の地盤反力特性を考慮した耐震信頼性設計法」の助成を頂き、実施したものである。

参考文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y., Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied scientific Research*, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 3) Zhang, F., Kimura, M.: Numerical prediction of the dynamic behaviors of an RC group-pile foundation, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.3, pp.77-92, 2002.

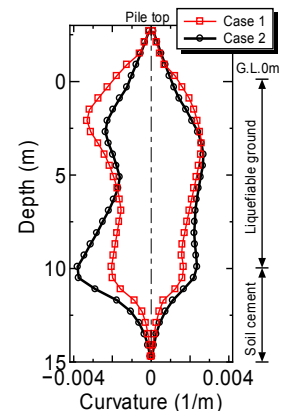


図-7 解析における曲率の最大値最小値の深度分布