

三次元有効応力解析による液状化地盤における地盤と杭の相互作用に関する一考察

東電設計株式会社 正会員 ○大塚 悠一

東電設計株式会社 正会員 溜 幸生

国立研究開発法人海洋研究開発機構 正会員 堀 宗朗

東京電機大学 名誉会員 安田 進

1. はじめに

耐震設計において地震発生時の液状化地盤中における杭基礎と地盤の動的相互作用を検討することは重要であり、今まで多くの研究と実験がなされてきた。この相互作用は慣性の相互作用(inertial interaction)と運動学的相互作用(kinematic interaction)に分類できるが、後者については未だ不明瞭なところが多い。例えば比較的密な飽和地盤における群杭では、杭の位置によって間隙水圧の低下の傾向が異なる一方で、杭に作用する地盤反力に大きな差はないことが分かっている¹⁾が、その理由について有効応力法により解析的に明確にした例は少ない。筆者らは三次元有効応力解析プログラム FLIP3D²⁾を用いて E-Defense による振動台実験の再現解析を行い、数値解析が実験を十分に再現することを示した³⁾。本研究では再現解析の結果の分析をさらに進め、杭周囲の過剰間隙水圧の差や杭位置による水圧と土圧について考察を行った。

2. 実験概要

図1に実験に用いた地盤・杭・構造物で構成される試験体の模式図を示す。杭は3×3の配置であり、杭径で無次元化した杭間隔は約4.0である。地盤が十分に液状化したケース(鷹取波 3.0 m/s^2)の杭 B2, C3 の北側(N)および南側(S)に配置した水圧計による過剰間隙水圧を図2に示す。群杭の外側の杭である杭 C3 は群杭内部の杭 B2 に比べて、7秒当たりでN側とS側の過剰間隙水圧の差が大きいことが分かる。この傾向は前述の既往の知見¹⁾と整合している。

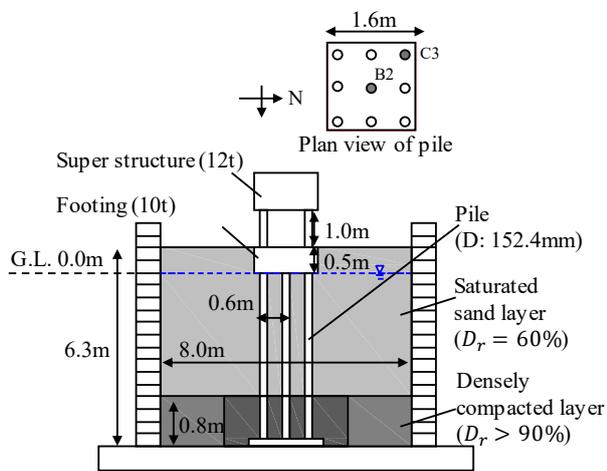


図1 振動台実験図

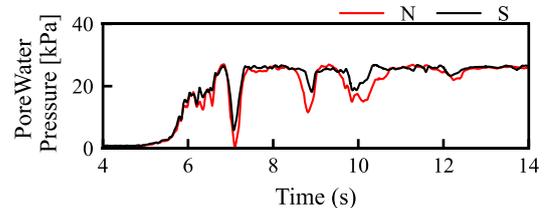
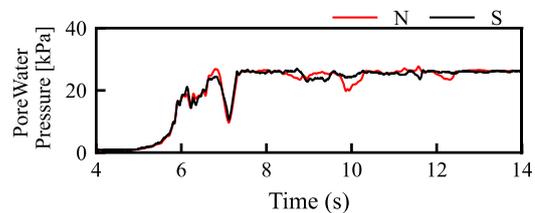


図2 杭周辺の過剰間隙水圧(深度-2.0m)の時刻歴の実験結果(上: B2 杭, 下: C3 杭)

3. 数値解析結果と考察

本研究では解析プログラムとして、三次元有限要素法による有効応力解析プログラムである FLIP ROSE 3D (ver. 1.6)²⁾を用いて、杭が非線形特性を示し、地盤が十分に液状化したケース(鷹取波 3.0 m/s^2)の再現解析を行った³⁾。実験結果と同様に杭 B2, C3 の N 側と S 側の解析による過剰間隙水圧の時刻歴を図3に示す。

C3 は B2 に比べて実験結果と同様に7秒付近でN側とS側の過剰間隙水圧の差が著しいことが分かる。杭

キーワード 液状化, 群杭, 構造物と地盤の相互作用, 三次元有効応力解析
連絡先 135-0062 東京都江東区 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F TEL 03-6372-5384

B2, C3 の N 側と S 側の解析による有効応力の時刻歴を図 4 に示す. 間隙水圧の低下に対応して応力が増大していることが分かる. 杭の N 側と S 側における過剰間隙水圧の差と同じ要素から抽出した全応力の差の時刻歴を図 5 に示す. ここで杭に接する要素の全応力は, 杭に作用する土圧に対応するとしている. 過剰間隙水圧差に関しては 4-8 秒までは群杭外側の C3 が大きい, 8 秒以降では群杭内部の B2 と大きな差がない. 全応力差に関しては全時刻において B2 と C3 の位置で大きな差が生じていない. つまり杭と地盤の相対変位と土のせん断変形に伴うダイラテンシーによって杭周辺の過剰間隙水圧の低下が発生するが, 同時に有効応力が増加するために, 全応力で考えると杭に働く全応力差は群杭の中の杭の場所によって大きな差が生じていない. これが液状化地盤の群杭では杭位置による間隙水圧差がありながらも地盤反力の差が小さい理由であると考えられる.

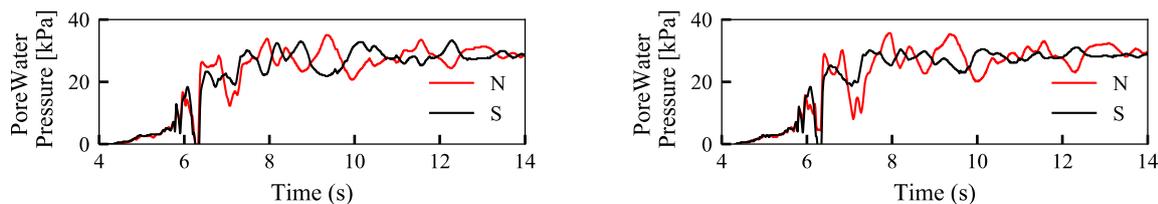


図 3 杭周辺の過剰間隙水圧 (深度-2.2m) の時刻歴の解析結果(左: B2 杭, 右:C3 杭)

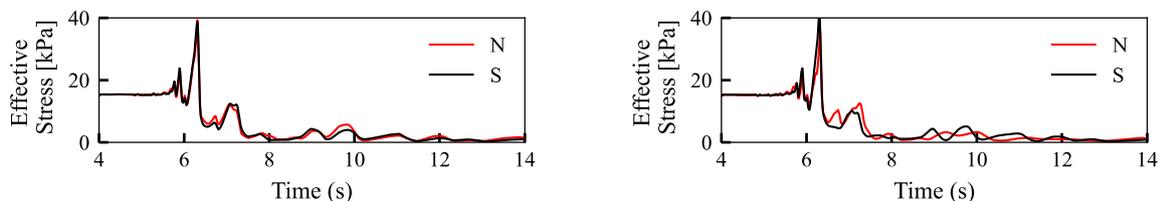


図 4 杭周辺の有効応力 (深度-2.2m) の時刻歴の解析結果(左: B2 杭, 右:C3 杭)

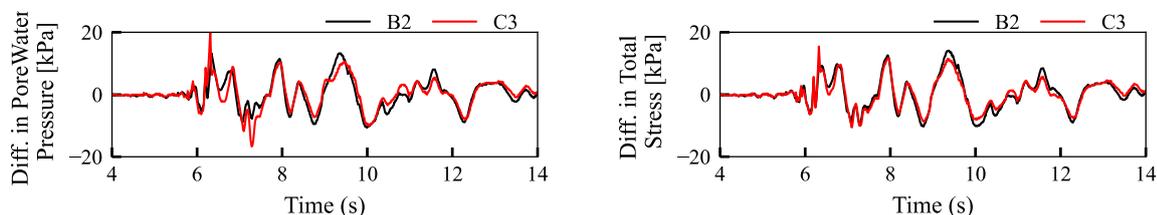


図 5 杭周辺の NS 間の過剰間隙水圧差 (左) と全応力差 (右) (深度-2.2m) の時刻歴の解析結果

4. まとめ

本研究では, 液状化地盤における地盤と杭の相互作用について考察するために, E-Defense による地盤-杭-構造物系の大型振動台実験の再現解析と分析を行った. 既往の実験で示されていた過剰間隙水圧の低下の度合いが群杭の外側の杭において大きい傾向を数値解析においても再現できていることを確認した. 一方, 全応力で比較すると杭に働く土圧は群杭における杭の場所によって大きな差が生じていないことも確認できた.

謝辞: 本検討では, 「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」(平成 14 年度~平成 18 年度)の一環で, E-ディフェンス (防災科学技術研究所) にて実施された大型振動台実験のデータを利用させていただいた. 関係各位に謝意を表します.

参考文献: [1] Suzuki, H. and Tokimatsu, K.: Estimation of effects of pore water pressure response on p-y behavior of pile group in liquefied ground, Seond International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2005.

[2] Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand. *Soils and Foundations*, 33 (1), 192-199, 1993.

[3] Otsuka Y, Tamari Y, Ichimura T, Hori M, and Yasuda S. Validation of a 3D FEM model for the liquefaction analysis of soil-pile-structure systems, Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 2020.