第Ⅲ部門　　繰返し水平載荷時における鋼製杭の三次元地盤挙動解析

京都大学大学院工学研究科　学生員　○稲葉　圭紀
京都大学大学院工学研究科　正会員　　肥後　陽介
清水建設技術研究所　正会員　桐山　貴俊　杉山　博一

1. はじめに

基礎構造物設計上の課題は，橋脚の杭基礎や洋上風車基礎等に地震や風などの繰返し水平荷重が作用した際の安全性照査である．このためには，杭の水平繰返し載荷時の地盤挙動を正確に把握することが重要である．杭の水平載荷試験においては，コストや時間の観点から一般に困難であるため，現地盤条件での地盤と杭の関係を考慮した解析で得られた定数を用いて，杭の水平挙動を推定して設計に利用する[1]．したがって，精緻に杭と地盤をシミュレーション可能な解析法の整備が重要である．

繰返し載荷時の正確な杭と地盤の挙動を把握するためには，間隙水の移動を考慮した3次元解析が必要なため，本研究では液状化層を有する地盤における長杭の水平繰返し載荷実験のシミュレーションを実施し，3次元条件下での水平繰返し載荷時の地盤挙動評価を目的とする．載荷パターンはパラメータの妥当性を確認するための単調載荷，風荷重を想定した長周期の波形を入力動とした繰返し載荷，より非排水に近い条件を再現するために短周期の波形を入力動とした繰返し載荷を実施した．

2. 既往の実験

本研究では，Cox ら(1974)[2]，Reese ら(1974)[3]によって実施された，砂質地盤における杭の水平載荷試験の再現解析を行った．直径24インチの鋼管杭2本にひずみゲージを取り付け，単調水平載荷，繰返し水平載荷した後，杭に沿った点で曲げモーメントを測定した．この実験の鋼管杭は開端杭，載荷点は地盤から30cm上方の点で，変位の計測点は地盤表面である．載荷条件は単調載荷が最大荷重60kips(267kN)まで載荷し，最大変位は1.2inch(3.05cm)となった．繰返し載荷では周期を17秒，最大荷重55kips(245kN)で繰返し載荷を100回実施し，その結果最大変位は単調載荷と同等の1.2inch(3.05cm)であった．

3. 解析手法

本研究では液状化解析手法LIQCA3D20[4]を用いた．2相混合体理論と砂の構成式を用いた有効応力解析法に基づく動的有限要素解析法で，支配方程式は運動方程式と連続式で，構成式は砂の繰返し弾塑性構成式を用いた．

4. 単調載荷試験のシミュレーション

本研究の解析モデルは対称性を考慮した1/2モデルとし，モデル図を図1に示す．杭体はソリッド要素でモデル化した．地盤は弾塑性体としてモデル化し，既往の実験サイトの土質調査結果から砂層1，2のみ液状化対象層とし，推定される RL20 に最も近いパラメータセットを設定した（表1）．粘土層はR-Oモデルで表現し代表的パラメータセット[4]とした．杭と地盤の相互作用はジョイント要素で再現した．変位境界条件は地盤表面が xyz 方向すべて自由，底面が xyz 方向すべて固定，側面は面に垂直な方向のみ固定としている．荷重条件は，作用方向が x 軸正方向，作用荷重最大値は対称性を考慮し，実験の半分の133.5kNとした．

図 1 解析モデル図

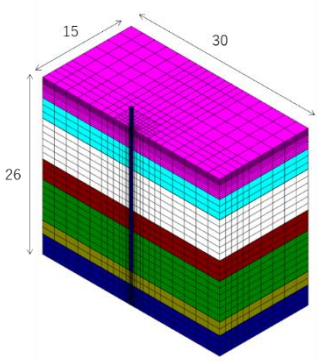


表 1 砂層のパラメータ

	砂層1,2	砂層3,5,7
密度 $\rho(\mathrm{g/cm^3})$	2.06	2.06
初期間隙比 e_0	0.558	0.558
圧縮指数 λ	0.0009	0.0009
膨潤指数 κ	0.0005	0.0005
透水係数 $k(\mathrm{m/s})$	8.5×10^{-5}	8.5×10^{-5}
変相応力比 M_m	0.800	0.800
破壊応力比 M_f	1.308	1.308
硬化関数中のパラメータ B_0	3000	3000
硬化関数中のパラメータ B_1	100.0	100.0
異方性消失のパラメータ C_d	2000	2000
擬似過圧密比 OCR	1.2	1.2
ダイレイタンシー係数 D_0	0.75	0
ダイレイタンシー係数 n	7.0	7.0
基準ひずみ(塑性剛性) γ_r^P	0.02	0.02
基準ひずみ(弾性剛性) γ_r^E	0.015	0.015

単調載荷終了時の地盤表面の x 軸方向の変位は4.3cmであり，実験結果の3.05cmと概ね整合していることから，パラメータの妥当性は検証されたとして，これらを用い

Yoshiki INABA, Yosuke HIGO, Takatoshi KIRIYAMA and Hirokazu SUGIYAMA
inaba.yoshiki.52s@st.kyoto-u.ac.jp

て繰返し載荷時の解析を実行した.

5. 繰返し載荷試験のシミュレーション

単調載荷時と同じモデルを用いて，繰返し試験の再現解析を実施した. 繰返し載荷の作用荷重最大値は, 対称性を考慮して実験の半分の 122.5kN である．載荷周期は 17 秒と 1.7 秒の 2 パターンで 100 回の載荷を実施した．載荷の最小値, 周期は明記されていなかったため, 本研究で独自に最小値を 0，周期は試験条件に合わせて設定した 17 秒を基本ケースとし，より非排水に近い条件を再現するため基本ケースの 1/10 の周期を設定した.

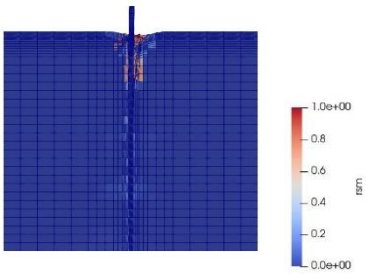
周期が 17 秒のケースでは，地表面付近で液状化に達しており，周期が 1.7 秒のケースでは G.L.-6.0m まで液状化に達していることが確認できる. さらに, 地盤表面において実験地を上回る結果が得られた．また，図 2(a)に長周期の載荷終了時の有効応力減少比，図 2(b)に短周期の 30 回載荷後の有効応力減少比分布図を示す．単調載荷時には液状化が認められなかったが，周期が 17 秒のケースでは間隙水圧が消散しきらず, 地盤表面の杭体から 7D の範囲まで液状化が発生した．実験結果よりもかなり大きな変位量が得られた原因は, 実験の載荷条件が明確でなく, 水圧が消散するのに十分な時間があった可能性が考えられる．図 2(a)，(b)を見ると載荷周期が 1.7 秒のケースでは，載荷周期が 17 秒のケースに比べて，全体が非排水に近い状態となり, 間隙水圧が蓄積し, 早い段階で液状化している．次に周期 17 秒のケースにおいて，液状化の懸念のない砂の構成式パラメータを探索した．ダイレイタンシー量 を直接制御するD_0，塑性せん断ひずみ量を制御するB_0をそれぞれ$D_0 = 0.5, B_0 = 6000$に変更した．それぞれの載荷終了時の有効応力減少比の結果を図 2(c)～(e)に，変更前後の液状化強度曲線を図 2(f)～(h)に示す.

6. 結論と今後の課題

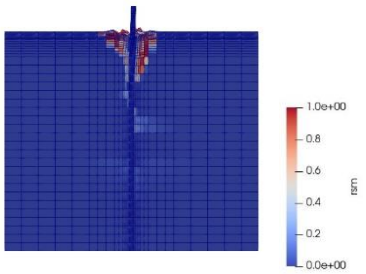
風荷重を想定した周期 17 秒の繰返し載荷を行うと，地表面付近の砂層が液状化に至り，地盤表面には 1.1m という大きな変位が生じることが分かった．非排水に近い条件を再現するための周期 1.7 秒のケースでは, 地表面だけでなく, 地中深くまで液状化に至り, 地盤にはさらに大きな変形が生じることが分かった．本研究では周面摩擦のない条件となっているので, 今後, 周面摩擦を考慮して計算をおこなうことで精度の高い解析結果を得られるか検証する．また，正確な変位量評価のために，地盤上部の要素分割をさらに細かくするなど試行し，検証する.

参考文献

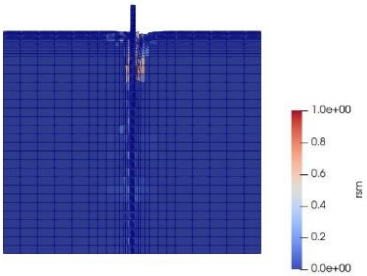
1) 日本道路協会：杭基礎設計便覧(H27 年 3 月版), pp137-138, 2015. 2) Cox, W. R.*et al.*: the Offshore Technology Conference, Houston, Texas,: OTC-2079-MS, May 1974. 3) Reese, L. C.*et al.*: the Offshore Technology Conference, Houston, Texas,: OTC-2080-MS, 1974.5.4) LIQCA 液状化地盤研究所 : LIQCA2D20・LIQCA3D20(2020 年版)資料,2022



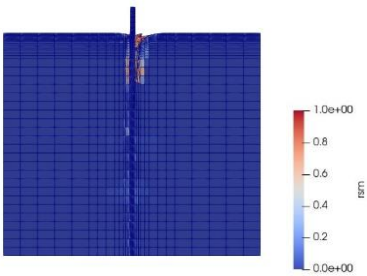
(a)有効応力減少比分布図(長周期，100 回載荷後)



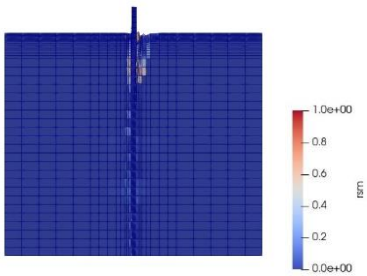
(b)有効応力減少比分布図(短周期，30 回載荷後)



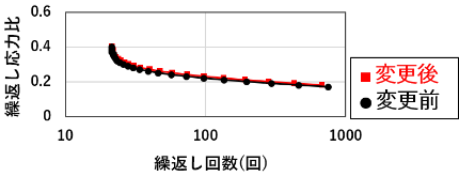
(c)有効応力減少比分布図
(D_0=0.50，100 回載荷後)



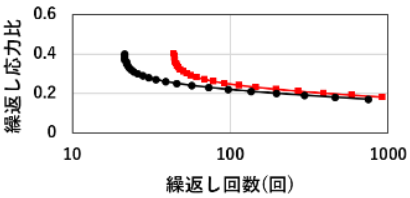
(d)有効応力減少比分布図
(B=6000，100 回載荷後)



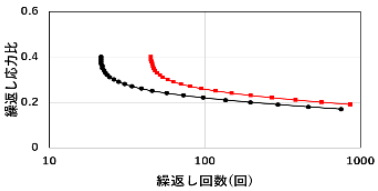
(e)有効応力減少比分布図
(D_0=0.50, B=6000，100 回載荷後)



(f)砂層 1,2 の液状化強度曲線(D_0=0.50)



(g)砂層 1,2 の液状化強度曲線(B=6000)



(h)砂層 1,2 の液状化強度曲線(D_0=0.50, B=6000)

図 2 有効応力減少比分布図，液状化強度曲線結果一覧