

繰返し荷重をうけるモノパイル基礎の三次元 FEM 解析事例

川崎地質株式会社 ○小林優起, 吉泉直樹, 白井太郎, 市川直樹

1. はじめに

現在、導入拡大が進む洋上風力発電は、風車構造物本体（タワー、ブレード、RNA）を海底地盤に設置した基礎で支える着床式が主流である。その中で主流となっているのが、「モノパイル基礎（MP）」と呼ばれる1本の鋼管杭を海底地盤に打設し、上部構造である風車本体を支える基礎形式である¹⁾。

ブレードやタワーが受ける水平外力（風や波）は、モノパイルを介して、モノパイル周辺地盤に伝わる。モノパイルの設計において重要となるのは、モノパイルと地盤の相互作用による水平地盤反力の評価である。

本稿では、3DFEM を取り入れたモノパイル設計法が主流になりつつある背景を踏まえ、日本で開発された FEM コード「LIQCA3D23²⁾」を使用した、繰返し水平荷重を受けるモノパイルの解析事例を紹介する。

2. 遠心模型実験によるモノパイルの挙動評価

「大村ほか, 2020」³⁾は相対密度80%の飽和豊浦砂の模型地盤上にモノパイル（以降、杭）を設置し、50Gの遠心場で種々条件の繰返し変位を与えその挙動を観察した。その結果、荷重条件によって杭周辺の過剰間隙水圧は繰返し回数の増加とともに上昇し、杭モーメント及び杭反力が低下したケースが報告されている。

3. LIQCA 解析モデル及びパラメータ

解析モデルを図-1に示す。パラメータは豊浦砂の土質試験結果を基本とし、硬化関数や規準ひずみ、ダイレイタンス係数は、液状化強度曲線や応力ひずみ関係、有効応力経路が試験結果を再現するように、パラメトリックスタディにより決定した。

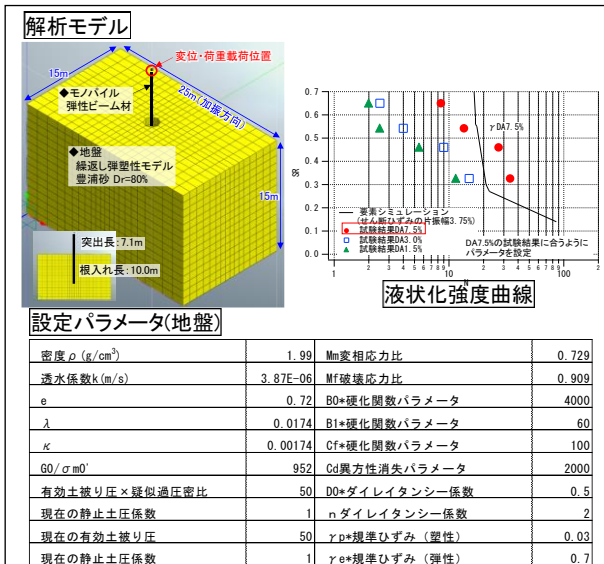


図-1 解析モデルと設定パラメータ

4. 定変位解析(遠心実験との比較)

(1) 荷重変位

定変位解析は、遠心実験のトレースとして、杭上部に140mm(実験スケールでは2.8mm)の変位を繰返し荷重するケースについて行った。なお、繰返し回数は20回とした。

(2) 定変位解析結果

定変位解析の結果、過剰間隙水圧比の上昇は実験に比べて遅く発揮された。また、図-2に示す通り、杭に発生する曲げモーメントは繰返し回数の増加に伴い低下する傾向がみられた。解析の4サイクル目付近で実験の1サイクル目の曲げモーメントに近い値となり、5サイクル目では実験と解析の曲げモーメントが概ね一致する。過剰間隙水圧の上昇が実験に比べて遅れていることを考慮すれば、曲げモーメントの上昇・低下傾向は実験結果と概ね一致する。

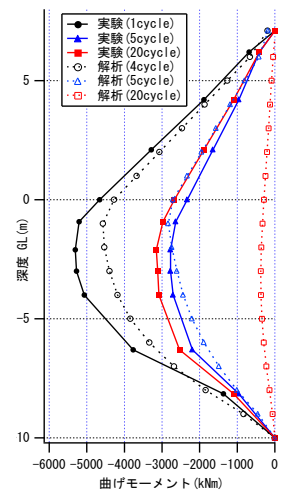


図-2 杭の曲げモーメント分布

5. 定荷重解析

(1) 荷重荷重及び振動数

定荷重解析は、杭上部に荷重する荷重と荷重波形の振動数を変化させ、表-1に示す5ケースについて行った。

表-1 解析ケース(定荷重解析)

CASE	上部荷重荷重(kN) (繰返し荷重)	振動数(Hz)	繰返し回数 (サイクル数)
1	1750	0.2	20
2	1250	0.2	20
3	650	0.2	20
4	650	0.1	20
5	650	0.5	20

(2) 定荷重解析結果

ここでは、表-1のうち荷重値の異なるCASE1~3について結果を述べる。地盤の過剰間隙水圧比は、いずれの荷重条件においても地表面付近では負圧となった。その他の領域では、繰返し回数の増加に伴い過剰間隙水圧比が徐々に上昇し、杭近傍では8~12サイクル目で1.0となる。杭根入れの中間深度付近では、過剰間隙水圧比が上昇しピークに達した後、低下傾向を示す(図-3)。

杭に発生する曲げモーメントは、繰返し回数の増加に伴い低下するとともに、モーメントが最大値となる深度

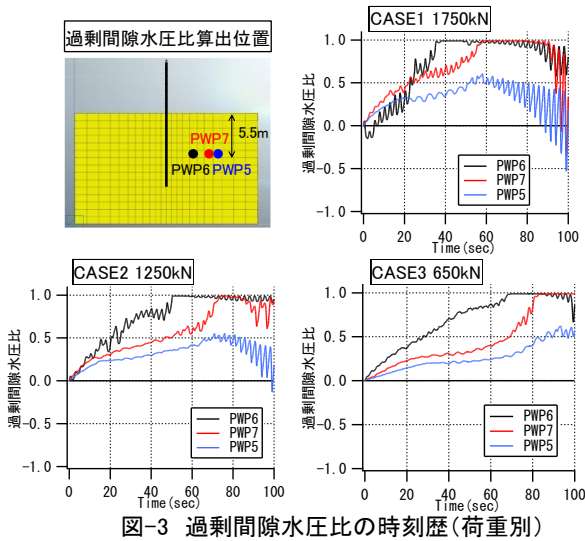


図-3 過剰間隙水圧比の時刻歴(荷重別)

が地表面に近づく傾向がある。各サイクルのモーメントピーク値は、いずれのケースにおいても5サイクル目以降概ね一定となる。

6. 水平地盤反力係数の算定

水平地盤反力係数は、地盤要素の有効応力 (kN/m^2) を節点の水平変位 (m) で除したものと算定した。水平地盤反力係数は、時間の経過に伴い徐々に低下し、載荷荷重によらず概ね一定の値に収束する (図-4)。また、載荷初期は杭根入れの中間深度付近で水平地盤反力係数が大きく、時間の経過につれ根入れ中間深度付近ではゼロとなり地表面付近と杭下端付近で大きな値となる (図-5)。

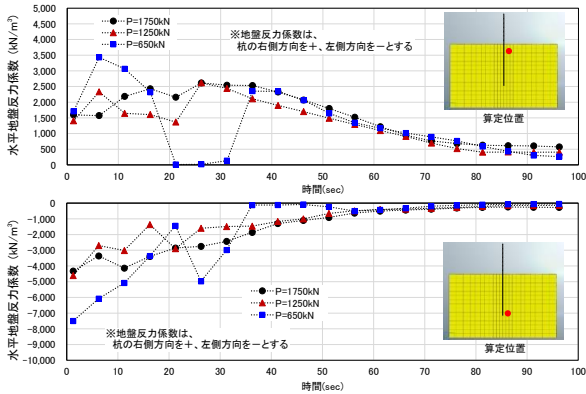


図-4 杭周辺の水平地盤反力係数の時刻歴

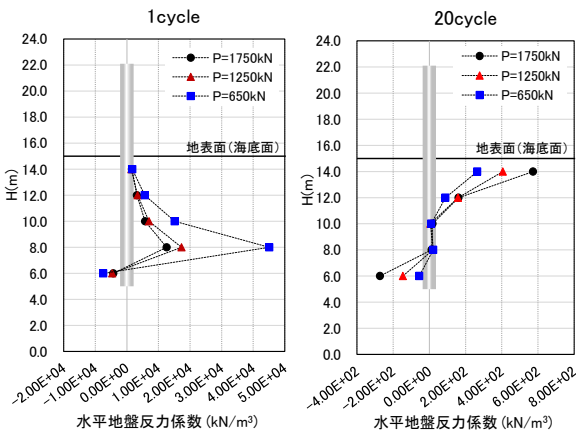


図-5 杭周辺の水平地盤反力係数(深度分布)

7. 振動数の違いによる比較

載荷荷重の振動数の違いによる挙動の変化を把握するため、表-1の CASE3~5について比較を行った結果、振動数が高いほど過剰間隙水圧比が上昇しにくく (図-6)、杭の水平変位量は小さい傾向を示した (図-7)。

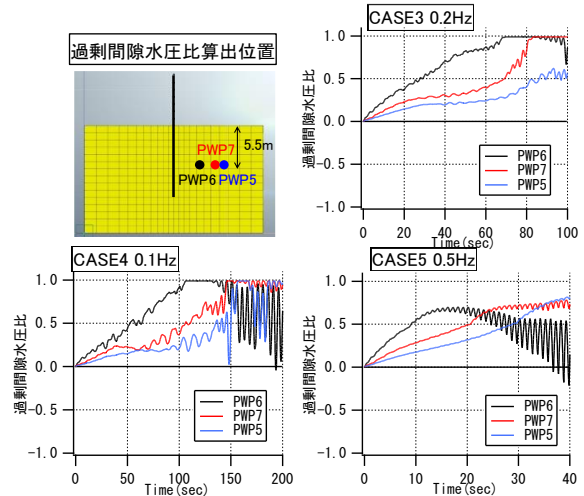


図-6 過剰間隙水圧比の時刻歴(振動数別)

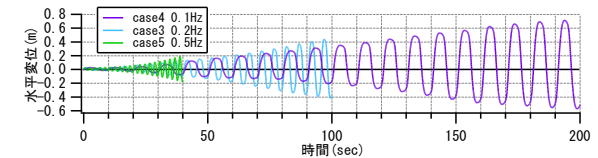


図-7 杭の水平変位(地表面+1.0m地点)

8. まとめ

- ①定変位条件では実験に比べて過剰間隙水圧の上昇は遅れるが、変位載荷による過剰間隙水圧の上昇とそれによる曲げモーメントの低下は実験を概ね再現できた。
- ②曲げモーメントは繰返し回数の増加に伴い低下するが、定荷重条件では5サイクル目以降ほぼ一定となった。
- ③載荷荷重の振動数が高い(短周期)ケースでは他のケースに比べて過剰間隙水圧の上昇が抑制され、杭に生じる水平変位も小さい。

今後は、実際の設計手法を想定し、これら三次元解析結果を杭-地盤相互作用モデルに反映させる手法等についても検討していきたい。

9. 謝辞

本研究の遂行にあたり、一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所 (京都大学名誉教授) 岡二三生先生に多くの助言を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

《引用・参考文献》

- 1) NEDO (2014) :NEDO 再生可能エネルギー技術白書, 第2版, p. 73.
- 2) 一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所 (2023) : LIQCA2D23・LIQCA3D23(2023年公開版)資料.
- 3) 大村直哉, 高橋章浩, 内藤歩, 小林孝彰, 蒲田幸徳 (2020) : モノパイルの繰返し水平載荷条件と周辺砂地盤の剛性に関する遠心模型実験, 第 55 回地盤工学研究発表会.