

繰返し荷重をうけるモノパイル基礎の三次元有効応力解析事例

川崎地質株式会社 ○市川 直樹, 吉泉 直樹, 白井 太郎, 小林 優起

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。

本稿では、三次元FEM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「FLIP ROSE 3D¹⁾」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。また、小林らが昨年度実施した「LIQCA 3D²³⁾」による解析結果²⁾との比較を行った。

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、載荷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. FLIP 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、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。

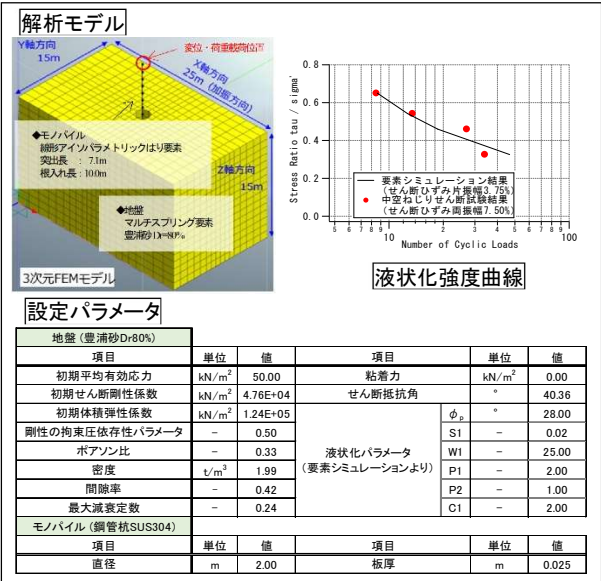


図-1 解析モデルと設定パラメータ

4. 定変位解析 (遠心実験との比較)

(1) 載荷変位

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）の変位を繰返し載荷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

実験及び解析における載荷点（杭上部）の荷重－変位関係を図-2に示す。なお、解析結果の荷重は、荷重相当としてせん断力（加振方向）を示したものである。実験では2サイクル目で荷重の大きな低減がみられ、以降ほぼ一定の荷重となる。実験の荷重－変位関係は、一般的にみられるようなスリッ形状を示し、解析でも同様の傾向が確認された。

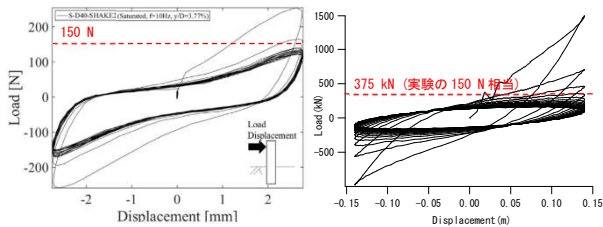


図-2 荷重-変位関係 (左: 実験、右 FLIP 解析)

図-3に示すモーメント分布図では、地盤の液状化と共に曲げモーメントの低下が見られる。5サイクル目では実験と両解析共に曲げモーメントが概ね一致する。FLIP 解析のモーメントの分布は、実験・LIQCA 解析と比較してピークがより深部になる傾向がみられる。

ただし、実験では5サイクル目以降徐々にモーメントが増加する傾向を示したが、解析では5サイクル目付近まで曲げモーメントが急激に低下した後、増加する傾向はみられなかった。

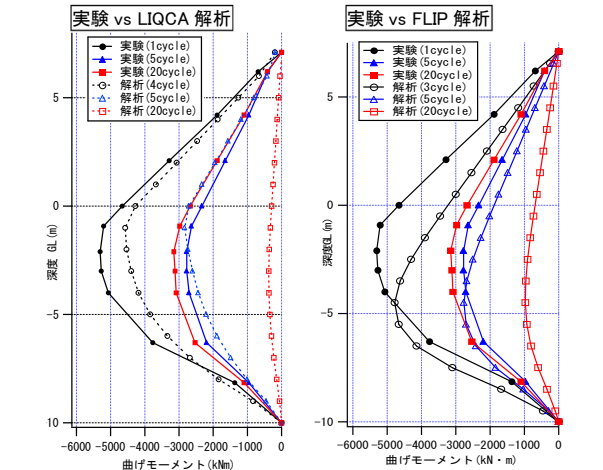


図-3 杭の曲げモーメント分布 (左: LIQCA、右 FLIP)

5. 定荷重解析

(1) 載荷荷重

定荷重解析は、杭上部に載荷する荷重を変化させ、表-1に示す3ケースについて行った。

表-1 解析ケース(定荷重解析)

CASE	上部載荷荷重(kN) (繰返し載荷)	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

(2) 定荷重解析結果

図-4に示す杭根入れ中間深度地盤の過剰間隙水圧比は、繰返し回数の増加に伴い徐々に上昇し、荷重値が大きく杭に近いほど上昇しやすくなっている。

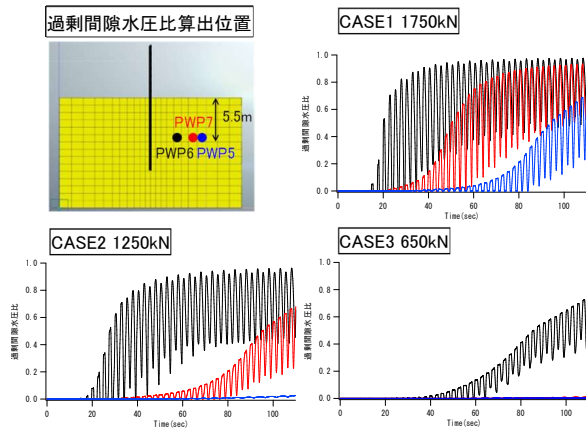


図-4 過剰間隙水圧比の時刻歴(荷重別)

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あるが、いずれの荷重条件においても8サイクル目以降はモーメントの低下がみられず、ほぼ一定となる(図-6 CASE3 三次元)。

6. 二次元解析との比較

二次元解析は、定荷重解析 CASE3の条件で実施した。地盤要素の奥行幅は、モノパイル径の2倍、2.5倍、3倍の3ケースについて行った(表-2)。

表-2 解析ケース(定荷重解析:二次元モデル)

CASE	上部載荷荷重(kN) (繰返し載荷)	地盤の解析 奥行幅(m)	杭に対する 地盤要素の 奥行幅
4	650	4	2倍
5	650	5	2.5倍
6	650	6	3倍

図-5に同荷重条件の三次元解析(CASE3)を含めた荷重載荷点(杭上部)における荷重-水平変位関係を示す。

繰り返しの載荷に伴い徐々に変位が増加するが、二次元解析の場合は奥行幅が大きいほど地盤の剛性は大きく評価されるため、杭上部はより小さい変形となっている。

CASE3の三次元解析は20サイクル目で0.85m程度の水平変位となり、二次元解析ではCASE4で0.70m程度と三次元に近い挙動となっている。

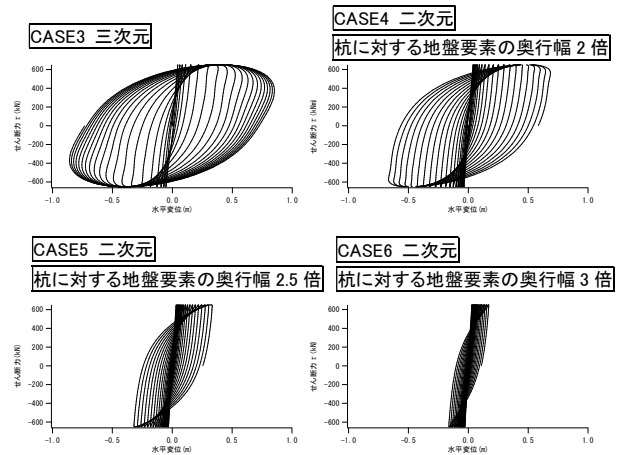


図-5 杭上部の荷重-水平変位関係

二次元解析の曲げモーメントは、三次元解析と比較していずれの奥行幅であってもほぼ同程度である(図-6)。

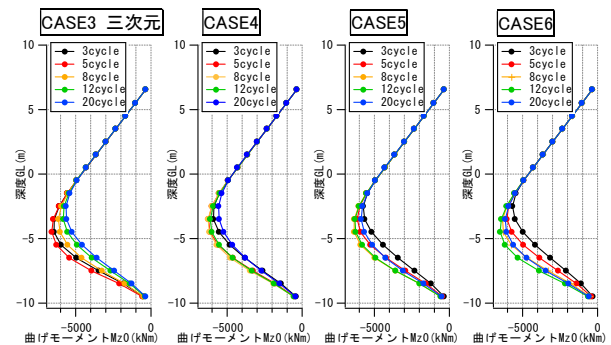


図-6 杭の曲げモーメント分布図

7. まとめ

- ①定変位条件では、両解析コードで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定荷重条件では、荷重が大きく杭近傍ほど過剰間隙水圧比が上昇しやすい傾向がある。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あるが、8サイクル目以降はほぼ一定となる。
- ③二次元解析との比較では、変位量・モーメント分布は解析幅杭径2倍ケースが三次元解析と近い結果となる。

今後は、実際の設計手法を想定し、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や要素間の排水の影響についても検討していきたい。

《引用・参考文献》

- 1) 一般社団法人 FLIP コンソーシアム (2023): FLIP ROSE 3D (Ver. 1.8) 取扱説明書。
- 2) 小林優起, 吉泉直樹, 白井太郎, 市川直樹 (2024): 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, 全地連技術フォーラム2024, 論文 No. C099。
- 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。