モノパイル基礎の水平抵抗評価のための遠心模型実験およびその再現解析

(株)大林組　　正会員　○小山宏人　栗本　卓　伊藤政人
正会員　　粕谷悠紀　高橋真一

１．はじめに

我が国において今後導入が加速する洋上風車のモノパイル基礎の設計を合理的に行うためには，水平載荷時の挙動の把握と挙動に則した解析モデルの設定方法が重要となる．今回，モノパイル基礎の縮小模型を用いて遠心場における水平載荷実験を行い，三次元静的全応力解析による再現解析を行った．

本報告では遠心模型実験およびその再現解析方法と結果について述べる．

２．遠心模型実験概要

実験の遠心加速度は 80g とした．**図 1** に実験模型及び計測機器配置図を示す．実験に用いた土槽の大きさは，L1830mm×B800mm×H550mm である．実物スケールのモノパイルはφ6.1m，根入れ長は 33m を想定し，基礎模型の寸法は**表 1** に示す通りとした．計測項目は，載荷点荷重，水平変位，基礎模型引張側および圧縮側のひずみである．

地盤は硅砂 7 号を用い，空中落下法により相対密度 Dr=80%の地盤を製作した．実験に用いた硅砂 7 号の物性値を**表 2** に示す．地盤作成後，土槽下部から粘性流体（メトローズ水溶液）を浸透させ飽和させた．飽和完了後，基礎模型を地盤上に配置し，上部から静的に荷重をかけることで地盤に貫入させた．

載荷は油圧ジャッキを用いた一方向単調載荷とし，変位速度 1.0mm/sec とした．

３．解析概要

解析方法は，実験同様 pushover 解析とし，解析コードには SoilPlus 大規模オプションを用いた．**図 2** に三次元 FEM 解析モデルを示す．解析モデルは実物スケールとし，地盤の大きさは L146m×B64m×H44m，モノパイルはφ6.1m×t120mm×根入れ L33m とした．ここで，地盤はソリッド要素，モノパイルはシェル要素とした．静的解析時の境界条件は，地盤底面は水平鉛直ともに固定，地盤側面の鉛直方向は自由，水平方向は固定とした．

地盤の構成モデルは弾塑性（モール・クーロン則）とし，c，φは三軸圧縮試験よりそれぞれ 12.5kN/m^2，

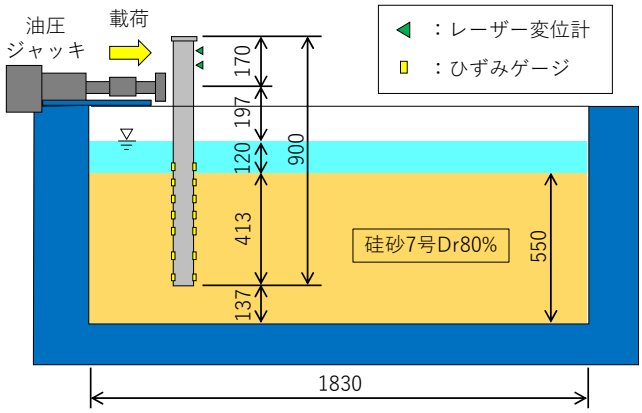

図 1　実験模型および計測機器配置図

表 1　モノパイルの実物大および模型寸法

	材質	寸法
実物大	鋼製	φ6.1m，t=120mm 根入れ長L=33m
実験模型	ステンレス製	φ76.3mm，t=1.5mm 根入れ長L=413mm

表 2　硅砂 7 号室内試験値

項目	記号	単位	数値
土粒子密度	ρ_s	g/cm^3	2.687
最大密度	ρ_{dmax}	g/cm^3	1.647
最小密度	ρ_{dmin}	g/cm^3	1.295
湿潤密度	ρ_t	g/cm^3	1.567
相対密度	Dr	%	80

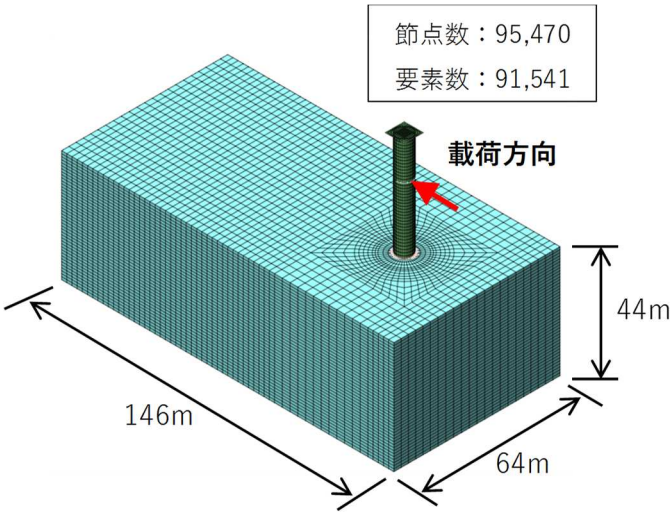

図 2　三次元 FEM 解析モデル図

キーワード　モノパイル基礎，遠心模型実験，全応力解析，水平載荷
連絡先　　〒108-8502　東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟（株）大林組　TEL 03-5769-1307

39.0° とした．また，地盤の変形係数は，三軸圧縮試験の拘束圧と変形係数の関係性から深度依存性を考慮し設定した．地盤の変形係数分布を**図 3** に示す．なお，モノパイルは線形弾性体とした．

モノパイル外面と地盤との間にはジョイント要素を配置し，面直角方向は引張による剥離，せん断方向耐力は最大周面摩擦度を適用した．

地盤に予め自重相当の初期応力を与え，模型実験の油圧ジャッキに相当する高さ（GL+25.44m）に最大 5.0m の強制変位を与えた．

4．解析結果

載荷点における P-δ関係について遠心模型実験と FEM 解析の比較を**図 4** に示す．実験結果は載荷初期段階から荷重の増加に伴い徐々に地盤の塑性化が進行し変形が大きくなる様子が見られ，FEM 解析においても比較的良好に再現ができている．

次に，今回のモデルにおいて想定される風荷重および波浪荷重を載荷点高さの水平力に換算した設計水平力載荷時の FEM 解析におけるモノパイル変位および地盤塑性状況を**図 5** に示す．設計水平力載荷時に地表面から根入れ長の 1/3 程度は地盤が塑性化し，地表面で約 200mm の変位が確認できる．

続いて，モノパイル引張側および圧縮側のひずみを**図 6** に示す．実験結果と FEM 解析でひずみピーク位置のずれはあるものの，概ね再現できている．

今回の実験では地盤剛性に対してモノパイルの剛性が大きく，モノパイル自体の変形が小さいため，再現するにあたり地盤変形係数設定の依存度が高かった．実務設計においても地盤調査から変形係数を適切に解析モデルに反映させることが最も重要であると考える．

5．まとめ

洋上風車のモノパイル基礎の遠心模型による水平載荷実験を実施し，三次元 FEM 解析でその再現を行い評価した．その結果，P-δおよびモノパイル根入れ部のひずみは比較的良好に再現できた．今後は，風荷重や波浪荷重を想定した繰返し影響についても検討を行う予定である．

【参考文献】1)小山宏人ら：スカートサクション基礎の水平抵抗に対する解析的評価（その 1：全応力解析），土木学会第 72 回年次学術講演会，pp.1003-1004，2017 年 9 月

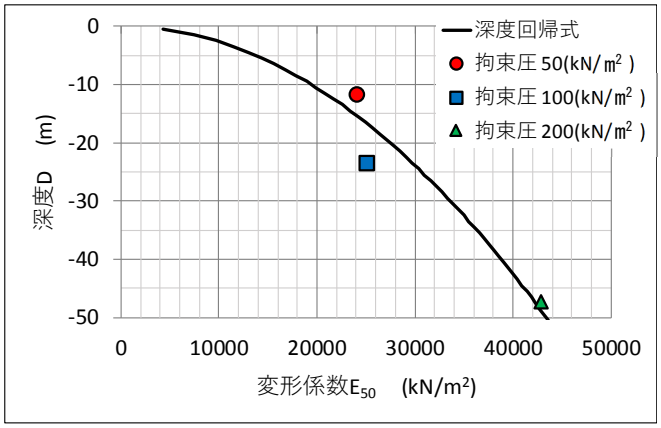

図 3　変形係数分布

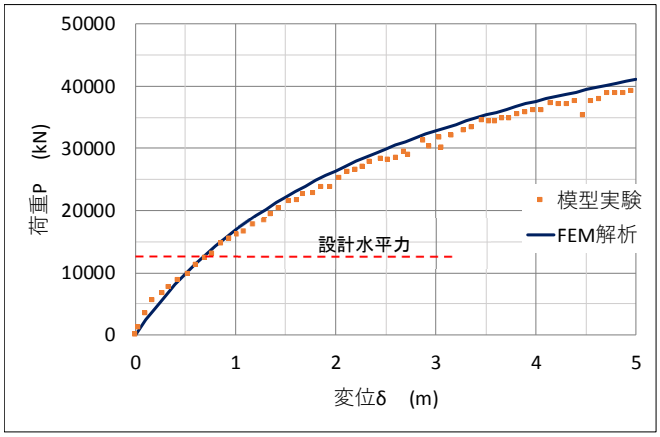

図 4　載荷点における P−δ関係

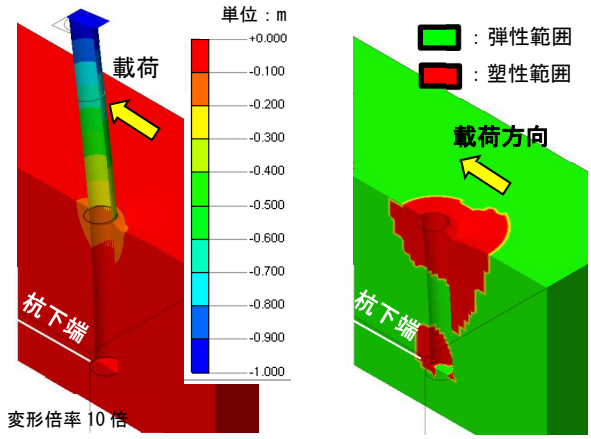

図 5　設計水平力時の変形図（左）塑性状況図（右）

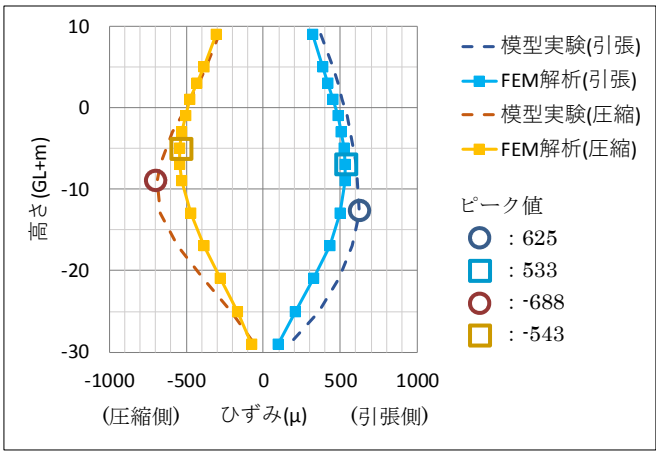

図 6　設計水平力載荷時のモノパイルひずみ