

砂地盤中の単杭の単調・繰返し載荷時の地盤ばね評価

清水建設 正会員 石井 やよい, 杉山 博一
桐山 貴俊, ○嶋田 健司
東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

本稿では、砂地盤中の着床式洋上風車のモノパイル基礎を対象とした単杭について、まず単調載荷に関する既往の研究結果の有限要素法による再現解析を報告し、次に繰返し劣化 p - y 曲線について API 基準を援用する簡易評価法について述べる。

2. 解析対象と解析方法

表 1 には、解析の対象とした単杭の諸元と砂地盤の相対密度を示す。紙面の都合により、地盤パラメータの詳細については各参考文献を参照されたい。有限要素法による解析は PLAXIS 3D および PLAXIS Monopile Designer を用いて排水状態の有効応力解析で行った。砂地盤の構成則には、PLAXIS の標準で、PISA プロジェクトでも実績[4]のある HSsmall (以下、HSs) モデルおよび我国で最も実績のあるモール・クーロン (以下、MC) モデルを用いた。Haouari and Bouafia (2020)の遠心実験 (20G) [1]では、ミニチュア CPT の先端抵抗 q_c から地盤のヤング率 E を次式[5]により求めている。

$$E = 3q_c \tag{1}$$

神田ら (1999) の遠心実験[2]でも同様に CPT が行われており、これらの再現解析 (50G を対象) でも式 (1)を用いた。PISA でも CPT が行われているが、式

(1)ではなく、文献に示された、CPT から推定されたせん断弾性係数を用いた。一方、Cox et al. (1974)の野外載荷試験[3]には、 N 値しか記載されていないため、本再現解析では今井の式[6]によって S 波速度を求めてせん断弾性係数を推定した。同野外載荷試験では深い部分に一部、粘土層が見られるが、杭の曲げモーメントの最大値は浅い部分で生じることから、本再現解析では簡単のため全層を砂として扱った。HSs では、Brinkgreve の経験式[7]を用いてパラメータを設定した。インターフェース要素の地盤パラメータは、MC では周辺の地盤特性に表 1 に示すインターフェース強度の低減係数により低減させ、HSs では内部摩擦角のみを低減させた。

3. 単調載荷の解析結果

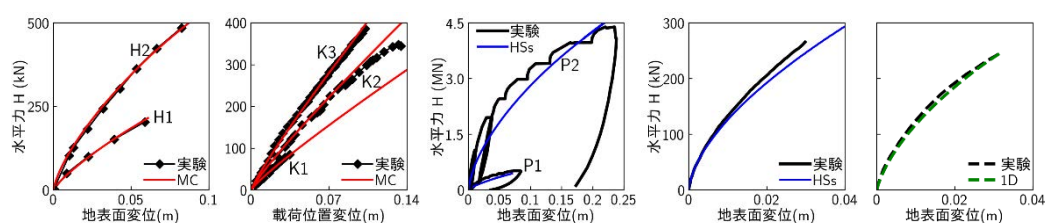
図 1(a)~(d)、図 2(a)~(d)には求めた荷重-変位関係と曲げモーメントの深度分布を示す。いずれのモデルでも良い再現結果が得られている。特に、神田ら (1999) の遠心実験の再現解析において、インターフェース強度の低減係数は、板厚が厚くなるに従い、野外載荷試験 (0.6 程度) に比べて小さく設定すると再現性が良くなる傾向が見られた。これは、滑面杭を用いる遠心実験では、地盤反力が十分に伝達されないことと、杭の板厚が厚くなる程、杭の変形が小さく、

表 1 単調載荷の再現解析の対象とした単杭の諸元と砂地盤の相対密度

出典	Haouari and Bouafia (2020)[1]		神田・竹村・日下部 (1999)[2]			Cox et al.(1974)[3]	PISA[4]	
実験／試験	遠心実験 (20G)		遠心実験 (50G)			野外試験		
Case No.	H1	H2	K1	K2	K3	C	P1	P2
L/D	10	5.56	27			34.4	8	5.25
杭径 D(m)	0.5	0.9	0.5			0.61	0.762	2
根入れ長 L(m)	5	5	13.5			21	6.02	10.57
板厚 t(mm)	21.7	44.8	10	25	50	9.53	25	38
砂の相対密度(材料)	92% (Le-Rheu 砂)		85% (豊浦砂)			45～100%	75%, 100%	
構成則 (本解析)	MC		MC			HSs	HSs	
インターフェース強度の低減係数	0.45		0.6	0.3	0.2	1	1	

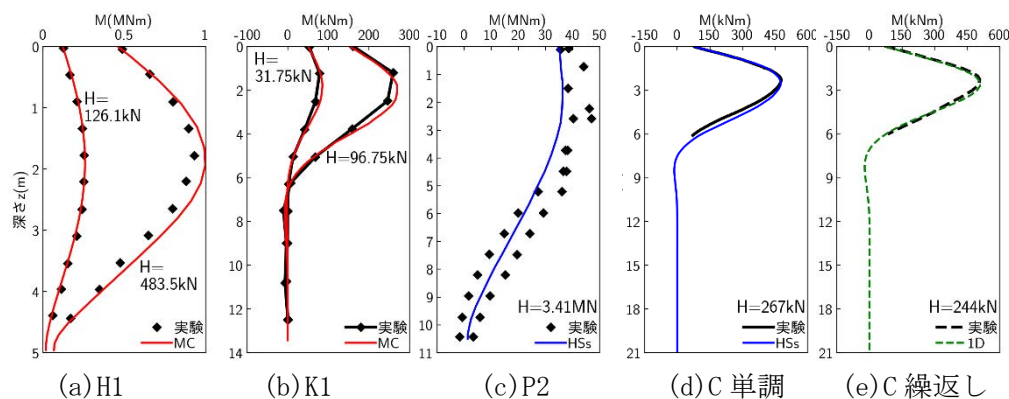
キーワード 着床式洋上風車, モノパイル, 地盤ばね, 繰返し載荷, 有限要素法

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3 丁目 4-17 清水建設株式会社技術研究所 TEL 090-2728-9871



(a) H1, H2 (b) K1, K2, K3 (c) P1, P2 (d) C 単調 (e) C 繰返し

図1 荷重－変位関係の既往の载荷試験と本再現解析の比較



(a) H1 (b) K1 (c) P2 (d) C 単調 (e) C 繰返し

図2 杭の曲げモーメントの深度分布

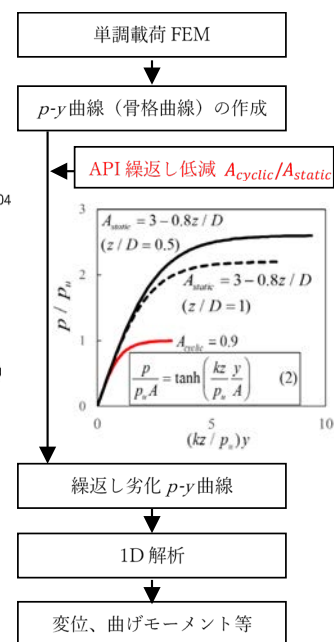


図3 地盤繰返し劣化を考慮した単杭の応答評価

インターフェースにおける杭と砂の接触力が小さくなることが考えられる。実際、Case H1 および H2 は、短杭の遠心実験であるものの、杭の表面に砂を接着して粗面とし、かつ、杭をジャッキを用いて貫入することで、より実機に近い状態を再現しているため、野外载荷試験に近いインターフェース強度の低減係数でもよい再現性が得られている。以上のように、杭の三次元幾何学的効果（短杭効果）は遠心実験でも杭の境界条件を適切に設定した FEM により考慮できることを示した（図 1(a)～(d), 図 2(a)～(d)）。

4. 単杭の繰返し劣化 p-y 曲線の簡易評価法

以下、本稿では、繰返し劣化 p-y 曲線を、図 3 に示すように、FEM で求めた p-y 曲線の骨格曲線に、下記の API 基準の繰返し低減係数を乗じて評価する方法を提案する。式(2)で表される API 基準[8]の p-y 曲線は、 p 乗数=y乗数=A（単調载荷： A_{static} 、繰返し载荷： A_{cyclic} ）である。つまり、繰返し载荷の p-y 曲線は A_{cyclic}/A_{static} の相似比で単調载荷の p-y 曲線を縮小したものである（図 3）。この相似比を繰返し低減係数とする。因みにこの方法では、p-y 曲線の初期勾配（すなわち初期地盤剛性）は繰返しに依存しない。

図 1(e)、図 2(e)では、この方法で繰返し劣化 p-y 曲線を評価した 1D 解析（Winkler モデル）によって、長

杭の野外载荷試験が再現できることを確認した。

5. まとめ

既往の砂地盤中の単杭の単調载荷に対して再現解析を実施し、以下の結果を得た。まず、遠心実験の場合に、CPT 先端抵抗で地盤のヤング率を評価することにより、モール・クーロンモデルでも地盤変位の非線形性の弱い領域においてよい再現結果が得られた。また、インターフェース強度の低減係数は、杭の表面粗度や板厚により大きな影響を受けるため、適切に設定することが重要であることを示唆した。次に、杭の三次元幾何学的効果は有限要素法で、繰返し劣化効果は API 繰返し劣化低減係数により評価する単杭の p-y 曲線を用いた 1D 解析法を示し、長杭に関して提案法の有効性を示した。

謝辞 JIP テクノサイエンス株式会社の竹原和夫氏、山口清道氏には PLAXIS 3D の解析方法についてサポートいただき、謝意を表します。

参考文献 [1] Haouari and Bouafia(2020), Centrifuge Modelling and Finite Element Analysis of Laterally Loaded Single Piles in Sand with Focus on P-Y Curve, [2] 神田・竹村・日下部(1999), 遠心模型実験による砂地盤中の単杭の p-y 関係の測定, [3] Cox et al.(1974), [4] Minga and Burd(2019), Validation of the PLAXIS MoDeTo 1D model for dense sand, [5] USSR ガイドライン, [6] 今井・殿内 (1982), [7] Brinkgreve et al.(2010), Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands, [8] API(2011).