

15MW モノパイル式洋上風車基礎の地盤ばね設定に関する検討

大成建設(株) 正会員 ○内藤 将志 笠井 康裕 仁井田 将人 小尾 博俊

1. はじめに

モノパイル式洋上風車基礎の設計においては、杭を梁、地盤をばねにモデル化して解析することが一般的である。洋上の杭基礎に関する地盤ばねの設定方法については、海外では API 指針¹⁾、国内では港湾基準等に示されている。しかし、API 指針による地盤ばねはモノパイル基礎のような大口径杭に適用した際に、実際の挙動を必ずしも再現しないことが PISA プロジェクト²⁾など近年の研究で指摘されており、また、港湾基準等の国内指針は $3/\beta$ (β は杭の特性値) 以上根入れされていない杭には適用できないなどの制約がある。そのため、モノパイル式洋上風車基礎の地盤ばねは 3次元 FEM 解析を踏まえて設定することが実務・研究双方の分野で行われている。

そこで、既往の実大水平載荷試験の再現解析として実施した予備検討を基に、15MW 風車を想定したモノパイル基礎 3次元 FEM 解析モデルの作成および解析を実施し、API 指針による地盤ばねを設定した 1次元梁ばねモデルと比較しての評価を行った。

2. 3次元 FEM 解析モデル

15MW 風車を想定した 3次元 FEM 解析を実施するにあたり、風車タワー基部以下のモノパイル杭基礎—地盤系をモデル化した 3次元解析モデル(1/2 モデル)を作成した。設定した条件を以下に示す。

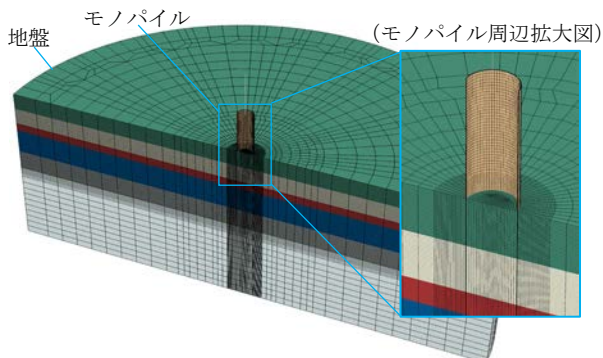


図1 3次元 FEM 解析モデル

2.1. 地盤条件

検討対象サイトの地盤条件を表 1 に示す。本条件は、国内を想定した仮想サイトとして設定した。

表 1 地盤条件

土層	下端深度 (m)	層厚 (m)	N 値	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (kN/m ³)	γ 入力値 (kN/m ³)	内部摩擦角 ϕ (deg)	膨張角 ϕ (deg)	粘着力 C (kN/m ²)
S1	10	10	5	0.25	18	7.9	33	3	0
C1	20	10	15	0.4	16	5.9	0	0	90
S2	25	5	15	0.25	16	5.9	33	3	0
C2	40	15	15	0.4	15	4.9	0	0	90
S3	100	60	50	0.25	17	6.9	36	6	0

2.2. 杭諸元

杭諸元を表 2 に示す。なお、杭仕様は IEA Wind Task 37 15MW³⁾のモノパイル基礎を参考とした概略検討を踏まえ設定した。

表 2 杭条件

杭外径 (m)	杭板厚 (mm)	杭根入れ長 (m)	杭突出長 (m)
10	110	50	50

2.3. FEM 解析条件

本検討は汎用 FEM 解析プログラム Abaqus を使用して実施した。地盤は 8 節点ソリッド要素としてモデル化し、材料非線形特性は Mohr-Coulomb とした。杭体は簡単のため、海底面からの突出長 25m より上側を梁要素、下側はソリッド要素としてモデル化し、荷重を伝達できるよう剛梁多点拘束によって接続した。また、材料特性は線形とした。杭の周面および底面の杭—地盤間境界条件は接触として定義している。なお、上記の FEM 解析条件は予備検討として実施した、PISA²⁾および柏らの研究⁴⁾における実大水平載荷試験の再現解析結果を踏まえ設定したものである。

個別に検討を行った内容に関して、以下に示す。

2.3.1. 地盤初期剛性の設定に関する検討

本検討における地盤弾性係数 E は柏らの研究⁴⁾を参考に、建築基礎構造設計指針⁵⁾で示される 700N の α 倍 (α は実数) として設定する。 α の値を設定するにあたっては、予備検討に使用した砂質土単一土層の実大水平載荷試験を対象とした再現解析を実施した。実験値および解析値の整合度の評価には、PISA プロジェクト中で用いられた評価指標 η を適用した。両解析モデルの整合度 η の最大値をとる α の平均値として、 $\alpha=12$ を採用した。

キーワード 洋上風力 モノパイル 地盤ばね 3次元 FEM API
連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 土木本部 土木設計部 洋上風力設計室 TEL 03-6882-0792

2.3.2. 要素サイズに関する検討

解析モデルの要素サイズが応答に与える影響を把握するため、杭応答に与える影響が大きいと考えられる杭周辺の要素サイズを変更し、ケーススタディを実施した。結果として、半円を36分割し、要素辺長を0.37m程度以下とした場合に、杭頭反力に対応する海底面水平変位が収束することを確認した。以上を踏まえ、0.37mを要素サイズの基準とした。

3. 1次元梁ばねモデル

前章で実施した3次元FEM解析によるモノパイル基礎の応答と比較するため、同じ条件で1次元梁ばねモデルを作成した。地盤および杭の条件は前章と同一とし、設定する地盤ばねはAPI指針およびそのP-Yカーブにおけるばね反力Pに k_P を、変位Yに k_Y をそれぞれ乗じて補正したものとする(k_P および k_Y は任意の実数)。

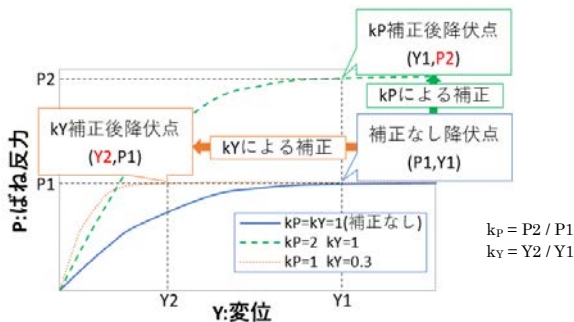


図2 係数 k_P および k_Y による地盤ばね補正概念図

4. 3次元FEM解析と1次元梁ばねモデルの比較

4.1. 荷重ケースの設定

2章および3章で作成した解析モデルに対して、IEA15MW, ULS(終局限界状態)とFLS(疲労限界状態)に対応するケースの荷重値を設定し静的に载荷した。なお、1次元梁ばねモデルの解析には汎用FEM解析プログラムTDAPIIIを使用した。

表3 入力荷重

荷重ケース	地盤ばね算定用荷重値	
	水平力 H_{tb} (kN)	曲げモーメント M_{tb} (kN·m)
① FLS (DLC1.2)	3,000	40,000
② ULS (DLC6.1)	23,000	392,000

4.2. 比較結果

3次元FEM解析および1次元梁ばねモデルによる応答の比較を行った。結果として、補正なしAPI指針による地盤ばねは地盤剛性を過小評価することを確認した。また、 $k_P=1.1$ とした場合にULS, $k_P=1.6$ とした場合にFLSで3次元FEM解析と整

合すること、 $k_P=1, k_Y=0.6$ として補正した場合にはULSおよびFLS双方の荷重ケースで整合することを確認した。

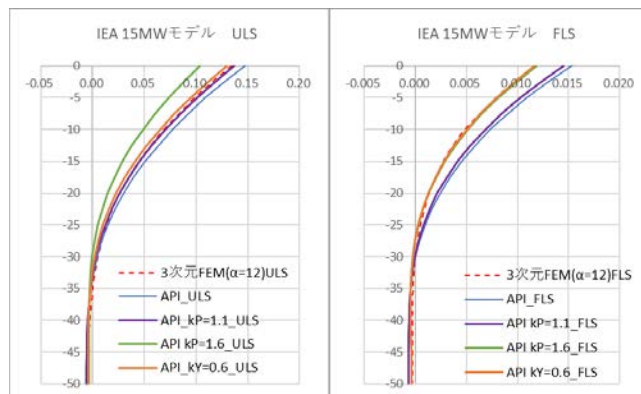


図3 水平変位の深度分布の比較

表4 地表面水平変位量(対3次元FEM解析比)の比較

1次元梁ばねモデル地盤ばね		1D/3D	
		ULS	FLS
a	$k_P=k_Y=1$ (補正なし)	1.09	1.31
b	$k_P=1.1, k_Y=1$	1.02	1.24
c	$k_P=1.6, k_Y=1$	0.77	1.01
d	$k_P=1, k_Y=0.6$	0.97	1.00

5. まとめ

本研究では15MW風車の搭載を想定した洋上風力モノパイル基礎の3次元FEM解析を実施し、1次元梁ばねモデルによる応答と比較した。結果として、以下の成果を得た。

- 地盤の初期剛性および要素サイズに関する検討を行い、3次元FEM解析の精度を高めた。
- API指針による地盤ばねが、3次元FEM解析と比較して地盤剛性を過小評価することを確認した。
- API指針による地盤ばねのP-Yカーブを補正することで、1次元梁ばねモデルの応答が3次元FEM解析結果に近づくことを確認した。

参考文献

- 1) American Petroleum Institute (API), API Geotechnical and Foundation Design Considerations, Recommended practice 2GEO first edition, 2011
- 2) Taborda, D. M. G., Zdravkovic, L., Potts, D. M., Burd, H. J., Byrne, B. W., Gavin, K. G., Housby, G. T., Jardine, R. J., Liu, T., Martin, C. M. & McAdam, R. A. Finite element modelling of laterally loaded piles in a dense marine sand at Dunkirk, 2019
- 3) IEA Wind TCP Task 37, Definition of the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine Technical Report, 2020
- 4) 柏 尚稔, 勝二理智, 林 康裕, 砂質地盤における杭-地盤系の強非線形性を考慮した群杭の杭頭水平地盤ばね評価手法, 2010
- 5) 日本建築学会, 建築基礎構造設計指針, 2020