

水平荷重を受けるモノパイル基礎の 1 次元骨組解析と 3 次元 FEM 解析による検証*

A study of laterally loaded monopile foundation using 1D beam models and its validation with 3D FEM analysis

中村 俊介**

Shunsuke NAKAMURA

松本 陽介**

Yosuke MATSUMOTO

甲斐 郁寛***

Ikuhiro KAI

飯田 芳久***

Yoshihisa IIDA

石原 孟****

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ¹⁾では、国内におけるモノパイル式洋上風車の基礎設計における課題として、多様な海底地質構造に対応する地盤ばねの評価方法の開発があげられている。

モノパイル基礎の地盤ばねに関する先行研究として、欧州の PISA プロジェクトでは、砂質土地盤と粘性土地盤における地盤ばねの評価手法（以下、PISA 1D モデルと称す）が提案されている²⁾。PISA 1D モデルは、3 次元 FEM 解析で得られた地盤反力曲線を表す関数にある複数のパラメータをフィッティングすることにより作成され、1 次元骨組解析モデルに組み込まれる。このモデルは、Bentley 社が開発したモノパイル基礎の最適化設計ツール PLAXIS Monopile Designer³⁾にも組み込まれて実用化されている。PLAXIS Monopile Designer に組み込まれた PISA 1D モデルは、Minga and Burd^{4), 5)}により砂質土地盤と粘性土地盤を対象とした検討例が示されている。

しかし、砂質土地盤や粘性土地盤以外に PISA 1D モデルを適用して検証した事例はなく、このような場合には PISA 1D モデルの適用可否を慎重に判断する必要がある。

そこで、本研究では、欧州で実用化されている PISA 1D モデルと、日本で広く使われているトリリニアモデルを、洋上風車建設候補海域近傍の凝灰質砂岩層（軟岩）を対象として行われた静的水平載荷試験⁶⁾に適用し、2 つのモデルの妥当性を検証した。

2. 検討方法

2.1 静的水平載荷試験の概要

静的水平載荷試験は、地盤工学会基準⁷⁾に準拠して多サイクルで実施した。鋼管杭の諸元は、直径 1.6m、板厚 40mm、根入れ長 10.1m である。鋼管杭には変位計、傾斜計、ひずみゲージを設置し、計測データから断面力の深度分布や変位の深度分布等を推定した。詳細は松本ら⁸⁾を参照されたい。

2.2 3 次元 FEM 解析の概要

3 次元 FEM 解析には PLAXIS 3D⁹⁾を用いた。3 次元 FEM 解析のモデルを図 1 に示す。解析モデルの作成は、PLAXIS Monopile Designer のモデル自動作成機能³⁾を活用した。鋼管杭をシェル要素、地盤をソリッド要素、杭と地盤の接触をインターフェイス要素でモデル化した。モデルは対称性を考慮して半断面モデルとした。地盤モデルの範囲は、荷重の荷重方向を杭径の 12 倍、荷重直角方向を杭径の 4 倍とした。

鋼管杭のシェル要素は線形弾性を仮定した。シェル要素のヤング率は、計測器保護のために設置した溝形鋼の曲げ剛性を考慮し、鋼材のヤング率を約 1.04 倍した 213,000,000kN/m²とした。また、ポアソン比は一般的な 0.3 とした。

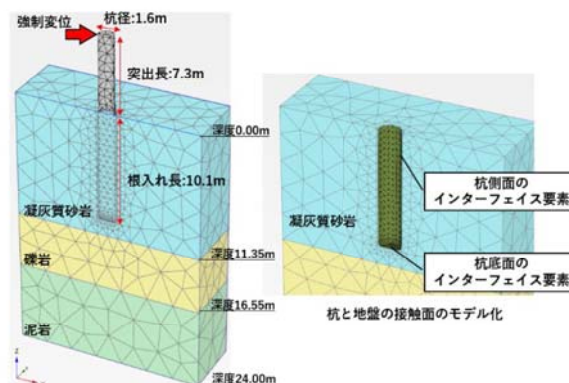


図 1 3 次元 FEM 解析のモデルの鳥瞰図

* 令和5年12月1日第45回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 東電設計 (株) 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12

*** 会員 東京電力リニューアブルパワー (株)

**** 会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

地盤のソリッド要素は、ボーリング調査に基づき上層から凝灰質砂岩、礫岩、泥岩で構成した。材料モデルは、凝灰質砂岩を HS small とし、礫岩と泥岩を Mohr-Coulomb とした。HS small は、ひずみの変化と拘束圧の変化に伴い剛性が変化する Hardening soil モデルに、小ひずみによる剛性と除荷・再載荷時の非線形挙動を取り入れた材料モデルである⁸⁾。

HS small でモデル化した凝灰質砂岩の主な入力物性値を以下に示す。水中単位体積重量 γ_t は密度検層結果から海水の比重を減じて 6.6kN/m^3 とした。粘着力 c 、内部摩擦角 φ は圧密排水条件の三軸圧縮試験から 203.9kN/m^2 、 32.40° とした。変形係数 E_{50}^{ref} は標準貫入試験で計測された代表深度($n=2$)の平均 N 値より $E=2,800\text{N}^{\frac{1}{2}}$ の関係式から求めた $75,600\text{kN/m}^2(\text{N 値}=27)$ とした。初期せん断剛性 G_0^{ref} は PS 検層から $G_0=\rho V_s^2$ の関係式⁷⁾で求めた $300,300\text{ kN/m}^2$ ($V_s=420\text{m/s}$) とした。地盤の剛性の深度分布は、式(1)と式(2)に従い拘束圧とせん断強度の関数で考慮される⁸⁾。ここで、 p^{ref} は 100kPa 、 m は 0.5 とした。なお、変形係数を評価するために、標準貫入試験、三軸圧縮試験、孔内水平載荷試験を実施したが、本研究では風力発電設備の地盤調査において実施されることの多い標準貫入試験の結果を用いた⁹⁾。この方法は CPT の先端抵抗により変形係数を評価する Obrzud と Truty¹⁰⁾の方法に近い。標準貫入試験の N 値は、他の試験と同程度の深度の結果である。各試験から求めた変形係数を表 1 に示す。

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3' \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m$$

(1)

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3' \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m$$

(2)

表 1 各試験で求めた変形係数の比較

変形係数	N値 (2800N)	三軸圧縮 試験	孔内水平 載荷試験
深度(m)	En(MN/m2)	E50(MN/m2)	Eb(MN/m2)
-2.25	84.0	78.7	95.7
-9.25	67.2	79.7	96.1
平均	75.6	79.2	95.9

PLAXIS Monopile Designer では鋼管杭と地盤の界面のせん断強度のデフォルト値 ($c=0.1\text{kN/m}^2$, $\varphi=29^\circ$) が Jardine ら¹¹⁾に基づき提案されているが、必要に応じて変更することもできる。本研究では接触面のインターフェイス要素のせん断強度の設定方法を提案し、以下に示す。接触面のインターフェイス要素は、強度特性 (c , φ) を変更した2つのケース (以下、ケース_3D 不攪乱、ケース_3D 再構成とする) を設定した。ケー

ス_3D 不攪乱では、接触面の強度は隣接する凝灰質砂岩の物性値と同様であると仮定し、杭側面と杭底面のどちらにおいても $c=203.9\text{kN/m}^2$, $\varphi=32.4^\circ$ とした。ケース_3D 再構成では、杭の打設による周辺地盤の乱れ¹²⁾を想定して、杭側面における接触面は再構成試料の三軸圧縮試験より得られた強度特性 $c=3.74\text{kN/m}^2$, $\varphi=35.49^\circ$ とした。杭底面は乱れていないことを想定して、凝灰質砂岩層と同様の値($c=203.9\text{kN/m}^2$, $\varphi=32.4^\circ$) を設定した。両者ともに引張強度は 0kN/m^2 とし、強度特性に関するパラメータ以外は凝灰質砂岩層のものと同一とした。解析は、地盤の自重解析、鋼管杭のプッシュオーバー解析の順に行った。プッシュオーバー解析は、杭頭に強制変位を入力した。

2.3 1次元骨組解析の概要

1次元骨組解析は、PISA 1D モデルとトリリニアモデルの2種類の地盤ばねモデルで行った。鋼管杭の諸元は3次元 FEM 解析と同様である。地盤ばねは、いずれのモデルも地盤の水平反力分布に対応する p - y ばね、地盤と杭界面に作用する鉛直方向せん断摩擦力に対応する m - θ ばね、杭の底面水平力に対応する S - y ばね、杭の底面モーメントに対応する M - θ ばねの4種類を考慮した。なお、これらの地盤ばねは、ケース_3D 再構成の3次元 FEM 解析結果に基づき作成した。

PISA 1D モデルの解析は、PLAXIS Monopile Designer の組み込み機能を用いて行った。この組み込み機能により、PLAXIS 3D による3次元 FEM 解析結果と PLAXIS Monopile Designer に予め入力した地層の物性値を基に、PISA 1D モデルの地盤ばねを自動で作成できる。また、組み込み機能により1次元骨組モデルのプッシュオーバー解析を行うことができる。

PLAXIS Monopile Designer では3次元 FEM 解析で得られた地盤反力曲線を基に、砂質土の場合は $s1$ ~ $s24$ の24種類、粘性土の場合は $c1$ ~ $c28$ の28種類のパラメータが算出される。このパラメータは式(3)~式(5)の係数(a , b , c)のいずれかに代入される。また、式(3)~式(5)の x は z/D_{out} , z/L , L/D_{out} の3種類のパラメータがあり、 z は地表面からの深度、 D_{out} は杭の外径、 L は杭の根入れ長である。式(3)~式(5)により、 $\overline{y_u}$ (正規化された各地盤反力の上限値、 $\overline{p_u}$, $\overline{m_u}$, $\overline{S_u}$, $\overline{M_u}$)、 $\overline{x_u}$ (地盤反力の上限値に達したときの正規化された変位、 $\overline{y_{pu}}$, $\overline{\theta_{mu}}$, $\overline{y_{Hu}}$, $\overline{\theta_{Mu}}$)、 n (曲線形状を決める変数、 n_p , n_m , n_H , n_M)、 k (初期勾配を決める変数、 k_p , k_m , k_H , k_M)の計16個のパラメータが算出される³⁾。そして、この16個のパラメータを式(6)~式(9)に代入することにより、PISA 1D モデルの地盤ばね

の骨格曲線が算出される.

$$y = b \quad (3)$$

$$y = a \cdot x + b \quad (4)$$

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} + c \quad (5)$$

$$\bar{y} = \bar{y}_u \frac{2c}{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}; \bar{x} \leq \bar{x}_u, \bar{y} = \bar{y}_u; \bar{x} > \bar{x}_u \quad (6)$$

$$a = 1 - 2n \quad (7)$$

$$b = 2n \frac{\bar{x}}{\bar{x}_u} - (1 - n) \left(1 + \frac{\bar{x}k}{\bar{y}_u} \right) \quad (8)$$

$$c = \frac{\bar{x}k}{\bar{y}_u} (1 - n) - n \frac{\bar{x}^2}{\bar{x}_u^2} \quad (9)$$

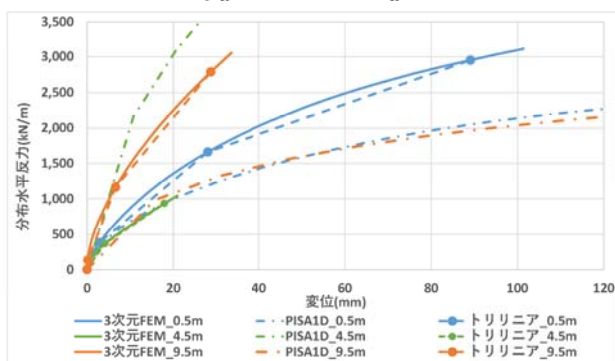


図 2 深度 0.5m, 4.5m, 9.5m 地点の p-y 曲線

PLAXIS Monopile Designer では, 砂質土地盤の場合には, 地盤の物性情報として, 層中心における有効単位体積重量 γ' , 初期せん断剛性 G_0 , 有効内部摩擦角 ϕ' , ダイラタンシー角 ψ , 静止土圧係数 K_0 を入力する. 本研究では, $\gamma' = 6.6 \text{ kN/m}^3$, $G_0 = 300,300 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 32.4^\circ$, $\psi = 2.4^\circ$, $K_0 = 0.429$ を入力した. PISA 1D モデルの地盤ばねを求める際には, これらの値に基づき正規化が行われる. この時, 地盤の剛性の深度分布は式(2)に基づき設定されるが, PLAXIS Monopile Designer の砂質土地盤モデルでは粘着力 c を入力することができないことから, 凝灰質砂岩層に粘着力 c を考慮している 3 次元 FEM モデルと地盤の剛性の深度分布が異なる.

トリリニアモデルの解析は, 土木構造物の解析・設計用プログラム Engineer's Studio を用いて行った. トリリニアモデルの地盤ばねは, 3 次元 FEM 解析で得られた地盤反力曲線に対して, 任意の 3 点を指定して求めた.

代表深度の分布水平地盤ばね(p-y)の比較を図 2 に示す. PISA 1D モデルの地盤ばねは, 3 次元 FEM より算出した地盤ばねと大きく乖離した. 3 次元 FEM より算出した地盤ばねは, 地表面付近 0.5m から杭の回転中心約 6m までの深度にかけて勾配 (例えば, 4.5m) が小さくなり, 回転中心以深 (例えば, 9.5m)

では深度の増加に伴って勾配が大きくなる傾向がある. 一方で, PISA 1D モデルは地表面付近から杭の回転中心にかけて勾配が大きくなり, 回転中心以深では深度の増加に伴って勾配が小さくなった. 両者が乖離した原因として, 式(4)でフィッティングされる PISA 1D モデルの深度分布の形状が今回の地盤には適さなかったことや, 前述した地盤の剛性の深度分布が 3 次元 FEM モデルと PISA 1D モデルの正規化時に異なること等が推察される.

3. 検討結果

3.1 3 次元 FEM 解析の結果

試験結果と 3 次元 FEM 解析結果より得られた地表面における荷重変位曲線を図 3 に示す. 図中の赤丸で示す荷重 2,765kN 付近で鋼管杭が降伏したが, 解析の杭は線形弾性を仮定しているため, この荷重以下の範囲で以降の比較を行う. ケース_3D 不攪乱は, 全体的に試験結果を上回った. ケース_3D 再構成は, 载荷初期(荷重 1,000kN 付近)では試験結果をやや上回るが, 荷重 2,000kN 以上では試験結果と概ね一致した. 今回の検討条件においては, 杭側面のインターフェイス要素に地盤の乱れを考慮した強度特性を用いることにより, 試験を概ね再現することができた.

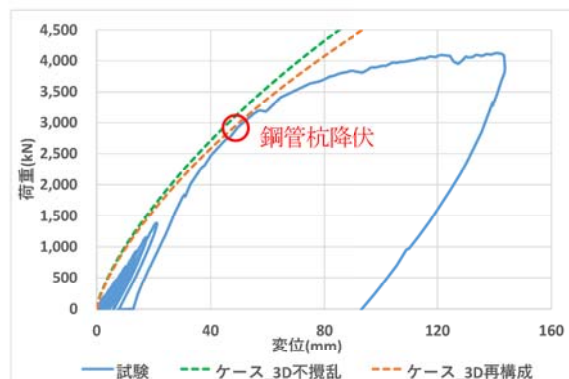


図 3 荷重変位曲線(試験結果と 3 次元 FEM 解析)

3.2 1 次元骨組解析の結果

3 次元 FEM 解析 (ケース_3D 再構成) と 1 次元骨組解析 (PISA 1D モデル, トリリニアモデル) の地表面における荷重変位曲線の比較を図 4 に示す. PISA 1D モデルによる地盤ばねを使用した 1 次元骨組解析は, 3 次元 FEM 解析をやや上回り, トリリニアモデルによる地盤ばねを使用した 1 次元骨組解析は, 3 次元 FEM 解析をやや下回る結果となった.

3 次元 FEM 解析と 1 次元骨組解析の曲げモーメントと変位の深度分布を図 5 に示す. 曲げモーメント分布には, 地表面位置に理論値 (载荷荷重 $\times$ 突出長) も

示した。曲げモーメント分布と変位分布は、トリリニアモデルによる地盤ばねを使用した1次元骨組解析は3次元 FEM 解析とほぼ一致したが、PISA 1D モデルの場合には乖離が生じた。

PISA 1D モデルで3次元 FEM 解析結果を再現できなかった原因は、次の2つが考えられる。まず、PISA 1D モデルはパラメトリックモデルであり、地盤反力の深度分布を求める場合、式(3)や式(4)の形で地盤反力の上限值や初期勾配等の16種類のパラメータを求めるため、3次元 FEM 解析で得られた地盤反力がこれらの式に適合しにくい場合には、誤差が大きくなる。次に、PLAXIS Monopile Designer の砂質土地盤モデルでは粘着力 c を考慮することができず、PLAXIS 3D による3次元 FEM 解析では粘着力 c を考慮しているため、両者の地盤の剛性の深度分布に差が生じた。

以上より、本研究で対象とした凝灰質砂岩層に PISA 1D モデルを適用する際に誤差が大きいことが分かった。凝灰質砂岩層を対象に3次元 FEM 解析に対応する1次元骨組解析を行うためには、ノンパラメトリックモデル、例えば、トリリニアモデル等により3次元 FEM 解析の地盤反力曲線を直接的にモデル化することが望ましい。

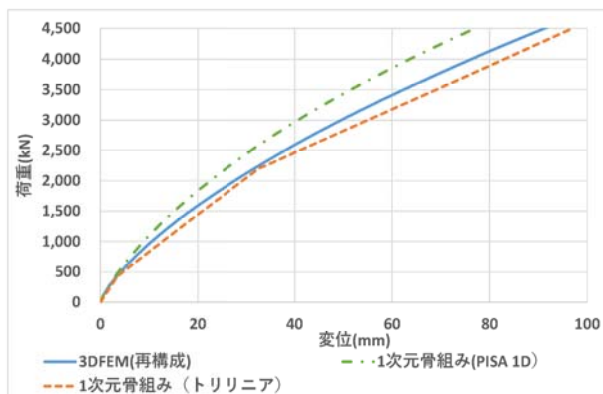


図4 荷重変位曲線(3次元 FEM と1次元骨組)

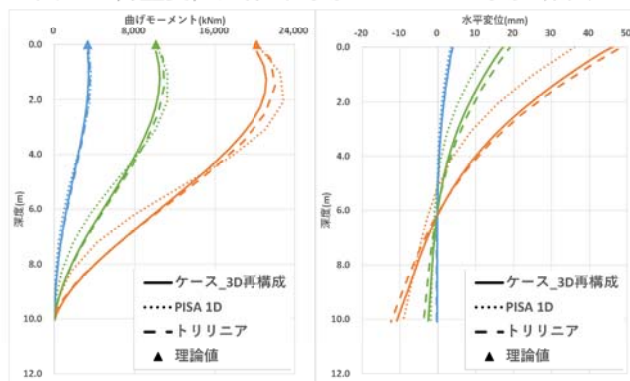


図5 曲げモーメントと変位の深度分布の比較
(青: 454kN 緑: 1,384kN オレンジ: 2,765kN)

4. まとめ

本研究では、杭側面のインターフェイス要素のせん断強度の設定方法を提案するとともに、欧州で実用化されている PISA 1D モデルと日本で広く使われているトリリニアモデルを凝灰質砂岩層に適用し、その妥当性を検証した。結論は以下のようにまとめた。

- 1) 杭側面のインターフェイス要素のせん断強度を再構成試料の三軸圧縮試験から設定することより、HS small モデルの凝灰質砂岩への適用に成功した。
- 2) 3次元 FEM 解析の地盤反力曲線を基にした PISA 1D モデルを用いた1次元骨組解析では、3次元 FEM 解析結果を精度よく再現できず、凝灰質砂岩層に適用する際に誤差が大きいことが分かった。
- 3) 3次元 FEM 解析より得られた地盤反力曲線を基に作成したトリリニアモデルによる1次元骨組解析では、曲げモーメントと変位の深度分布は、3次元 FEM 解析と一致することが分かった。

5. 参考文献

- 1) NEDO: 洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ, 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会, 2021.
- 2) B. W. Byrne et al.: New design methods for offshore wind turbine monopiles, OSIG 8th International Conference, 2017.
- 3) Bentley: Monopile Designer Manual, 2023. 1
- 4) E. Minga, H. Burd: Validation of the PLAXIS MoDeTo 1D model for dense sand, Oxford University, 2019.
- 5) E. Minga, H. Burd: Validation report of PLAXIS MoDeTo based on the Cowden clay PISA field tests, 2019.
- 6) 松本陽介ら: 静的水平載荷試験によるものパイル基礎の曲げモーメントと変位に関する研究, 第44回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022
- 7) 地盤工学会: 杭の水平載荷試験方法・同解説 第1回改訂版, 2010
- 8) Bentley: PLAXIS Material Models Manual, 2023. 1
- 9) 洋上風力発電施設検討委員会: 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説, 2020.
- 10) R.F., Obrzud, A. Truty: The hardening soil model - A practical guidebook Z_ Soil.PC 100701 report, 2020.
- 11) Jardine, R, Chow, F., Overy, R (2005). ICP design methods for driven piles in sands and clays. Thomas Telford, London.
- 12) J. H. Long, G. Vanneste, Effects of cyclic lateral loads on piles in sand, ASCE, 1994.