

水平荷重を受けるモノパイル基礎の3次元FEM解析

東電設計（株） 正会員 ○中村 俊介, 正会員 松本 陽介

東京電力リニューアブルパワー（株）

甲斐 郁寛

東京大学大学院工学系研究科

正会員 石原 孟

1. はじめに

着床式洋上風車の基礎設計の課題の1つに、わが国における多様な海底地質構造に対応した地盤バネの合理的評価方法の開発が挙げられている¹⁾。欧州で開発された設計手法²⁾では、3次元FEM解析結果を基にモノパイル基礎設計用の地盤バネを設定している。このように地盤バネを設定する場合には、信頼性の高い3次元FEM解析を行うことが重要である。

砂質地盤については、材料モデル HS small を使用した3次元FEM解析による静的水平載荷試験の再現解析により、3次元FEM解析の適用性が確認されている³⁾。一方、筆者らの知る範囲においては、国内の凝灰質砂岩で行われた静的水平載荷試験に対して、HS small による3次元FEM解析の適用性が確認された事例はない。

そこで、本研究では、凝灰質砂岩で実施された静的水平載荷試験⁴⁾を対象とした3次元FEMによる再現解析から、砂質地盤で適用性が確認された³⁾HS small の凝灰質砂岩への適用可能性を明らかにすると共に、HS small の入力パラメータの1つである初期せん断剛性 G_0 の設定方法を提案することを目的とした。

2. 静的水平載荷試験の概要と解析条件

静的水平載荷試験⁴⁾は、地盤工学会基準⁵⁾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。孔内水平載荷試験結果を基に算出した杭の特性値 βL は 3.1 である。

解析は PLAXIS 3D で行った。図 1 に解析モデルを示す。解析モデルの作成は、PLAXIS Monopile Designer のモデル自動作成機能⁶⁾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、荷重の載荷方向を杭径の 12 倍、載荷直角方向を杭径の 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。ポアソン比は一般的な 0.3 とした。

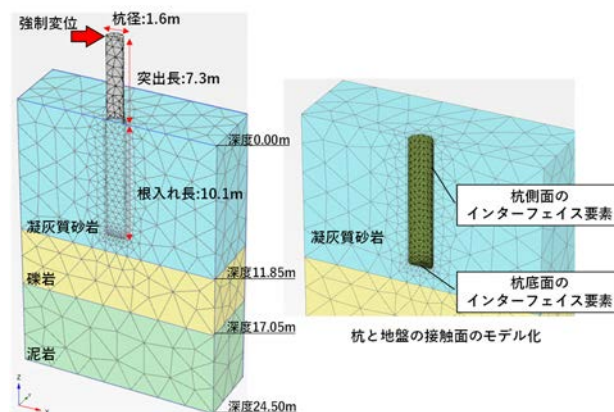


図 1 解析モデル図

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⁷⁾。

HS small でモデル化した凝灰質砂岩の入力物性値を示す。水中単位体積重量 γ' は、密度検層結果から海水の比重を減じて 6.6kN/m³ とした。変形係数 E_{50}^{ref} は、孔内水平載荷試験から求めた 95,900kN/m² を用いた。一次圧密載荷の接線剛性 E_{oed}^{ref} は $E_{oed}^{ref}=E_{50}^{ref}$ 、除荷/再載荷剛性 E_{ur}^{ref} は $E_{ur}^{ref}=3E_{50}^{ref}$ の関係式より求めた⁷⁾。除荷/再載荷時のポアソン比 ν_{ur} は 0.2 とした⁷⁾。応力依存性のべき指数 m は 0.5 とした。初期せん断剛性 G_0^{ref} は 2 パターン設定した。Case1 は、動的解析による耐震設計で使用されることが多い方法、すなわち PS 検層から $G_0=pV_s^2$ の関係式⁸⁾で求めた 300,300 kN/m² ($V_s=420$ m/s) である。Case2 は、本試験が暴風波浪を想定した片振幅単調載荷の静的水平載荷試験であることを踏まえて、Francis のバネと Vesic のバネの関係⁹⁾を参考に、PS 検層から求め

た G_0 を 0.5 倍した. Francis バネは杭の両側の地盤に作用することを想定し, Vesic バネは杭の片側の地盤に作用することを想定しており, 両者のバネ定数は 1.0 : 0.5 の関係にある⁹⁾. せん断剛性 G が G_0 の 72.2% まで低下したときのせん断ひずみ $\gamma_{0.7}$ は, 繰返し三軸圧縮試験から求めた 0.019% とした. 粘着力 c と内部摩擦角 ϕ は, 不攪乱試料による圧密排水条件の三軸圧縮試験より求めた 203.9kN/m^2 と 32.40° とした. ダイレタンシー角 ψ は, $\psi=\phi-30$ より 2.4° とした⁷⁾. 引張強度は 0 kN/m^2 とした.

接触面のインターフェイス要素は, 杭側面と杭底面に異なる粘着力と内部摩擦角を設定した. 杭側面は, 杭の打設による周辺地盤の乱れ¹⁰⁾を想定し, 再構成試料による圧密排水条件の三軸圧縮試験より求めた $c_d=3.74\text{kN/m}^2$, $\phi_d=35.49^\circ$ を用いた. 杭底面は乱れていないと想定し, 不攪乱試料による $c_d=203.9\text{kN/m}^2$, $\phi_d=32.40^\circ$ を用いた. 両者とも引張強度は 0 kN/m^2 とした.

3. 解析結果

図 2 に試験と解析の荷重変位曲線の比較を示す. 解析結果は, 初期せん断剛性 G_0^{ref} を PS 検層から設定した Case1 と, それを 0.5 倍した Case2 を示した. 試験杭が約 $3,000\text{kN}$ で降伏した⁴⁾ことから, 比較はそれ以下の荷重で行った. Case1 の場合, 解析は試験を上回る結果となった. Case2 の場合, 解析は試験をよく再現できた. この結果より, 片振幅単調荷重による静的水平載荷試験の解析には, 両振幅荷重を想定している PS 検層から求めた G_0 よりも, それを 0.5 倍して片振幅単調荷重を想定した G_0 の方が適しているといえる.

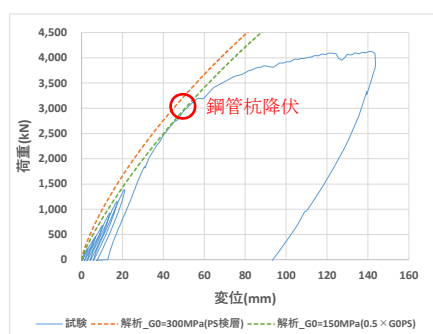


図 2 荷重変位曲線の比較

図 3 に曲げモーメントと水平変位の深度分布の比較を示す. 曲げモーメントの試験結果は, 杭に設置したひずみゲージの計測結果より求めた値である⁴⁾. 深度 0m 位置には, 載荷荷重×突出長より求めた曲げモーメントの理論値を示した. 深度 0m の試験変位は, 0.5m 上部に設置された変位計の計測結果より推定した値であ

る⁴⁾. 解析結果は, 荷重変位曲線が良く再現できた Case2 の結果である. 解析による曲げモーメント分布は, 試験結果とよく一致した. また, 解析による変位分布は杭の回転中心が約 6m にあり, 杭周辺地盤に設置した傾斜計から求めた回転中心 $5.3\sim 6.4\text{m}$ ⁴⁾の範囲に入っている.

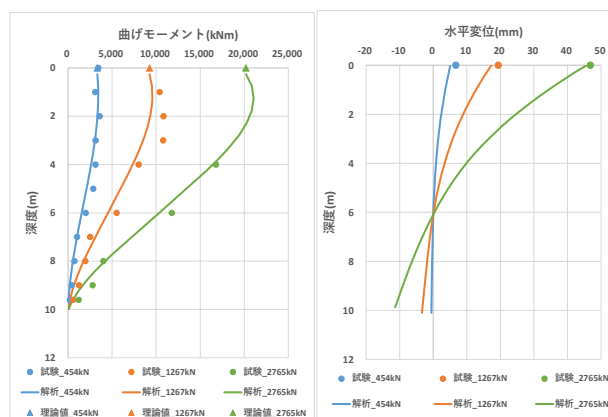


図 3 深度分布(左: 曲げモーメント 右: 水平変位)

4. まとめ

1. 砂質地盤で適用性が確認された PLAXIS 3D の HS small モデルを凝灰質砂岩に適用した. 地盤要素の変形係数を孔内水平載荷試験から設定し, 初期せん断剛性は PS 検層から求めた G_0 の 0.5 倍とし, 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し, 杭底面のインターフェイス要素と地盤要素のせん断強度を不攪乱試料の三軸圧縮試験から設定することにより, 凝灰質砂岩で実施した静的水平載荷試験の荷重変位曲線, 曲げモーメント分布, 地表面変位, 変位の回転中心をよく再現でき, HS small モデルの凝灰質砂岩への適用可能性を確認できた.
2. PS 検層から算出した初期せん断剛性 G_0 を用いた場合, 解析は試験の荷重変位曲線を上回ったが, PS 検層から求めた G_0 を 0.5 倍した場合は, 試験の荷重変位曲線をよく再現できた. これは, 暴風波浪を想定した静的水平載荷試験は片振幅単調荷重であり, 地震を想定した PS 検層による G_0 は両振幅載荷に対応するためである.

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, 2021
- 2) B.W. Byrne: 水平荷重を受ける洋上風車のモノパイルの設計, 基礎工, 48 巻, 12 号, 2020
- 3) E. Minga and H. Burd: Validation of the PLAXIS MoDeTo model for dense sand, 2019
- 4) 松本 他: 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
- 5) 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
- 6) Bentley: Monopile Designer-Manual V22.02.2022
- 7) Bentley: PLAXIS Material Models Manual V22.02.2022
- 8) 日本建築学会: 建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A, 2016
- 9) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2009
- 10) J.H. Long, G. Vanneste, Effects of cyclic lateral loads on piles in sand, ASCE, 1994.