

第I部門

2024年9月6日(金) 9:00 ~ 10:20 A104(川内北キャンパス講義棟A棟)

耐風・風工学(1)

座長：中藤 誠二（関東学院大学）

9:30 ~ 9:40

[I-323] モノパイル基礎の減衰評価手法の提案と鋼管杭の振動試験による検証

*松本 陽介¹、中村 俊介¹、甲斐 郁寛²、飯田 芳久²、石原 孟³ (1. 東電設計株式会社、2. 東京電力リニューアブルパワー株式会社、3. 東京大学大学院工学系研究科)

キーワード：洋上風力発電、モノパイル基礎、振動試験、3次元FEM解析、1次元骨組解析

凝灰質砂岩を対象とした鋼管杭の振動試験を行うとともに、1次元骨組モデルにより振動解析を実施した。3次元FEM解析に基づく地盤反力曲線を反映した1次元骨組解析は、試験から得られた1次モードの固有振動数と減衰比を精度よく再現した。

モノパイル基礎の減衰評価手法の提案と鋼管杭の振動試験による検証

東電設計（株） 正会員 ○松本 陽介, 正会員 中村 俊介
 東京電力リニューアブルパワー（株） 甲斐 郁寛, 正会員 飯田 芳久
 東京大学大学院工学系研究科 正会員 石原 孟

1. はじめに

洋上風車の耐風・耐波設計は動的解析に基づき行われる。モノパイルに適した地盤反力曲線の算定方法として、3次元FEM解析の結果をもとに1次元骨組解析用の地盤反力曲線を算定する方法が提案されたが¹⁾、動的解析に必要な減衰評価手法が検討されていない。

そこで、本研究では、3次元FEM解析により分布水平、分布回転、底面水平、底面回転の4種類の地盤ばねを求めるとともに、地盤の動的特性を考慮した1次元骨組解析を実施し、鋼管杭の振動試験から得られた1次固有振動と減衰比と比較することにより、提案手法の妥当性を検討する。

2. 振動試験の概要

鋼管杭の寸法は、直径1.6m、板厚40mm、突出長9.5m、根入れ長10.1mである。試験サイトは平均N値27の軟岩（凝灰質砂岩）である。地盤条件等の詳細は松本ら²⁾を参照されたい。

加振は杭頭に設置した起振機(EX-10000HSV)により行った。鋼管杭の固有振動数を得るためのスイープ加振試験を3回、減衰比を得るための正弦波加振からの急停止試験を2回行った。計測は地表面から上方向0.25mと7.0mの位置に取り付けた加速度計(VP-5123HHV)で行った。

スイープ加振試験は、0.02Hz～19.5Hzまで振動数を変化させて行った。鋼管杭の固有振動数は、応答加速度と加振力のフーリエスペクトル比から算定した。スイープ加振試験から得られた鋼管杭の固有振動数は、5.55Hz, 5.59Hz, 5.46Hzである。

正弦波加振は、5.5Hzまたは5.4Hzで約20秒加振した。加振力は約5kNである。次に起振機を急停止させ、鋼管杭を自由振動させ、応答加速度から減衰比を求めた。減衰比は2.1%と2.3%である。なお、正弦波加振時の地表面+7.0m位置の最大水平変位は約6mm、地表面+0.25m位置の最大水平変位は約1.5mmである。これ

らの変位は、計測した加速度を2回積分して求めた。

3. 3次元FEM・1次元骨組解析と結果

1次元骨組解析用の地盤反力曲線の算出に使用した3次元FEMモデルを図1に示す。解析はPLAXIS 3Dで行った。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。

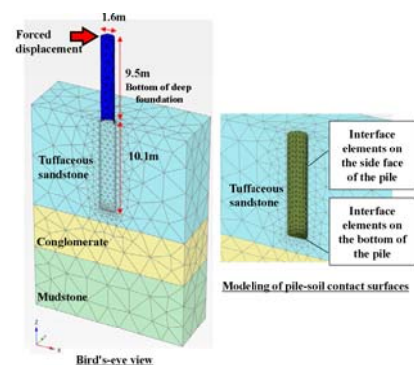


図1 3次元FEM解析モデルの鳥瞰図

凝灰質砂岩の非線形モデルはHS smallを使用した。解析モデルの詳細は中村ら¹⁾の論文に示す。なお、変形係数 E_{50}^{ref} は孔内水平載荷試験より求めた $95,900\text{kN/m}^2$ を採用し、初期せん断剛性 G_0^{ref} は Bentley³⁾に従い、除荷/再載荷剛性から算出し、 $119,875\text{kN/m}^2$ とした。

1次元骨組解析は、鋼管杭を梁要素、起振機(6t、固定架台含む)を質点、地盤を地盤ばねでモデル化した。解析はISCEFで行った。地盤ばねのばね定数は、PLAXIS 3Dを使用して3次元FEM解析より分布水平、分布回転、底面水平、底面回転の4種類の地盤反力曲線を求め、その初期勾配を使用した。

地盤の減衰は、材料固有の材料減衰(2%)、載荷除荷により生じる履歴減衰、逸散減衰がある。本研究では、これらを分布水平ばねに対応するダッシュポットの減衰係数 c_h で考慮した。減衰係数は、Gazetas and Dobry⁴⁾と土木学会指針⁵⁾の方法に倣い、式(2)により求めた。

$$c_{hj} = \max\left(2\%, \frac{h_j k_j}{(\pi f_1)}\right) \quad (2)$$

ここで、 c_{hj} は単位層厚当たりの水平地盤ダッシュポットの減衰係数、 h_j は地盤の減衰係数、 k_j は地盤ばね、 f_1 は構造-地盤連成系の1次固有振動数である。鋼管杭

キーワード 洋上風力発電, モノパイル基礎, 振動試験, 3次元FEM解析, 1次元骨組解析

連絡先 〒135-0062 東京都江東区東雲1丁目7番12号 東電設計（株） TEL: 03-6372-5001

の固有振動数（約 5.5Hz）が地盤（約 9.3Hz）よりも小さいため、逸散減衰を無視した⁵⁾。

履歴減衰は、図 2 に示す繰返し三軸圧縮試験より得られた G/G_0 - γ 曲線と h - γ 曲線より求めた。なお、試験結果は式(3)の修正 HP モデル⁶⁾と式(4)で近似した。

$$G_j = G_{0j} / \left(1 + ((\gamma_j - \gamma_{Gj}) / (\gamma_{0.5j} - \gamma_{Gj}))^2 \right) \quad (3)$$

$$h_j = h_{\max j} \gamma_j / (\gamma_j + \gamma_{hj}) \quad (4)$$

ここで、 $\gamma_{0.5j}$ は基準ひずみで $G_j/G_{0j} = 0.5$ のときのひずみ、 G_{0j} はせん断剛性の初期値、 $h_{\max j}$ はひずみが大さいときの減衰比の最大値である。 λ , γ_{Gj} , γ_{hj} はモデルパラメータである。

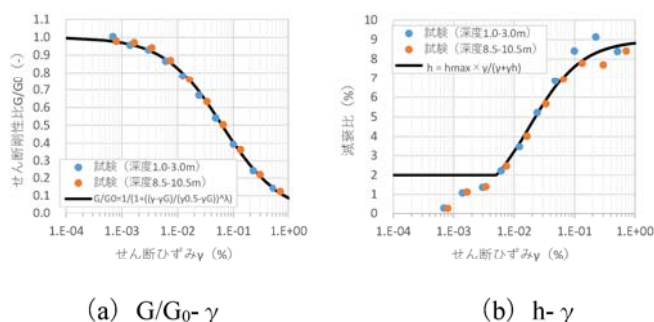


図 2 G/G_0 - γ 曲線と h - γ 曲線

せん断ひずみは式(5)⁷⁾により、以下のように求めた。

$$\gamma_j = y_j (1 + \nu_j) / (2.5D) \quad (5)$$

ここで、 y_j は水平変位、 ν_j は地盤のポアソン比、 D は杭の直径である。水平変位の鉛直プロファイルは、地表変位を 1.5mm とし、松本ら²⁾の実験で得られた低荷重域の水平変位の鉛直プロファイルより推定した。地盤のポアソン比は PS 検層より求めた 0.464 とした。

上記方法で算出した 1 次元骨組解析に使用した水平地盤ダッシュポットの減衰係数とその計算に使用した地盤のせん断ひずみ、地盤の減衰比、水平ばね剛性を図 3 に示す。

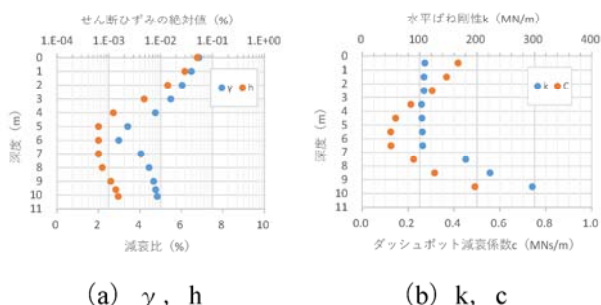


図 3 水平地盤ダッシュポットの減衰係数

鋼管杭の構造減衰比は、若林⁸⁾より溶接組立材の減衰比 0.5% と仮定し、レイリー減衰で考慮した。

1 次元骨組モデルの固有振動数は固有値解析により求め、減衰比は杭頭を固有振動数で正弦波加振したの

ちに自由振動させた結果から求めた。鋼管杭と地盤の連成応答による減衰定数は、自由振動時における加速度波形のピークをフィッティングし、式(6)より求めた。
 $y = a \cdot e^{(b \cdot t)}$, $h = b / (-2.0 \cdot \pi \cdot f)$ (6)
 ここで、 a は振幅、 b は減衰項、 t は時間、 f は振動数、 h はモーダル減衰比である。

表 1 に試験と解析で得られた固有振動数と減衰比を示す。1 次元骨組解析では、1 次モードの固有振動数と減衰比は試験の値とよく一致し、本研究で用いた手法の妥当性が検証された。なお、鋼管杭の構造減衰比は 0.5% を考えると、地盤減衰による 1 次モードのモーダル減衰比への貢献は 1.61% であることが分かる。

表 1 試験と解析で得られた固有振動数と減衰比

試験 (スweep)	項目	単位	1回目	2回目	3回目
	固有振動数	Hz	5.55	5.59	5.46
	平均	Hz	5.53		
試験 (自由振動)	加振振動数	Hz	5.50	5.40	平均
	応答振動数	Hz	5.41	5.33	5.37
	減衰比	%	2.05	2.28	2.17
1次元 骨組	項目	単位	解析結果		
	固有振動数	Hz	5.37	(0.0%)	
	減衰比	%	2.11	-(2.5%)	

※ () 書きは相対誤差。相対誤差=(解析-試験)/試験 × 100

4. まとめ

凝灰質砂岩を対象として、モノパイルを想定した振動試験を実施するとともに、振動解析を 1 次元骨組モデルより実施した。3 次元 FEM 解析に基づく地盤反力曲線を反映した 1 次元骨組解析は、試験の 1 次モードの固有振動数と減衰比を精度よく再現できた。

参考文献

- 1) 中村俊介、松本陽介、甲斐郁寛、飯田芳久、石原孟：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、第 45 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2023.
- 2) 松本陽介、山田一貴、甲斐郁寛、田邊成、中村俊介、石原孟：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.
- 3) Bentley: PLAXIS Material Models Manual V22.02, 2022.
- 4) Gazetas G. and Dobry R., Horizontal response of piles in layered soils, Journal of Geotechnical engineering, 110(1): 20-40, 1984
- 5) 土木学会, 風力発電設備支持構造物設計指針・同解説, 2010.
- 6) 中川太郎、小林勝己、佐々木聡、佐々木仁：地盤の非線形履歴特性のモデル化、フジタ技術研究報告, 第 47 号 2011 年
- 7) Kagawa T. and Kraft L. M., Lateral load-deflection relationships of piles subjected to dynamic loadings, Soils and Foundations, 20(4): 19-36, 1980.
- 8) 若林實: 構造物の減衰とエネルギー吸収能力について, 京都大学防災研究所年報 / 京都大学防災研究所 編 (通号 17A) 1974.