

凝灰質砂岩層における振動試験に基づくモノパイル基礎の固有振動数と減衰比の研究*

A study of natural frequency and damping ratio of monopile foundation based on vibration tests
in tuffaceous sandstone layers

松本 陽介**
Yosuke MATSUMOTO

中村 俊介**
Shunsuke NAKAMURA

飯田 芳久***
Yoshihisa IIDA

前田 修***
Osamu MAEDA

石原 孟****
Takeshi ISHIHARA

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の評価手法が検討されていない。また、減衰の検討例として砂質地盤を対象とした研究²⁾はあるが、凝灰質砂岩のような固結砂を対象としたものはない。

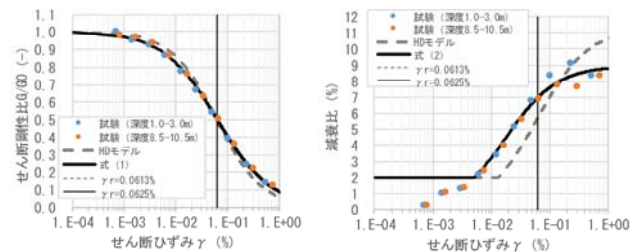
そこで、本研究では、凝灰質砂岩層を対象とした鋼管杭の振動試験により、杭と地盤の連成系における1次固有振動数と減衰比を明らかにする。また、3次元FEM解析により分布水平、分布回転、底面水平、底面回転の4種類の地盤ばねを求めるとともに、地盤の動的特性を考慮した1次元骨組解析を実施し、鋼管杭の振動試験から得られた1次固有振動と減衰比と比較することにより、1次元骨組解析の妥当性を検証する。

2. 振動試験

2.1 地盤条件

地盤条件は、松本ら¹⁾の論文に示す水平載荷試験と同様であり、平均N値27、せん断波速度420m/sの凝灰質砂岩層である。また、繰返し三軸試験も図1に示す通り行っている。一般に、繰返し三軸試験結果($G-\gamma$, $h-\gamma$ 関係)はH-Dモデル³⁾で近似されることが多い。ここで、最小減衰比は土木学会指針⁴⁾に従い2%とした。H-Dモデルで試験を近似した場合、基準ひずみは0.0613%、最大減衰比は11.29%となる。H-Dモデルで近似した $G-\gamma$ 関係は、基準ひずみよりも低ひ

ずみで試験を僅かに過大評価し、高ひずみで試験を僅かに過少評価した。 $h-\gamma$ 関係は基準ひずみよりも低ひずみで減衰を過小評価し、最大減衰比を過大評価した。



(a) $G-\gamma$ 関係

(b) $h-\gamma$ 関係

図1 繰返し三軸試験結果

そこで、 $G-\gamma$ 関係は中川ら⁵⁾を参考にH-Dモデルにモデルパラメータを導入した式(1)で近似した。また、 $h-\gamma$ 関係は文献⁶⁾を参考に式(2)で近似した。ここで、 G はせん断剛性、 G_0 は初期せん断剛性、 γ はせん断ひずみ、 γ_r は基準ひずみ、 h は減衰比、 h_{max} は最大減衰比、 γ_G , λ , γ_h はモデルパラメータである。これらの式により、試験を精度良く近似できた。この方法で求めた基準ひずみは0.0625%、最大減衰比は8.97%である。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + ((\gamma - \gamma_G)/(\gamma_r - \gamma_G))^\lambda} \quad (1)$$

$$h = h_{max} \frac{\gamma}{(\gamma - \gamma_h)} \quad (2)$$

2.2 試験方法

試験杭の寸法と計測機器配置を図2に示す。鋼管杭の諸元は、直径1.6m、板厚40mm、根入れ長10.1mである。鋼管杭は、表層の埋土を深礎工により除去し、パイプロハンマ(PVE-150)により下杭を圧入した後、上杭を建て込み、上杭と下杭を現場円周溶接し、油圧ハンマ(S350)にて所定深度まで打設した。

* 令和6年11月29日第46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

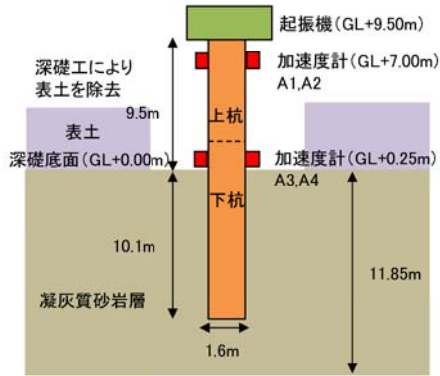


図 2 試験杭の寸法と機器配置図

杭頭には起振機 EX-10000HSV ((株) エス・テック社製) と鋼製固定架台を設置した。起振機は固定架台にボルトで固定し、固定架台は杭の内側に配置したプレートにボルトで固定した。起振機と固定架台等の重量は約 6t である。

計測は杭頭付近 (GL+7.00m) の 2 か所と深礎底面付近 (GL+0.25m) の 2 か所に取り付けたサーボ式加速度計 (VP-5123HHV) により行った。サンプリング周波数は 200Hz である。

振動試験は、鋼管杭の固有振動数を得るためのスイープ試験を 3 回、減衰比を得るための急停止試験を 2 回行った。

2.3 試験結果

(1) スイープ試験

スイープ加振は、1 回目と 2 回目が 0.02Hz から 19.5Hz を対象とし、3 回目が 0.02Hz から 8.0Hz を対象として行った。加振時間は 1Hz あたり 10 秒である。

杭と地盤の連成振動による固有振動数は、図 3 に示す加振力に対する A1, A2 のフーリエスペクトル比より求めた。これらのスペクトル比は、Parzen 窓により 0.2Hz で平滑化した。また、同一標高に設置した加速度計毎に求めたスペクトル比を平均した。

スイープ加振の 1 次固有振動数は 5.58Hz, 5.56Hz, 5.47Hz (平均 5.54Hz) である。今回の加振範囲では、2 次固有振動数は確認できなかった。

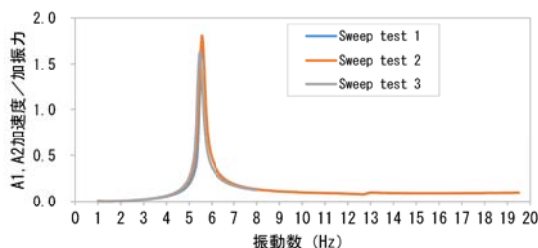


図 3 応答加速度のフーリエスペクトル比

(2) 急停止試験

急停止試験は、1 回目が 5.5Hz, 2 回目が 5.4Hz で約 20~22 秒間加振した後に、起振機を急停止させ鋼管杭を自由振動させた。急停止試験の加振力、応答加速度を図 4 に示す。

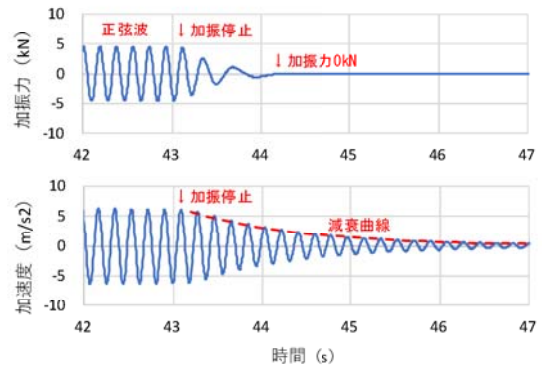


図 4 急停止試験の加振力と応答加速度の例 (急停止試験 2 回目、加速度計 A1)

自由振動の分析は、加振停止後の起振機に生じる慣性の影響を確認するため、加振停止後を対象とする場合 (方法①) と、加振停止後に加振力が 0kN になった後を対象とする場合 (方法②) の 2 通りの方法で行った。いずれの方法も、加振停止後の最大応答加速度の 1% 以上の加速度を対象とした。

自由振動区間の固有振動数は、加速度 (A1, A2) のフーリエスペクトル (0.2Hz で平滑化) のピークより求めた。固有振動数は、方法①の 1 回目が 5.40Hz, 2 回目が 5.35Hz (平均 5.38Hz) であり、方法②の 1 回目が 5.44Hz, 2 回目が 5.40Hz (平均 5.42Hz) である。

杭と地盤の連成振動によるモーダル減衰比は、式(3)の減衰曲線を、加振停止後の加速度波形に残差二乗和が最小になるようフィッティングして求めた。

$$y = a \cdot e^{(b \cdot t)}, h = b / (-2.0 \cdot \pi \cdot f) \quad (3)$$

ここで、 a は最大振幅、 b は減衰項、 t は時間、 f は自由振動区間の固有振動数、 h はモーダル減衰比である。

フィッティングは、自由振動区間の正側の加速度に対して行い、固有振動数は前述した自由振動区間の固有振動数とした。この方法で求めたモーダル減衰比は、方法①の 1 回目が 2.13%, 2 回目が 2.37% (平均 2.25%) であり、方法②の 1 回目が 2.02%, 2 回目が 2.24% (平均 2.13%) である。

(3) 振動試験結果のまとめ

振動試験結果を表 1 に示す。固有振動数はスイープ試験が 5.54Hz, 急停止試験の方法①が 5.38Hz, 方法

②が 5.42Hz である。杭と地盤の連成系におけるモード減衰比は、方法①が 2.25%，方法②が 2.13% である。方法②は方法①に対して、固有振動数が 0.04Hz 高く、減衰比が 0.12% 小さくなった。この差が、固有振動数と減衰比の評価結果に及ぼす加振停止後の起振機の慣性による影響と言える。

表 1 振動試験結果のまとめ

(a) 固有振動数

固有振動数 (Hz)					
スイープ試験		1回目	2回目	3回目	平均
急停止試験	分析方法	1回目	2回目	3回目	平均
	① 加振停止以降	5.40	5.35	-	5.38
	② 加振力0kN以降	5.44	5.40	-	5.42

(b) 減衰比

減衰比 (%)					
分析方法		1回目	2回目	3回目	平均
急停止試験	① 加振停止以降	2.13	2.37	-	2.25
	② 加振力0kN以降	2.02	2.24	-	2.13

3. 1 次元骨組解析

3. 1 解析方法

1 次元骨組解析モデルを図 5 に示す。解析は、解析コード ISCEF で行った。鋼管杭を梁要素、起振機（固定架台含む）を質点、地盤を地盤ばねとダッシュポットでモデル化した。地盤ばね（地盤剛性）は、分布水平、分布回転、底面水平、底面回転の 4 成分を考慮した。ダッシュポット（地盤減衰）は、杭・地盤系のモード減衰に寄与度が高い 7 分布水平成分を考慮した。

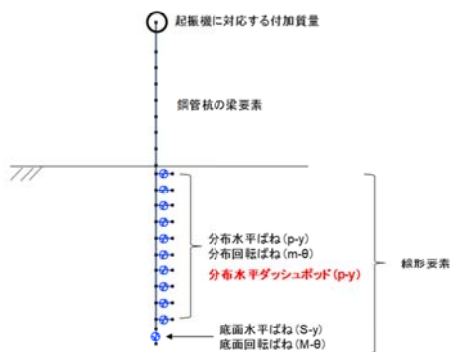


図 5 1 次元骨組解析モデル

地盤ばねのばね定数は、解析コード PLAXIS Monopile Designer と PLAXIS 3D を使用して 3 次元 FEM 解析より求めた。解析方法の詳細は松本ら¹⁾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 95.9MPa を採用し、初期せん断剛性 G_0^{ref} は Bentley⁸⁾ に従い除荷/再載荷剛性から算出し 119.9MPa とし、基準拘束圧 P^{ref} は 100kPa とした。

ダッシュポット係数は、Gazetas and Dobry⁹⁾に倣い

式(4)より求めた。

$$c_{hj} = \max(0.02, h_j) \cdot \frac{k_j}{\pi \cdot f_1} \quad (4)$$

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 は地盤の減衰比、 k_j は地盤ばね剛性、 f_1 は構造・地盤連成系の 1 次固有振動数である。なお、鋼管杭の固有振動数（約 5.4Hz）が 1/4 波長則により算出した凝灰質砂岩層の固有振動数（約 8.9Hz）よりも小さいため、逸散減衰の項を無視した⁴⁾。

地盤の減衰比 h_j は、式(2)で近似した $h - \gamma$ 関係より求めた。ここで、せん断ひずみは Kagawa and Kraft¹⁰⁾ に倣い式(5)より求めた。

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

ここで、 γ_j はせん断ひずみ、 y_j は水平変位、 ν_j は地盤のポアソン比、 D は杭径である。

上記の方法で 1 次元骨組モデルの地盤ばね剛性とダッシュポットの減衰係数を設定するためには、杭の水平変位を設定する必要がある。本研究では、急停止試験で生じた変位をもとに、以下の方法で杭の水平変位を設定した。まず初めに、正弦波加振時の加速度計 A3、A4 の 2 回積分値の最大値が約 1.5mm であったことから、深礎底面における杭の水平変位を 1.5mm とした。次に、静的水平載荷試験の結果¹⁾から深礎底面以深の水平変位分布を設定した。

設定した杭の水平変位分布を図 6 (a) に、水平変位分布より算出したせん断ひずみ γ と地盤の減衰比 h を (b) に、ばね剛性 k と減衰係数 c を (c) と (b) に示す。地盤ばね剛性は、3 次元 FEM で求めた地盤反力曲線の原点と図 6 (a) の水平変位に対応する地盤反力を結ぶ勾配（方法 A）と、建築基礎構造設計指針¹¹⁾の初期水平地盤反力係数の考え方を参考にして原点と水平変位 1mm に対応する地盤反力を結ぶ勾配（方法 B）の 2 通りの方法で算出した。ただし、杭の回転中心付近（深度 5.5m 前後）は FEM 解析の水平変位が小さく剛性が極端に変化するため、回転中心の上下の剛性で線形補完した。ダッシュポットの減衰係数は、式(4)より求めた。ここで、地盤の減衰係数は式(5)と式(2)より求めた。1 次固有振動数は、骨組モデルの固有値解析結果（方法 A : 5.43Hz、方法 B : 5.37Hz）とした。

鋼管杭の構造減衰比は、若林¹²⁾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。

加振は、解析モデルの起振機の位置に、固有振動数に対応する最大加振力 5kN の正弦波を載荷した後、加振力を 0kN にして杭を自由振動させた。

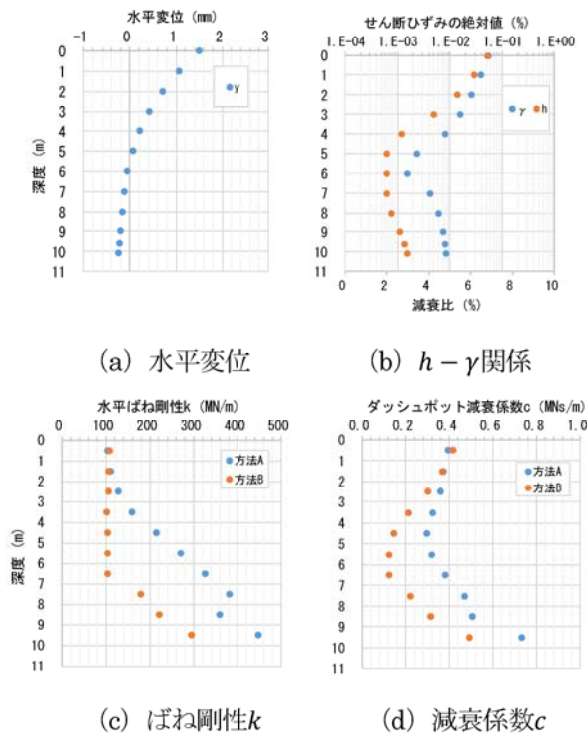


図 6 杭の水平変位とばね剛性・減衰係数の分布

3.2 解析結果

1次元骨組モデルの減衰比は、急停止試験と同様に式(3)で求めた。固有振動数は、固有値解析で求めた。固有振動数と減衰比を表 2 に、振動試験との相対誤差を表 3 に示す。

表 2 1次元骨組解析の固有振動数と減衰比

項目	方法A	方法B
固有振動数(Hz)	5.43	5.37
減衰比(%)	1.99	2.11

表 3 振動試験と骨組解析の相対誤差

相対誤差(%)	固有振動数		減衰比	
	方法A	方法B	方法A	方法B
方法①	0.9	-0.2	-11.8	-6.5
方法②	0.2	-0.9	-6.9	-1.3

相対誤差=(解析-試験)/試験 × 100

1次元骨組解析の1次固有振動数は、誤差1%以下であり、試験と良く一致した。モーダル減衰比は、解析が試験を1.3～11.8%過小評価した。これは、本研究でモデル化していない3成分(分布回転、底面水平、底面回転)の減衰係数の影響である可能性が考えられる。ただし、杭の構造減衰と地盤の水平成分の減衰により、試験の減衰比を9割程度再現できたことから、既往の研究と同様に、水平成分に比べ、他の3成分の影響は小さいことが推測される。

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。結論を以下に示す。

- 1) 本研究の対象とした凝灰質砂岩層の動的変形特性($G-\gamma$, $h-\gamma$)は、H-Dモデルにモデルパラメータを導入することで、試験を精度良く近似できた。
- 2) 急停止試験の減衰比を評価する範囲から起振機の慣性の影響を除外した場合、固有振動数が0.04Hz高く、減衰比が0.12%小さくなった。
- 3) 地盤の非線形性の影響を等価線形化した地盤ばねとダッシュポットでモデル化した1次元骨組解析は、試験の1次固有振動数を精度よく再現できた。また、解析のモーダル減衰比は試験を1割程度過小評価した。これは、本研究でモデル化していない減衰係数(分布回転成分、底面水平成分、底面回転成分)による影響と考えられる。

5. 参考文献

- 1) 松本 陽介, 中村 俊介, 甲斐 郁寛, 飯田 芳久, 石原 孟: 凝灰質砂岩層における静的水平載荷試験に基づくモノパイル基礎の荷重と変位の評価に関する研究, 日本風力エネルギー学会 論文集, 48 巻 2 号 p. 21-31, 2024
- 2) 加藤 一紀, 佐々木 智大, 小山 宏人, 伊藤 政人: モノパイル式洋上風力基礎の地盤-構造物相互作用評価実験(その1: 共振実験), 土木学会全国大会第79回年次学術講演会, 2024
- 3) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Proc. of the American Society of civil engineers, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692
- 4) 土木学会, 風力発電設備支持構造物設計指針・同解説, 2010.
- 5) 中川太郎, 小林勝巳, 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
- 6) 原子力規制委員会: 別紙 14 表層地盤物性値の違いによる建屋応答への影響について, <https://www.nra.go.jp/data/000317843.pdf>, アクセス日: 2024/10/20
- 7) 新田 康男, 河本 悠歩, 古島 優希, 石原 孟: 洋上風力発電モノパイル基礎の地震荷重の評価(その2: 各種地盤ばね効果の検討), 土木学会全国大会第79回年次学術講演会, 2024
- 8) Bentley: Monopile Designer Manual, V23.02
- 9) Gazetas G. and Dobry R., Horizontal response of piles in layered soils, Journal of Geotechnical engineering, 110(1): 20-40, 1984
- 10) Kagawa T. and Kraft L. M., Lateral load - deflection relationships of piles subjected to dynamic loadings, Soils and Foundations, 20(4): 19-36, 1980.
- 11) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2019
- 12) 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.