

モノパイル基礎洋上風車の地震荷重評価のための 1次元非線形地盤反力モデルの提案*

A study of one-dimensional nonlinear soil reaction model for prediction of seismic loads on monopile supported offshore wind turbines

石原 孟** 難波 治之** 河本 悠歩*** 古島 優希***
Takeshi ISHIHARA Haruyuki NAMBA Yuho KAWAMOTO Yuki FURUSHIMA

1. はじめに

洋上風力発電設備の大型化に伴い、モノパイル基礎により支持される風力発電設備の地震荷重を合理的に評価することは重要である。風力発電設備支持物構造設計指針・同解説「2010年版」¹⁾ (以下「土木学会指針」) に準拠した地盤ばねと減衰係数を用いれば、地震荷重は安全側に評価されるが²⁾、さらなる精度を向上させるため、地盤の非線形性をより厳密に反映できる非線形モデルの提案が求められる。

宮本ら³⁾は、荷重-変位の関係を薄層法による地盤ばねと Broms による極限地盤反力を用いた双曲線により表す非線形モデルを構築し、また非線形モデルの履歴則として Masing 則を用いた。しかし、宮本らのモデルでは、地盤ばねは地震動の大きさに依存し、また用いた Masing 則は地盤ばねの変形が大きくなると履歴減衰を過大に評価する問題がある。近年、Wang and Isihara⁴⁾は荷重-変位の関係を PySimple5 モデルで表し、荷重-変位および減衰-変位の関係が地盤の $G-\gamma$ と $h-\gamma$ 曲線に合致するようモデルパラメータをフィッティングする方法を提案したが、モデルパラメータは地盤ごとに同定する必要がある。

そこで、本研究では、モノパイル基礎の風車を対象に 1次元非線形地盤反力モデルを提案するとともに、3D FEM の解析結果⁵⁾と比較することによりモデルの妥当性を検証する。また、自由地盤の解析方法として、逐次非線形解析と等価線形解析を比較し、地盤の非線形性の影響を明らかにする。更に、土木学会指針に示された 1次元簡易モデルと、薄層法により評価した地盤ばねと減衰を用いるモデル⁶⁾を用いて地震応答解析を実施し、3DFEM の解析結果と比較することにより、土木学会指針で推奨された地震応答解析のモノパイル基礎への適用可能性を検証する。

2. 地震応答解析の概要

2.1 自由地盤の地震応答解析の概要

土木学会指針に従い、地盤の等価剛性と等価減衰比は、地盤各層の有効せん断ひずみ γ_e から HD モデルに従い、式(1)と式(2)により表すことができる¹⁾。

$$G_{ej} = G_{0j} / (1 + \gamma_{ej} / \gamma_{0.5j}) \quad (1)$$

$$h_{ej} = h_{maxj} (1 - G_{ej} / G_{0j}) \quad (2)$$

ここで、 $\gamma_{0.5}$ は $G/G_0=0.5$ のときのひずみ、 G_0 はひずみが微小であるときのせん断剛性、 h_{max} は減衰比の最大値である。有効せん断ひずみ γ_e は、等価線形解析および逐次非線形解析により算出した地盤の最大せん断ひずみ γ_{max} の 0.65 倍として求める。 j はモノパイルの各断面に対応する深度の地盤層を表す。本研究では土木学会指針に従い、等価線形解析および逐次非線形解析とも、地盤の履歴減衰の下限値は 2% に設定する。等価線形解析には DYNEQ⁷⁾を用い、逐次非線形解析には RESP-F3T⁸⁾を用いた。

2.2 1次元ビームモデルによる地震応答解析の概要

Fig.1 に本研究の地震応答解析で用いた 1次元ビームモデルを示す。地震応答解析に用いる入力地震動は、等価線形解析または逐次非線形解析により作成する。地震応答解析から得られた工学的基盤面の加速度、およびモノパイルの各深度における水平地盤ばねとダッシュポットに工学的基盤面との相対変位と相対速度の時刻歴を入力する。本研究では 1次元ビームモデルによる地震応答解析に RESP-F3T⁸⁾を用いた。

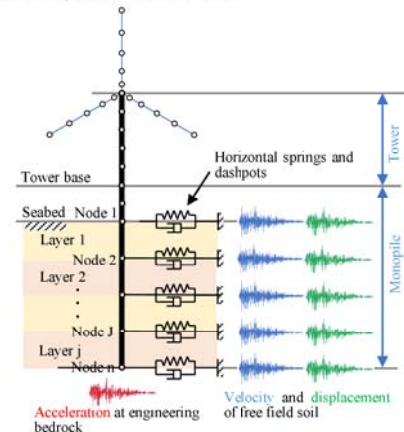


Fig. 1 One-dimensional beam model

*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 東京大学大学院工学系研究科

***団体会員 清水建設株式会社

地盤のひずみが 1%より大きくなった場合には、地盤の非線形効果が大きく、本研究では地盤反力の非線形モデル（通称 **P-y** モデル）と地盤減衰の非線形モデル（通称 **h-y** モデル）を宮本ら³⁾の論文を参考に以下のように構築した。

$$P = K_0 y / (1 + y / y_{50}) = Ky, \quad y_{50} = P_u / K_0 \quad (3)$$

$$h = h_{\max} (1 - K / K_0) \quad (4)$$

ここで K_0 は地盤剛性 G_0 と h_0 を用いて薄層法により求めた地盤ばねの剛性である。 $h_{\max}$ は h - γ モデルにおける最大減衰比であり、 P_u は極限地盤反力である。 y_{50} は $P_u / 2$ の荷重に達したときの地盤変位である。砂質土の P_u は以下に示す Broms⁹⁾の式により求めた。

$$P_u = 3\sigma'_0 K_p D L n \quad (5)$$

ここで、 σ'_0 は初期鉛直有効応力、 K_p は受動土圧係数、 D は杭直径、 L は地盤ばねの支配範囲の杭長、 n は杭本数であり、モノパイルの場合は 1 とする。

本研究で構築した非線形反力モデルは、宮本ら³⁾のモデルと異なり、①地盤剛性の初期値 G_0 は地盤の初期剛性、 h_0 は 0%として、薄層法により地盤ばね K_0 とダッシュポット C_0 を求めた。このように求めた減衰は地盤の逸散減衰に相当し、1次元ビームモデルに用いる。また②履歴則は、石原・吉田モデル¹⁰⁾を用いた。なお、薄層法の数値解析を安定させるために、減衰 0.02%を与えた。

土木学会指針に対応する 1次元ビームモデルにおける地盤ばねの剛性および地盤ばねの減衰係数は以下のように算定した。単位層厚当たりの水平地盤ばね剛性 k_h は Francis の式を用いて、式(6)により求める。

$$k_{h_j} = \frac{1.30 E_{s_j}}{1 - \nu_j^2} \left(\frac{E_{s_j} D_j^4}{E_{p_j} I_{p_j}} \right)^{1/12} \quad (6)$$

ここで、 E_s と ν はそれぞれ地盤のヤング係数とポアソン比、 E_p と I_p はそれぞれモノパイルのヤング係数と断面 2 次モーメントである。

単位層厚当たりの水平地盤ばねの減衰係数 c_h は式(7)により求める。

$$c_{h_j} = \begin{cases} h_{e_j} k_{h_j} / (\pi f), & f = f_g \quad (f \leq f_g) \\ h_{e_j} k_{h_j} / (\pi f) + c_{rad_j} (f - f_g) / f, & (f > f_g) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 h_e は地盤の等価減衰比である。 f は構造-地盤連成系の固有振動数 (Hz)を表す。 f_g は地盤の水平 1 次固有振動数である。 c_{rad} は逸散減衰を表し、Gazetas の方法を参考に、式(8)により求める。

$$c_{rad_j} = 1.57 \rho_j D V_{s_j} (1 + \eta_j) \quad (8)$$

ここで、 ρ_j は地盤密度、 η_j は地盤の等価縦波速度係数 $\eta_j = 3.4 / (\pi(1 - \nu_j))$ 、 V_{s_j} は地盤の等価線形せん断波速度 (m/s)である。

3. 解析結果と考察

3.1 自由地盤の地震応答解析

地盤の等価剛性と等価減衰は、自由地盤の等価線形解析および逐次非線形解析により評価した。入力地震動は、告示スペクトル適合波（乱數位相）を工学的基盤に定義する。工学的基盤における入力地震動の告示スペクトルは式(9)による。

$$S_{a0}(T) = \begin{cases} a_0(1 + 9.375)T \cdot Z & (T \leq 0.16) \\ 2.5a_0 \cdot Z & (0.16 < T < 0.64) \\ 1.6a_0 / T \cdot Z & (T \geq 0.64) \end{cases} \quad (9)$$

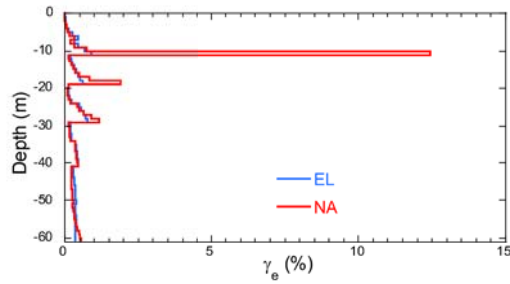
ここで、 $S_{a0}(T)$ は工学的基盤面での基準化加速度応答スペクトル（減衰 5%）、 T は周期(s)、 a_0 は工学的基盤面での基本最大加速度で 320 Gal とし、地震地域係数 Z を 0.9 とした。

地盤モデルは、地盤ひずみが 1%超となる柔地盤と地盤ひずみが 1%以下となる硬地盤の 2 ケースを設定する。これらの地盤物性値は河本ら^{5),6)}の論文に示す値と同じであり、柔地盤のせん断波速度は硬地盤のせん断波速度の 0.55 倍である。

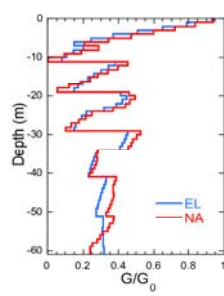
Fig.2 には、地盤ひずみが 1%超となる柔地盤について、等価線形解析 (Equivalent Linear, 以下 EL と呼ぶ) および逐次非線形解析 (Nonlinear Analysis, 以下 NA と呼ぶ) により得られた地盤の有効せん断ひずみ、等価線形地盤の剛性比 G_e / G_0 と等価減衰比 h_e の鉛直分布を示す。海底面から深度 10m 付近において、等価線形解析により得られた地盤ひずみに比べ、逐次非線形解析により得られた地盤ひずみが約 12 倍に大きくなることが分かる。Fig.3 には、地盤ひずみが 1%以下の硬地盤の解析結果を示す。海底面から深度 10m 付近においては、等価線形解析に比べて、逐次非線形解析により得られた地盤ひずみが約 3 倍に大きくなり、また全断面において、逐次非線形解析により求められた地盤応答が等価線形解析による地盤応答より大きくなる。その結果、逐次非線形解析により得られた剛性低下率 G_e / G_0 の値が小さくなり、減衰比 h_e は逐次非線形解析のほうが大きくなる。

3.2 1次元ビームモデルによる地震応答解析の結果

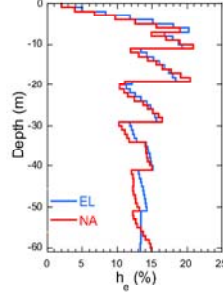
本研究では、定格出力 3MW のモノパイル支持の洋上風力発電設備を解析対象とした。Table 1 には主な構造諸元を示す。詳細については文献 6 を参照されたい。



(a) Effective shear strain

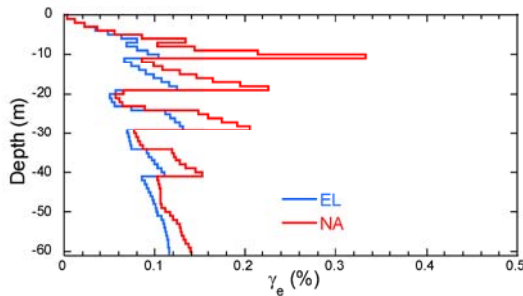


(b) G_e/G_0 ratio

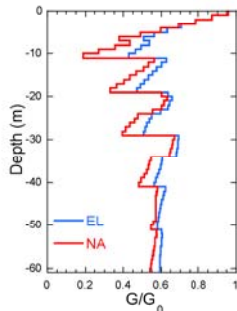


(c) Damping ratio

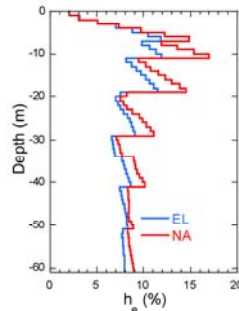
Fig.2 Distribution of soil properties for a soil with $\gamma_{\max} > 1\%$



(a) Effective shear strain



(b) G_e/G_0 ratio



(c) Damping ratio

Fig.3 Distribution of soil properties for a soil with $\gamma_{\max} < 1\%$

Table 1 Specification of the turbine model

Parameter	Value
Rated power	3MW
Sea water level (above seabed)	12.8 m
Tower base height (above seabed)	25.6 m
Hub height (above sea surface)	85.5 m
Monopile length (below seabed)	27.0 m
Monopile diameter	5.5 m
Blades and nacelle mass (rigid)	178 ton

Figs.4, 5, 6 には、柔地盤と硬地盤における風車タワーおよびモノパイルの曲げモーメントおよびせん断力の分布の解析結果を示す。図中の SE と TLM は土木学会指針の簡易式 (Simplified Equation) および薄層法 (Thin Layer Method) により求めた等価線形ばねと減衰係数を用いた地震応答解析の結果を表し、3DFEM と Nonlinear は 3 次元有限要素法および 1 次元非線形地盤反力モデル (One-dimensional Nonlinear Soil Reaction Model) を用いた地震応答解析の結果を表す。括弧内の記号は、自由地盤の解析モデルを示し、EL と NA はそれぞれ等価線形解析と逐次非線形解析により求めた地震動を用いたことを示す。

Fig.4 は地盤ひずみが 1% 超となる柔地盤についての解析結果である。土木学会指針に従い、1% 超の場合に自由地盤の解析には逐次非線形解析を行った。逐次非線形解析の結果から評価した等価線形ばねと減衰係数を用いた土木学会指針による簡易モデル (SM) の結果は、3D FEM の値を上回る結果となった。また薄層法 (TLM) の結果も過大評価になるが、SM より 3D FEM の値に近い結果となった。一方、本研究で提案した 1 次元非線形地盤反力モデルの結果は、3D FEM の結果によく一致した。

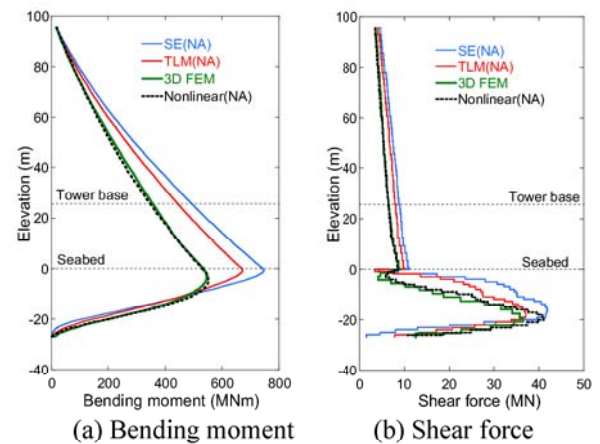


Fig. 4 Comparison of maximum responses by different linear and nonlinear models for a soil with $\gamma_{\max} > 1\%$

Fig.5 は地盤ひずみが 1% 以下となる硬地盤についての解析結果である。土木学会指針に従い、1% 以下の場合に自由地盤解析に等価線形解析を適用した。等価線形解析の結果から評価した等価線形ばねと減衰係数を用いた土木学会指針による簡易モデルの結果は、3D FEM を上回る結果になったが、薄層法の結果は、全断面で 3D FEM を下回る結果となった。これは地盤の等価線形解析では逐次非線形化解析より得られた有効ひずみを過小評価したことによるものである。河本ら⁶⁾により 3 次元薄層法を用いた地震応答解析も

同様な結果を示し、薄層法によるばねと減衰係数を用いる場合には自由地盤解析に注意を要する。

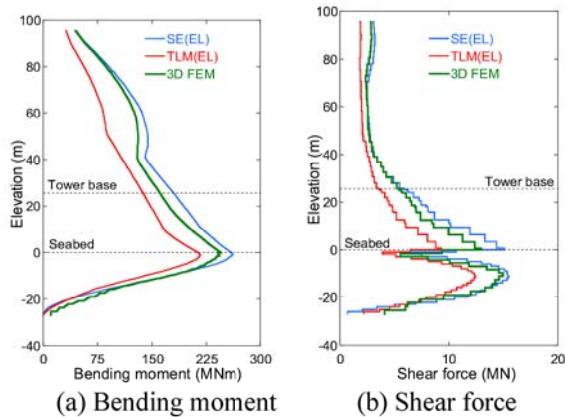


Fig. 5 Comparison of maximum responses by different spring and damping models using equivalent linear ground motion and 3D FEM for a soil with $\gamma_{\max} < 1\%$

Fig.6 には地盤ひずみが 1%以下となる硬地盤について、自由地盤解析に逐次線形化解析を適用した場合の結果を示す。この場合、薄層法を用いても、3D FEM の結果より大きくなり、安全側の評価になった。この結果から、薄層法によりばねと減衰を評価する場合に自由地盤解析に逐次線形化解析を行う必要があることが分かる。

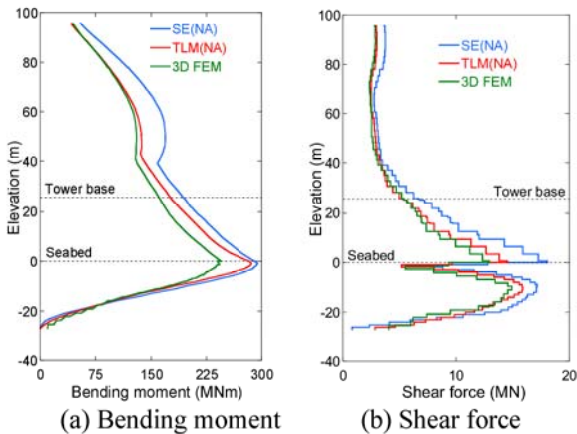


Fig. 6 Comparison of maximum responses by different spring and damping models using nonlinear ground motion and 3D FEM for a soil with $\gamma_{\max} < 1\%$

4. まとめ

モノパイル基礎の洋上風車を対象に、地震時の地盤のせん断ひずみが 1%を超える場合と 1%以下の場合について、提案した 1 次元非線形地盤反力モデル、土木学会指針に示されている簡易モデルおよび薄層法により評価した等価線形ばねと減衰係数を用いて、1 次元ビームモデルにより算定した地震荷重を 3 次元 FEM による解析結果と比較し、以下の結論が得られた。

1) 本研究により提案した 1 次元非線形地盤反力モデ

ルにより評価した地震荷重は、地盤ひずみが 1%超の柔地盤において、3D FEM の結果と良く一致した。

2) 地盤ひずみが 1%以上の柔地盤の場合は、逐次非線形解析により得られた有効ひずみが等価線形解析から得られた有効ひずみより約 12 倍大きくなる断面がある。また地盤ひずみが 1%以下の硬地盤の場合でも、逐次非線形解析により得られた有効ひずみが等価線形解析から得られた有効ひずみより約 3 倍大きくなる断面があり、注意を要する。

3) 地盤ひずみが 1%以下の硬地盤について、自由地盤解析に等価線形解析を適用した場合、土木学会指針による簡易モデルの応答は、3D FEM の結果を上回るが、薄層法により求めた等価線形ばねと減衰係数を用いた地震応答解析の結果は、3D FEM の結果を下回り危険側の評価となる。一方、自由地盤解析に逐次非線形解析を適用した場合は、薄層法により評価した地震応答解析の結果も 3D FEM の結果を上回ったことより、地盤ひずみが 1%以下の場合、薄層法により求めた等価線形ばねと減衰係数を用いた地震応答解析を行う際には、自由地盤解析の精度に注意が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会，風力発電設備支持物構造設計指針・同解説，2010
- 2) 石原孟，難波治之，新田康男，河本悠歩，モノパイル基礎の洋上風車の地震荷重評価のための簡易モデルの提案，第 45 回風力エネルギー利用シンポジウム，2023
- 3) 宮本裕司，酒向裕司，喜多村英司，三浦賢治，非線形，液状化地盤における杭基礎の地震応答性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第 471 号，1995
- 4) L. Wang, T. Ishihara, New p-y model for seismic loading prediction of pile foundations in non-liquefiable and liquefiable soils considering modulus reduction and damping curves, *Soils and Foundations*, 62(5), 101201, 2022
- 5) 河本悠歩，古島優希，亀山雄貴，石原孟，3 次元解析によるモノパイル基礎洋上風車の地震荷重評価，第 46 回風力エネルギー利用シンポジウム，2024
- 6) 河本悠歩，新田康男，難波治之，石原孟，等価線形モデルによるモノパイル基礎の洋上風車の地震荷重評価，日本風力エネルギー学会論文集，Vol.48, No.1, 2024
- 7) 吉田望，DYNEQ A computer program for Dynamic response analysis of level ground by equivalent linear method，東北大学工学部，2008
- 8) 3 次元立体構造物の静的・動的な非線形型解析プログラム，RESP-F3T (3 次元フレーム汎用解析プログラム) Version 2.3.2，構造計画研究所，2022
- 9) Broms, B. B., Design of Laterally Loaded Piles, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations, Division, ASCE*, Vol.91, Issue 3, 1965
- 10) Ishihara, K., N. Yoshida, N., Tsujino, S., Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, 1985