

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*

A study of three-dimensional analyses for prediction of seismic loads on monopile supported offshore wind turbines

河本 悠歩**
Yuhu KAWAMOTO

古島 優希**
Yuki FURUSHIMA

亀山 雄貴**
Yuki KAMEYAMA

石原 孟***
Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風力発電設備の大型化に伴い、モノパイル基礎支持の洋上風車に作用する地震荷重を合理的に評価することは重要となっている。モノパイル基礎支持の洋上風車へ作用する地震荷重の評価は、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考慮した1次元 Winkler モデルを用いた場合に、地震荷重が過大評価される傾向がある^{2),3)}。石原ら⁴⁾と河本ら⁵⁾は地震荷重をより正確に予測できる地盤ばねと減衰係数の評価手法⁴⁾と3次元薄層法モデル⁵⁾による地震荷重の評価手法を提案した。しかし、石原ら⁴⁾や河本ら⁵⁾の研究では、地盤応答のひずみレベルが1%以下であり、等価線形解析が適用できる条件での評価に留まっている。

本研究では、地盤応答のひずみレベルが1%以下および、1%を超える地盤条件において、地盤の非線形性を等価線形化して考慮する3次元薄層法と、逐次非線形として考慮する有限要素法 (FEM) を用いた地震応答解析を実施し、両モデルにより予測される支持構造物に作用する地震荷重の相違を調べ、地盤の非線形性の近似方法が地震荷重の予測結果に与える影響を明らかにする。なお、地盤応答のひずみレベルが1%を超える地盤条件での1次元 Winkler モデルの適用可能性について文献6を参照されたい。

2. 地震応答解析の概要

2.1 3次元薄層法モデルの概要

Fig.1 に、3次元薄層法モデル (以下、「3D-TLM」) の断面図を示す。薄層法は、地盤を伝播する波動問題に対し、平行成層地盤における波動方程式を満足する解析解を用い、モノパイル基礎の有限要素法を組み合わせるハイブリッド解法である⁷⁾。この解法を平行成層地盤に適用し、風車・モノパイルをビーム要素によりモデル化し、モノパイルと地盤を、モノパイルを軸として、円周方向にモノパイル半径の長さの16本の剛梁で結んだ、風車・モノパイル・地盤の一体型モデルと

した。解析プログラムは SuperFLUSH/3D⁸⁾を用いた。地盤には、地盤応答解析プログラム SHAKE によって算定した等価地盤剛性と減衰を工学的基盤までモデル化し、それ以深は工学的基盤の物性値を有する半無限地盤を仮定した。地盤剛性と減衰は複素剛性として考慮される。入力地震動を工学的基盤に直接入力し、周波数応答解析法により地震応答解析を行った。

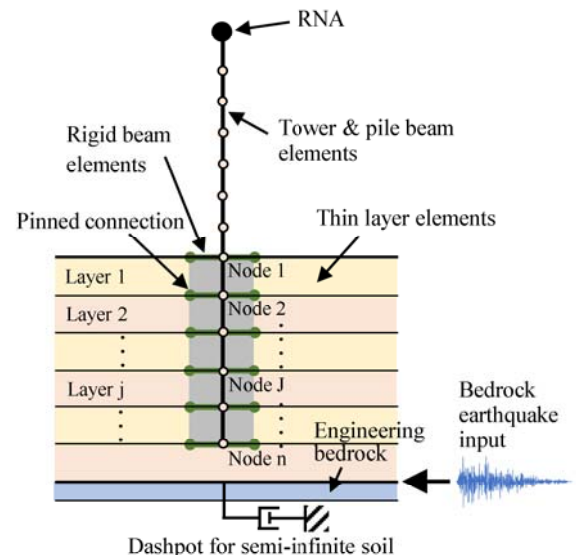


Fig. 1 3D Thin layer model (3D-TLM)

2.2 3次元非線形 FEM モデルの概要

Fig.2 に、3次元非線形 FEM モデル (以下、「NL-3D-FEM」) の鳥瞰図と断面図を示す。風車・モノパイルをビーム要素によりモデル化し、モノパイルと地盤を、モノパイルの節点と円周方向の地盤の節点を多点拘束 (MPC) とした、風車・モノパイル・地盤の一体型モデルとした。解析プログラムは SoilPlus⁹⁾を用い、逐次非線形時刻歴応答解析を実施した。水平方向の地盤のモデル化範囲は、境界面が風車の応答に影響を与えないように十分広くとり、深さ方向のモデル化範囲は、工学的基盤までとした。地盤モデルの側面および底面は、それぞれ節点間を接続する1次元の粘性ダンパーによって自由地盤および固定端と接続した。地盤モデル側面の粘性ダンパーの減衰係数は、加振方向と平行

*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

**団体会員 清水建設株式会社

***会員 東京大学大学院工学系研究科

な面を式(1)、加振方向と直交する面を式(2)とした。また、上下方向の入力を行わないため、地盤モデル底面の粘性ダンパーは式(1)の減衰係数のみとした。

$$C_1 = \rho V_s A \quad (1)$$

$$C_2 = \rho V_p A \quad (2)$$

ここで、 ρ は地盤の密度、 V_s および V_p は地盤の S 波速度および P 波速度、 A はダンパーが接続する節点の支配面積である。

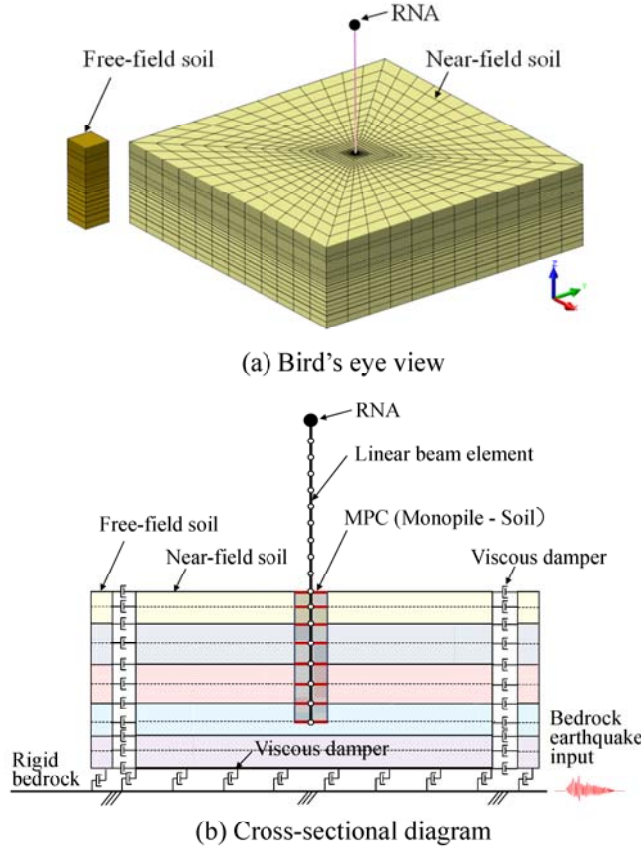


Fig. 2 Non-linear 3D FEM model (NL-3D-FEM)

地盤の非線形性は、地盤のソリッド要素の 3 成分のせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係 ($\tau_{xy}-\gamma_{xy}$, $\tau_{yz}-\gamma_{yz}$, $\tau_{zx}-\gamma_{zx}$) に、石原-吉田モデルとして考慮した。

骨格曲線には、式(3)、式(4)に示す Hardin-Drnevich モデルを適用し、除荷時の歪みと応力およびその時の減衰定数から計算される骨格曲線に対して石原-吉田モデルを適用する。

$$G/G_0 = 1/(1 + \gamma/\gamma_{0.5}) \quad (3)$$

$$h = h_{max} (1 - G/G_0) \quad (4)$$

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、 γ は地盤のせん断ひずみである。

3. 解析対象および入力地震動の概要

本研究の解析対象は、タワーとモノパイルを直接接

合するトランジションピースのない、定格出力 3MW の洋上風車とした。主な構造諸元を Table 1 に示す。

Table 1 Specification of wind turbine

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

Fig.3(a)には地中のモノパイル寸法、Fig.3(b)~(f)には地盤パラメータを示す。本研究では、地盤応答のひずみレベルが 1%以下および 1%を超える、それぞれ硬地盤と柔地盤の 2 つの地盤条件に対して検討した。柔地盤は、初期地盤物性を硬地盤の 55%に低減し、密度、 $\gamma_{0.5}$ 、 h_{max} は硬地盤と共通とした。なお、本研究では、地盤剛性の違いが地盤の非線形性の近似方法に与える影響を確認するため、モノパイルの寸法はいずれの地盤条件においても共通とした。

入力地震動は、式(5)による工学的基盤定義の告示スペクトル適合波（乱数位相）とした。

$$S_{a0}(T) = \begin{cases} a_0(1 + 9.375)T \cdot Z & (T \leq 0.16) \\ 2.5a_0 \cdot Z & (0.16 < T < 0.64) \\ 1.6a_0 / T \cdot Z & (T \geq 0.64) \end{cases} \quad (5)$$

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ある。

本研究では、 a_0 が 2 Gal の地震と、告示の極めて稀に発生する地震に対応する a_0 が 320 Gal、地震地域係数 Z を 0.9 とした 2 つの入力地震動を用いた。なお、本研究で a_0 が 2 Gal のケースを用いたのは、地盤の剛性低下が非常に少なく、線形解析に近い場合における 3D-TLM と NL-3D-FEM の比較を行うためである。

3D-TLM の地盤に考慮する地盤の等価剛性と減衰の算定のため、 a_0 が 320 Gal の入力地震動に対して地盤応答解析を実施した。硬地盤に対しては等価線形化法による SHAKE を実施し、地盤の等価剛性と等価減衰比は、式(3)、式(4)の Hardin-Drnevich モデルに従い、式(3)の γ を有効せん断ひずみ γ_e （地盤の最大せん断ひずみ γ_{max} の 0.65 倍）として算定した。柔地盤に対しては、石原-吉田モデルの履歴特性を考慮した逐次非線形解析を実施し、得られた地盤の最大せん断ひずみ γ_{max} の 0.65 倍を有効せん断ひずみ γ_e として、等価線形解析の場合と同様に、式(3)、式(4)に従い地盤の等価剛性と等価減衰比を算定した。

Fig.4 に、等価線形地盤の剛性比 G_e/G_0 と等価減衰定数 h_e の分布を示す。硬地盤では、有効せん断ひずみが最大 0.14%となっていることに対し、柔地盤では、有効せん断ひずみが最大 12.0%となっており、硬地盤に対して柔地盤のせん断剛性に大幅な剛性低下が見られる。なお、 a_0 が 2 Gal の場合の硬地盤に対する等価線形解析では、せん断ひずみが非常に小さく、剛性低下がないに等しいことを確認したため、 a_0 が 2 Gal のケースの 3D-TLM には剛性低下のない硬地盤を考慮した。

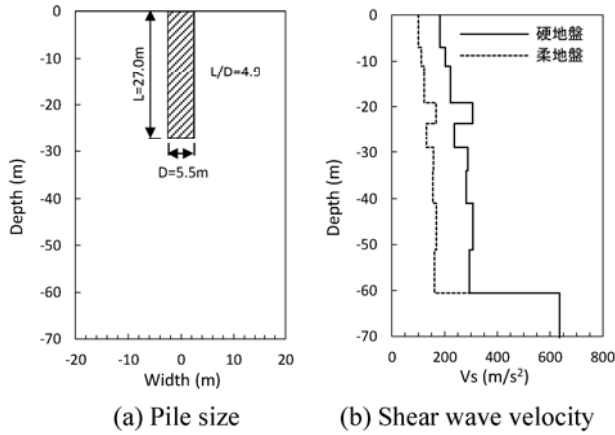


Fig. 3 Soil and pile conditions

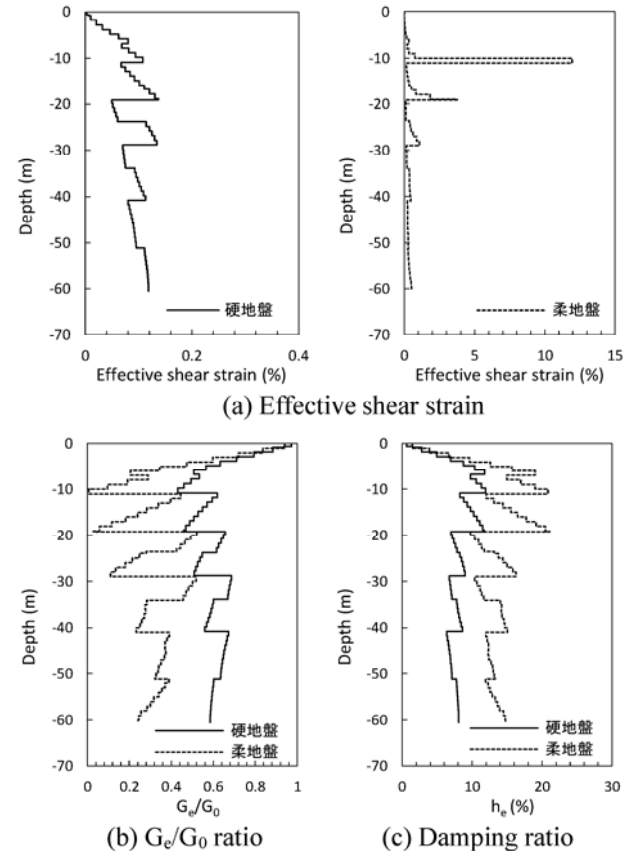


Fig. 4 Equivalent linear soil properties

4. 解析結果と考察

Fig.5 と Fig.6 に $a_0=2$ Gal と $a_0=320$ Gal の場合の硬地盤に対する地震応答解析結果、Fig.7 に $a_0=320$ Gal の場合の柔地盤に対する地震応答解析結果として、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を示す。

a_0 が 2 Gal のケースでは、Fig.5 に示すように、3D-TLM と NL-3D-FEM は同等の曲げモーメントおよびせん断力の分布を示し、2つの解析手法が、ひずみが微小の場合に同等の結果となることが分かる。

a_0 が 320 Gal の硬地盤のケース (Fig.6) は、等価線形解析の有効ひずみが 0.14%の地盤応答レベルを対象としている。3D-TLM の曲げモーメントとせん断力が、支持構造物全体に渡って NL-3D-FEM の値を下回る。また、NL-3D-FEM の地表面における曲げモーメントの分布形状が 3D-TLM より鈍角となっており、NL-3D-FEM において、地盤とモノパイルの相互作用の影響による地盤の非線形化の影響が表れたものと考えられる。

a_0 が 320 Gal の柔地盤のケース (Fig.7) は、逐次非線形解析による地盤応答の有効せん断ひずみが 12.0%となる場合を対象としている。3D-TLM は、Fig.6 の硬地盤のケースと変わらず海底面で曲げモーメントの最大値を示しているが、NL-3D-FEM の最大値は高さが下がり、その値が 3D-TLM に比べ小さくなっている。そ

の影響で NL-3D-FEM の曲げモーメントは、海底面より上部では 3D-TLM の曲げモーメントを下回っているのに対し、地中部では、3D-TLM の曲げモーメントを上回っている。等価線形解析による 3D-TLM では、地盤のひずみが大きい場合に、地盤の非線形性を精度よく評価できず、顕著な差が表れたと考えられる。

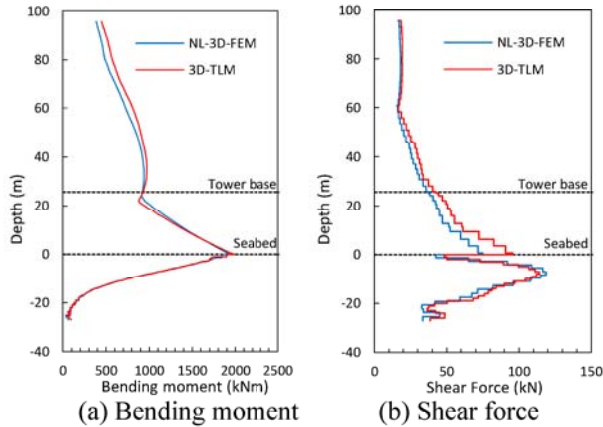


Fig. 5 Maximum responses for stiff soil ($a_0 = 2$ Gal)

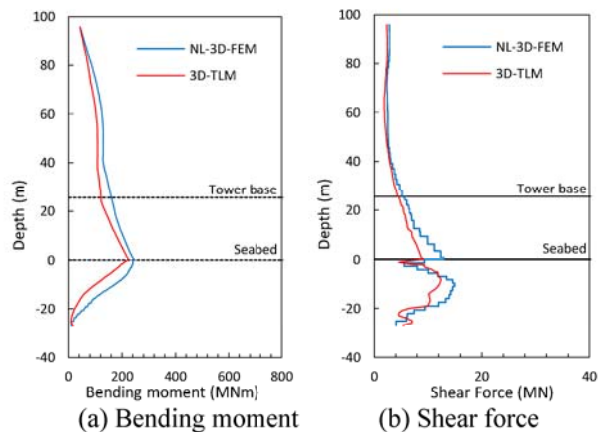


Fig. 6 Maximum responses for stiff soil ($a_0 = 320$ Gal)

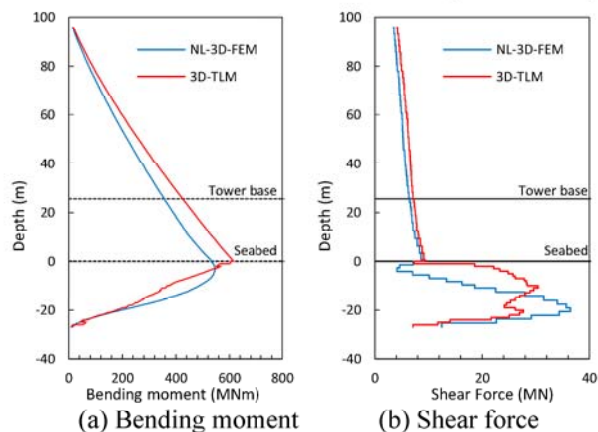


Fig. 7 Maximum responses for soft soil ($a_0 = 320$ Gal)

5. まとめ

モノパイル基礎支持の洋上風車を対象に、地盤応答解析において、ひずみレベルが 1% 以下および 1% を超える条件において、地盤の非線形性を等価線形化して考慮する 3 次元薄層法モデルと、逐次非線形として考

慮する 3 次元非線形 FEM モデルを用いて、地震応答解析を実施し、以下の結論が得られた。

- 1) 地盤のひずみが微小なレベルでは両モデルは同等の結果を示す。
- 2) 等価線形解析により求めた有効ひずみが最大 0.14% の場合、3 次元薄層法モデルは、3 次元非線形 FEM モデルに対し、地震荷重を過小評価する。
- 3) 逐次非線形解析により求めた有効ひずみが最大 12% の場合、3 次元薄層法モデルは、地盤の非線形性を適切に評価できず、3 次元非線形 FEM モデルの結果に対し差異が生じる。
- 4) 3 次元非線形 FEM モデルは、地盤の非線形性を厳密に評価することにより、曲げモーメントの最大値は海底面より深い深度で現れ、海底面より上部の地震荷重が低下する。

なお、本研究の結論が、異なる地震動、モノパイルの細長比においても、同様となるかについては、今後、継続的に検討を進める予定である。

謝辞

本研究は、次世代エネルギーインフラの創成社会連携講座の研究の一部として実施された。また本研究にあたり、(株) ウェンティ・ジャパンの協力を得た。ここに記して謝意を表する。

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) 山本康之，新田康男，池田竜介，河本悠歩，石原孟，洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価（その 1：逸散減衰効果の検討），令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回学術講演会，I-334，2023
- 3) 田中栄次，新田康男，池田竜介，河本悠歩，石原孟，洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価（その 2：薄層法及び FEM の適用），令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回学術講演会，I-335，2023
- 4) 石原孟，難波治之，河本悠歩，新田康男，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
- 5) 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, pp.8-19, 2024
- 6) 石原孟，難波治之，河本悠歩，古島優希，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，第 46 回風力エネルギー利用シンポジウム，2024
- 7) 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，2006
- 8) 構造計画研究所，SuperFLUSH/3D, Version 3.0, 2018
- 9) 伊藤忠テクノソリューションズ，SoilPlus 2023