

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）

9:40 ~ 9:50

[I-324] 洋上風力発電モノパイル基礎の地震荷重の評価（その1：薄層法の適用）

*河本 悠歩¹、新田 康男¹、古島 優希¹、石原 孟² (1. 清水建設株式会社、2. 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、地震応答解析、簡易法、薄層法、減衰係数

洋上風力発電設備の大型化に伴い、モノパイル基礎による支持構造には地震時に大きな荷重が発生することから、地震応答解析の予測精度は重要である。土木学会指針に準拠した地盤ばねとダッシュポットを用いたWinklerモデルは、地盤ばねの減衰係数を安全側に評価するため、地震応答が大きくなる傾向がある。薄層法を用いて地盤ばねと減衰係数を求める方法も提案されている。これらの手法で評価した地盤ばねと減衰係数を用いた解析モデルの結果の精度検証のため、本研究では、砂地盤上の3MW洋上風車を対象に、地盤とモノパイルの挙動を厳密に再現できる3次元薄層法を用いた地震応答解析を実施し、応答結果の比較検証を実施した。

洋上風力発電モノパイル基礎の地震荷重の評価（その1：薄層法の適用）

清水建設（株） 正会員 ○河本 悠歩, 新田 康男,
古島 優希
東京大学 正会員 石原 孟

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る支持構造には地震時に大きな荷重が発生し、それにより断面寸法が決まることから、地震応答解析の予測精度は重要である。土木学会指針¹⁾に準拠した地盤ばねとダッシュポットを用いた Winkler モデルは、地盤ばねの減衰係数を安全側に評価するため、地震応答が大きくなる傾向がある^{2),3)}。地盤ばねと減衰係数に関して、土木学会指針による簡易法（以下「簡易法」）に加え、薄層法（TLM）による地盤ばねと減衰係数を用いる方法も提案されている¹⁾。しかし、これらの手法を用いて評価した地盤ばねと減衰係数を用いたモノパイル基礎の地震応答解析の例が少なく、3次元薄層法による精度検証が急務である。

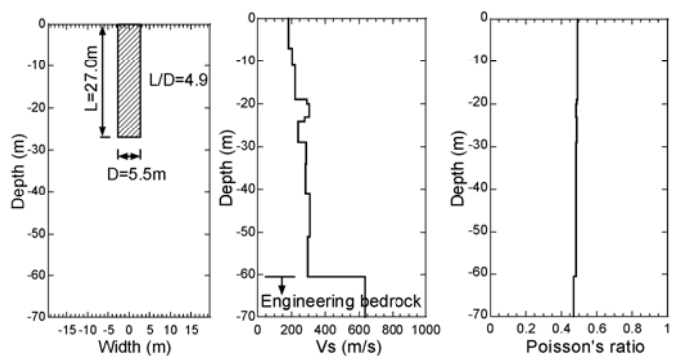
そこで、本研究では、砂地盤上の 3MW 洋上風車を対象に、地盤とモノパイルの挙動を厳密に再現できる 3次元薄層法を用いた地震応答解析を実施し、その結果を、薄層法および簡易法により評価した地盤ばねとダッシュポットを用いた 1次元の Winkler モデル（以下「1D model」）による地震応答解析と比較することにより、その予測精度を検証する。

2. 3次元薄層法による地盤ばねと減衰係数の評価

土木学会指針¹⁾に示されるように、地盤ひずみレベルが 1%以下の場合に、等価線形解析法を用いることができる。本研究では、地盤ひずみレベルが 1%以下の範囲において、風車・モノパイル・地盤の相互作用を正確に考慮した地震応答解析の手法として、3次元薄層法を用いた。

Fig.1(a)には地中のモノパイル寸法、Fig.1(b)～(f)には地盤パラメータを示す。本研究ではせん断波速度 V_s が 636m/s となる GL-60.55m を工学的基盤面とした。Fig.1(e), (f)に示した地盤の基準ひずみと減衰定数の最大値を用いて、等価線形 SHAKE 解析を実

施し求めた、地震時の有効せん断ひずみ、等価線形剛性と減衰係数を Fig.2 に示す。入力地震動は、極めて稀に発生する地震動レベルとし、告示スペクトルを満足する乱数位相の加速度時系列データを工学的基盤に定義した。地域係数は 0.9 とした。



(a) Pile size (b) Shear wave velocity (c) Poisson's ratio

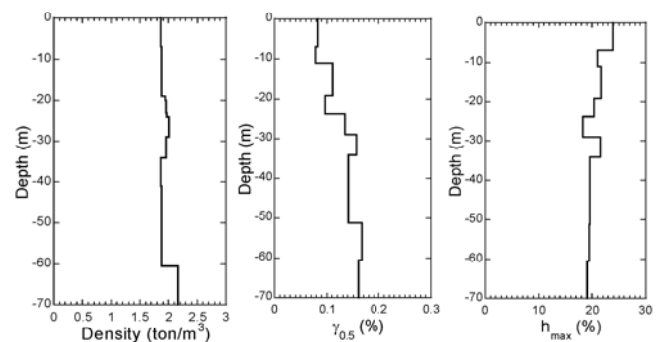
(d) Soil density (e) $\gamma_{0.5}$ (f) h_{max}

Fig. 1 Soil and pile conditions

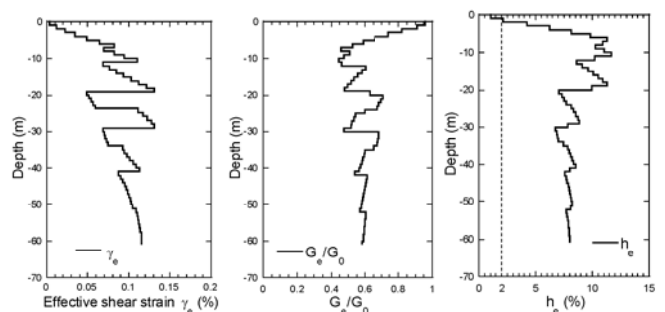
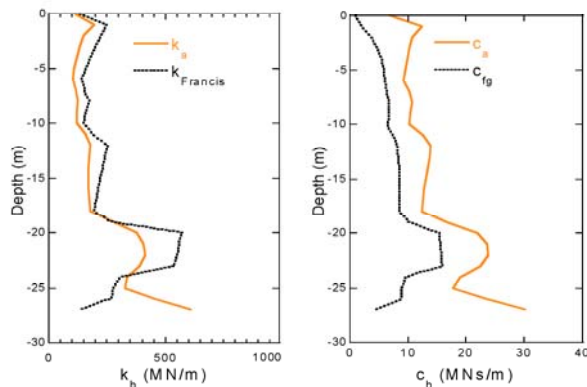
(a) Effective shear strain (b) G_e/G_0 ratio (c) Damping ratio

Fig. 2 Equivalent linear analysis by SHAKE

キーワード 洋上風力発電, モノパイル基礎, 地震応答解析, 簡易法, 薄層法, 減衰係数
連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 TEL. 090-2638-4153

次に杭周に沿って分布する地盤ばねとダッシュポットを薄層法によって評価した。これは、3次元成層地盤における薄層法の点加振解 (SuperFLUSH/3D) を用いて、モノパイルの設定した高さ位置における地盤の柔性マトリックスを求め、その逆行列から地盤の剛性マトリックスを算定し、それに水平方向の剛体変位分布を仮定して求めた地盤反力と、水平方向の軸ばね反力が等価になるように Winkler モデルへ等価置換を行う方法である。Fig.3 には、この方法により評価した水平ばねの剛性 k_a と減衰係数 c_a を、土木学会指針¹⁾の簡易法により求めた水平ばねの剛性 k_{Francis} と減衰係数 c_{fg} と比較して示す。

モノパイル下端部を除き、Francis の式による水平ばね剛性は薄層法により求めたものと概ね一致した。一方、水平の減衰係数については、簡易法による値は薄層法の値に比べて過小評価されている。



(a) Spring stiffness (b) Damping coefficient

Fig.3 Horizontal spring stiffnesses and damping coefficients

3. 地震応答解析結果のまとめ

本研究では Fig.4 に示す 1D model と 3D TLM により地震応答解析を行った。1D model による地震応答解析では、Fig.3 に示す薄層法により評価した水平地盤ばねとダッシュポットによるモデル(1D $k_a c_a$)と、Francis の式と簡易法により評価した水平地盤ばねとダッシュポットによるモデル(1D $k_{\text{Francis}} c_{fg}$)の 2 つのモデルを評価した。

Fig.5 に、地震応答解析により得られたタワーおよびモノパイルに作用する曲げモーメントとせん断力の最大応答値を示す。Francis の式と簡易法による 1D $k_{\text{Francis}} c_{fg}$ モデルは、3D TLM の値に比べて過大評価されている。これは簡易法による水平方向の減衰係数が 3D TLM により考慮される減衰に比べて過小評価

されているためである。一方、薄層法により評価した 1D $k_a c_a$ モデルの最大応答値は、タワー上部の曲げモーメントとタワー基部以下のせん断力が 3D TLM の値に近くなった。その理由は水平ばねに対応する減衰係数が簡易法の値に比べて大きいこと、およびモノパイル底面での地盤の影響を考慮したことによるものであると推定される。

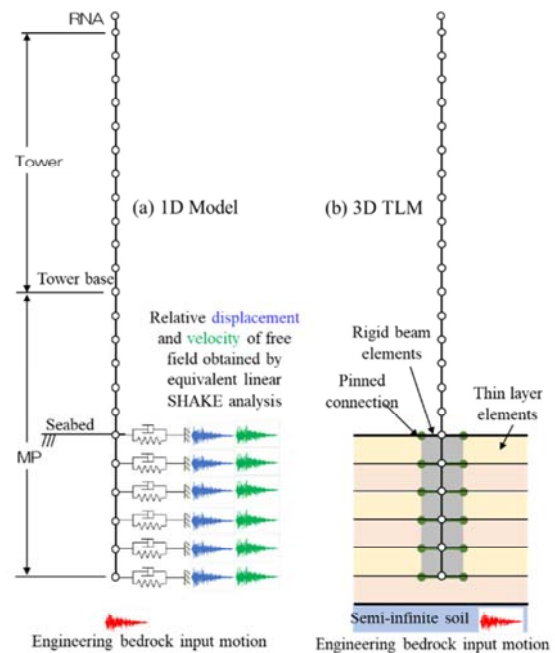
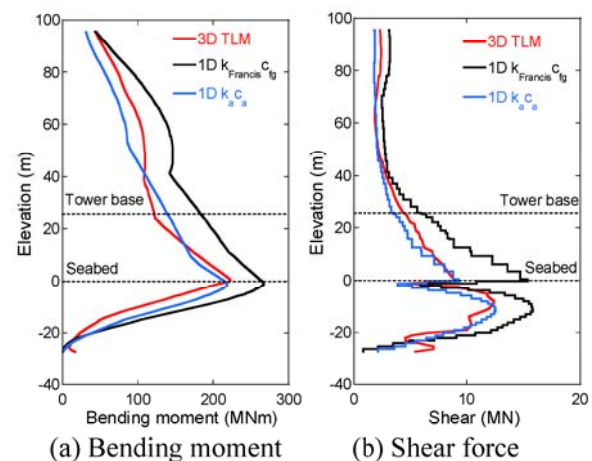


Fig.4 Comparison of 1D model and 3D TLM



(a) Bending moment (b) Shear force

Fig. 5 Maximum responses predicted by 1D model and 3D TLM

参考文献

- 1) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針, 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