

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）

清水建設（株） 正会員 ○田中 栄次, 新田 康男,
池田 竜介, 河本 悠歩
東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

前編（その1）では、地盤の逸散減衰効果を土木学会指針^[1]が規定する2次モード以上にレーリー減衰として考慮可能な吉岡ら2022の手法^{[2][3]}のモノパイル基礎への適用性を示した。

本編（その2）では、地震応答評価の更なる合理化を目的として、3MW級風車のモノパイル基礎を対象に、薄層要素法および軸対称FEM解析法の適用性について検討を行う。

2. 薄層法ばねモデルによる検討

倉本ら2022^[4]は、地盤ばね・減衰の評価方法として、薄層要素法と宮本らの手法^[5]を用いた場合についての検討も行っている。これは、3次元成層地盤における薄層法(TLM)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ウィンクラーモデルへ等価置換を行う方法である。

この手法を適用して算定した地盤ばね K とダッシュポットの減衰係数 C の分布をオリジナルモデルの土木学会指針によるものと比較して図1に示す。この減衰係数は、GL-2mの位置について図2に示すように、振動数によって変化するため、その傾きが最小となるように設定した $C_{min}(TLM)$ ^{[1][6]}である。図中には参考として、Ishihara&Wang 2019^[7]の方法に従って、1次振動数に対し算出した $C(f_1)$ の値も示すが、 $C_{min}(TLM)$ とほぼ同じ傾きとなっている。

低振動数域で曲線の傾きが小さくなる傾向は、表層の波動インピーダンス ρV_s と基盤の波動インピーダンス $\rho_B V_{SB}$ の比によって変わることが知られている^{[8][9]}。図3は工学的基盤を剛体とした場合と、 $V_s=400\text{m/s}$ と波動インピーダンス比を変えた場合の減衰定数の変化を示したものである。土木学会指針は工学的基盤を剛体と仮定して減衰係数の値を設定していることに相当すると考えられる。

この薄層法ばねモデルに地震動（スペクトル適合波（乱数位相））を入力して応答結果を求め、前編（その1）の応答結果と比較したものを図4に示す。

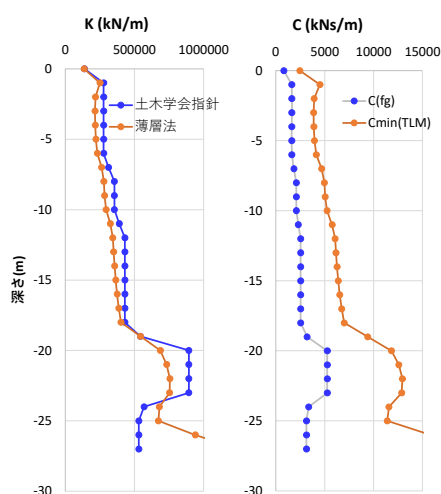


図1 地盤ばねと減衰係数

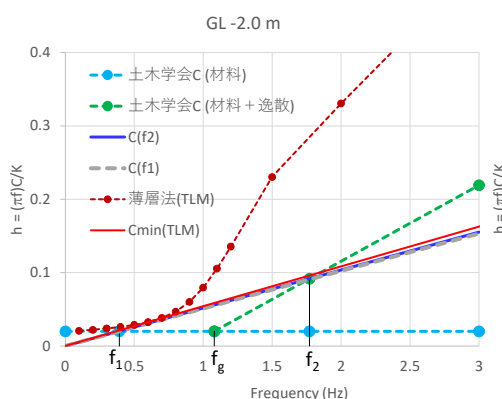


図2 GL-2mの減衰定数

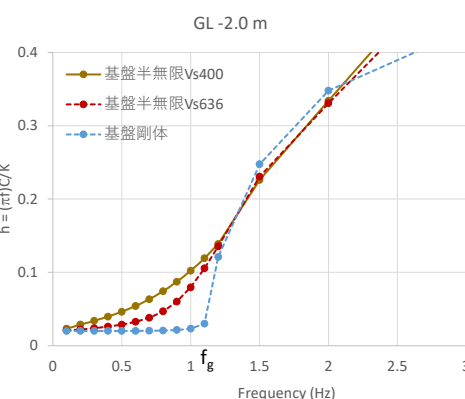


図3 減衰定数の波動インピーダンス比の影響

キーワード 洋上風力発電, 地震応答解析, 薄層要素法, 軸対称FEM
連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL. 090-2554-6682

タワートップと海底面では、薄層法ばねモデルは2次レーリー減衰増モデルおよび1次と2次Cモデルの応答とほぼ同じ応答となっている。インターフェース部から海底面までの1次モードの影響が大きい部分でもやや応答が小さくなり、1次と2次Cモデルとはほぼ同じ応答となっている。

3. 風車-地盤一体モデルによる検討

薄層ばねを用いたウィンクラーモデルの妥当性を確認するために、以下の2つの風車-地盤一体モデルを用いて、工学的基盤面に同じ地震動を入力して、応答結果を求め、ウィンクラーモデルと比較した。

(a) 薄層法 (SuperFLUSH/3D) によって地盤をモデル化し風車と一体にした解析モデル (図5)

(b) 軸対称 FEM (SoilPlus) によって地盤をモデル化し風車と一体にした解析モデル (図6)

応答解析結果を図4に重ね書きして示す。地盤を薄層法によってモデル化した方法においても、軸対称 FEM によってモデル化した方法においても、風車と地盤を一体として解いた場合に、ウィンクラーモデルで解いた場合よりも、インターフェース部分の曲げモーメントが小さくなっている。この結果は、本研究で用いた1Dウィンクラーモデルがモノパイル基礎の3次元効果を考慮していないことによるものと思われる。今後 Wang & Ishihara2022^[10]により提案された半解析1Dモデルを用いて応答解析を行い、その理由を明らかにする予定である。

4. まとめ

本研究より、薄層法、1次または2次Cモデルおよび2次レーリー減衰増モデルは地盤の逸散減衰効果を適切に考慮することにより、ほぼ同じ応答値が得られることを明らかにした。また本研究で用いた1Dウィンクラーモデルは一体モデルより応答が大きくなり、モノパイル基礎の3次元効果を考慮する必要があることが示唆された。

本研究にあたり、(株)ウエンティ・ジャパンの協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献 [1][2][3][4][5] 前編 (その1) と同じ

[6] 日本建築学会：建物と地盤の動的相圧作用を考慮した応答解析と耐震設計，2006

[7] T. Ishihara, L. Wang, A study of modal damping for offshore wind turbines considering soil properties and foundation types, Wind Energy, Volume 22, Issue 12, pp.1760-1778, 2019

[8] 田治見：「建築振動学」 5.2 章, 1965

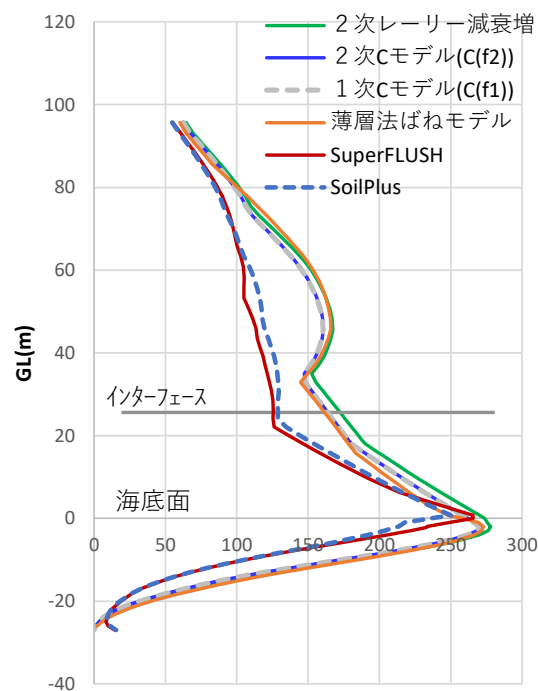


図4 曲げモーメント応答の比較(MNm)

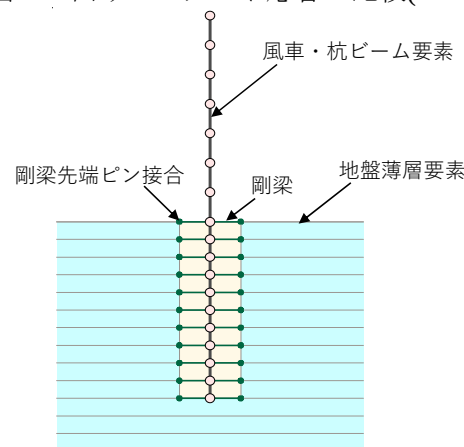


図5 薄層法一体モデル (SuperFLUSH/3D)

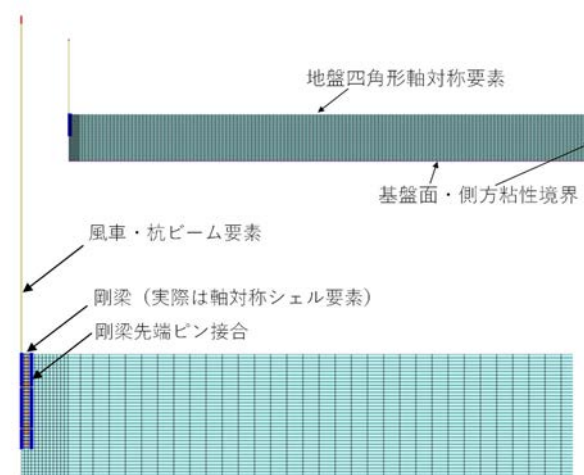


図6 軸対称 FEM 一体モデル (SoilPlus)

[9] A.Mita et al. : Soil-Structure Interaction Experiment using Impulse Response, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.18, 1989

[10] L. Wang, T. Ishihara, A semi-analytical one-dimensional model for offshore pile foundations considering effects of pile diameter and aspect ratio, Ocean Engineering, 250, 1-17, 2022.