

洋上風力発電ジャケット基礎の地震応答解析 ～その2 薄層法の適用～

(株) 構造計画研究所 正会員 ○倉本 龍, 正月 俊行, 内山 不二男, 國松 要介
 電源開発 (株) 正会員 吉岡 健, 石尾 将大
 東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

研究その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次モード以上にのみレリー減衰として考慮可能な簡易設定法の実用性を示した。さらに、ジャケット基礎の場合は、1次モード(頭振りモード)が杭の軸力に変換されるため、地盤のダッシュポットに直接逸散減衰項を付与しても1次応答を過小評価しないことを示した。

そこで本研究その2では、地震応答評価の更なる合理化を目的として、10MW級風車のジャケット基礎を対象に薄層法の適用等、解析モデルの高度化を図った。

2. 解析モデルと解析条件

解析モデルは飯田・石原²⁾を参照し、図1のようにブレードを多質点フレームで模擬し、さらに空力減衰をダッシュポットにて付与した。杭基礎は地盤のばねとダッシュポットを有するWinklerモデルとした。地震波は極稀時のスペクトル適合波のランダム位相とした。加振方向は、風と地震の連成解析を事前に実施し、最大応答を与える定格風速運転時のSide-Side方向加振(90°ミスアライメント)とした。

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³⁾を用いた場合(以降、薄層法ケースと呼ぶ)と、土木学会指針式を用いた場合(以降、指針式ケースと呼ぶ)を検討し、応答を比較した。薄層法ケースでは水平軸ばねの他に、地層のせん断剛性に対応するせん断ばね(図1参照)の値が考慮される。これら2種類のばねを合わせて考慮することで、後述する通り指針式ケースの水平軸ばねと同等となる。なお、杭軸方向に作用する鉛直ばねについては、どちらのケースも指針式から求めた値を用いた。

図2に薄層法計算時に用いた地盤や杭の条件を示す。地盤物性としては、水平成層の地盤応答解析結果により得られた等価物性を用いた。また、群杭効果や地盤の逸散減衰を精密に考慮出来るように、杭の3次元的配置を考慮した。なお、今回の検討では洗堀を考慮するため、洗堀深さより浅い部分をはぎとった解析モデルを用いた。

3. 解析結果

(1) 地盤ばねの比較

薄層法により求めた地盤のインピーダンスの例として層上面D.L.-23.13mにおける結果を図3に示す。時刻歴応答解析にあたり、この振動数依存の曲線から特定の振動数における値を動的地盤ばね(ばね定数・減衰係数)として抽出す

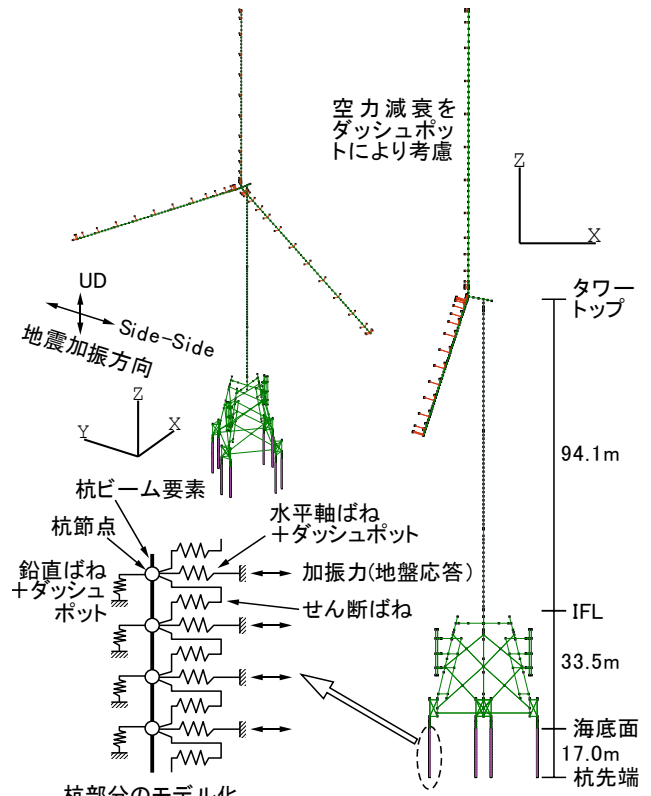


図1 解析モデル

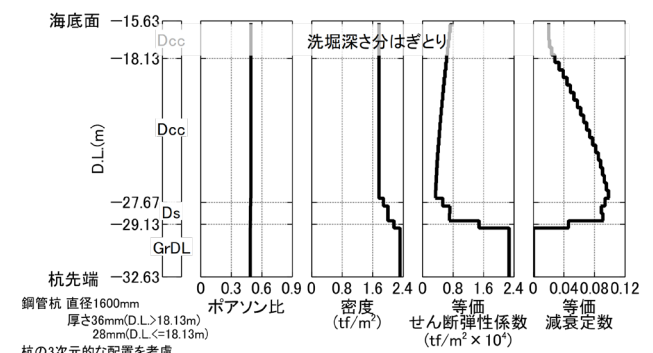


図2 薄層法計算条件

る必要がある。ばね定数は土木学会指針に従い、ゼロ Hz に近い振動数における実部値を採用した。水平軸成分の減衰係数については応答が安全側になるように、減衰勾配(図中の黒破線)が最小になる振動数における虚部の値(図中の黒丸)から求めた。水平せん断成分の減衰係数については、虚部の傾きが極めて小さいことから全層でゼロとした。

図4は、単杭頂部に水平力をかけ、杭変位の深さ分布を

キーワード 洋上風力発電, ジャケット基礎, 地震応答解析, 薄層法

連絡先 〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3 (株) 構造計画研究所 TEL: 03-5342-1123

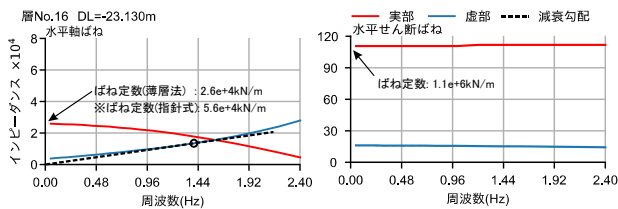


図3 地盤インピーダンスの例

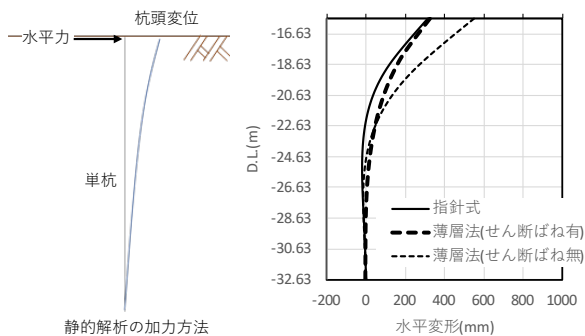


図4 杭変位分布

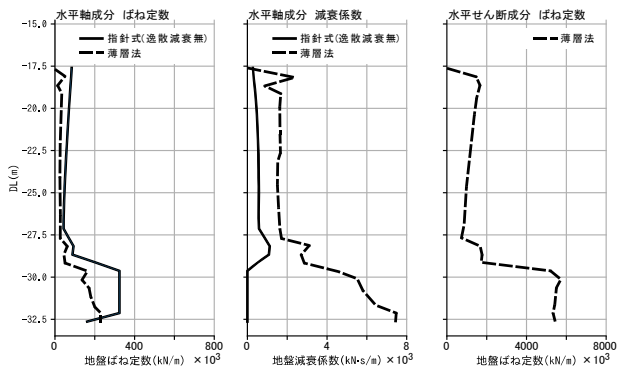


図5 動的地盤ばねの深さ分布

比較した図である。薄層法については、せん断ばね無の結果も併記している。これより指針式とせん断ばねがある場合における薄層法の頂部変位や全体的な変形性状は近いことがわかる。また、別途固有値解析を実施した結果、せん断ばねがあることによって、3次モードまでの固有振動数が指針式と誤差2%以内で良く一致した。以上より、薄層法による水平軸ばねは指針式の半分以下であるものの、これを繋ぐせん断ばねとの組み合わせにより、指針式と同等な水平剛性となっていることが確認できた。

動的地盤ばねの深さ分布を図5に示す。水平軸成分の減衰係数については、薄層法により地盤の逸散減衰を考慮した結果、薄層法の方がD.L.-29m以浅において2.5倍前後大きくなる結果となった。なお、D.L.-29m以深の岩盤層(GrDL)でも減衰係数に差が大きい、岩盤部は杭の変位が発生しないため応答結果には寄与しない。

(2) 減衰効果の比較

図6は時刻歴応答解析より得られたタワーの曲げモーメント時刻歴とフーリエスペクトルである。図には全体1次～3次の固有周期・固有モード図を併記している。薄層法のスペクトルに着目すると、1次モードの応答は指針式の結果と

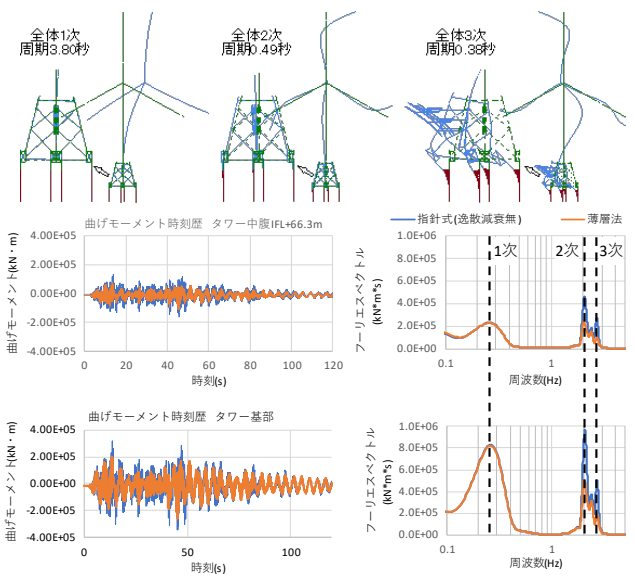


図6 タワー曲げモーメントの時刻歴とフーリエスペクトル

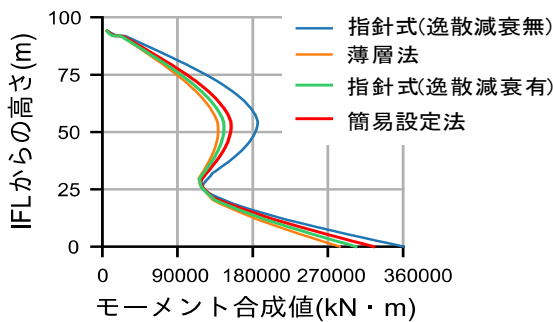


図7 タワー最大曲げモーメントの鉛直分布

ほぼ同じで、2次・3次の応答のみが小さくなっていることがわかる。これは、研究その1でも述べた通り、1次は杭の水平変形がほとんどなく、軸変形がメインのモード変形であることに起因している。高次モードの応答低減により、タワーの最大曲げモーメントの鉛直分布で見ても薄層法は指針式(逸散減衰無)に比べて大きく低減した(図7)。また、図には指針式(逸散減衰有)および簡易設定法のケースも併記しているが、薄層法に近い結果が得られた。

4. まとめ

本研究その2では薄層法および逸散減衰を考慮した指針式により求めたタワーの高次モードの応答が大きく低減する結果が得られた。なお、モノパイル基礎の場合は逸散減衰により1次モード減衰が過大評価されるため、研究その1に示す簡易設定法を用いる必要がある。

本研究にあたり、ひびきウインドエナジー(株)の協力を得た。記して謝意を表す。

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) 飯田・石原:風車支持構造物に作用する風と地震の組み合わせ荷重の数値予測, 土木学会年講, I-227, 2020.
- 3) 宮本ら: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, 建築学会構造系論文集 No.471, 1995.