

着床式洋上風力発電設備を対象とした地震応答解析におけるモデル化法の基礎検討

港湾空港技術研究所 正会員 ○大矢 陽介

1. 目的

洋上風力発電設備の円滑な導入に向けて、国内では平成 28 年に港湾法が改正され、その後、基準類の整備、促進区域の指定および基地港湾の整備が進められている。陸上風力発電設備については地震被害がいくつか報告されているが、洋上風力発電設備は国内において建設実績が少なく地震被害の経験も無いため、地震時の挙動について不明確な点が多い。本研究では着床式洋上風力発電設備を対象に、地震応答解析において大口径杭の管内質量の影響評価、レベル 2 地震動の際に懸念される地盤の液状化の考慮方法について検討した。ここでは、モノパイル式基礎の安定性を評価可能な解析手法として、地盤と杭基礎の動的相互作用を考慮した多入力解析を用いた。

2. 検討内容

検討対象は、モノパイル式基礎の 2MW 風車とした。表 1 に示す風車等の諸元は文献 1)を参考とし、地盤条件は本検討用に一部修正した。図 1 に示すように風車モデルは梁ばねモデルとして、事前に実施した 1 次元地盤の有効応力解析²⁾から得られた地盤の時刻歴波形を地盤と杭の間の相互作用ばねを介して入力した。図 1 はブレードをモデル化しているが、これは風荷重を算出するために設けたもので、本検討の地震応答解析では剛体として扱った。地盤の *N* 値深度分布および有効応力解析の結果を図 4、入力波形として用いたレベル 2 地震動相当（工学基礎で 2E 波相当）の加速度波形を図 5 に示す。地震開始 12 秒後には地盤の液状化によるスパイク状の加速度波形が地表面に現れ、海底面から深さ約 5m の範囲で地盤が液状化した。

3. 検討結果（固有値解析）

管内質量について杭全長、海底面以浅、および仮想固定点以浅で考慮する 3 ケースを検討した。また、地盤反力

表 1 解析条件

定格出力	2MW
ローター直径	83.3m
ハブ高さ	77m
基礎形式	モノパイル
構造減衰比	0.8%
杭	鋼管杭（SM490）φ5000×52
水深	16m
支持層	海底面から 45.5m（杭長 51.5m）

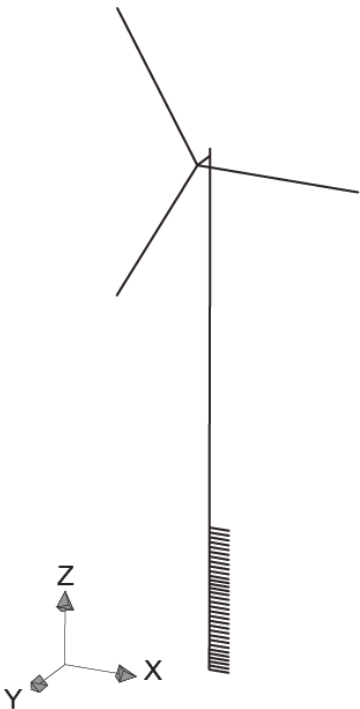


図 1 風車の解析モデル

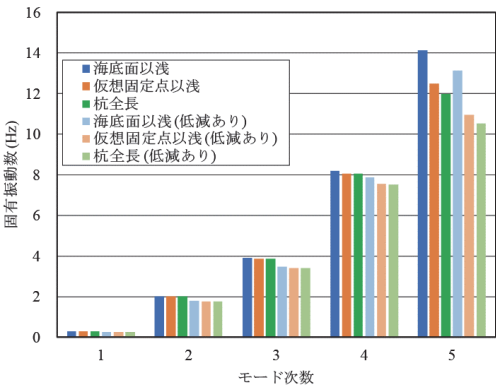


図 2 各ケースの固有振動数

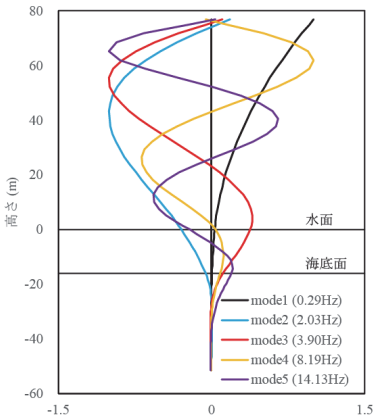


図 3 モード図（海水面以浅の管内質量考慮）

キーワード 洋上風車，着床式，液状化，地震応答解析

連絡先 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 港湾空港技術研究所 TEL：046-844-5058

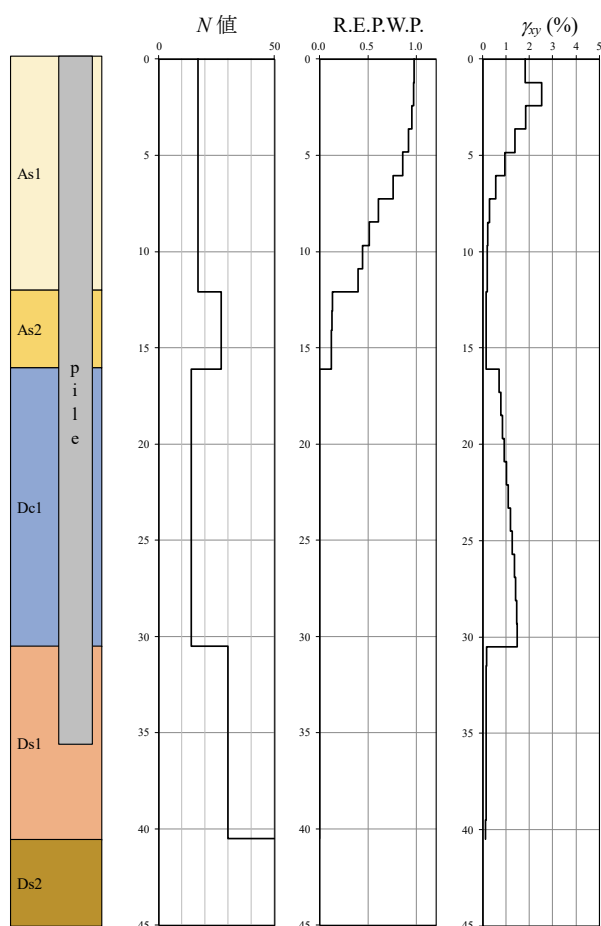


図4 N 値と解析結果の深度分布 (R.E.P.W.P.: 過剰間隙水圧比. 地盤反力係数 $k_n=3000 \times N$ (kN/m³). 地盤の解析パラメータは N 値から推定³⁾)

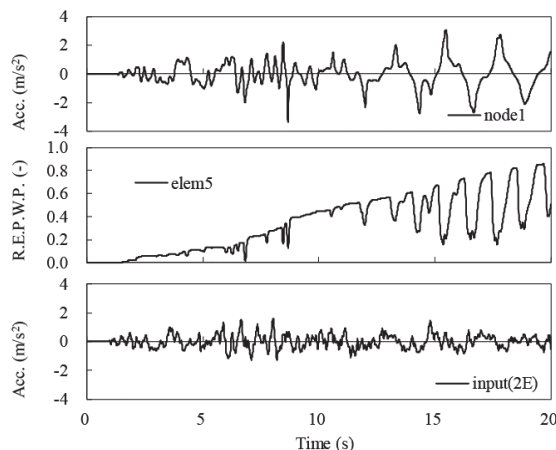


図5 水平成層地盤の時刻歴波形 (上から, 海底面位置の加速度, As1 層中心の過剰間隙水圧比, 入力加速度)

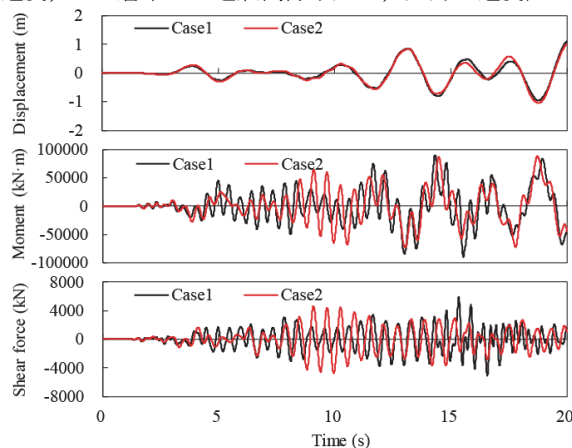


図6 風車の時刻歴波形 (上から, ナセル位置の変位, 海底面位置の杭の曲げモーメント, せん断力)

係数を過剰間隙水圧比に応じて低減したケースについても検討した (図2). 管内質量の影響は高次の固有モードで大きくなり, 管内質量が一番小さく固有振動数が一番大きな海底面以浅で管内質量を考慮したケースの固有振動数 (図3) と比べて最大で, 2次モードで0.8%, 3次モードで1.9%, 4次モードで4.9%, 5次モードで25%程度小さくなった. 低次モードは海底面より上部が振動するモードであるため, 海底面より深部の管内質量の影響が小さくなったと考えられる. 一方, 過剰間隙水圧による地盤反力係数低減の影響は全てのケースで, 1次モードで2%, 2次モードで14%程度固有振動数が小さくなり, 海底面付近の地盤反力係数低減の影響が大きいことが分かった.

4. 検討結果 (地震応答解析)

風車モデルの地震応答解析の解析結果として, 事前の有効応力解析における過剰間隙水圧の時間変化に応じて地盤反力係数を低減したケース (Case1), 過剰間隙水圧の最大値深度分布に応じて予め地盤反力係数を低減したケース (Case2) の風車の時刻歴応答を図6に示す. ナセル位置の水平変位時刻歴は両ケースではほぼ一致し, 液状化発生以降は風車の1次固有周期で振動した. 海底面位置の杭の曲げモーメントは, 液状化発生までは地盤反力係数のモデル化の違いが時刻歴波形に現れているが, 液状化発生以降, 両ケースともに風車の1次固有周期での振動となり, 最大曲げモーメントは同程度となった. 一方, せん断力は液状化発生まではCase2の方が大きい, 液状化発生以降, 地盤のサイクリックモビリティによる有効拘束圧応力の増加の影響を受けCase1の方が大きくなった.

本検討条件では, 地盤の液状化を考慮するため地盤反力係数を予め低減することが, 必ずしも杭の断面力を大きく評価する結果とはならなかった.

参考文献 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 平成23年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 洋上ウィンドファーム・フィージビリティスタディ (F S) 秋田県秋田市沖 報告書, 報告書管理番号: 2012000000929, 2012. 2) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 3) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 36pp., 1997.