

洋上風力発電施設の風と波浪と地震を同時に受ける動的応答解析

早稲田大学大学院 学生会員 ○斎藤 崇嗣

早稲田大学 フェロー 清宮 理

1.はじめに 風力発電施設を洋上に設置する計画が日本で進められている．日本では地震だけでなく台風などの低気圧，冬期の季節波浪を受ける．洋上風力発電施設を対象に風，波，地震を受ける時の動的応答解析を有限要素法汎用プログラムソフト TDAP で行い，風速や基礎形式の違いによる各外力の寄与の程度を把握するとともに，同時性についても検討した．

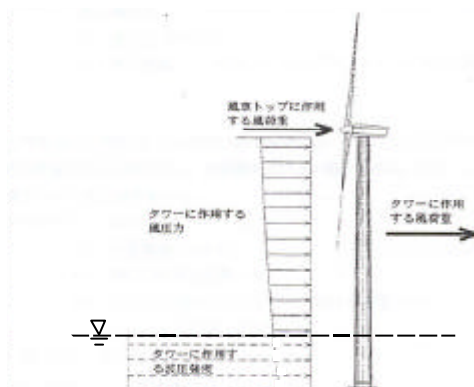


図1 洋上風力発電概念図

2.解析対象

2.1 洋上風力発電施設 解析の対象とした風力発電施設は、高さ 82.8m、発電能力は 1.65MW である．タワーの頂部には、ナセル（動力伝達装置，発電機，制御装置などを収納する部分）とブレード（風車の回転羽）が 3 枚取り付けられている．風車本体の自重はタワー，ナセル，ブレードの重量の和で，1677kN の大型風力発電施設である．

基礎構造はモノパイル式（杭基礎）とニューマチックケーソン式に設定した．材質はモノパイルがタワーと同じ SM400 の鋼管、ケーソンがコンクリートである．また、タワー基部での寸法は直径 4025mm、板厚 24mm で、ここでの全断面降伏モーメントは 72000(kN・m)、全断面塑性モーメントは 91000(kN・m)である．

2.2 解析モデル 図 2 はモノパイル式、図 3 ケーソン式の解析モデルである．タワーは梁要素，ナセルとブレードは質点 杭は梁要素に置換し、ケーソンは高さ 22m、直径 15m の円形とした．タワーについては線形モデルとし、杭部分を非線形モデルとした．表層地盤は平面ひずみ要素に置換し、地盤の非線形は Ramberg-Osgood モデルで表現し、工学的地盤面を -40m に設定した．地盤条件を表 1 に示す．この解析モデルでの固有振動数は、モノパイル式が 0.51Hz（タワーの 1 次モード），1.33Hz（タワーの 2 次モード），1.59Hz（表層地盤）で、ケーソン式が 0.82Hz（タワーの 1 次モード），1.30Hz（タワーの 2 次モード），1.67Hz（表層地盤）である．

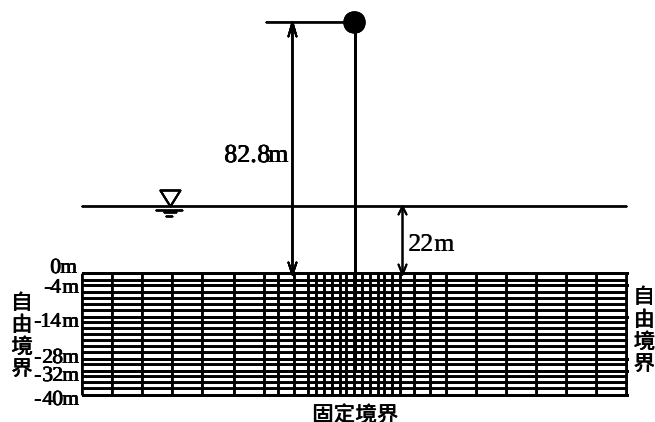


図2 解析モデル（モノパイル式基礎）

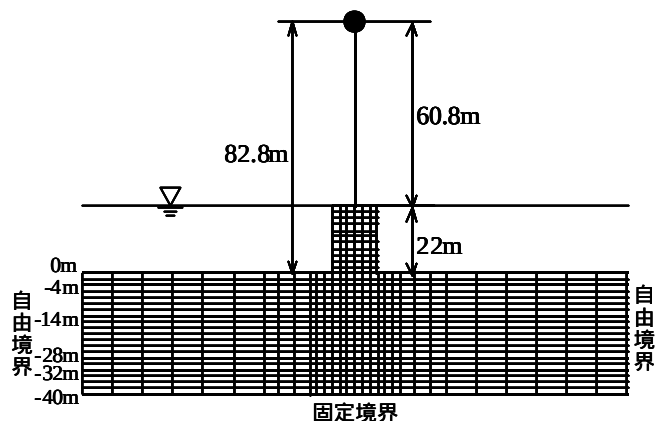


図3 解析モデル（ニューマチックケーソン式基礎）

表1 地盤条件

	区間 (m)	平均 N 値	γ (kN/m ³)	G_0 (kN/m ²)	ポアソン比
砂質土	0 ~ -4	4	17.64	29027.6	0.49
粘性土	-4 ~ -14	2	16.66	26989.2	0.49
粘性土	-14 ~ -28	8	17.64	72000.6	0.49
砂質土	-28 ~ -32	16	18.62	77527.8	0.49
砂質土	-32 ~ -40	50	19.60	174048	0.49

2.3 荷重条件 今回想定作用させた外力は図 1 に示すように風荷重，波荷重，地震荷重である．

（1）風荷重 風荷重は高度による風速の増加を考慮した分布をもとに静的荷重として，風速 0m/s（無風），7m/s（標準平均風速），17m/s（定格風速），25m/s（カットアウト風速），36m/s（暴風風速）の 5 種類について建築基準法をもとに設計計算した．

（2）波荷重 波荷重はモリソンの公式を用いて，水深 22m，周期 5sec，波長 38.93m の波を動的に与えた⁴⁾．

（3）地震荷重 入力地震波は，兵庫県南部地震でのポートアイランド波を用い，最大加速度振幅を 679Gal の動的荷重とした．

キーワード 洋上風力発電、動的応答解析

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 51 号館 16-01 清宮研究室 電話番号(FAX):03-5286-3852

2.4 解析方法

(1) 風速増加によるタワーの挙動 モノパイル式とケーソン式について、波荷重が作用している状態で風荷重を変化(5種類)させ、その挙動について解析した。

(2) 風、波、地震の同時作用によるタワーの挙動

荷重の同時性を考える場合、暴風時と大地震が遭遇する確率は非常に小さいので一般的に設計荷重として使用しない。しかし、通常の風速での地震の発生確率は高く、港湾施設基準のレベル1地震動の再現期間75年では、平均風速11m/sで風車高さに換算すれば定格風速程度になる^{2),3)}。そこで今回の解析では、風速17m/sの風荷重と波荷重、地震荷重(679Gal)を作用させた。

3. 解析結果

(1) 図4に風速増加によるタワー頂部の最大変位と図5にタワー基部の最大曲げモーメントの変化を示す。変位、モーメントともにケーソン式の方が無風から暴風の一連で値が低くなっている。暴風時(風速36m/s)の場合、タワー基部のモーメントが、モノパイルで42700kN・m、ケーソンで24000kN・mとなった。また、17m/s(定格風速)から25m/s(カットアウト風速)で値が低くなるのは、風速25m/s程度を超えると発電を停止するため、翼の回転を止めるシステムが作用し、頂部にかかる荷重が小さくなるからである。

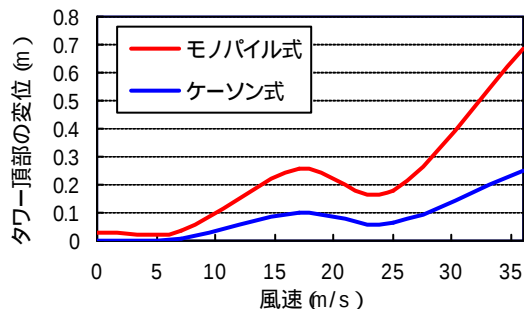


図4 風速増加によるタワー頂部変位の変化

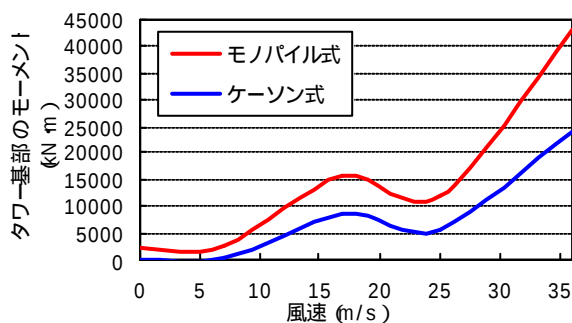


図5 風速増加によるタワー基部の最大曲げモーメントの変化

(2) 図6、7及び8に、定格風速(17m/s)で波荷重、最大加速度679Galの地震波を作用させた時の応答結果を示す。図6より、タワー頂部の最大変位が、モノパイルで140cm、ケーソンで61.9cmとなった。図7より、タワー頂部の最大応答加速度が、モノパイルで1240Gal、ケーソンで1260Galとほぼ等しい値となった。また、図8より、タワー基部での最大曲げモーメントが、モノパイルで84800kN・mと降伏モーメント(72000kN・m)を超え、ケーソンでは52000kN・mと低い値になった。

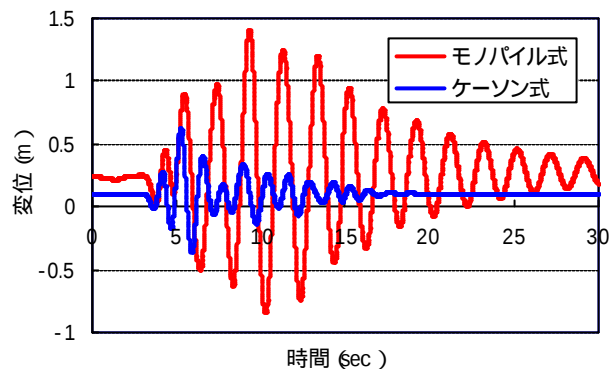


図6 タワー頂部の変位の時刻歴応答

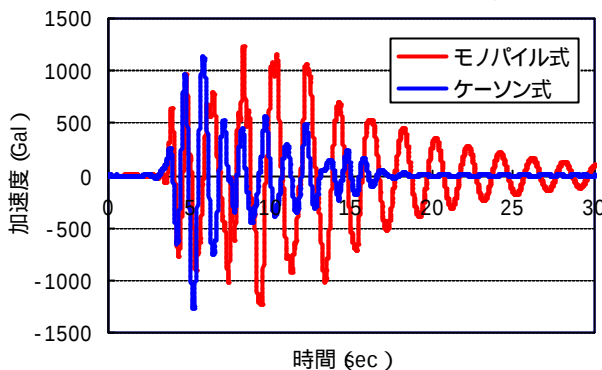


図7 タワー頂部の加速度の時刻歴応答

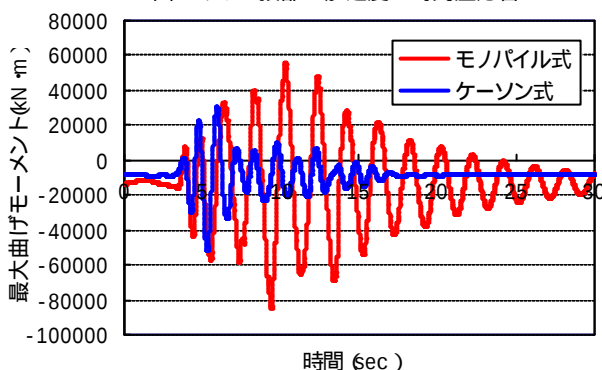


図8 タワー基部の最大曲げモーメントの時刻歴応答

4. 結論 洋上の風力発電施設は定格風速(17m/s)時に兵庫県南部地震クラスの地震が発生した場合、ケーソン式基礎の耐震性は確認されたが、モノパイル式はタワー基部において降伏モーメントを超えた。このことから洋上で80mを超える大規模な風力発電施設を建設する場合、モノパイル式では板厚あるいは径を大きくする必要があるとともに、基礎形式の選定が重要であることが分かった。また、風速増加に対してもケーソン式の安全性が高いことが分かったが、実際にタワーが倒壊しているのは最大瞬間風速80m/sを超える風である。今後はさらなる暴風風速をはじめ、風を動的に与えるなど、風荷重について検討していきたい。

～参考文献～

- 1) 洋上風力発電基礎工法の技術(設計・施工): 財団法人沿岸開発技術研究センター 2002.11
- 2) Osamu KIYOMIYA, Tatsuomi RIKIJI and Pieter H.A.J.M.van GELDER: Dynamic Response Analysis for Onshore Wind Energy Power Units during Earthquakes and Wind, The 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, 2002, May, pp.520-526
- 3) 力示龍臣, 清宮理: 風と地震を同時に受ける風力発電タワーの動的地震応答計算, 土木学会第56回年次学術講演会, 2001.9 部門, pp.676-677
- 4) 岩垣雄一, 榎木亨: 海岸工学, 東京大学出版会 1979.4