

洋上風力発電タワーの波浪と地震を同時に受ける動的応答解析

早稲田大学理工学部土木工学科 学生会員 小林 大祐
早稲田大学理工学部土木工学科 フェロー 清宮 理

1. はじめに

現在、「エネルギー問題」と「地球環境問題」の解決案として、自然エネルギー、リサイクルエネルギーなどへの新しいエネルギー源への転換の取り組みがなされている。そのような中、日本では建設例の無い洋上風力発電施設の動的地震解析をおこない、その耐震性の検討をおこない耐震設計の基礎資料としたので報告する。

2. 解析モデル

2. 1洋上風力発電施設

図-1 に今回解析の対象とした



風力発電施設を示す。発電能力は1.65MW であり、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。タワーの高さは60.6m であり、また、風車本体の自重はタワー、ナセル、ブレードの重量の和で、 $(892.44\text{kN}) + (559.00\text{kN}) + (225.56\text{kN}) = (1677.00\text{kN})$ の大型風力発電施設である。基礎構造はモノパイル基礎（杭基礎）と設定した。材質はタワーと同じ SM400 の鋼管である。ただし、今回はタワーの振動性状に着目した。風力発電は通常、風荷重に対して設計されている。この際、風速 25m/s 程度まではブレードが回転して発電し、それ以上の風速（カットアウト風速）となると、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ものとする。風力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設計計算がなされている。基部での寸法は直径 2045mm、板厚 24mm でここでの全断面降伏モーメントは 71920 (kN・m) である。

キーワード: 洋上風力発電施設, 地震応答解析, 有限要素法

連絡先: 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 51 号館 16F-01 Tel&Fax 03-5286-3852

2. 2解析モデル

図-2 に解析モデルを示す。タワーは梁要素、ナセルとブレードは質点、杭ははり要素、表層地盤は平面ひずみ要素に置換した。

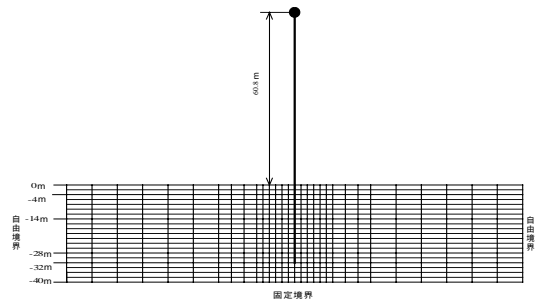


図-2 解析モデル

タワー部のはり要素数は 21 個、表層地盤は 600 個とした。表層地盤は比較的軟弱な地盤を想定し、地盤の非線形は R~O モデルで表現した。また、工学的地盤面を -40m に設定した。地盤条件を表-1 に示す。今回タワーについて線形モデルとし、杭部分を非線形モデルとした。この解析モデルでの固有振動数は低次から 0.56 Hz, 1.33 Hz, 1.59 Hz である。

2. 3入力条件

今回想定作用させた外力は図-3 に示すように地震

| | 区間 (m) | 平均N値 | (kN/m ²) | G ₀ (kN/m ²) | ポアソン比 |
|-----|-----------|------|----------------------|-------------------------------------|-------|
| 埋め土 | 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 | 19.6 | 174048 | 0.49 |

表-1 地盤条件

荷重、風荷重、波荷重及び自重である。風荷重としては無風（風速 0m/s）、標準平均風速（4m/s）、定格風速（17m/s）、カットアウト風速（25m/s）である。地震荷重としてはレベル 1、レベル 2 荷重が設計で作用されているが、現

在, タワーの耐震性は明確にはなっていない. さらに, 風, 波と地震との遭遇確率を考慮すると両者の荷重の組み合わせは難しい.

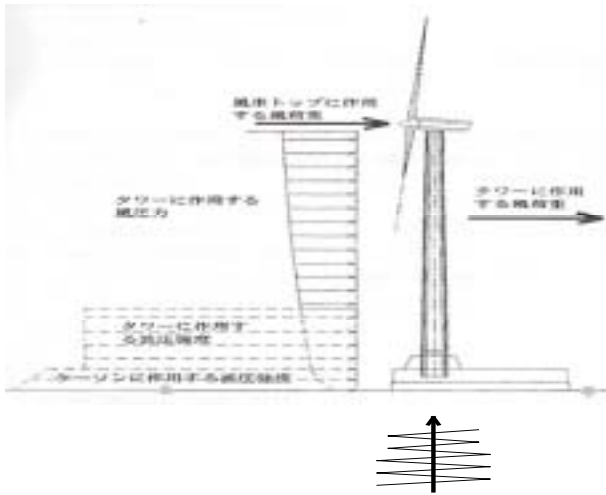


図-3 荷重概念図

台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ていない. しかし通常の風速での地震の発生確率は高く, 地震時に何かしらの風を考慮する必要がある. 今回は各々の風速下でかつ波浪条件下での地震動を受けた時タワーがどのように動的挙動を示すか調べた. 入力地震波として, 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 **200,400,600,679Gal** として動的解析を行った. 風荷重はタワーに風速の高度分布(べき乗則)を考慮した水平方向の静的荷重(送風荷重 **28.1kN**)を作用させ, ナセル, ブレード(質点)には定格運転の風車メーカーの提示値 **228kN** を作用させた. 波荷重はモリソン式を用いて, 水深 **10.7m**, 周期 **3sec**, 波長 **14.03m** の波を動的に与えた. また比較のため波浪荷重を合田波圧で与えた静的計算も合わせて行った.

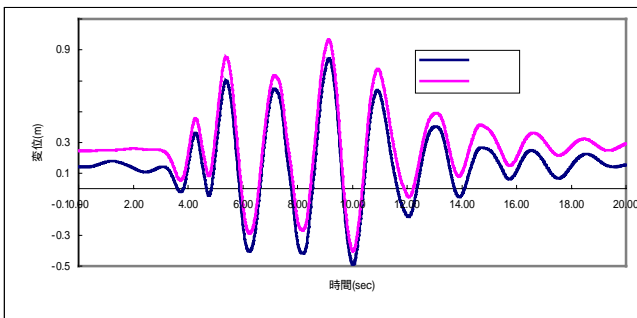


図-4 タワー頂部の変位の時刻歴応答

3.解析結果

図-4に最大入力加速度 **679Gal**での動的応答解析結果の比較を示す. 波を動的に加えたときタワーの頂部では

1050Galの加速度, **84cm**の水平変位が計算された. ただし, 最大変位の中には **25cm**の風による成分が含まれている. 加速度応答倍率としては基盤面に対して**2倍**程度であり, 変位は正弦的な振動が卓越していた.タワーの基部では最大曲げモーメントが **60000kN・m**と大きな値が算定された. 図-5には頂部の加速度, 図-6には基部の曲げモーメントの時刻歴応答の比較を示す. 波の影響はかなり小さく, 風荷重の影響が大きいことが分かる. 最大曲げモーメントは降伏モーメントを超えなかった.

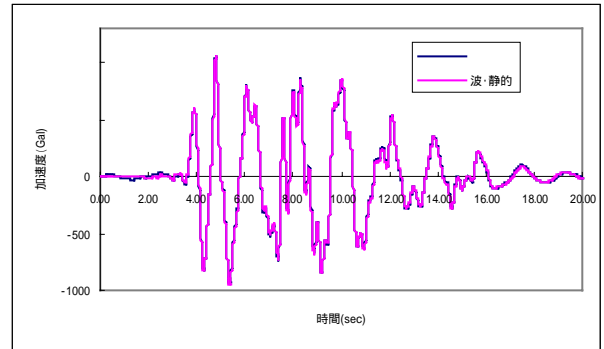


図-5 タワー頂部の加速度の比較

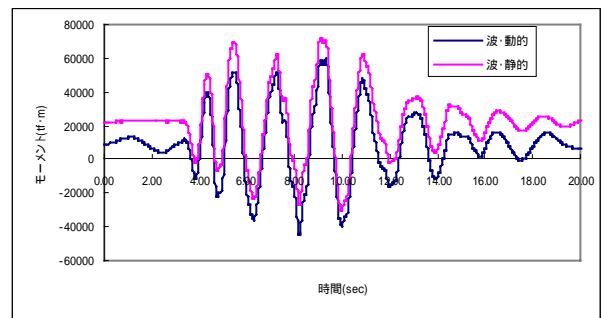


図-6 タワー基部の曲げモーメントの比較

4.まとめ

計算では, 地震, 波浪, 風の**3種類**の荷重を考慮した動的解析を行ったが荷重の組み合わせに関しては問題が多い. しかし洋上風力発電タワーに関しては地震の影響が大きく, 今回想定している地点では波浪の影響は小さかった. 波浪を静的, 動的に検討すると動的のほうが静的よりやや小さい荷重になる場合が多くなった. ただし**3種類**の荷重を同時に加えてもタワーの基部は降伏モーメントを超えなかった. これより洋上風力発電施設の耐震性が判明した.

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 2000.11,
- 2.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 I 部門, pp. 676-677