

## 洋上風力発電タワーの動的地震応答解析

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 学生会員 力示 龍臣

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。タワーは鋼管で材質はSM400である。タワー基部での寸法



図1 風力発電施設

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。

#### 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。

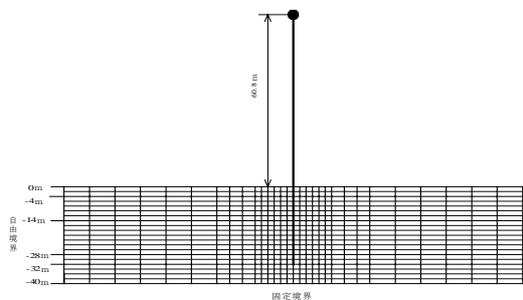


図-2 解析モデル

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。

	区間 (m)	平均値	(kN/m <sup>3</sup> )	G <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	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

#### 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。

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

地震荷重としてはレベル 1, レベル 2 荷重が設計で使用されているが, 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.

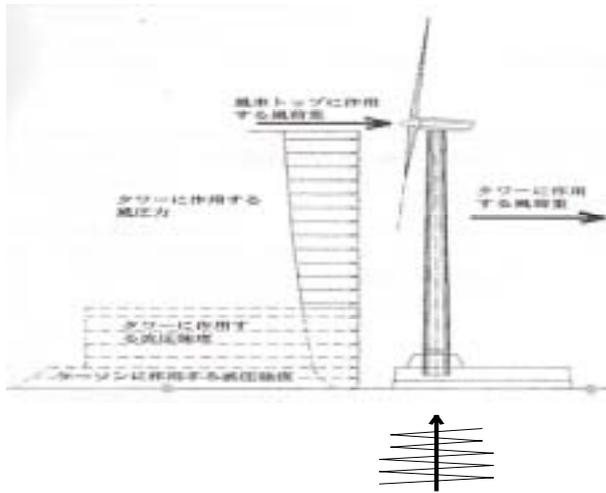


図-3 荷重概念図

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 28.1 kN)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 228 kN 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 14.03 m の波を静的に与えた.

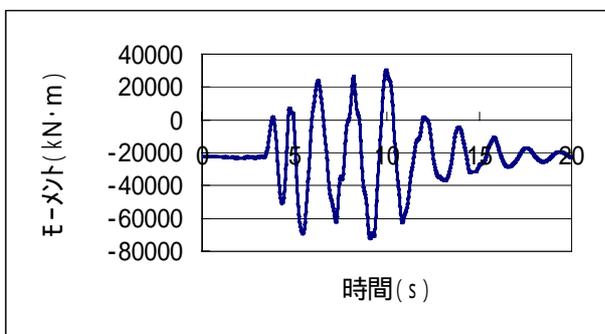


図-4 タワー基部の曲げモーメントの時系列応答

### 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時系列の一例を示す. タワーの頂部では

1050Gal の加速度, 96cm 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 72233 kN・m と大きな値が算定された. 図-5には各種の風速に対する入力加速度とタワー基部の最大曲げモーメントの関係を示す. 入力加速度が大きくなれば応答値も大きくなっている. 今回, 定格風速(風速 17m/s), 679Gal にタワー基部の最大曲げモーメントが降伏モーメントを超えた.

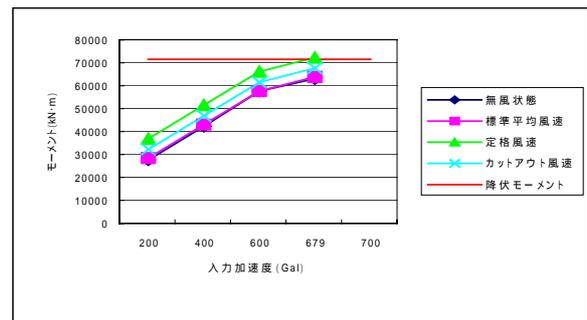


図-5 入力加速度ごとの基部の曲げモーメント

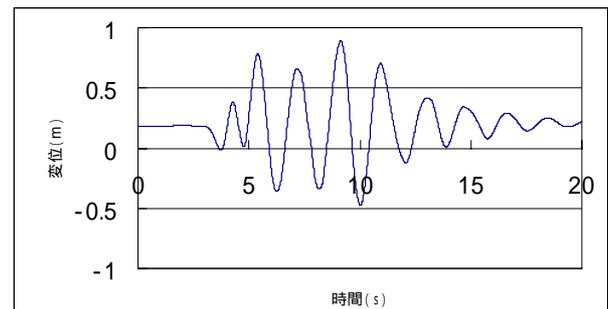


図-6 タワー頂部の時刻歴応答

### 4. まとめ

今回の計算で入力加速度の大きさにより風力発電タワーにどの程度の応答があるかがわかった. 今後, 鋼材の非線形性を考慮に入れての解析, また, 今回は静的に与えた波荷重を動的に与えることでのタワーの応答そして, 風と波と地震の荷重の組み合わせについても更に検討を進めていきたい.

### 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 200.11,
- 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