

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解析

早稲田大学理工学部

学生員 力示 龍臣

早稲田大学理工学部

フェロー 清宮 理

1. はじめに

地球環境問題などから、二酸化炭素を排出しない自然エネルギーの利用が要望されており風力発電の建設が世界で積極的に行われている。日本でも現在 200 基を越える風力発電が建設されている。地震国である日本では耐震性の検討が不可欠であるが十分な検討がなされておらず、今回、動的地震応答計算により風力発電タワーの挙動を調べ耐震設計の基礎資料としたので報告する。



図-1 風力発電施設

2. 計算モデル

2.1 風力発電施設

図-1 に今回計算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 60.8m である。また、風車本体の自重はタワー、ナセル、ブレードの重量をそれぞれ足し合わせたもので、 $(892.44 \text{ kN}) + (559.00 \text{ kN}) + (225.56 \text{ kN}) = (1677.00 \text{ kN})$ の大型の風力発電施設である。基礎構造は今回杭基礎と設定した。ただ基礎はかなり丈夫な構造を想定しタワーの振動に着目した。風力発電施設は通常、風力に対して構造設計がなされている。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で作用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構造設計がなされている。タワーは鋼管で、材質は SM400 である。タワー基部での寸法は直径 2045mm、板厚 24mm でここでの全断面降伏モーメントは 94000 kNm である。

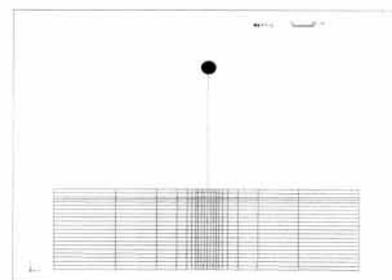


図-2 計算モデル図

2.2 計算モデル

図-2 に計算モデルを示す。タワーははり要素、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。タワー部のはり要素数は 21 個、表層地盤の要素は 420 個とした。表層地盤は比較的軟弱な地盤を想定し、地盤の非線形性は R~O モデルで表現した。また、工学的基盤面を -40m に設定した。地盤条件を表-1 に示す。タワーについては今回非線形性を考慮していない。この計算モデルでの固有振動数は低次から 0.41Hz、1.32Hz、1.82Hz である。

表-1 地盤条件

土質	区間 (m)	平均N値	γ (kN/m ³)	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

2.3 入力条件

今回想定した外力は図-3 に示すように地震荷重、風荷重および自重である。風荷重の状況としては、カットイン風速 (4m/s 程度)、渦振動風速 (10m/s 程度)、定格風速 (15m/s 程度)、カットアウト風速 (25m/s 程度)、最大風速 (60m/s 程度) がある。また地震荷重としてはレベル 1、レベル 2 地震動が設計で採用されているがタワーについての耐震性能は現在明確ではない。また使用(設計)年数を 20 年とし、風と地震との遭遇確率を考慮すると両者の組み合わせの設定は、現在難しい。台風時と大規模地震動が同時に発生する確率は非常に小さく通常構造物でも一般的に設計荷重として使用していない。今回は定格風速下 (17m/s) で地震動を受けた時タワーがどのような動的挙動を示すか調べた。このため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基盤

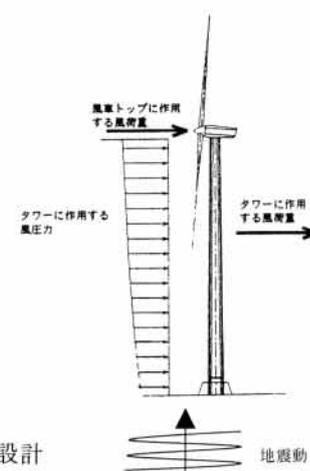


図-3 荷重概念図

入力加速度を 100Gal ずつ増加させて動的応答計算を行った。風荷重はタワー（はり要素）には風速の高度分布を考慮した水平

キーワード：風力発電 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

方向の静的荷重（総風荷重 28.1 kN）を作用させ、ナセル・ブレード（質点）には定格運転時の風車メーカーの提示値 228 kN を同様に作用させた。

3. 計算結果

図-4に入力加速度 200Gal での動的応答計算結果の時系列の一例を示す。タワー頂部は、最大で 464Gal の加速度、51 cm の水平変位が計算された。ただし、最大変位の中には 31 cm 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、波形後半部ではやや長期的な振動が卓越した。変位波形では 2 s 程度の正弦波的な振動が卓越していた。タワー基部では最大せん断力として 1050 kN が計算され 0.7 s 程度の振動周期が卓越し、基部での加速度波形と振動周期がほぼ一致した。一方、基部での最大曲げモーメントは 32000 kNm と大きな値が算定され、卓越周期は 2 s 程度と変位波形と同じような卓越周期であった。せん断波形、曲げモーメントともに風荷重分を含んだ値である。図-5に入力加速度と基部の最大曲げモーメント及び最大せん断力との関係を示す。入力加速度が大きくなれば応答値も大きくなる。今回鋼材の非線形性を考慮していないので当然の結果ではあるが、かなり大きな断面力がタワー基部に計算された。しかし、降伏モーメントを超えず大規模な地震に対してもタワーがかなり耐震性のあることが分かった。今回基礎は地震時に破壊しないと仮定してかなり安全側の基礎構造モデルを想定したが基礎の耐震性は今後の検討課題としたい。

4. まとめ

今回の計算で入力加速度の大きさによりどの程度の断面力や応答がタワーに生じるか分かったが、応答値は大きくなるものの破壊に結びつく断面力とはならなかった。今後鋼材の非線形性を考慮してタワーの残留変位などの算定、風と地震の荷重の組み合わせによる影響、風荷重の変動による影響などについて検討を進めたい。

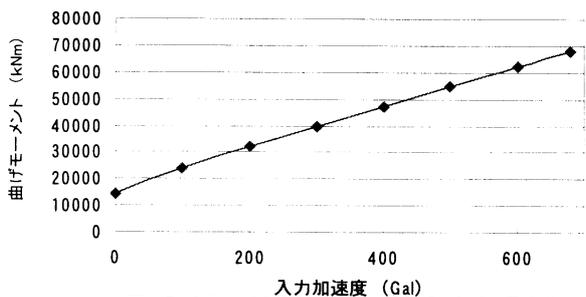


図-5, 1 入力加速度によるタワー基部における最大曲げモーメントの変化

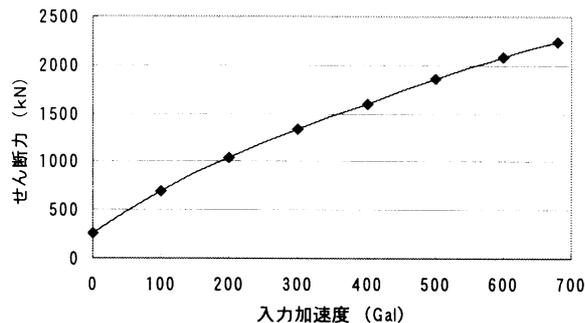
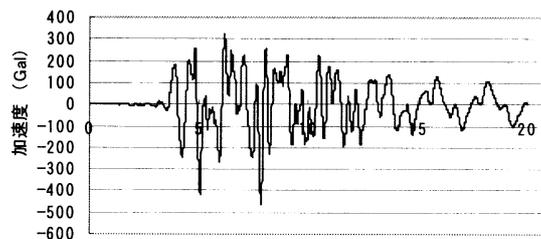
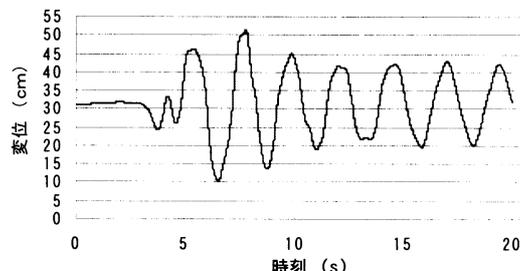


図-5, 2 入力加速度によるタワー基部における最大せん断力の変化



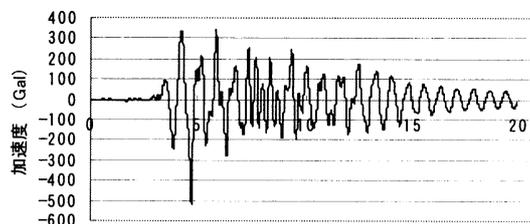
時刻 (s)

図-4, 1 タワー頂部の加速度の時系列(200Gal)



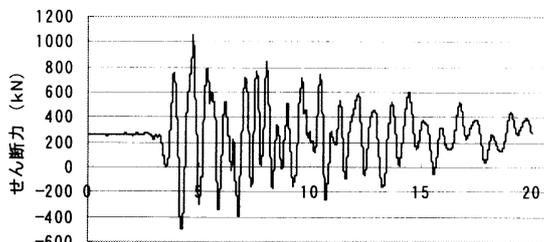
時刻 (s)

図-4, 2 タワー頂部の変位の時系列(200Gal)



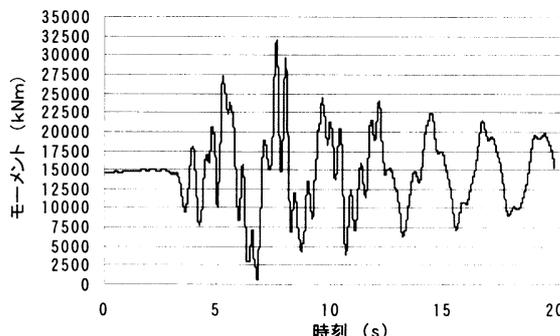
時刻 (s)

図-4, 3 タワーの基部の加速度の時系列(200Gal)



時刻 (s)

図-4, 4 タワー基部のせん断力の時系列(200Gal)



時刻 (s)

図-4, 5 タワー基部のモーメントの時系列(200Gal)

5. 参考文献

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