

発電時に風車タワーに作用する風荷重の簡易評価式の提案

その1 発電時の風荷重の特性

A simplified method for assessment of wind loading on a wind turbine tower in the operational conditions

Part1 Wind loading in the operational conditions

○石原 孟¹⁾ 石井 秀和²⁾
Takeshi ISHIIHARA¹⁾ Hidekazu ISHII²⁾

1. はじめに

平成16年度のNEDOの調査¹⁾によると、風力発電設備の故障・事故発生率は従来の構造物に比べ高い。風車は工業製品であり、標準的な風車クラスは3つであるのに対し、設置場所の風況条件は場所により異なり、選定した風車は設置場所の風況条件に適合しなかったのが故障・事故発生の原因と考えられる。2005年に発行された風車に関する国際基準IEC61400-1の第3版²⁾では、風車を建設する際には設置地点の風況条件に基づき風車に作用する風荷重を算出し、風車の健全性を評価することが義務付けられている。

風車に作用する風荷重は、発電時と暴風時に分けられ、風車の健全性を評価する際には両方の風荷重を評価する必要がある。暴風時の風荷重に関してはこれまでに幾つかの研究があり、その評価式が提案されている³⁾。一方、発電時の風荷重の評価式に関する研究は少なく、暴風時の評価式を援用しているのが現状である。しかし、風車発電時の風荷重の特性は制御により、従来の土木・建築物と異なり、風車の特性を考慮した評価式の提案が急務である。

本研究その1では、出力2MWのモデル風車を用い、時刻歴応答解析を行うことにより風車発電時の風荷重の特性を調べるとともに、風車発電時に大きな風荷重が発生するメカニズムを明らかにする。本研究その2では、ガスト影響係数法を用いて、乱れの小さい洋上から乱れの大きい山岳地にまで適用できる風車発電時の最大風荷重の簡易評価式を提案する。

2. 発電時の時刻歴応答解析の概要

表1には本研究で用いたモデル風車の概要を示す。本モデル風車は土木学会構造工学委員会・風力発電設備支持物の動的解析と構造設計小委員会が作成した標準風車モデルであり、現在陸上に最も多く建設されている風車を模擬して作成されている。風車モデルは3枚翼を有するアップウィンド式風車であり、風車タワーは鋼製、ハブ高さは76.5m、総重量は249.4tonである。風車の制御は可変ピッチ、可変速の制御方式を採用し、定格風速は

約12m/s、定格出力は2000kWである。

表1 モデル風車の特性

定格出力	2000kW
ハブ高さ	76.5m
風車種類	アップウィンド型
ロータ直径	80m
制御方法	可変速、ピッチ制御
ロータ回転数	10~18rpm
運転風速範囲	4~25m/s
定格風速	12m/s
総重量	249.4ton

時刻歴応答解析に使用される変動風速はIEC61400-1の通常乱流モデルを用いて作成した。平均風速の指数は0.2であり、乱れ強度は次式により与えた。

$$I_1 = I_{ref} (0.75 + 5.6/V_{hub}) \quad (1)$$

ここで、 I_{ref} はハブ高さでの平均風速 V_{hub} (m/s)が15m/s時の風方向の乱れ強度の期待値である。また変動風のスペクトルについてはKaimalモデルを用いた。

本風車モデルではPI制御を採用し、発電機速度の偏差 y 、同残差 y_1 に対するトルク指令値 ΔQ_{Dem} ならびにピッチ位置指令値 $\Delta \theta_{Dem}$ は、次式により表した。

$$\Delta Q_{Dem} = 512y + 236y_1 \quad (2)$$

$$\Delta \theta_{Dem} = 0.0257y + 0.0101y_1 \quad (3)$$

また時刻歴応答解析では風車タワーの2次振動モードまで考慮し、1次モードの構造減衰比は0.8%とした³⁾。高次モードの構造減衰比は剛性比例型と仮定し求めた。

3. 発電時の時刻歴応答解析の結果

図1には時刻歴応答解析により求めたタワー基部に作用する転倒モーメントの平均値と最大値の風速による変化を示す。風車タワー基部に作用する転倒モーメントの平均値と最大値は定格風速(約12m/s)の前では平均風速の増大に伴い増大するが、定格風速の後では平均風速の増大に伴い、転倒モーメントの平均値は減少するが、最大値は反対に増加していることが分かる。また最大転

1) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授
Professor, Department of Civil Engineering, Univ. of Tokyo

2) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 修士1年
Master, Department of Civil Engineering, Univ. of Tokyo

倒モーメントの増大は乱れ強度が大きくなるにつれ、顕著になっている。このような現象は通常の構造物の風応答には見られず、風車特有の現象と言える。その原因を探るために、定格風速の前と後における風速、転倒モーメントおよび翼のピッチ角の時系列波形を詳しく調べた。

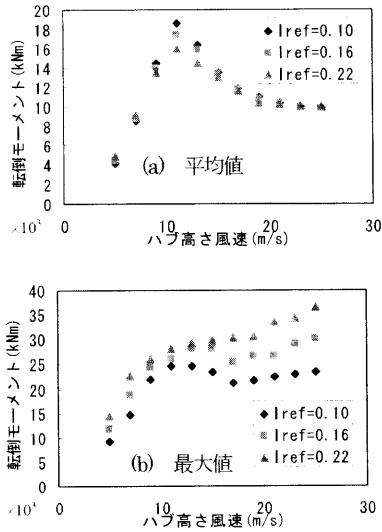


図1 タワー基部の転倒モーメントの平均値と最大値

図2と図3には定格風速前の9m/sおよび定格風速後の15m/sでの風速、風方向転倒モーメント、ピッチ角の時系列波形を示す。

定格風速前(図2)では発電量を最大にするようにピッチ角は0度でほぼ一定のままになっている。60sec付近では急な風速変動に対応するため、回転数制御の他にピッチ角も変化させている。この図から、定格風速前の転倒モーメントは従来の構造物とほぼ同じような応答特性を示し、風速の変動に追従して変動していることが分かる。このような振動はいわゆるガスト励起型振動である。

一方、定格風速後(図3)では、風速が小さくなる時(120, 240sec付近)、発電量を一定に保つように、ピッチ角が小さくなるように制御されている。このときには風速が小さくなっているにも関わらず、大きな転倒モーメントが励起されていることが分かる。ピッチ角を小さくすることにより、発電量が大きくなるが、風方向の推力も大きくなり、大きな転倒モーメントが発生する。このように励起された転倒モーメントは大きな変動転倒モーメントをもたらす、転倒モーメントの平均値が下がっても、最大値は増加するという現象が起こる。本研究ではこの現象をピッチ制御励起型振動と名づけた。

4. まとめ

本研究その1では、風車発電時の時刻歴応答解析を行い、風車発電時の風荷重の特性および定格風速後に大きな風荷重が発生するメカニズムを調べた。その結果、定格風速後に発生する大きな風荷重は風速変動、すなわち、風のガストにより直接に励起されたものではなく、風車のピッチ制御により励起された振動によるものであることを明らかにした。

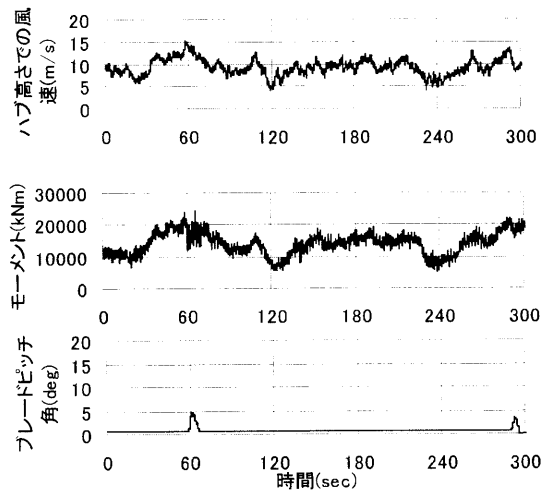


図2 風速9m/sの時の時刻歴波形(定格風速前)

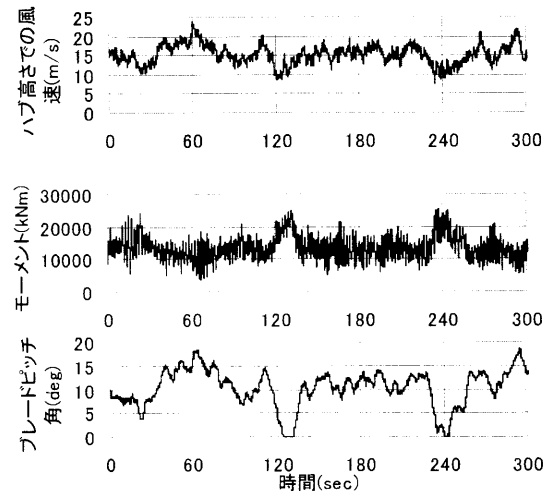


図3 風速15m/sの際の時刻歴波形(定格風速後)

参考文献

- 1) NEDO 技術開発機構：平成16年度風力発電利用率向上調査委員会及び故障・事故調査分科報告書，2005。
- 2) IEC 61400-1：Wind turbines - Part 1: Design requirements, Ed. 3, 2005。
- 3) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説(2007年版)，構造工学シリーズ17，2007。