

発電時に風車タワーに作用する風荷重の特性とその予測

東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 学生会員 ○石井 秀和
 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 正会員 石原 孟

1. はじめに

2005年に発行された風車に関する国際基準IEC61400-1の第3版¹⁾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。

風車の健全性を評価する際には発電時と暴風時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、その評価式が提案されている²⁾。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、従来の土木構造物と異なり、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、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し、実測データと比較し、その精度を検証する。

2. 発電時の風荷重の特性

本研究で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を用いた。この風車モデルは 3 枚翼を有するアップウィンド式風車で、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たものである。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。風車モデルおよび解析条件の詳細については参考文献 3 を参照されたい。

発電時の風荷重は、発電時の風速と乱れ強度の影響を受ける。本研究では時刻歴応答解析によりタワー基部に作用する転倒モーメントを求めた。図 1 に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と乱れ強度による変化を示す。

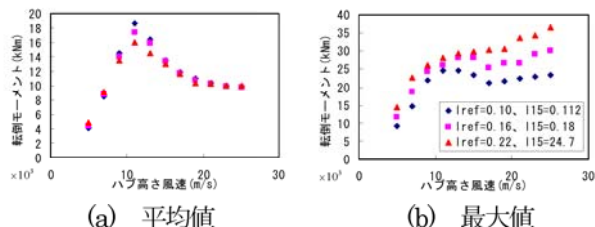


図1 タワー基部の転倒モーメントの平均値と最大値

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、平均値は減少するのに対し最大値は反対に増加していることが

分かる。また最大転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。その結果を図2、図3に示す。

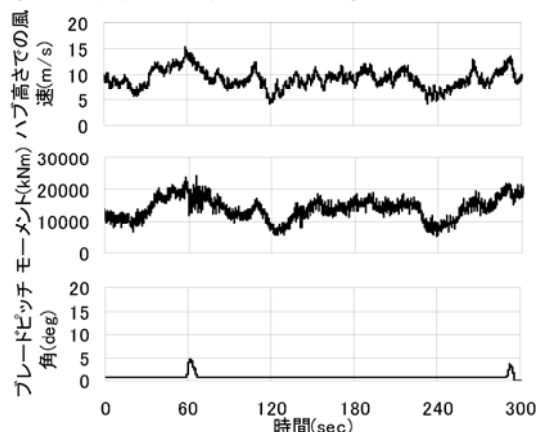


図2 風速 9m/s の時の時刻歴波形 (定格風速前)

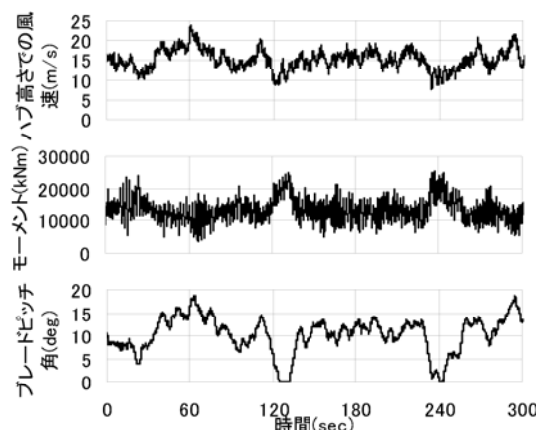


図3 風速 15m/s の際の時刻歴波形 (定格風速後)

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で、転倒モーメントは風速の変動に追従して変動し、従来の構造物とほぼ同じような応答特性を示している。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、風速が小さくなるときの(120、240sec 付近)、発電量を一定に保つために、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かかわらず、大きな転倒モーメントが励起されていることが分かる。これは、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ためである。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

キーワード 発電時風荷重、風車タワー、振動特性、予測

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 橋梁研究室 03-5841-1146

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。

発電時の風荷重を考える際にはロータの回転による振動数(1P)および3枚ブレードがタワーの前方を通過することに対する振動数(3P)が重要である。本風車はカットイン風速付近(4–5m/s)ではタワーの1次固有振動数 f_1 と3P振動数 f_{3P} と接近しており、変動風荷重が大きくなっている³⁾。図4には、風速5m/sと9m/sでの風方向変動転倒モーメントのパワースペクトル密度を示す。図4(a)から、タワーの1次固有振動数と3P振動数が共振し、大きなピークを形成している。一方、風速が9m/sの場合には図4(b)に示すように3P振動数が高振動数側に移動し、共振がなくなっていることが分かる。

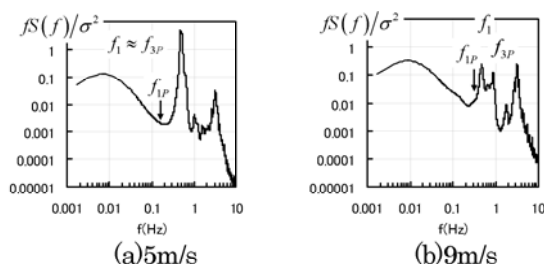


図4 風方向変動転倒モーメントのパワースペクトル密度

3. 発電時の風荷重の簡易評価式の評価

風車発電時にタワー基部に作用する風方向転倒モーメントの最大値 M_{Dmax} はガスト影響係数法に基づき、次式により表される。

$$M_{Dmax} = M_D \times G_D \quad (1)$$

ここで、 M_D は風方向転倒モーメントの平均値、 G_D はガスト影響係数であり、それぞれ次式により求める。

$$M_D = \frac{1}{2} \rho U_H^2 \pi R^2 H C_{MD} \quad (2)$$

$$G_D = \frac{M_{Dmax}}{M_D} \approx 1 + g_D \frac{\sigma_{MDQ}}{M_D} \sqrt{1 + R_D} \quad (3)$$

このガスト影響係数の評価式には転倒モーメントの非共振成分の標準偏差 σ_{MDQ} 、ピークファクター g_D および共振成分と非共振成分の比 R_D の3つのパラメータが含まれている。2節に示したように、風車発電時の変動風荷重はピッチ制御の影響を強く受けるため、式(3)に含まれる3つのパラメータを理論的に導出することは困難である。そこで、本研究では時刻歴応答解析の結果からこれらのパラメータを求め、表1に示した。

表1 発電時の最大風荷重の簡易評価式³⁾

	定格風速前	定格風速後
σ_{MDQ}	$2M_D I_1 \sqrt{0.25 \frac{U_H - U_R}{U_{IN} - U_R} + 0.15}$	$2M_D I_1 \sqrt{0.55 \frac{U_H - U_R}{U_{OUT} - U_R} + 0.15}$
g_D	3.1	$(4.5 I_1 + 0.1) \sqrt{\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_H - U_R}{U_{OUT} - U_R}\right)} + 3.1$

R_D	0.2	$(-17.8 I_1 + 6) \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_H - U_R}{U_{OUT} - U_R}\right) + 0.2$
C_{MD}	$C_{MD} = \varepsilon_T C_{DT} C_g + \varepsilon_N C_{DN} + C_T, \quad C_g = \frac{1}{3 + 3\alpha} + \frac{1}{6}$	

本研究が提案した評価式の妥当性を検証するために、この式を用いて、風速及び乱れ強度を変化させ、ガスト影響係数および転倒モーメントの最大値を計算し、時刻歴応答解析の結果と比較した。図5から、提案式の結果は時刻歴応答解析の結果とよく一致していることが分かる。

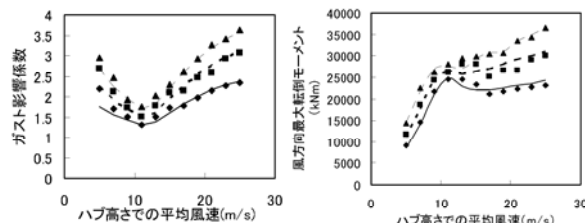


図5 本提案式の予測値とシミュレーション結果の比較

最後に、石川県能登半島の珠洲第一風力発電所から得られた実測データ⁴⁾との比較を行った。対象風車はGE Wind Energy社製の風車であり、定格出力1500kWである。図6には本提案式による予測値と実測値の比較を示し、ガスト影響係数とタワー基部の最大転倒モーメントともに実測とほぼ一致していることが分かる。

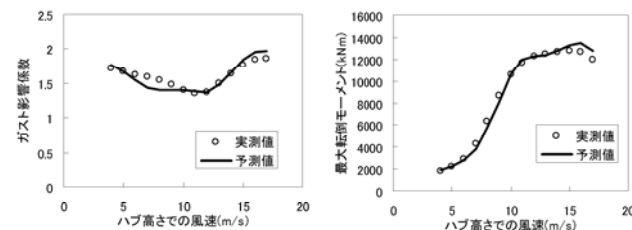


図6 本提案式の予測値と実測値との比較

4. まとめ

本研究では、風車発電時の時刻歴応答解析を行い、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。また、回転数特性により、共振が起こる可能性があることを示した。これらに基づいて、発電時の平均風速および乱れ強度を考慮した最大風荷重の簡便評価式を提案し、時刻列応答解析の結果および実測データと比較することにより、その有効性を示した。

参考文献 1) IEC 61400-1 : Wind turbines - Part 1: Design requirements, Ed. 3, 2005. 2) 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. 3) 石原孟、石井秀和 : 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、2 : 日本風工学誌, Vol. 34 No. 2, 2009. 4) 丸山勇祐、三輪俊彦、斉藤芳人 : 山間地に建つ大型風力発電装置の耐風設計のための実測調査(その1) 風車タワーに作用する風荷重と風応答特性, 前田技術研究所所報, Vol. 49, 2008.