

風力発電設備支持物構造設計指針の策定 Guidelines for Design of Wind Turbine Support Structures

石原 孟*1 勝地 弘*2 嶋田健司*3 土谷 学*4
Takeshi ISHIHARA Hiroshi KATSUCHI Kenji SHIMADA Manabu TSUCHIYA

1. はじめに

近年、地球温暖化をはじめとする地球環境問題に対する関心が国際的に高まる中、発電時に二酸化炭素を一切排出しない風力発電が注目されている。わが国の風力発電導入量は、新エネルギー等事業者支援対策事業等により1990年代後半から急速に増加しており、2007年3月末時点で導入された風力発電設備容量は149万kWに達し、1314基の風車が全国各地に建設されている。その一方で、日本特有の自然環境及び地形条件に起因する強風により、Fig.1及びTable1に示すような風車タワーの座屈や基礎の崩壊等の重大事故も報告されている^{1), 2)}。

風力発電量は風速の3乗かつブレード長さの2乗に比例することから、より高い効率を求め、風車の大型化が進められてきた。現在国内に設置されている大型風車は、翼の先端までの高さが120mにも達している。風力発電設備は風況のよい地点に建設されることから、台風時にも周辺地域より強い風を受けることが多い。また風車はヨー制御やピッチ制御と呼ばれる制御方式が採用されており、制御によって暴風時の風車の姿勢や作用する風荷重が異なるが、台風時の停電により制御用電源が喪失した場合、風車に作用する風荷重は制御が可能な場合に比べ大きく増大する。そのうえ、建設地点の地形や自然環境条件は多岐にわたり、風車本体を支える支持物の安全性はこれらの影響を大きく受ける。

これまでの風力発電設備支持物の構造設計では、海外で作成された規格や基準類をそのまま適用したもの、あるいは既存の土木、建築、機械等の分野の設計指針をそのまま用いたものが多い。しかし、これらの基準や指針は、わが国特有の自然環境条件あるいは風力発電設備固有の特性を十分に考慮しているとは言えず、わが国に適した風力発電設備支持物構造設計指針の策

定が強く望まれてきた。

このような状況に鑑み、平成16年9月、土木学会に「風力発電設備耐風設計小委員会」が設置され、風車の導入と建設を担当する電力会社、風力発電事業者、建設会社の実務者、風車の製造・販売を行う国内メーカーと代理店の技術者、そして大学・研究機関の研究者からなる35名の委員が3年間の活動を経て、「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」を策定し、平成19年11月27日に土木学会から刊行された³⁾。本稿は、風力発電設備支持物構造設計指針における耐風設計の考え方及びその評価手法について紹介する。

2. 風力発電設備の特徴と考慮すべき風荷重

風力発電設備は風力発電機（ブレード、ハブ、ナセル）およびそれを支える支持物（タワー、ペダスタル、基礎）から構成される。また風力発電設備支持物に作用する風荷重は、風車タワー、ロータ及びナセルに作用する風荷重からなるが、中でも風車ロータに作用す



(a) タワーの倒壊 (b) 基礎の破壊
Fig.1 風力発電設備支持物の台風被害の一例

Table 1 風力発電設備支持物の主な台風被害

年	場所	風車規模	被害状況
1999	鹿児島県	250kW	タワー倒壊
2002	沖縄県	250kW	基礎崩壊
2003	沖縄県	400kW	タワー倒壊
		500kW	基礎崩壊
2004	高知県	750kW	基礎亀裂

*1 東京大学大学院工学系研究科, 教授 Professor, University of Tokyo
*2 横浜国立大学大学院工学研究院, 准教授 Associate Professor, Yokohama National University
*3 清水建設技術研究所総合解析技術センター, 主任研究員 Senior Research Engineer, Shimizu Corporation
*4 鹿島建設環境本部新エネルギーグループ, 課長 Manager, Kajima Corporation

る風荷重は風車の運転状況に応じて大きく変化する。

風力発電設備支持物の耐風設計を行う際には以下に示す風力発電設備の特徴を考慮する必要がある。

- 1) 風力発電設備は一般に風況のよい地点に設置され、台風時には周辺地域より強い風が吹くことが多い。設置地点での設計風速の過小評価による被害例が見られたことから、設置地点の自然環境条件に十分に注意する必要がある。
- 2) 風力発電機はヨー制御やピッチ制御と呼ばれる制御方式が採用されており、制御によって暴風時の風力発電設備の姿勢や作用する風荷重が異なる。また台風時の停電により制御用電源が喪失し、風力発電設備に作用する風荷重は制御が可能な場合に比べ大きく増大する可能性がある。
- 3) 風力発電設備は構造減衰が小さく、振動特性は建築物や煙突などの工作物と異なる。
- 4) 地震が発生する時に発電している確率が高く、地震荷重を評価する際には発電時の風荷重を考慮する必要がある。

また風力発電設備支持物の耐風設計を行う際には暴風時の風荷重に加え、発電時の風荷重も評価する必要がある。Table 2 には風力発電設備支持物構造設計に必要な風荷重の一覧を示す。風力発電設備支持物に作用する長期荷重を評価する際には、固定荷重、積載荷重に加え、発電時の 10 分間平均風荷重の最大値を考慮する必要がある。また地震が発生する時に風車が発電している確率が高いことから、地震荷重を評価する際には発電時の年平均風荷重を加える必要がある。更に発電時の風荷重のピーク値は、暴風時の風荷重と共に、短期荷重の一つとして評価する必要がある。

Table 2 風車支持物構造設計に必要な風荷重の一覧

荷重の種類	荷重特性	評価対象
発電時の平均風荷重	10分平均最大値	長期荷重
	年平均値	地震荷重との組み合わせ
発電時の最大風荷重	ピーク値	短期荷重
暴風時の風荷重	ピーク値	短期荷重

なお、風力発電設備支持物に作用するせん断力と曲げモーメントは高さによって支配的な風荷重が変化することに注意を有する。また風車タワーの共振風速は発電時の風速範囲に入っているものの、ブレードの存在によりタワーから発生する渦が乱されるため、発電時および暴風時には風車タワーの渦励振の影響が小さいものとし、準定常理論により風力発電設備に作用す

る風および風直交方向の風荷重を求める。

3. 風力発電設備支持物耐風設計の概要

「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」は、13章から構成されている。暴風時と発電時の風荷重は、第3章により求めた設計風速および第4章により定めた風力係数を基に、第5章に示す等価静的法により算定する。また地震時の荷重(第6章)は、風力発電設備に作用する地震荷重に発電時の年平均風荷重(第5章)を加算して求める。以下、風力発電設備支持物構造設計指針における耐風設計の概要について紹介する。

3.1 設計風速の評価

風力発電設備支持物を設計する際には建設地点の自然環境を考慮した設計風速を決定することが重要である。建設地点の地形が平坦な場合における設計風速は、建築基準法に示す基準風速(10分間平均風速の50年再現期待値)を用いて、地表面粗度、ハブ高さを考慮して評価することができる。一方、建設地点の地形が急峻な場合には設計風速を求めることが容易ではない。指針では地形による平均風速の割増係数を数値流体解析により求め、山岳地帯における設計風速を評価した。

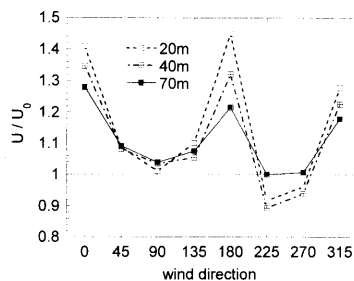


Fig. 2 複雑地形上の風速の割増係数の解析例 4)

Fig. 2 には数値解析により複雑地形上の風速の割増係数を求めた一例を示す。このケースでは70mの高さでも風速の割増係数が1.2を超えていることが分かる。風圧力は風速の2乗に比例することから、風速の割増係数を正確に評価することは風力発電設備の耐風安全性を考える上で極めて重要である。風車は風況のよい地点に建設され、台風時には周辺地域よりも強い風が吹くことが多い。風車を建設する際に設置地点での設計風速の評価を誤ると、台風時に大きな被害を受ける可能性がある。

3.2 風力係数の評価

風力発電設備支持物に作用する風荷重を評価する際には、ブレード、ナセルおよびタワーの風力係数が必要であるが、一般的に、ブレードとナセルの風力係数

の入手は困難である。指針では、風力発電設備支持物に作用する平均風荷重を算定するためのブレード、ナセルおよびタワーの風力係数を与えた。ブレードに関しては実際の風車に採用されているブレードの空力データをもとに標準的なブレードモデルの風力係数を定めた。またナセルに関しては矩形および卵形の形状を設定し、風洞実験によって得られた実験結果をもとに新たに風力係数を提案した。Fig. 3 に矩形型ナセルに作用する平均抗力係数を示している。図中には3種類のナセル長さ($L_n/H_n=2, 2.5, 3$)の結果を示す。ナセルの長さにはほぼ関係なく、平均抗力係数 C_{nD} の値は一つの式で表せることが分かる。

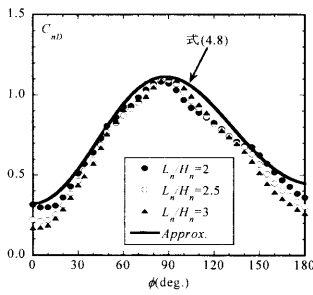


Fig. 3 矩形型ナセルに作用する平均抗力係数⁵⁾

ナセルの平均風力係数を与える式は一樣流中の風洞実験に対して作成したものであるが、ヨー角によって多少の差はあるものの、平均風力係数は一樣流中、乱流中とも同程度の大きさであるため、最終的な評価式はどちらもほぼ包含するものとした。

3.3 風荷重の評価

Table 2 に示すように風車支持物構造設計を行う際には暴風時の風荷重に加え、発電時の風荷重も評価する必要がある。以下、暴風時及び発電時の風荷重の評価方法について示す。

(a) 暴風時の風荷重

通常の構造物と異なり、風車に作用する風荷重は風車の姿勢によって大きく変化する。また風車に作用する風荷重を求める際には風速の他、風車の空気力係数、構造諸元、振動特性を正しく評価する必要がある⁶⁾。更に暴風時における風車の姿勢は、風車の制御方式によって変化し、風車に作用する最大風荷重が変化する。

Fig. 4 にはストール制御風車が風向きに正対する時の姿勢を示す。ストール制御風車の場合にはブレードのピッチ角を制御できないため、ヨー制御を行うことにより暴風時に風車のタワーに作用する転倒モーメントを低減している。Fig. 5 には風車のタワーに作用す

る転倒モーメントのヨー角による変化を示す。この図からわかるように、ストール制御風車に作用する風荷重はヨー角が0度または±180の時に最も大きく、±90の時に小さくなっている。

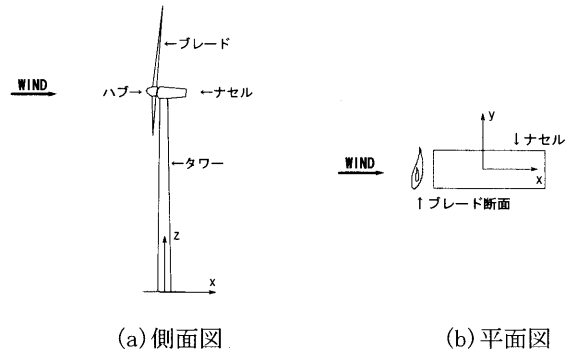


Fig. 4 ストール制御風車が風向きに正対する場合の姿勢

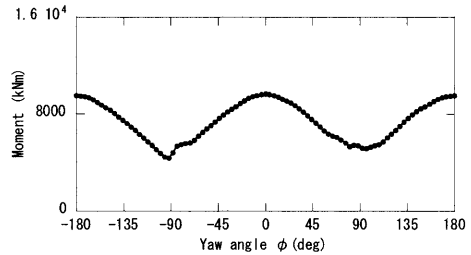


Fig. 5 タワー基部の転倒モーメントのヨー角による変化

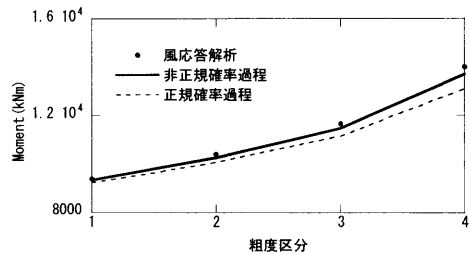


Fig. 6 タワーの転倒モーメントの乱れによる変化⁷⁾

風力発電設備は構造減衰が小さく、振動特性は建築物や煙突などの工作物と異なる。また日本では山岳地形に風力発電設備が建設されることが多く、乱れの影響も大きい。Fig. 6 には指針で提案された評価式により求めた粗度区分 I ~ IV における風荷重と風応答解析プログラム⁶⁾から得られた風荷重との比較を示す。この図から、建設地点での設計風速が同じであっても、乱れが大きい程、風荷重が大きいことが分かる。また指針では、設計者に使いやすい形でガスト影響係数の簡便式も提案した。建築基準法を模して、粗度区分毎におけるガスト影響係数を定めた。Fig. 7 には簡便式により求めたガスト影響係数と提案した評価式によるガ

スト影響係数との比較結果を示す。また比較のために建築基準法によるガスト影響係数も併記した。建築基準法によるガスト影響係数は風車の規模が小さい時に過小に評価することに注意を有する。

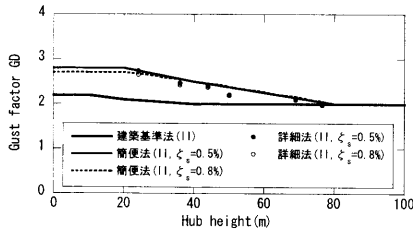


Fig. 7 ガスト影響係数のハブ高さによる変化⁷⁾

(b) 発電時の風荷重

長期荷重及び地震時に風車に作用する荷重を評価する際には風車発電時の平均風荷重を求める必要がある。風車発電時のロータに作用する平均風荷重はメーカーから提供されたスラスト係数により求めることができる。ピッチ制御風車の場合には、発電時の平均風荷重の最大値は定格風速時に出現するのに対して、ピーク値はカットアウト風速時に出現する場合が多いことに注意を要する。

Fig. 8 には、500kW ピッチ制御風車の発電時にタワー基部における平均曲げモーメントの風速による変化を示す。この例では風速の出現頻度はレイリー分布、年平均風速は8.50m/sと仮定している。この図から年平均曲げモーメントに対応する風速は7.34m/sであり、年平均風速8.50m/sよりすこし低くなっていることが分かる。

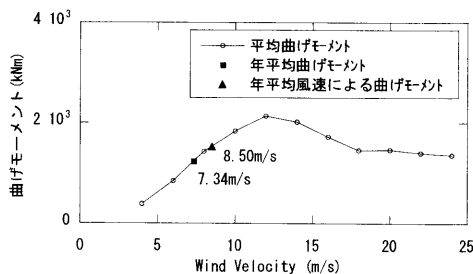


Fig. 8 タワー基部に作用する平均曲げモーメントの風速に変化

地震が発生する時には、風車が発電している可能性が高いことから、風車発電時の地震荷重には風車発電時の風荷重の年平均値を考慮する必要がある。Fig. 9 には、時刻歴応答解析により求めた定格出力400kWの風車の発電時に地震力が作用するときのタワー基部の曲げモーメントの一例を示す。この図から、発電時の地震荷重の最大値は必ずしも地震力の作用方向と風向

が一致するときに出現するとは限らないことが分かる。これは発電時の空力減衰の効果により地震荷重が低減されることによるものである。

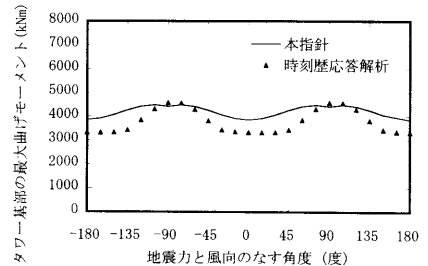


Fig. 9 タワー基部の曲げモーメントの地震力作用方向による変化

4. おわりに

風力発電設備支持物構造設計指針に関して、その策定の目的、耐風設計の基本的な考え方と概要を紹介した。本指針は、風力発電設備支持物の構造設計方法を具体的に示した国内で初めてのものであり、指針の活用により、風力発電設備支持物の安全性と信頼性が向上されることを期待している。

参考文献

- 1) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 2003 年台風 14 号による風力発電設備の被害とシミュレーションによる強風の推定, 土木学会誌, Vol.88, pp.45-48, 2003.
- 2) 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.
- 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.
- 4) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.195-221, 2003.
- 5) 野田博, 嶋田健司, 石原孟: 風力発電機ナセルに作用する平均風力ならびにピーク風圧に関する研究, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.133-138, 2006.
- 6) 石原孟, ファックパン, 高原景滋, 銘苅壮宏: 風力発電設備の風応答予測に関する研究, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.175-180, 2006.
- 7) ファックパン, 石原孟, ビンルンヴァン, 藤野陽三: 風力発電設備の風応答評価式の提案, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.181-186, 2006.
- 8) 石原孟, 祝磊, ルン ヴァン ビン: 風力発電設備停止時と発電時における地震応答予測に関する研究, 第 29 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2007.