

改正建築基準法と風力発電設備支持物構造設計の課題*

石原 孟**

1. はじめに

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、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)}。

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・解説」³⁾ を策定し、平成 19 年 11 月 27 日に土木学会から刊行された。これにより、わが国の自然環境条件および風力発電設備固有の特性を考慮した支持物構造設計が可能になった。

また昨年 6 月 20 日の建築基準法の改正に伴い、風力発電設備支持物が該当する工作物の確認申請の手続きが変更され、高さが 60m を超える風力発電設備は支持構造の安全性を確認するために指定性能評価機関による評価と大臣認定を受けることが必要となった。建築基準法の改正は風力発電設備支持物の安全性と信頼性の向上に貢献する一方、今年 4 月 2 日の朝日新聞⁴⁾に指摘されたように、耐震基準の厳格化により 6 割以上の風力発電の計画が遅れている事態も発生している。

本稿は、建築基準法の考え方および高さが 60m を超える風力発電設備支持物の性能評価の現状について紹介するとともに、風力発電設備支持物構造設計に関わる技術課題について考える。

2. 建築基準法の考え方と変遷

建築基準法は昭和 25 年 5 月 24 日に制定され、同年 10 月 25 日より施行された。建築基準法の第 1 条には「この法律は、建築物の敷地、構造、設備及び用途に関する

最低の基準を定めて、国民の生命、健康及び財産の保護を図り、もって公共の福祉の増進に資することを目的とする。」と書かれている。

建築基準法は、社会の発展とともに改定され、現況に即した法律として運用されてきた。例を挙げると、昭和 56 年 4 月 24 日に建築基準法施行令が改正され、いわゆる新耐震設計法が導入された。また平成 10 年の第 9 次改正は、平成 7 年の阪神淡路大震災を契機に各規定の見直しが進み、建築物の安全性の一層の確保と建築基準の性能規定の導入を始めとする単体規定の見直し、建築規制の適用の合理化等の措置を構ずる事を内容とした建築基準法の改正が行われた。民間機関による建築確認・検査制度も創設され、平成 12 年 6 月 1 日に施行された。さらに昨年 6 月 20 日の改正は、構造計算書偽造事件を契機に、より安全で信頼性の高い建築物を提供することを目的に、建築確認手続きの厳格化を中心とする見直しが行われた。高さが 60m を超える工作物の安全確認も指定性能評価機関による評価および大臣認定を受けることになった。

建築基準法自体はシンプルな形で構成されている。建築基準法と施行令は別にするにより、その目的と基準の適用範囲を明確にしている。また建築基準法は、基準法>施行令>施行規則>条例という構成をとることにより、地域の違いから生じる差異に対応できるようにしている。建築基準法の最新版は法令データ提供システム⁵⁾から閲覧できる。

3. 風力発電設備支持物の性能評価

第 2 章に述べたように建築基準法は平成 10 年から平成 12 年にかけて「確認検査の民間開放」と「性能規定化」を目的として大幅な改正が行われ、前者は建築規制において民間の効率性を活用することが目的であり、後者は特定の構法や材料の使用を前提とした「仕様」による基準を廃止し、建築物が本来備えなければならない「性能」によって基準を定めることにより、技術開発を促進することが目的である。昨年 6 月 20 日の建築

* 平成 20 年 6 月 20 日～21 日 第 8 回風力エネルギー利用総合セミナーにて講演

** 東京大学大学院工学系研究科 教授 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

基準法の改正は、高さが60mを超える工作物も、建築物と同様に「性能」によって基準を定めることになり、特殊な構造方法を用いた工作物や新しく開発された材料は建築基準法令に定められた一般的な基準ではなく、高度な方法を用いて性能を検証することが可能になった。

風力発電設備支持物の性能評価は、時刻歴応答解析工作物性能評価業務方法書⁶⁾に従って行われる。また建築基準法施行令第139条第三号及び第四号ロの認定に係る性能評価の内容は①長期荷重に対する安全性、②積雪荷重に対する安全性、③風圧力に対する安全性、④地震力に対する安全性、⑤荷重の組合せ、⑥長期荷重に対する使用性、⑦外装材等の安全性、⑧特殊な材料及び特殊な構造方法、⑨特殊な装置等となっている。風力発電設備支持物はその中の①～⑥と⑧～⑨に関係している。

時刻歴応答解析工作物性能評価業務方法書には、風力発電設備支持物が満足すべき性能についても示されている。まず稀に発生する荷重・外力の作用後も、風力発電設備支持物の安全性や使用性および耐久性が低下せず、補修を必要としない状態に保つことである。そして、極めて稀に発生する荷重・外力に対しては、風力発電設備支持物は、倒壊・崩壊しないことである。前者は設計耐用期間内の構造物の安全性・使用性等を適切なコストで確保することを目的とし、後者は人命を保護することを目的としている。性能評価の詳細については第4章で説明する。

また、風車のタワー及び基礎に使用する材料についてはJIS規格に適合していないものは建築基準法第37条第二号の規定に基づき、国土交通大臣の認定を受ける必要がある。ただし、海外規格に適合する材料でもJIS規格に適合していることを示したものは、建築基準法第37条第一号の規定に基づき指定されたJIS規格に適合するものとして、同条第二号の規定に基づく国土交通大臣の認定を取得することなく使用することが可能である。JIS規格に適合しているかどうかは、海外規格により製造された実際に使用する材料の化学成分、機械的性質を示す試験データがJIS規格の範囲に入っているかどうかにより判断する。従って、海外規格とJIS規格とが完全に一致していなくても、使用する材料の化学成分、機械的性質に関する試験データがJIS規格の範囲に入っていれば、対象材料はJIS適合と判断される。そのため、JIS規格に適合するかどうかを判断する際には使用材料に関する試験データが不可欠であり、データ不足の場合には追加試験を要する場合がある。

図1には日本建築センターにおける建築基準法に基づく性能評価業務の標準的な手続きの流れ⁷⁾を示す。事前相談から、申請書類の提出、審査委員会での説明、部会での審議、審査委員会での報告を経て、性能評価書が交付される。その後、国土交通大臣に提出し、大臣の認定を受ける。建築基準法第20条第一号の規定に基づく国土交通大臣の認定に関する性能評価に要する期間は、一般に1ヵ月程度であり、性能評価後の大臣認定取得に要する期間は概ね2週間程度である。ただし、性能評価の期間は、個別の事案の事前準備状況によって異なる。また、風車に使用する材料の化学成分、機械的性質を示す試験データが不足している場合には追加試験を行う必要があるため、追加試験に要する分だけより時間がかかる場合がある。

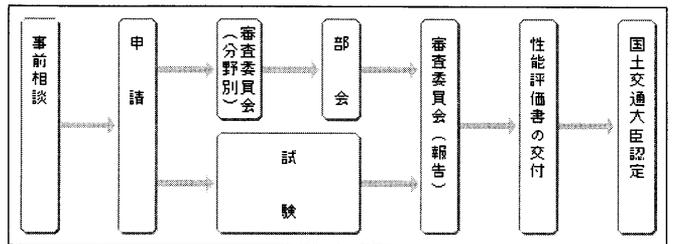


図1 性能評価の標準的な手続きの流れ⁷⁾

性能評価機関の連絡先及び業務内容は財団法人建築行政情報センター⁸⁾のホームページに掲載されている。例えば、高力ボルト接合に関する認定を行う場合には、指定性能評価機関に係る省令59条の指定区分12号の3を受けた(財)日本建築センター、(財)日本建築総合試験所、(株)国際確認検査センターの3つの機関のみが可能である。

4. 風力発電設備の特徴と安全性照査

4.1 風力発電設備の特徴

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荷重は、風車タワー、ロータ及びナセルに作用する荷重からなるが、中では風車ロータに作用す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構造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。

以下、時刻歴応答解析工作物性能評価業務方法書に従い、長期荷重、積雪荷重、風圧力、地震力に対する安全性照査および荷重の組合せ、長期荷重に対する使用性、特殊な材料及び特殊な構造方法、特殊な装置等を紹介する。

4.2 長期荷重に対する安全性照査

長期荷重に対する安全性照査では、風力発電設備支持物の各部分の固定荷重、積載荷重及び発電時の平均風荷重の最大値（多雪区域における積雪荷重等）を考慮して求めた長期荷重に対して、風力発電設備支持物の構造耐力上主要な部分の応力度や耐力の計算を行い、各部に生じる力が長期許容応力度や長期許容耐力以下であることを確認し、損傷が生じないことを確かめる。コンクリート系構造については、耐久性上有害なひび割れが生じないことを確かめる。

4.3 積雪荷重に対する安全性照査

風力発電設備支持物に作用する積雪荷重については、平成12年建設省告示第1461号第二号に定められた方法に基づき、施行令第86条に規定される方法により、垂直積雪量、単位荷重より積雪荷重を求め、構造計算を行う。積雪荷重を固定荷重、積載荷重に加え、風力発電設備支持物の構造耐力上主要な部分の応力度や耐力の計算を行い、各部に生じる力が短期許容応力度以内であることを確認し、損傷が生じないことを確かめる。

4.4 風圧力に対する安全性照査

風力発電設備支持物に作用する風圧力については、平成12年建設省告示第1461号告示第三号に定められた方法によって構造計算を行うこととしているが、同号口にある基準風速の1.25倍の暴風での検討については、評価員が必要と認めた場合に限る。従って、風力発電設備支持物に関しては、極めて稀に発生する暴風に

対する検討を一律に行わないことを意味する。これは、高層建築物と異なり、風力発電設備内に日常的に人が出入り、居住する使用形態ではないことや台風の襲来を事前に予知しうることを考慮したことによるものである。ただし、風車が市街地に建設され、風車の倒壊・崩壊により人命に対して危険が生じると判断される場合には当該暴風に対する検討が必要となる。

従って、極めて稀に発生する暴風時に風車の周囲に人が入らないことが確保され、大臣認定の性能評価において確認された場合には、積雪荷重と同じように、稀に発生する暴風時の風荷重に対して、支持物の構造耐力上主要な部分の応力度や耐力の計算を行い、各部に生じる力が短期許容応力度や短期許容耐力以内であることを確認する。この際には直交方向の振動、ねじれ振動及び構造部材の疲労についても適切に考慮し、損傷を生じないことを確かめる。

(a) 風力発電設備支持物構造設計に必要な風荷重

表1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。発電時の瞬間風荷重の最大値は、暴風時の瞬間風荷重の最大値と共に、短期荷重の一つとして評価する必要がある。また、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異なることについて注意を有する。なお、風車タワーの共振風速は発電時の風速範囲に入っており、ブレードとナセル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。

表1 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10分間平均風荷重	最大値	長期荷重
	年平均値	地震荷重との組み合わせ
発電時の瞬間風荷重	最大値	短期荷重
暴風時の瞬間風荷重	最大値	短期荷重

風力発電設備支持物に作用する風荷重は「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」に示されている方法により求めることができる。暴風時と発電時の風荷重は、指針の第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。以下、風力発電設備支持物に作用する風荷重の求め方について紹介する。

(b) 設計風速の評価

風力発電設備支持物を設計する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。

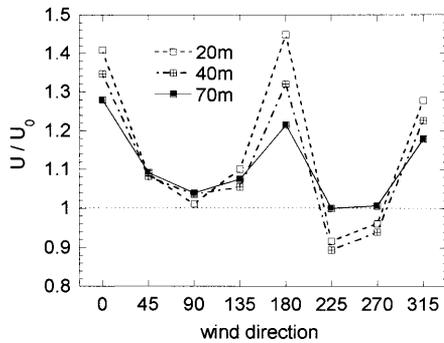


図2 複雑地形上の風速の割増係数の解析例⁹⁾

図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。

なお、局地的な地形による平均風速の割り増しは、風車の設置位置における平均風速の高さ方向の分布係数を適切に補正するためのものであり、平成12年の建築基準法に基づく告示（平成12年建設省告示第1454号）に示されている基準風速を補正するためのものではないことに注意されたい。また、この割り増しに関する取り扱いが建築基準法が改正される前と同じである。

(c) 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。図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。

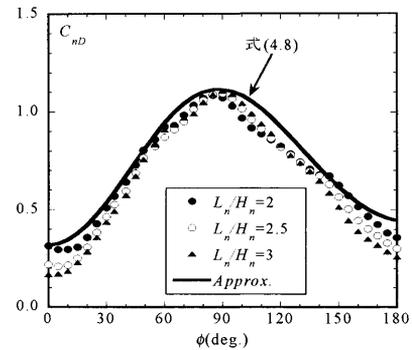
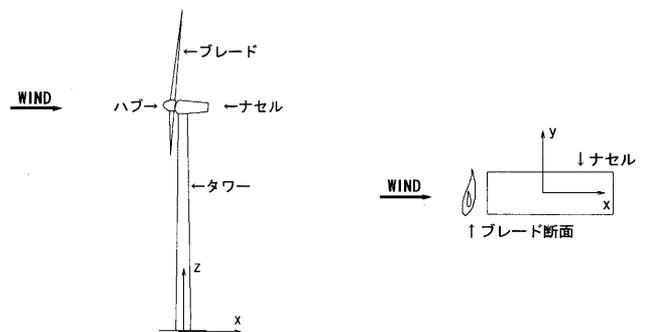


図3 矩形型ナセルに作用する平均抗力係数¹⁰⁾

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。

(d) 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¹¹⁾。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。



(a) 側面図

(b) 平面図

図4 ストール制御風車が風向きに正対する場合の姿勢

図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。

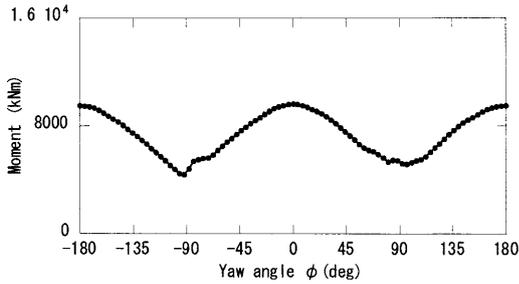


図5 タワー基部の転倒モーメントのヨー角による変化

図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。

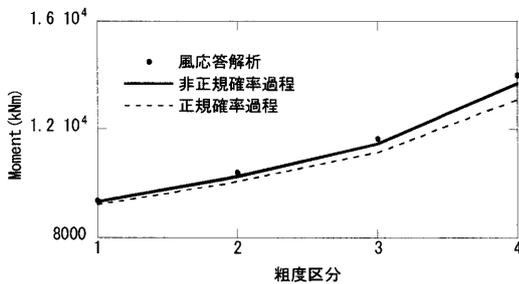


図6 タワーの転倒モーメントの乱れによる変化¹²⁾

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。図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¹¹⁾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。

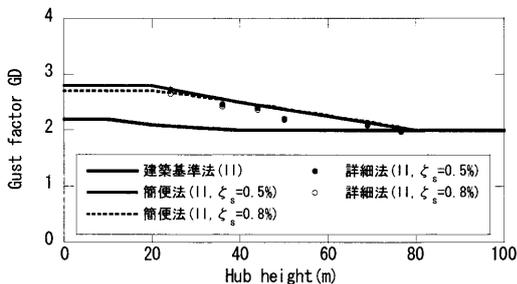


図7 ガスト影響係数のハブ高さによる変化¹²⁾

図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。

(e) 発電時の風荷重

表1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。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 (12m/s) に出現するのに対して、瞬間風荷重の最大値はカットアウト時に出現していることに注意を有する。発電時の瞬間風荷重の特性については文献13に参照されたい。

図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。

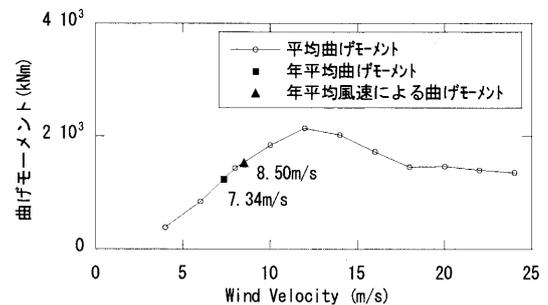


図8 タワー基部に作用する平均曲げモーメントの風速による変化

4.5 地震力に対する安全性照査

風力発電設備支持物に作用する地震力について平成12年建設省告示第1461号告示第四号に定められた方法によって構造計算を行い、以下の各項について評価することにより風力発電設備支持物の安全性を照査する。

(a) 水平方向入力地震動の設定

水平方向入力地震動は日本建築センターにより策定した設計用入力地震動作成手法指針案¹⁴⁾に従い、作成することができる。スペクトルの適合度については国土交通省建築研究所¹⁵⁾から提案されたクライテリアを

用いて適合度判定できる。時刻歴応答解析に用いられる地震波は以下に示す3種類がある。

まず平成12年建設省告示第1461号告示第四号イに定められた解放工学的基盤における加速度応答スペクトルにより、建設地表面地盤による増幅を適切に考慮した模擬地震波（「告示波」という。）を作成し、設計用入力地震動とする。この場合、告示第四号イに定められた継続時間等の事項を満たし、一様乱数、観測地震波（例えば、海洋型地震であるHACHINOHE 1968 EW、直下型地震であるJMA KOBE 1995 NS等）の位相特性を考慮して作成した3波を用いる¹⁴⁾。

次に告示第四号イただし書により、建設地周辺における活断層分布、断層破壊モデル、過去の地震活動、地盤構造等に基づいて、建設地における模擬地震波（「サイト波」という。）を適切に作成することができる。例えば、風力発電設備が静岡県に建設される場合には南海トラフの巨大地震として東海・東南海・南海地震を設計用入力地震動として採用できる。

最後に、上記に作成された地震波が適切なものであることを確かめるため、過去における代表的な観測地震波（例えば、EL CENTRO 1940 NS、TAFT 1952 EW、HACHINOHE 1968 NS）のうち、建設地及び支持物の特性を考慮して適切に選択した3波以上について、その最大速度振幅を0.25m/s、0.5m/sとして作成した地震波を、それぞれ稀に発生する地震動、極めて稀に発生する地震動として採用する。

なお、上記の最大速度振幅の値は施行令第88条第1項に定められた地震地域係数Zを乗じた値とすることができる。

(b) 応答解析に用いる振動系モデルの設定

風力発電設備支持物の振動系モデルは、風力発電設備支持物の各部分に生じる力及び変形を適切に把握できるように設定される必要がある。また風力発電設備支持物と地盤の動的相互作用が支持物の振動性状に与える影響が大きいと推定される基礎構造を有している場合には、支持物と地盤の動的相互作用¹⁶⁾を考慮した振動系モデルを用いる必要がある。極めて稀に発生する地震に対しても風力発電設備支持物の構造耐力上主要な部分に損傷が生じないように構造設計を行うため、振動系モデルの復元力特性は弾性とするのが可能である。また減衰特性については「風力発電設備支持物構造指針・同解説」に準拠し、1次固有振動数に対して設定できる。

(c) 水平方向地震力に対する応答計算

風力発電設備支持物の各応答値は、設定した振動系

モデルに対する運動方程式をNewmark- β 法（ $\beta=1/4$ ）を用いた数値積分法により、求めることができる。

また、2方向同時に地震動が加わった場合の応答又は主軸に対して45度方向に地震動が加わった場合の応答の影響、上下方向の地震動の影響、入力地震動の位相差の影響、鉛直方向の荷重に対する水平方向変形の影響を必要に応じて検討する必要がある。

(d) 評価判定クライテリア

稀に発生する地震動によって、構造耐力上主要な部分の変形によって風力発電設備支持物の部分に著しい損傷が生じるおそれのないことや支持物の構造耐力上主要な部分に生じる応力が短期許容応力度以内であることを確かめると共に、極めて稀に発生する地震動によって、支持物の構造耐力上主要な部分が弾性的な挙動を示す範囲にあることを確かめる。

(e) 地震荷重と風荷重の組み合わせ

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。図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¹⁷⁾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。

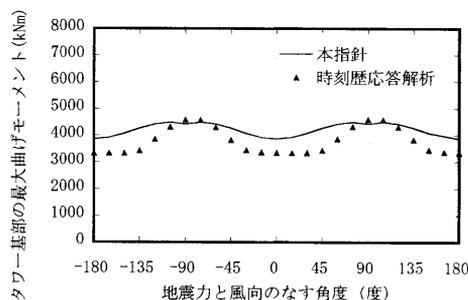


図9 タワー基部の曲げモーメントの地震力作用方向による変化

4.6 荷重の組合せと長期荷重に対する使用性

積雪荷重、風圧力又は地震力に対する安全性を検討する場合には4.2に規定する荷重及び外力との組合せを適切に考慮し、風力発電設備支持物の構造耐力上主要な部分の構造安全性を確かめると共に、4.2に規定する実況に応じた荷重及び外力による変形又は振動によって、支持物の使用上の支障が生じないことを確かめる必要がある。

4.7 特殊な材料・構造方法・装置

風力発電設備支持物の安全性を考える上では、特殊な材料及び特殊な構造方法、特殊な装置等も重要である。風力発電設備支持物の構造計算を行うに当たり、構造耐力に影響する鍛造のフランジ材、200mmを超える厚いフランジ材および太径高力ボルトについては建築基準法第37条第二号の認定を受けたものを用いる必要がある。また風力発電機は通常ヨー制御、ブレードピッチ制御、ロータ回転制御、振動・加速度検知による緊急停止など、構造安全性に関連する特殊な装置が用いられているため、風力発電設備支持物の設計においては想定したとおりの特性又は機能を有するか、またその特性又は機能を維持するために適切な維持管理されているかを確認する必要がある。特に稀に発生する暴風時に停電によりヨー制御が不能になった場合を想定するなど、各制御のフェールセーフを考慮した荷重設定を行い、安全性を確保することが望まれる。

5. 風力発電設備支持物構造設計に関わる技術課題

「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」³⁾は、平成19年11月27日に土木学会から刊行され、わが国の自然環境条件および風力発電設備固有の特性を考慮した支持物構造設計が可能になったが、幾つかの技術課題も残されている。

まず指針2007版では、過去に発生した風車倒壊事故の例を鑑み、稀に発生する風圧力に対して風力発電設備支持物の安全性向上に主眼を置いたため、極めて稀に発生する地震力に対する照査方法を明示していない。現状では極めて稀に発生する地震力に対しても、杭および基礎の安定計算の一部を除いて、短期許容値を用いて支持物の安全性を照査しており、支持物の弾塑性を考慮した設計法の提案が望まれる。

またタワーの接合部分のボルトについては、国内においてJIS B 1186を使用した引張・摩擦接合^{18)・19)}が一般的であるのに対して、欧州^{20)・21)}では風車タワーの設計に引張接合が用いられている。例えば、現在欧州で広く使われている風車タワー接合部のボルト設計では離間を認め、疲労耐力と終局耐力を別々に照査している。疲労耐力の照査をクリアできれば、ボルトの短期許容引張力を初期導入張力より高く設定することを認めている。ただし、ボルトの疲労耐力を照査する際の風速の最大値は風車の設計風速の0.7倍としており、高風速による疲労損傷を無視している。欧州には台風がないため、風速の確率分布はワイブル分布に従う。そのため、高風速の出現頻度が極めて低く、高風速による疲労損傷を無視できる。一方、わが国では台風の影響

により、風速の確率分布は高風速側においてワイブル分布に従わず、台風により高風速の出現頻度が高くなる。現状では設計風速までの強風を含めた疲労耐力評価を行っておらず、台風に起因する高風速がボルトの疲労強度にどのような影響を与えるかは不明である。また離間を認めた場合には極めて稀に発生する地震力に対して、風車タワーのフランジ接合部を剛結と仮定することができず、離間による非線形効果を考慮した時刻歴応答解析の手法および離間を模擬する非線形ばねモデルを確立する必要がある。

さらに、風力発電設備支持物の大臣認定を受ける際には1機ずつ受けるのが現状である²²⁾。同タイプの風力発電設備支持物であれば、設置する地域の地盤条件や風力など外的要因が同じなら、安全と判断できる。そのために、一部地域の戸建て住宅などで実施している「一般認定」を風力発電設備支持物に適用すれば、風力発電設備支持物タイプごとに審査して大臣認定を与えることにより、性能評価や大臣認定を経なくても、建築確認を受けられるようにすることが可能となるが、地形による風速の割り増し係数の算定方法や支持物と地盤の動的相互作用の評価方法の確立は不可欠である。

6. おわりに

昨年6月20日の建築基準法の改正に伴い、高さ60mを超える風力発電設備は支持構造の安全性を確認するために指定性能評価機関による評価と大臣認定を受けることが必要となった。本稿は、建築基準法の考え方および風力発電設備支持物の性能評価の現状について紹介するとともに、風力発電設備支持物構造設計に関わる技術課題を明らかにした。

風力発電設備支持物構造設計指針に関しては、現在土木学会構造工学委員にある風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会においてその改定を行っている。極めて稀に発生する地震力に対する構造設計手法の提案や欧州で使われているタワーの接合部分の設計手法の導入を行う共に、風力発電設備支持物に関する一般認証を実現するための研究も行っている。これらの活動は風力発電のさらなる拡大に貢献できることを願っている。

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) 朝日新聞:風力発電, 6割以上が計画遅れ 耐震基準の厳格化で, 2008年04月02日.
 - 5) 法令データ提供システム:建築基準法,
<http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxsearch.cgi>
 - 6) 時刻歴応答解析工作物性能評価業務方法書,
http://www.bcj.or.jp/c02/a01/c02_a01_list.html
 - 7) 財団法人日本建築センター,
http://www.bcj.or.jp/c02/a01/c02_a01.html
 - 8) 財団法人建築行政情報センター,
http://www.icba.or.jp/n_s/index.htm
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 石原孟, ファフックバン, 高原景滋, 銘苺壯宏: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.
 - 12) ファフックバン, 石原孟, ビンルウンヴァン, 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.
 - 13) 本田明弘, 平井滋登, 刈込界:風車に作用する空気の気力の実機観測・風洞実験・数値解析, 日本風工学会誌, Vol.33, No.2, pp.115-118, 2008.
 - 14) 日本建築センター:設計用入力地震動作成手法指針案, 1993.
 - 15) 国土交通省建築研究所:改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景, 2001.
 - 16) 日本建築学会:建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.
 - 17) 石原孟, 祝磊, ルウン 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, pp.187-190, 2007.
 - 18) 日本建築学会:高力ボルト接合設計施工ガイドブック, 2003
 - 19) 日本建築学会:鋼構造接合部設計指針, 2006
 - 20) DEUTSCHE NORM: DIN 18800 Structural steel work, Part 1 Design and construction, 1990
 - 21) DEUTSCHE NORM: DIN 18800 Structural steel work, Part 7 Execution and constructor's qualification, 2002
 - 22) 風力発電新設容易に国交省改正建築法の運用緩和:
<http://www.business-i.jp/news/sou-page/news/200804290018a.nwc>