

風力発電設備支持物構造設計の現状と課題

The State-of-the-Art on Design of Wind Turbine Support Structures

石原 孟*

Takeshi ISHIHARA

*正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

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。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。本稿では、風力発電施設の強風被害の実態及び発生メカニズムを紹介し、従来の風力発電設備支持物構造設計の問題点を明らかにすると共に、風力発電設備支持物構造設計の考え方、設計の現状および今後の課題について述べる。

1. まえがき

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、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、台風時には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。従って、風力発電設備支持物の構造設計においては入念な検討が欠かせないが、風力発電機の複雑さとそれに関する情報の不足から技術者が判断に悩む場合が多い。

本稿では、風力発電施設の強風被害の実態及び発生メカニズムを紹介し、従来の風力発電設備支持物構造設計の問題点を明らかにすると共に、わが国特有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、風力発電

設備支持物構造設計の基本的な考え方、設計の現状および今後の課題について述べる。

2. 風力発電施設の強風被害

(1) 被害の実例

風力発電設備は一般に風況のよい地点に建設され、台風時には周辺地域より強い風が吹くことが多い。風車を建設する際に風車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。また風車はストール制御とピッチ制御と呼ばれる二つの制御方式が採用されており、制御方式によって最大風荷重が発生するときの風車の姿勢が異なる。更にこれらの制御を行うために電力が必要であり、台風時の停電により制御用電源が喪失し、風車に作用する風荷重が設計時に考慮した値を超えて被害を受けた例がある。

例えば、2003年台風14号では沖縄県宮古島の北端の平良市狩俣に4基、南東部の城辺町七又に2基、南部の上野村新里に1基の、計7基の風力発電設備が被害²⁾を受けた。風力発電設備の破損箇所はブレード、ナセル、タワー、基礎、ヨー制御機構、ピッチ制御機構と多岐にわたり、全ての風車が運転不能の状態になった。

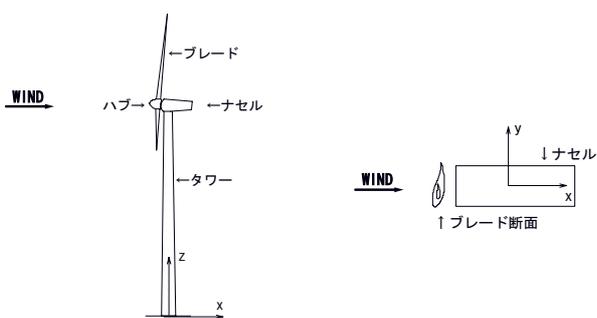
代表的な被害としては狩俣にある3号と5号風車の座屈倒壊である。3, 4, 5号風車は、本体・タワー・基礎が同じ設計のストール制御の風車であるが、被害状況が異なっていた。また七又にある1号風車は基礎が破壊され倒壊した。タワーを基礎に固定するためのアンカー部分は丸ごと基礎から引き抜けていた。

(2) 被害の発生メカニズム

風力発電設備が風況のよい場所に建設されるのは一般的である。このことは、強風時には周辺地域に比べ風車の設置場所でもより強い風が吹くことを意味する。地表面

粗度の変化や地形の起伏により地表面付近の風速が増大することがある。例えば、風車が海や湖に近い場所に設置される場合には陸上より強い風が吹くことが多く、水面と同じ地表面粗度を用いて設計風速を求める必要がある³⁾。また風力発電設備が山頂に建設される場合には風の増速を考慮する必要がある⁴⁾。複雑地形中に建設される風車の場合には平坦地に比べ設計風速が増大する可能性があり、風車の選定及び風車支持物の設計を行う際には地表面粗度や地形の起伏による風速の増加を厳密に評価し、設計に反映することが重要である。

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⁵⁾。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。図1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。



(a)側面図

(b)平面図

図1 ストール制御風車が風向きに正対する場合の姿勢

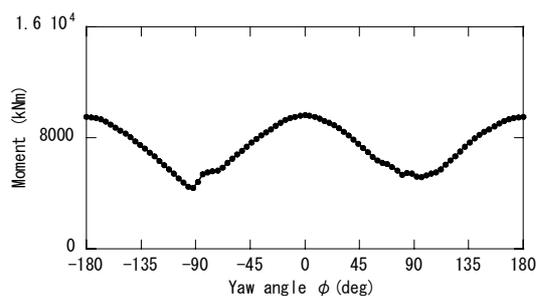


図2 タワー基部の転倒モーメントのヨー角による変化

図2には風車タワー基部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。台風14号のときには停電により風車のヨー制御が不能となり、その結果、狩俣3号と5号風車のロータが北北東または南南西に向けたことで、ヨー制御が行われているときに比べ大きな風荷重が作用し風車が倒壊した⁶⁾。

(3)被害の防止対策

風車の被害原因は強度不足によるものがあれば、想定外の風荷重が作用したことによるものもある。強度不足の問題は耐風性の高い風向・風速計を用いることや、ハブカバーやナセルカバーの材料強度を上げることにより解決できる。また台風時の停電により制御電源が喪失し、風車が制御不能になる問題は、制御用バックアップ電源を設置することや、電力を必要としない制御方法を開発することにより解決することが可能である⁷⁾。更に想定外の風荷重が作用したことによる被害は、地表面粗度の変化や地形の起伏による風速の増大、または風車の姿勢による風荷重の変化や風力発電設備支持物の耐力を正確に評価することにより未然に防ぐことができる。

3. 風力発電設備支持物構造設計の考え方

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DESTAL、基礎)から構成される。風力発電機は国際規格 IEC61400-1⁸⁾やGLのガイドライン⁹⁾などに定められた環境条件(例えば、クラス I の風力発電設備は平均風速 50m/s、瞬間風速 70m/s の暴風に対して安全である)を満たす工業製品である。従って、国際規格を満たしている風力発電機が、設置場所の自然環境条件に適合しているかどうかは、風力発電設備の設置者が判断し選定する必要がある。一方、風力発電設備支持物は、設置者により構築するのが一般的であり、土木技術者は、風力発電設備の支持物に作用する荷重を算定し、支持物の構造計算および応力照査と安定照査などの設計業務を担当する。風力発電設備の支持物に作用する荷重の大部分は風力発電機からくるため、風力発電機に対する理解及びそれに起因する荷重を正確に把握することは不可欠である。

(1) 風力発電設備の特性

風力発電設備支持物を設計する際には1)から6)に示す風力発電設備の特性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。また、地震や最大積雪量のときに風車が発電している確率が高く、発電時の風荷重を考慮する必要がある。
- 4) 風力発電設備の支持物であるタワーは静定のカン

チレバー構造であり、タワーには開口部があるため、座屈強度に対する影響を考慮した構造設計が不可欠である。

- 5) 風力発電設備はトップヘビーの構造物であるため、タワーと基礎フーチングの接合部（ペDESTAL）に大きな荷重が作用する。鋼製アンカーボルト（またはアンカーリング）とコンクリート製基礎との接続は異種材料の継手構造になっているため、応力状態が複雑であり、接合部の構造計算には特に注意を有する。

風力発電機は大量に生産されている規格品であり、その規格はクラス I から III の 3 分類程度であるのに対して、設置場所の自然環境および地理条件は地点毎に異なる。風力発電機の選定および支持物の設計において設置場所の自然環境および地理条件を考慮した荷重評価が不可欠である。

(2) 風力発電設備支持物の目標性能

構造設計の基本目標は、「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」と言える。風力発電設備支持物の構造設計においては、設計の対象とする限界状態に達する可能性がある一定のレベル以下となるように構造部材の寸法や材質等を決定する。

具体的には、構造物の耐用年限中に稀に発生する荷重・外力の作用後も、構造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ことである。この限界状態は損傷限界と呼ばれ、安全性の観点から支持物が当初保有していた将来極めて稀に発生する程度の荷重・外力に対する安全性を稀に発生する荷重・外力が作用した後も低下させないために、また使用性や耐久性の観点から稀に発生する荷重・外力が作用した後も使用性や耐久性の低下がないように、有害な割れまたはひずみが残留しないことが要求される。

一方、極めて稀に発生する荷重・外力に対して倒壊・崩壊を生じないことである。すなわち、構造物の耐用年限中に極めて稀に発生する荷重・外力に対して、風力発電機を支持する能力を喪失しないことである。この限界状態は倒壊・崩壊限界と呼ばれ、人命を保護するため、構造物の破壊を安全性に照らして適切に防止することを目的としている。

(3) 荷重レベル

風力発電設備支持物においては、設計耐用期間内における構造物の安全性・使用性を確保するために、適切な荷重レベルを設定する必要がある。風力発電機は回転機械であり、その耐用年数はブレードなどの回転部分の疲労寿命から決まる。国際規格に従い設計された風力発電機の疲労寿命は 20 年であり、その支持物の設計耐用期間を 20 年とするのは妥当である。

耐用期間 20 年の間では、50 年に 1 度稀に発生する自然現象を超える確率は 33.2% である。一方、500 年に 1 度稀に発生する自然現象を超える確率は 3.9% である。

稀に発生する自然現象に対応する荷重レベルについては、設計耐用期間内の超過確率に基づき荷重レベルを設定し、設計耐用期間の異なる構造物に対して、同じ信頼性、すなわち、超過確率を有することが合理的である。一方、極めて稀に発生する自然現象に対応する荷重レベルは人命の保護を目的としているため、設計耐用期間の異なる構造物でも、安全性が同じとなるように設定される必要がある。ちなみに、風車に関する国際基準 IEC では暴風に対しては 50 年再現期間、地震に対しては 475 年の再現期間を採用している。平成 19 年 6 月 20 日に改定された建築基準法では、60m を超える工作物は稀に発生する暴風に対して 50 年再現期間、極めて稀に発生する地震は約 500 年再現期間を採用しており、国際基準 IEC とほぼ対応している。

4. 風力発電設備支持物構造設計の現状

構造物の設計法に関する国際規格としては ISO2394¹⁰⁾ が制定されており、その中では耐用期間を通じて構造物の性能に関する信頼性を検証するための方法と原則が示されている。限界状態に達する可能性を照査する設計法としては、許容応力度設計法と限界状態設計法がよく用いられている。いずれの設計法も、設計対象とする構造物（または構造部材）の設計強度とこれに作用させる設計荷重の比が、予め設定された安全係数より大きければ、安全性や使用性が確保されるという考えに基づくものである。

(1) 設計方針

風力発電設備支持物の構造設計を行うため、まず、設計概要、荷重レベルと荷重の組合せ、設計クライテリアを明確にする必要がある。また荷重レベルおよび組合せでは、長期荷重、短期荷重（稀に発生する）、極めて稀に発生する荷重に対して、固定荷重、積載荷重、積雪荷重、風荷重、地震荷重の組み合わせを決定する。さらに設計クライテリアではタワー及び基礎の各部分に対して、明確なクライテリアを設定する。長期荷重に対しては長期許容応力度以下、短期荷重（稀に発生する）に対しては短期許容応力度または短期耐力以下、極めて稀に発生する荷重に対しては極限耐力などを設定する。

(2) 荷重評価

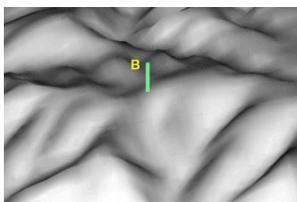
風力発電設備支持物を設計するには建設地点の自然環境を考慮した設計積雪深、設計風速、設計地震動等を決定する。

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）を用いることができる。基準風速の値は 30m/s ~ 46m/s の間にあり、市町村別に定められている。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。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することとなる。また設計地震動は、設計地震動に地震

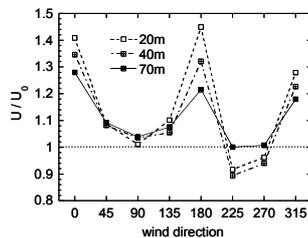
地域係数を乗じて求める。地震地域係数(0.7~1.0)は、建築基準法に従い、地域別に定めている。さらに設計垂直積雪量は建築基準法が定める基準に基づいて特定行政庁が規則で定める50年再現期待値に相当する数値を用いることとし、当該区域における局所的地形要因による影響等を考慮したものとする。

風力発電設備支持物に作用する各種荷重の評価は、2007年11月に土木学会が発行した「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」(風車指針)¹¹⁾を用いて行うことができる。この指針では、ブレードの風力係数は、実風車に採用されている種々の空気力データをもとに、標準的なブレードモデルの値を定め、ナセルの風力係数は、矩形および卵形のモデル形状を設定し、風洞実験により規定している。また風荷重の評価は、乱れの大きい山岳地帯にも適用できるピークファクターの評価式を導出し、風力発電設備の固有振動数と構造減衰を考慮した風荷重の評価式を提案している。さらに地震荷重は、定格発電量の異なる6基の風力発電設備モデルを対象に、過去に記録された代表的な6つの地震波を用いた時刻歴応答解析により、ベースシア係数および地震荷重の鉛直方向分布係数を定めている。最終的な地震時の荷重は、ロータ静止時に受ける地震荷重に発電時の年平均風荷重を加算して求めている。

建設地点の地形が平坦な場合には、設計風速は基準風速をベースに地表面粗度、ハブ高さを考慮して評価することができるが、一方、建設地点の地形が急峻な場合には設計風速を解析的に求めることが困難である。風車指針では地形や地表面粗度変化による平均風速の割増係数を用いて山岳地帯における設計風速を評価する。図3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^{4),12)}。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。



(a)対象地点Bの周辺地形



(b)風速の割増率の変化

図3 複雑地形による風速の増加⁴⁾

風による風車支持物の振動には、ブレードとナセルの重量を考慮した風車タワーモデルの1次振動が卓越する。風車指針では、風車タワーの1次振動モードと構造減衰を考慮し、風車タワーに作用する水平風荷重の評価式をスペクトルモーダル法により導出している。各ヨー角度における風方向と風直角方向の最大風荷重は、平均風荷

重にガスト影響係数を乗じて求める。図4には風車指針で提案した評価式により、400kWのストール制御風車を対象に求めた粗度区分I~IVにおける風荷重と風応答解析プログラム¹³⁾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。

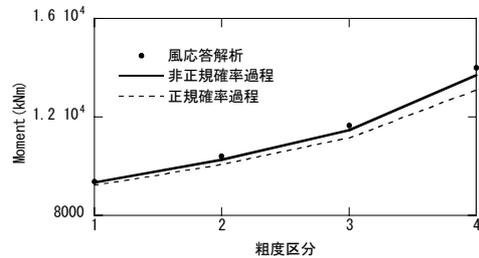


図4 タワーの転倒モーメントの乱れによる変化¹³⁾

(3) 構造計算

タワー、ペダスタル、基礎の応力度および安定性の照査は、風車指針に示されている構造計算式を用いて行うことができる。風力発電設備支持物、特にタワーのような典型的な静定構造物の場合には、靱性指向型設計法に向かないことや降伏後の変形に対する許容値設定が困難であることから、許容応力度設計法が用いられている。ただし、タワーの継手部や開口部、ペダスタル部においては、複雑な応力状態となっており、許容応力度設計法のみでは必ずしも合理的な設計にならない場合が予想される。そのような場合には、支持物全体の安全性を確認する限界状態設計法を用いる。

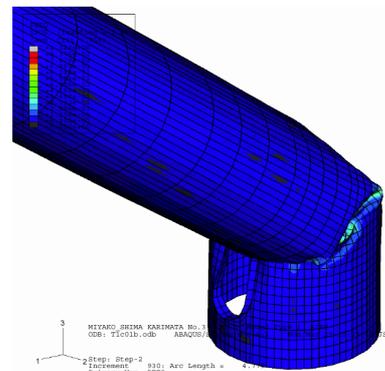


図5 FEMによるタワーの解析例¹⁴⁾

風車のタワーには開口部があり、座屈強度に対する影響を考慮する必要がある。図5にはFEMによるタワーの座屈解析例を示し、カラーコンターは相当塑性ひずみを表す。開口部近傍は、応力集中により局部的に大きな応力が発生する。通常、開口部の応力照査は、開口部の影響を除いた平均応力に開口に伴う応力集中係数を乗じることで発生応力を算定し、それが許容応力以下であることを確認することで行われる。しかしながら、開口のコーナー部には極めて局部的に大きな応力が発生し、許容応力度を超えることがしばしばである。一方で、開口部

が局部的に許容応力を超え、塑性域に入っても、タワー全体では十分に弾性挙動を示すことはよく知られていることから、風車指針では、タワー筒身の許容圧縮応力度に開口部の影響を考慮した低減係数を乗じる照査式を用いている。

風力発電設備はトップヘビーの構造物であるため、タワーと基礎フーチングの接合部（ペDESTAL）に大きな荷重が作用する。鋼製アンカーボルト（またはアンカーリング）とコンクリート製基礎との接続は異種材料の継手構造になっているため、応力状態が複雑であり、接合部の構造計算には特に注意を有する。過去の事故例ではコーン破壊に対する配慮が欠けた設計が見られたことから、風車指針では定着部のペDESTALを基礎と切り離して設計方法を示している。

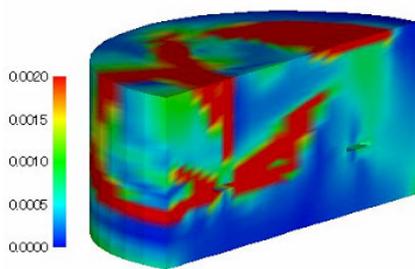


図6 FEMによる定着部の解析例¹⁵⁾

図6にFEMによるペDESTALの応力解析例を示し、カラーコンターは主せん断ひずみを表す。コンクリートのコーン状破壊の進展に伴い、最終的に斜め方向ひび割れの進展が確認できる。過去の事故例に対するFEM解析およびパラメータスタディからは、コーン状破壊時におけるコンクリートと鉄筋の分担力（図7）について以下のことが判明されている。

- 1) コンクリートの分担力はコンクリートの設計基準強度の平方根とコンクリートのコーン破壊面の有効水平投影長さに比例して増大するが、ペDESTALの寸法係数 a/b の減少に伴い小さくなる。
- 2) 鉄筋の分担力はコーン状破壊面を横切る外周鉄筋とせん断補強筋の降伏強度と円周単位長さあたりの鉄筋断面積の積に比例する。
- 3) アンカーボルトのプレストレスがない場合とある場合の解析結果からはプレストレスがある場合はない場合に比べて、破壊曲げモーメントに対する抵抗力が減少し、小さくなる。

風車指針では、このようなコーン状破壊に影響を与える様々な要因を考慮し、アンカーボルトまたはアンカーリングの抜け出しに対する構造計算式を提案している。

基礎については、直接基礎形式、杭基礎形式を対象とし、材料定数、許容応力度、安定計算、構造計算に関してその考え方や構造計算式を示した。基礎の設計に関しては、これまでに基礎自体が被害を受けた事例がないため、現行の設計実績を考慮し、既存の評価式を用い、風力発電

設備の基礎に適用している。

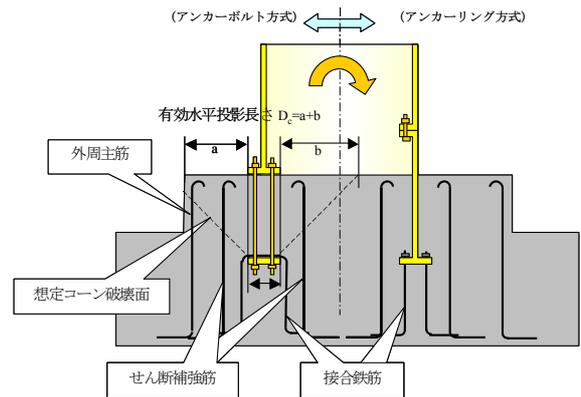


図7 コンクリートのコーン状破壊面の有効水平投影長さと各種鉄筋の定義¹¹⁾

5. 今後の課題

平成19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。

建築基準法施行令第139条第三号及び第四号口の認定に係る性能評価を行う際には、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特殊な装置が評価の対象となる。風力発電設備支持物の性能評価の詳細については、時刻歴応答解析工作物性能評価業務方法書¹⁶⁾を参照されたい。

「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」（2007年版）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。また風車発電時のロータ回転に起因する変動荷重は、風力発電設備に大きな繰り返し荷重をもたらすため、支持構造物の安全性に対する疲労荷重の評価が重要である。この問題を解決するために、2008年1月に土木学会構造工学委員会の中に風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会が設立され、現在風力発電設備支持物構造設計指針の改定作業を行っている。

設計法に関しては、現在風力発電機に関する国際基準が設定されているが、風力発電設備支持物に関する国際基準はまだ設定されていない。今後性能設計の観点に立ち、風力発電設備支持物の限界状態を明らかにし、風力発電設備固有の特性およびわが国の自然環境条件を考慮した設計体系を確立したい。

また荷重評価に関しては発電時の最大荷重に関する評価式を提案すると共に、風車発電時のロータ回転に起因

する疲労荷重の評価方法を提案する。また極めて稀に発生する地震力を評価するため、時刻歴応答解析による評価方法を提示すると共に、時刻歴応答解析の基本方針、設計用入力地震動の設定、解析モデルと応答計算、荷重の組合せの評価について示す。強風による風車被害の大半は制御系の不具合によるものであり、それに対する対策は重要である。現状では停電時に制御できるようにバックアップ電源を採用する方法や停電時にもパッシブ制御できるような風車が開発されている。今後これらのバックアップ電源の信頼性（風速計、電気系統、制御等）やパッシブ制御の性能（ダウンウインド、SmartYaw等）を立証し、制御システムが具備すべき条件および制御状態下における荷重評価方法を確立する。

さらに構造計算に関しては極めて稀に発生する地震力に対して、支持物の弾塑性を考慮した設計法を提案する。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・摩擦接合が一般的であるのに対して、欧州では風車タワーの設計に離間を認める引張接合^{17), 18)}が用いられている。しかし、わが国では台風により高風速の出現頻度が高くなり、それによる疲労荷重を評価する必要がある。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。

6. まとめ

本稿では、風力発電施設の強風被害の実態及び発生メカニズムを紹介し、従来の風力発電設備支持物構造設計の問題点を明らかにした。風力発電設備支持物構造設計に関しては、「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」を例に、風力発電設備支持物の構造設計の基本的な考え方、設計の現状および今後の課題を紹介した。

近年洋上風力発電の導入が始まっており、風力発電設備の大型化は留まるところを知らない。このような巨大で複雑な荷重を発生する風力発電機を支える支持物の合理的な構造設計はますます重要である。そのために、風力発電機が発生する各種荷重を正確に評価し、風力発電設備支持物の特性を考慮した構造設計法の開発は不可欠である。また日本は台風・地震の多い国であり、過去において台風・地震による被害を多く経験している。台風・地震被害からの教訓を生かし開発された構造設計技術はわが国のみならず、わが国と同じ自然条件を有する国と地域に設置される風力発電設備の安全性と信頼性の向上に貢献する。

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) 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.

- 3) 石原孟，山口敦，高原景滋，銘苅壮宏，新城文博：風洞実験と気流解析に基づく台風 0314 号の最大風速の推定，構造工学論文集，Vol. 51A，pp. 911-920，2005.
- 4) A. Yamaguchi, T. Ishihara and Y. Fujino: Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, J. Wind Eng. Indust. Aerodyn., Vol. 91, pp. 247-264, 2003.
- 5) 石原孟，ファフックバン，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.
- 6) 沖縄電力株式会社：台風 14 号による風力発電設備の倒壊等事故調査報告書，2004.
- 7) 石原孟：風車の耐風設計技術，ターボ機械，Vol. 34，No. 5，pp. 53-59，2006.
- 8) International Electrotechnical Commission : IEC 61400-1 - Ed. 3.0 Wind turbines - Part 1: Design requirements, 2005.
- 9) Germanischer Lloyd : Rules and Guidelines IV, Industrial Services 1, Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003.
- 10) ISO2394: General principles on reliability for structures, Third edition, 1998.
- 11) 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），2007.
- 12) 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.
- 13) 石原孟，ファバンフック，高原景滋，銘苅壮宏：風力発電設備の風荷重評価に関する数値的及び理論的研究，その 1，実風車における現地観測と風応答解析，その 2，風向を考慮した風荷重評価式の提案，日本風工学会誌，Vol. 30，No. 2，pp. 257-258，2005.
- 14) 高原景滋，銘苅壮宏，新城文博，石原孟，松浦真一：台風 14 号（マエミー）による宮古島の風力発電設備倒壊等事故について，風力エネルギー，Vol. 28，No. 4，pp. 40-47，2004.
- 15) 松尾豊史，金津努，高原景滋，銘苅壮宏：台風 14 号による風車基礎定着部の破壊挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 27，No. 2，pp. 1603-1608，2005.
- 16) 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
- 17) DEUTSCHE NORM : DIN 18800 Structural steel work, Part 1 Design and construction, 1990
- 18) VDI 2230 Blatt 1 : Systematic calculation for high duty bolted joints, Joints with one cylindrical bolt, 2003

(2008. 11. 13 受付)