

風力発電設備支持物構造設計指針の策定

A Design Code for Wind Turbine Support Structures and Foundations

石原 孟*

勝地 弘**

嶋田 健司***

土谷 学****

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、図-1 及び表-1 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。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、風車機械の複雑さと風車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。

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 名の委員で活動を始めた³⁾。委員及びオブザーバーの所属を表-2 に示す。委員会では、3 つの WG (風力発電システム WG, 設計風速・風荷重 WG, タワー・基礎 WG) を設置し、指針の素案を各 WG で検討した後、全体委員会で議論する体制としている。なお、小委員会の詳細については、ホームページ (図-2) をご覧頂きたい。本小委員会は、従来風力発電設備支持物における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



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

表-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

* 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区弥 2-11-16 准教授

** 横浜国立大学大学院工学研究院 准教授

*** 清水建設 (株) 主任研究員

**** 鹿島建設 (株) 課長

発電設備固有の特性を考慮した支持物の合理的な設計手法を提案し、技術者に分かり易く利用し易い設計指針の作成を行った。以下、本指針の基本的な考え方と概要を紹介する。

2. 本指針の基本的な考え方

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に定められた自然環境条件（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、本指針は、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を行うものとする。また風力発電機に関しては、工業製品として扱い、設置位置の自然環境条件（設計風速、設計地震動、設計垂直積雪量等）に基づき、メーカーにその耐力を確認するものとする。

2.1 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。

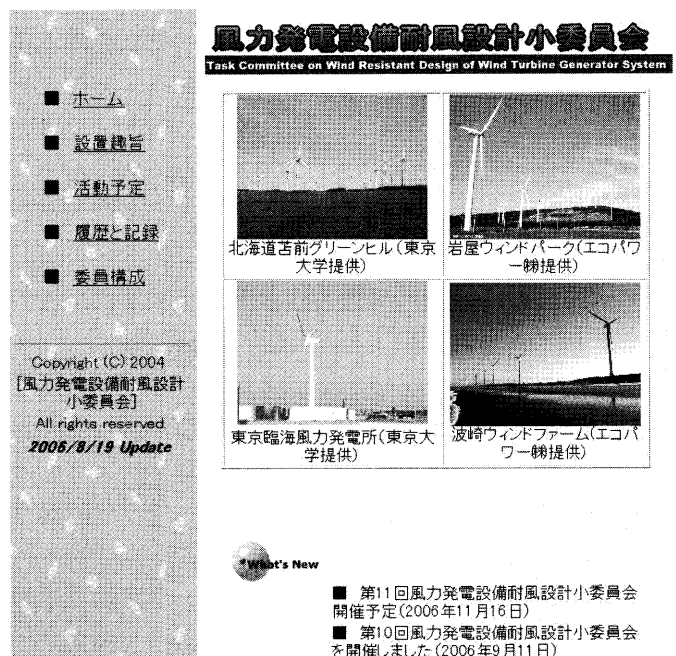
設置地点での設計風速の過小評価による被害例が見られたことから、設置地点の自然環境条件に十分に注意する必要がある。

- 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。風力発電機の制御トラブルが倒壊の直接原因になった事故もある。
- 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、発電しているときに、地震や最大積雪量の発生する確率が高く、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必要である。
- 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。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ている。
- 6) 風力発電機は大量に生産されている規格品であり、

表-2 委員及びオブザーバーの所属一覧

委員		
大学・研究機関	風力発電事業者	コンサルタント
東京大学	エコパワー(株)	電気興業(株)
横浜国立大学	電源開発(株)	東電設計(株)
九州工業大学	(株)ユーラスエナジージャパン	(株)風力エネルギー研究所
(独)建築研究所	メーカー	三菱重工橋梁エンジニアリング(株)
電力関係	石川播磨重工業(株)	建設会社
沖縄電力(株)	(株)荏原製作所	(株)大林組
関西電力(株)	JFEエンジニアリング(株)	鹿島建設(株)
東京電力(株)	(株)日本製鋼所	清水建設(株)
(財)電力中央研究所	富士重工業(株)	三井住友建設(株)
	三菱重工業(株)	
オブザーバー		
九州大学	(独)土木研究所	(財)電力中央研究所
東海大学	(社)日本電気協会	(社)日本電機工業会
(財)沿岸技術研究センター		

図-2 委員会ホームページ



<http://windeng.t.u.tokyo.ac.jp/TCWRDWT/>

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。

2.2 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、風力発電設備支持物が2.3節に示す荷重レベルで損傷および倒壊・崩壊を生じないことである。本指針では大雪、地震、暴風等短期荷重を受けた時の風力発電設備支持物の安全性を照査することを主たる目的とするが、疲労検討や発電および故障時の最大荷重の算出が必要と判断された場合には、IEC61400-1⁴⁾とGLのガイドライン⁵⁾などの指針に従い実施することができる。

2.3 荷重レベルと荷重係数

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。

50年に1度発生する暴風や地震は稀に発生する自然現象であるが、耐用期間20年の間でこれを超える確率、すなわち、超過確率は33.2%である。本指針ではこのような荷重に対して、支持物が損傷を受けないことを照査することとする。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、荷重レベルを設定する。この方法では設計耐用期間の異なる構造物の信頼性が同じとなるように設定することができ、信頼性と経済性を同時に考慮した決め方と言える。もう一つは過去の経験に基づく方法であり、過去に観測された最大規模の風や地震により、荷重レベルを設定する。この方法では設計耐用期間の異なる構造物が極めて稀に発生する荷重に対して安全性が同じとなるように設定され、安全性のみを考慮した決め方と言える。本指針では発生確率に基づく方法を採用し、表-3に示す損傷限界と倒壊・崩壊限界を照査するための荷重レベルと各荷

重レベルにおける荷重係数を表-4に定義した。表-4に示す荷重係数は日本建築学会建築物荷重指針・同解説(1993年版)⁶⁾に記載された積雪深、風速、地震動の再現期間換算係数に基づき求めたものである。また暴風時の荷重係数は風圧に基づき求めたため、風速の換算係数の2乗になっている。

表-3 風力発電設備支持物における荷重レベル

設計目標	荷重 レベル	再現期間 (年)	超過確率 (%)
損傷限界	I	50	33.2%
倒壊・崩壊限界	II	200	9.5%

表-4 風力発電設備支持物を対象とする各荷重レベルにおける荷重係数

荷重 レベル	再現期 間(年)	積雪時	暴風時	地震時
I	50	1	1(1.35)	1
II	200	1.2	1.32 (1.62)	2.11

ヨー制御を行う場合の荷重係数を表-4の中の括弧に示した。暴風時に動かない従来の工作物や建築物と異なり、風力発電設備はヨー制御により風荷重を低減できる反面、ヨー制御を行うことによる不確実性が増えるため、荷重係数はヨー制御を行わない場合に比べ、大きく設定されている。本指針で定義する荷重係数は国際認証機関が採用している風力発電設備における部分安全係数の積と一致している。

2.4 設計法

構造物の設計法に関する国際規格としてはISO2394⁷⁾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、許容応力度設計法や部分係数設計法(荷重強度係数設計法)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。

本指針は許容応力度設計法を準用している関係で、倒壊・崩壊限界を直接に照査しないが、構造計算式の作成においては、風力発電設備支持物の終局限界状態を照査し、適切な安全係数を設けることにより極めて稀に発生する積雪荷重、風荷重、地震荷重に対する支

持物の安全性（倒壊，崩壊等しないこと）を確保している。また本指針では，終局限界状態を照査するために必要な荷重とその組み合わせを定めたため，FEM解析や実験等に基づく構造計算を行い，部分係数設計法により終局限界状態を照査することが可能である。

2.5 荷重の種類および組み合わせ

風力発電設備支持物の構造設計を行う際には，支持物に作用する固定荷重，積載荷重，発電時の年平均風荷重，積雪荷重，暴風時の風荷重および地震荷重を組み合わせ，その結果として各部材に生じる応力および変形が許容値を超えないことを確かめる。設計荷重は各荷重状態の中の最大値として定める。

本指針では，わが国の自然環境条件および風車の特性に合わせて，風力発電設備支持物の設計荷重として積雪時，暴風時，地震時の荷重状態を定めた。各荷重状態には固定荷重，積載荷重を加えている。

- 1) 積雪時の荷重は積雪荷重の 50 年再現期待値に加え，発電している時に最大積雪量となる確率が高いことから，積雪時の荷重に発電時の年平均風荷重を考慮した。
- 2) 暴風時の風荷重は再現期間を 50 年とし，停電によりヨー制御が不可能な場合またはヨーが動いてしまう場合を考慮して，最も風荷重が大きくなるヨー角に対して風荷重を算定した。
- 3) 地震時の荷重は地震荷重の 50 年再現期待値に加え，発電している時に地震発生確率が高いことから，地震時の荷重に発電時の風荷重の年平均値を加算した。

多雪区域においては暴風時および地震時の荷重に積雪荷重の 50 年再現期待値の 0.35 倍の値を加えた。

本指針は許容応力度設計法を準用している関係で，表-5 に示す荷重とその組み合わせを用いて支持物の構造設計を行うが，構造計算式の作成においては，極めて稀に発生する積雪時，暴風時および地震時の荷重とその組み合わせに対して満足することを確認している。

表-5 荷重とその組み合わせ

荷重状態	一般の場合	多雪区域の場合
積雪時	$G+P+R+S$	$G+P+R+S$
暴風時	$G+P+W$	$G+P+W$ 注 $G+P+0.35S+W$
地震時	$G+P+R+K$	$G+P+0.35S+R+K$

注 この組み合わせは引張応力を受ける時に採用する。

この表における G ， P ， R ， S ， W および K は，それぞれ固定荷重，積載荷重，発電時の年平均風荷重，積雪荷重，暴風時の風荷重および地震荷重による力（軸方向力，せん断力，曲げモーメント等をいう）を表している。

3. 本指針の概要

本指針では，風力発電設備支持物の構造設計に関する諸要件および目標，風力発電設備支持物に作用する各種荷重の評価，タワー・ペデスタル・基礎の構造計算，設計例および評価式の算定根拠を可能な限り具体的な形で示した。また技術者への参考資料として，関連法規・基規準，指針類，風力発電機の技術資料，過去の代表的な事故例も巻末に加えた。本指針は，表-6 に示す 13 章から構成される。また指針の全体構成を理解しやすくするために 13 章を 5 つの編にまとめた。

3.1 総則・設計方針（第 1 編 第 1～2 章）

本指針は，3 枚翼を持つ水平軸風車の支持物であるタワー，ペデスタル，基礎を対象として，暴風時，地震時および積雪時における荷重評価および構造計算を行う場合に適用する。いわゆる小型風車や，プロペラ式以外の水平軸風車，垂直軸風車，ラチスタワーやコンクリートタワー風車は，対象外とした。

本指針の第 1 章の総則では本指針の適用範囲を定め，風車の基礎知識を説明すると共に，本指針で使われる用語，記号，座標系を示している。

第 2 章の設計の流れでは，構造設計の基本方針と荷重の種類および組合せを述べると共に，第 2 編の荷重評価と第 3 編の強度計算の全体像を分かるように各章の概要とフローチャートを示している。構造設計の基本方針については前に示す通りである。

3.2 荷重評価（第 2 編 第 3～6 章）

荷重評価は支持物全体に作用する暴風時，地震時，積雪時の荷重を対象に行う。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。また地震時と積雪時の荷重は，風力発電設備に作用する地震荷重と積雪荷重（第 6 章）に発電時の年平均風荷重（第 5 章）を加算して求める。

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，設計地震動等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）を用いることができる。

基準風速は、建築基準法に従い、30m/s～46m/s の値を市町村別に定めた。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。本指針では地形による平均風速の割増係数（第3章）を数値流体解析（第11章）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した。

設計地震動は、設計地震動の標準値に地震地域係数を乗じて求めることとした。設計地震動の標準値は50年再現期待値に相当する最大加速度300gal（煙突等の工作物の標準せん断力係数0.3と一致している）を採用し、地震地域係数(0.7～1.0)は、建築基準法に従い、地域別に定めた。

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。

本指針は、静的構造計算手法に供することを目的とし、風荷重、地震荷重は等価静的荷重として評価する。風力発電設備支持物に作用する設計荷重を正確に評価するために、建設地点の風と地震の特性および風力発電設備の動的特性と制御方式を考慮する必要がある。現状、風力発電設備支持物に作用する荷重の評価を建築基準法に準拠した場合、以下のような問題点がある。

- 1) 風力発電設備支持物に作用する風荷重を評価するためには、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、タワーを除き、ブレードとナセルの風力係数の入手が困難である。
- 2) 耐風設計に採用されている現行の評価式は、建築物のために作成したものであり、アスペクト比や構造減衰が大きく異なる風力発電設備に適用するには誤差が大きい。また山岳地帯に多くの風力発電設備が設置されているが、乱れ強度の大きい山岳地帯に適用できる高精度の風荷重評価式が提案されていない。
- 3) 耐震設計に採用されている現行の評価式は、煙突のために作成したものであり、トップヘビーの風力発電設備に適用するには誤差が大きい。また発電している時に地震発生確率が高いが、現行の評価式では発電時の風荷重を考慮していない。

以上の問題点を踏まえ、本指針では、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た。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た（第4章）。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（第5章）を提案した。本指針で示す風荷重評価式の予測精度は、多質点風応答解析プログラム（第11章）により検証されている。さらに地震荷重は、定格発電量の異なる7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（第6章）を定めた。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（第5章）を加算して求めることとした。

図-3には本指針で採用している設計基準風速の分布を示している。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。この設計基準風速は平坦な地形上（粗度区分II、高さ10m）における10分間平均風速の50年再現期待値を表しており、建築基準法の値と一致している。

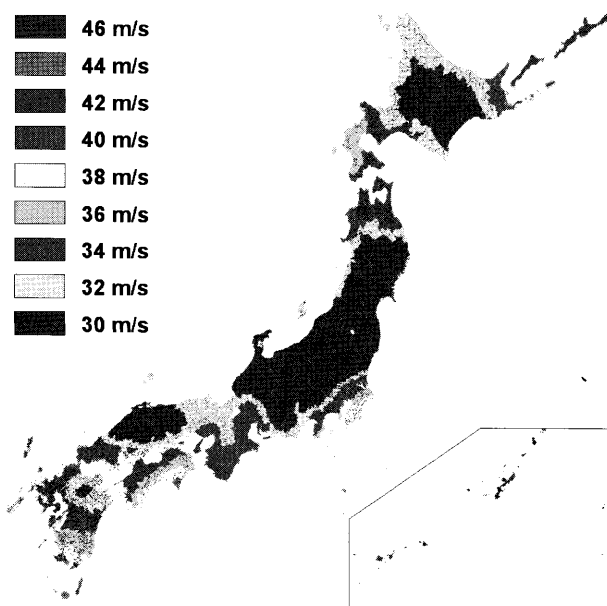


図-3 設計基準風速の分布⁸⁾

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。本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こととした。図-4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。第2章

にも述べているように、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。

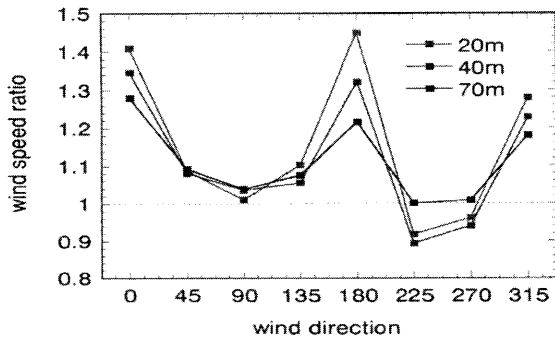


図-4 複雑地形上の風速の割増係数の解析例⁹⁾

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。そこで、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た。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-5には本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¹⁰⁾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。このことから、山岳地形に建設される風力発電設備の支持物については建設地点における設計風速および乱れ強度を算出し、本指針の評価式によりその耐風性能を評価する必要がある。

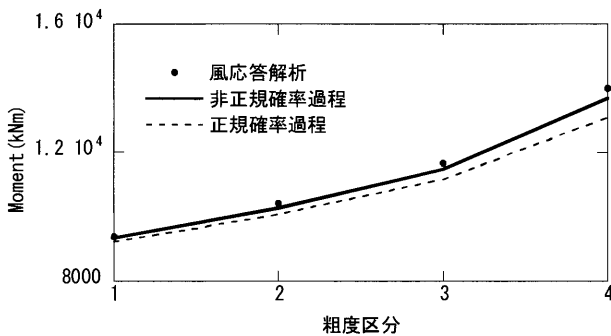


図-5 タワーの転倒モーメントの乱れによる変化¹⁰⁾

本指針では、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-6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。風車の規模が大きくなると、本指針の値とほぼ一致することが分かる。

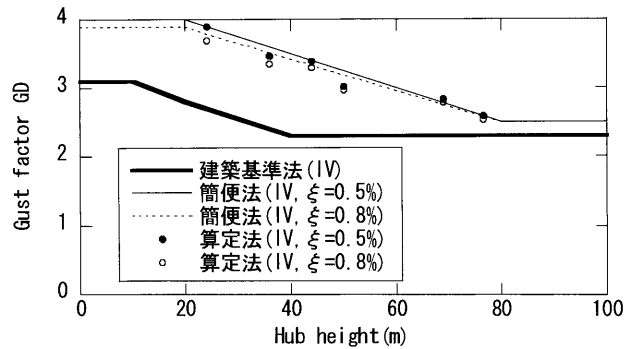


図-6 ガスト影響係数のハブ高さによる変化 (ピッチ制御風車, 粗度区分IV)¹⁰⁾

3.3 構造計算 (第3編 第7~9章)

タワー、ペデスタル、基礎の応力度および安定性の照査は、第7章、第8章、第9章に示す構造計算式を用いて行う。

風力発電設備を設置する場合には、風力発電機(ブレード、ナセル)は製品としてメーカーから購入し、設置者がタワー、基礎を構築するのが通常である。従って、本指針では、風力発電設備支持物であるタワー、基礎の構造計算を行い、その応力と安定性を照査対象としている。また、被害事例の中で、タワー基部の破壊(アンカーボルトの引き抜けなど)が見られていることから、本指針ではタワーと基礎との接合部、すなわち台座部をペデスタルと定義し、ペデスタル部の設計を独立した章として設け、構造計算法を示している。

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、煙突と同様に靱性指向型設計法に向かないこと、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、許容応力度設計法を用いることを基本とした。ただし、タワーの継手部や開口部、ペデ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ことで、許容応力度設計法によらないことも可能とした。また本指針では、FEM解析により継手部の構造計算式(第7章)およびアンカーボルトおよびアンカーリングの抜け出しに対

する構造計算式（第8章）を新たに作成した。

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-7には FEM によるタワーの座屈解析例を示す。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度を超え、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であり、上記のような設計での取り扱いでは、タワーの耐力を十分に活かし切れていないことになる。

本指針では、GL⁵⁾での考え方を参照し、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ることとした。

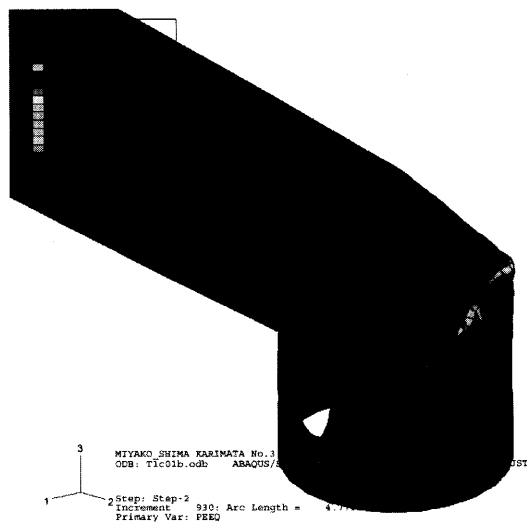


図-7 FEM によるタワーの応力解析例¹⁾

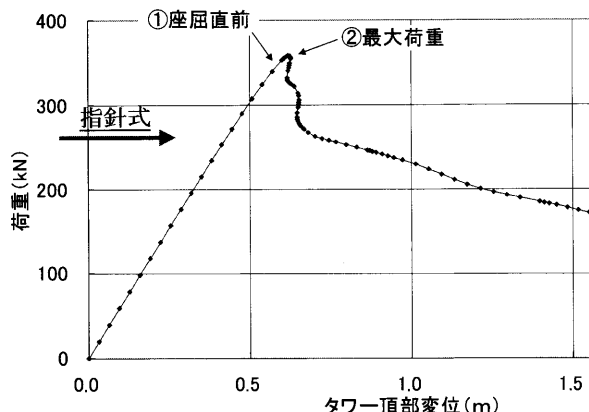


図-8 開口部方向への頂部水平荷重と変位の関係¹⁾

図-8は、図-7に示す FEM の解析結果を用いて、荷重と頂部水平変位との関係を求めたものである⁶⁾。これより、開口部が座屈（図中②）するまでは、荷重-変位関係がほぼ線形関係にあり、タワー全体としては弾性挙動を示していることがわかる。図-7の風車タワーを対象に本指針式によって、限界水平荷重を求めると約 220kN となり、図-8での最大荷重（約 360kN）の 60%である。FEM 解析結果によると、水平荷重 200kN でも開口のコーナー部では局部的に塑性域が見られるが、本指針での提案式は、局部的な塑性化は許容しつつも、全体としては十分に弾性範囲内の設計が可能な合理的な強度計算式となっていることが分かる。

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（ペデスタル）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、本指針では定着部のペデスタルを基礎と切り離して設計指針を示した。

図-9に FEM によるペデスタルの応力解析例を示し、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。このようなコーン破壊への抵抗力はコーン状破壊面上にあるコンクリート、コーン状破壊面を横切る外周鉄筋とせん断補強筋およびアンカー部と接合されている接合鉄筋によって確保される（図-10）。

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、コーン状破壊時におけるコンクリートと鉄筋の分担力について以下のことが判明した。

- 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、ペデスタルの寸法係数 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。

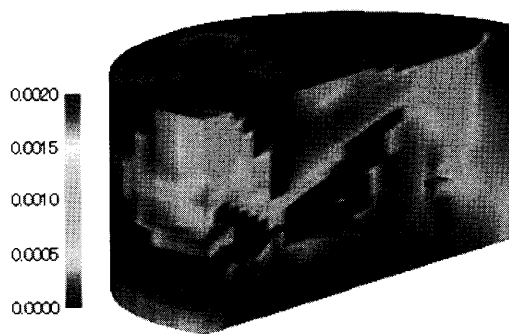


図-9 FEMによる定着部の応力解析例¹²⁾

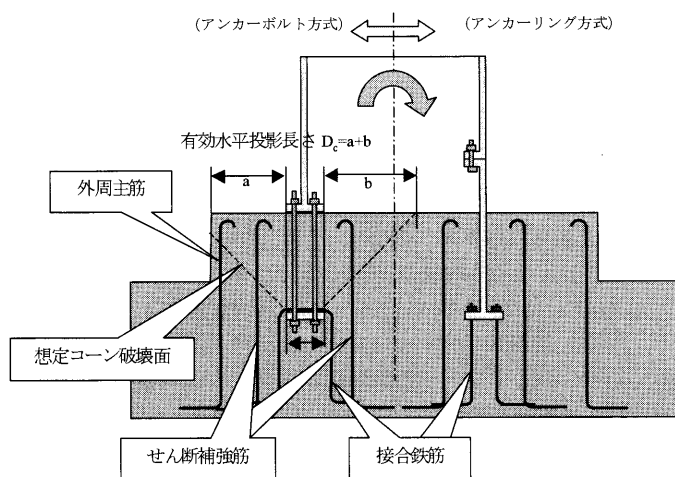


図-10 コンクリートのコーン状破壊面の有効水平投影長さとは各種鉄筋の定義

本指針では、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、FEM解析結果と比較することによりその精度を検証した。その他、コーン破壊の可能性がある領域の拘束という観点から、最小フープ筋を定め、またアンカーの引き抜き防止用に設置する鉄筋については、下側は基礎フーチングまで伸張して定着することや、外周鉄筋とせん断補強筋についてはペDESTAL頂部において定着フックを設置することを規定した。

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と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やすい形で示した。

3.4 設計・解析例（第4編 第10～11章）

本指針は、ユーザーの利便性の向上を目指して、平
Vol.31, No.2

坦地に建設されるストール制御風車と山岳地に建設されるピッチ制御風車を対象とする二つの設計例を第10に掲載した。具体的な計算方法を習得できるように、以下に示す特徴の持った例題を設けた。

- 異なる地域における平坦地形と複雑地形に設置する二つのケースを設定することにより、設計風速の評価方法並び地形による増速の算定方法（第3章）を示すと共に、地震地域係数や積雪深の違いが地震荷重と積雪荷重（第6章）に与える影響を例示する。
- ストールとピッチ制御風車の設計例を設けることにより、異なる姿勢での風力係数の設定方法を学ぶ（第4章）と共に、最大風荷重時の風車の姿勢、減衰、荷重の違い（第5章）を理解する。
- フランジがあるかない場合のタワー、初期軸力があるかない場合のペDESTAL、直接基礎と杭基礎を用いた設計例を設けることにより、タワー、ペDESTAL、基礎の強度計算式（第7章、第8章、第9章）を理解する。

設計例ではまず設計に関する一般事項、設計方針を示し、そして、設計風速の評価、風力係数の評価、風荷重の評価、地震とその他の荷重の評価により、構造計算に必要な最大荷重の分布を求める。最後に、風車のタワー、ペDESTAL、基礎の構造計算を行う。第10章の設計例を通じて、設計者が風力発電設備支持物の構造設計と本指針各章との関係を明らかにすることができると共に、本指針の内容をより深く理解できると期待している。

また本指針では、提案式の裏付けを明確にするために、式の作成に使用した数値計算結果を第11章で解説すると共に、数値流体解析に基づく設計風速の評価、FEM解析に基づく風荷重の評価、タワーおよびペDESTALの構造計算の詳細およびこれらの数値解析を行う際の留意点を示した。

3.5 関連法規・参考資料（第5編 第12～13章）

第12章では、風力発電設備支持物の構造設計に関連する電気事業法、建築基準法、IEC61400およびGL Wind Guidelineの国際規格、日本建築学会、日本電気協会、日本道路協会、土木学会等が発行する国内指針類の概要を述べた。

第13章では、設計者の利便性を考慮して、電気事業法および建築基準法の関連条文、許認可手続きを同章に示した。なお、2007年6月20日の建築基準法の改正において、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ている。ハブ高さが60m

を超える風力発電設備の場合、確認申請に先立ち、その構造方法の安全性を確認したものとす大臣の認定が必要であり、指定性能評価機関による評価を受けなければならない。ハブ高さが60m以下の場合の手続き方法は、改正前と概ね同じである。建築基準法改正後の建築確認の手続きフローを、図-11に示す。

また、風力発電機メーカー16社（国内5社、海外11社）の風力発電機（定格出力40kW～3600kW、全52機種）の仕様一覧を、第13章に示した。

更に第13章巻末には、暴風による風力発電設備の事故例を示した。事故発生場所、風車規模、事故発生日、事故発生時の気象、事故発生の状況、本指針との対応を述べると共に、事故の発生原因と事故の再発防止策を記述した。

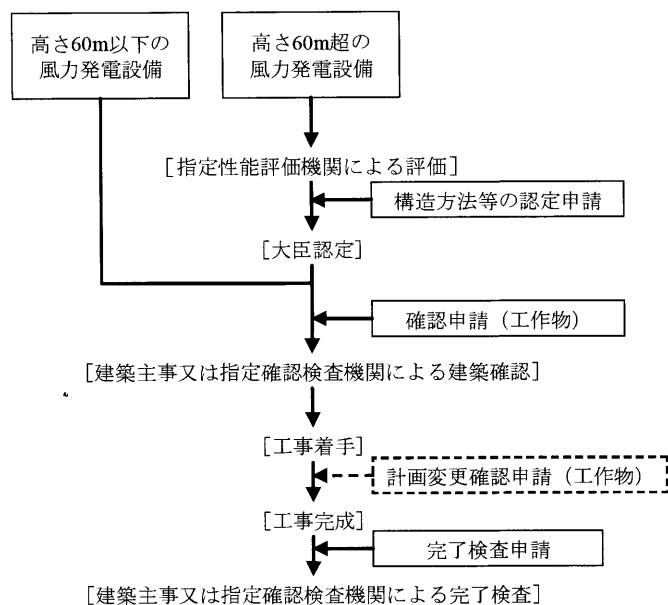


図-11 建築確認の手続きフロー

4. おわりに

風力発電設備支持物構造設計指針に関しては、その策定の目的、基本的な考え方、指針の概要を紹介した。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、本指針の活用により、風力発電設備支持物の安全性と信頼性がより向上し、風力発電の更なる普及に貢献できることを願うものである。

最後に、本指針策定にあたり、委員の方には大変な時間と労力を負担していただいた。また幹事会の方には最終段階において原稿の校正ならび設計例の作成に多くの時間を割いていただいた。本指針を査読していただいた構造工学委員会と独立行政法人建築研究所の方々、オブザーバーおよび外部関係者の方々から多く

の貴重なご意見をいただいた。この場を借りて厚く感謝申し上げたい。また本指針が引用した図面の掲載を許可して頂いた筆者と出版社には深甚なる謝意を表したい。

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) 石原孟, 勝地弘, 嶋田健司, 土谷学: 国内で初めての風車の耐風設計指針策定を目指して, 日本風工学会誌, Vol.31, No.1, pp.31-36, 2006.
- 4) International Electrotechnical Commission: IEC 61400-1 - Ed. 3.0 Wind turbines - Part 1: Design requirements, 2005.
- 5) Germanischer Lloyd: Rules and Guidelines IV, Industrial Services 1, Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003.
- 6) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 1993.
- 7) ISO2394: General principles on reliability for structures, Third edition, 1998.
- 8) 2001年版建築物の構造関係技術基準解説書, 工学図書株式会社, 2001
- 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) 石原孟, ファバンフック, 高原景滋, 銘刈壮宏: 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.
- 11) 高原景滋, 銘刈壮宏, 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.
- 12) 松尾豊史, 金津努, 高原景滋, 銘刈壮宏: 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.

表-6 本指針の構成

<p>第1章 総則</p> <ul style="list-style-type: none"> ・概説 ・適用範囲 ・風車の基礎知識 ・用語の定義 ・記号の説明 ・座標系 <p>第2章 設計の流れ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造設計の基本方針 ・荷重の種類および組合せ ・荷重評価 ・強度計算 <p>第3章 設計風速の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設計風速の評価の基本 ・設計基準風速 ・設計風速の評価 ・乱流統計量 ・平均風速の年間出現頻度 <p>第4章 風力係数の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・風力係数の評価の基本 ・ブレードの平均風力係数 ・ナセルの平均風力係数 ・タワーの平均風力係数 	<p>第5章 風荷重の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・風荷重の評価の基本 ・暴風時の最大風荷重の評価 ・発電時の年平均風荷重の評価 <p>第6章 地震とその他の荷重の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地震とその他の荷重の評価の基本 ・地震時の荷重の評価 ・積雪荷重の評価 ・固定荷重と積載荷重の評価 <p>第7章 タワーの構造計算</p> <ul style="list-style-type: none"> ・タワーの構造計算の基本 ・タワーの構造条件 ・鋼製タワーの構造計算 <p>第8章 ペDESTALの構造計算</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペDESTALの構造計算の基本 ・ペDESTALの設計条件 ・ペDESTALの構造計算 <p>第9章 基礎の構造計算</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基礎の構造計算の基本 ・基礎の設計条件 ・直接基礎の構造計算 ・杭基礎の構造計算 	<p>第10章 指針による設計例</p> <ul style="list-style-type: none"> ・平坦地に建設されるストール制御風車 ・山岳地に建設されるピッチ制御風車 <p>第11章 数値計算による解析例</p> <ul style="list-style-type: none"> ・数値流体解析に基づく設計風速の評価 ・FEM解析に基づく風荷重の評価 ・FEM解析に基づくタワーの構造計算 ・FEM解析に基づくペDESTALの構造計算 <p>第12章 関連法規および基準</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法 ・建築基準法 ・国際規格 ・国内関連指針 <p>第13章 参考資料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法の関連条文 ・建築基準法の関連条文 ・許認可手続き ・風力発電機の仕様 ・暴風による風車の事故例
---	---	---