

風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010 年版の策定

東京大学 石原 孟, 横浜国立大学 勝地 弘
清水建設 嶋田健司, 鹿島建設 土谷 学

1. はじめに

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を超えている。一方、わが国特有の自然環境およ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。これらの問題を解決するために、2004年9月に土木学会構造工学委員会に「風力発電設備耐風設計小委員会」が設置され、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ともに、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として「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2007年版」¹⁾を刊行した。本指針は、風力発電設備支持物構造設計における国内唯一の指針として広く利用され、風力発電設備支持物の安全性・信頼性の向上に大きく貢献した。

その後、国内において風力発電設備の耐風・耐震安全性に対する社会的な認知が深まり、わが国特有の自然環境条件に適した日本型風車の開発も行われてきた。さらに、2007年6月20日には建築基準法が改正され、風力発電設備支持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物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および大臣認定を受けることが必要となった。このような状況を鑑み、2008年1月に土木学会構造工学委員会に「風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会」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約40名の委員とともに、風力発電設備の動的解析および構造設計の高度化ならびに極めて稀に発生する地震時の荷重に対する設計法の確立を目指して精力的に活動してきた。3年にわたる活動の成果として「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010年版」を完成さ

せた。

今回の改定では、2007年版に盛り込まれなかった極めて稀に発生する地震荷重に対する評価手法および構造設計法を提示するとともに、台風シミュレーションによる地形割増係数の評価手法や発電時のピーク風荷重の評価手法に代表される最近の研究成果ならびに建築基準法改正後における性能評価手法が含まれている。本稿では「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010年版」の概要および主な改定点を紹介する(表-1)。

2. 風力発電設備支持物構造設計の基本的な考え方

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、定着部、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設計条件を満たす工業製品である。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る。台風の襲来、地震の発生、複雑地形の多いわが国においては、設置場所の自然環境条件が風力発電機の設計条件より厳しいことが多く、設置場所の自然環境条件を考慮した風力発電機および支持物の構造健全性の評価が不可欠である。本指針は、風力発電設備の支持物に作用する荷重の算定法および支持物の安定性と応力度・耐力の照査方法を示し、要求性能に対するみなし適合仕様を提供するものである。

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5)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、暴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

た場合，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) 風力発電設備の支持物であるタワーは静定のカンチレバー構造である。塑性エネルギーが他の部材に流れないため，耐力指向型の設計を用いることが望ましい。またタワーには開口部があり，座屈に対する影響を考慮する必要がある。
- 4) 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定着部（ペDESTALとも呼ぶ）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）と鉄筋コンクリート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，定着部の構造計算には特に注意を要する。
- 5) 風力発電設備の振動特性は，建築物や煙突等の工作物に比べ構造減衰が小さい点に特徴がある。また，地震や最大積雪量の発生時には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。

2.2 風力発電設備支持物の要求性能

風力発電機は回転機械であり，その耐用年数はブレード等の回転部分の疲労寿命から決まる。国際規格 IEC61400-1²⁾では風力発電機の疲労寿命が 20 年と定められており，本指針も国際規格 IEC61400-1 に従い，風力発電設備支持物の設計耐用期間を 20 年とした。

構造設計の基本目標は，「設計耐用期間内の構造物の使用性と安全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 2.3 に示す設計耐用期間および荷重レベルに対して風力発電設備支持物が損傷または倒壊・崩壊を生じないことを要求性能とした。

2.3 荷重レベル

設計耐用期間内における風力発電設備支持物の使用性と安全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。

本指針では，稀に発生する暴風，地震，積雪に対しては，50 年に 1 度の割合で発生する荷重レベルとした。風力発電設備支持物の耐用期間 20 年の間でこれを超える確率は 33.2%であり，この荷重レベルは設計耐用期間内の構造物の使用性等を適切なコストで確保することを目的としている。稀に発生する暴風，積雪の荷重レベルは，建築基準法および国際規格

IEC61400-1 の荷重レベルと完全に一致する。

一方，極めて稀に発生する地震に対しては，500 年に 1 度の割合で発生する荷重レベルとした。風力発電設備支持物の耐用期間 20 年の間でこれを超える確率は 3.9%であり，この荷重レベルは人命を保護することを目的としている。建築基準法では地震荷重の再現期間を明記していないが，極めて稀に発生する地震荷重の再現期間は概ね 500 年である。また国際規格 IEC61400-1 における地震荷重の再現期間は 475 年である。さらに長期荷重としては，風力発電設備支持物の各部分の固定荷重，積載荷重，積雪荷重および発電時の平均風荷重の最大値を考慮する。表-2 には風力発電設備支持物の荷重レベルと超過確率を示す。

表-2 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 (使用限界)	1	50	33.2
倒壊・崩壊限界 (安全限界)	2	500	3.9

2.4 荷重の組み合わせ

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，積雪荷重，発電時の年平均風荷重，発電時の平均風荷重の最大値，発電時のピーク風荷重の最大値，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必要がある。

本指針では，わが国の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長期荷重時，短期荷重時，極稀荷重時の荷重状態を定めた。

- 1) 長期荷重時には，固定荷重，積載荷重，積雪荷重，発電時の平均風荷重の最大値を考慮する。
- 2) 短期荷重時には，固定荷重，積載荷重に加え，50 年再現期間の積雪荷重，風荷重，地震荷重を考慮する。積雪時の荷重は，最大積雪量となる時に発電してい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する。暴風時の風荷重はヨー制御を行わない場合とヨー制御を行う場合を考慮して風荷重を算定する。発電時の風荷重は発電時のピーク風荷重の 50 年再現期待値を用いる。地震時の荷重は無風時の地震荷重に加え，地震発生時に発電している確率が高いことから，地震時の荷重に発電時の年平均風荷重を加算する。
- 3) 極稀地震時の荷重についても地震時の荷重に発電時の年平均風荷重を加算する。

表-3 には風力発電設備支持物の構造設計の設計に用いる荷重とその組み合わせを示す。多雪区域においては長期荷重に積雪荷重の 50 年再現期待値，短期荷重に積雪荷重の 50 年再現期待値の 0.35 倍の値をさらに加える必要がある。

表-3 荷重の組み合わせ

荷重状態		一般の場合
長期荷重時		$G+P+T$
短期荷重時	積雪	$G+P+R+S$
	暴風	$G+P+\gamma_s\gamma_g W$
	発電	$G+P+T'$
	地震時	$G+P+R+K$
極稀地震時		$G+P+R+K'$

この表における G, P, S, R, T, T', W, K および K' は，それぞれ固定荷重，積載荷重，積雪荷重，発電時の年平均風荷重，発電時の平均風荷重の最大値，発電時のピーク風荷重の最大値，暴風時の風荷重，稀に発生する地震荷重および極めて稀に発生する地震荷重によって生じる力（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。また γ_s は荷重係数，暴風時にヨー制御を行わない場合には 1.1，暴風時にヨー制御を行う場合には 1.35 である。 γ_g は荷重低減係数，本指針の荷重評価式を用いる場合にのみ 0.9 を適用する。

2.5 設計法

構造物の設計法に関する国際規格としては ISO2394³⁾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。設計法は 2007 年版の仕様規定から 2010 年版の性能規定に変更した。

本指針では，国際基準 IEC61400-1 に示されている荷重に対する部分安全係数を用いた。これらの部分安全係数の値は国際基準 ISO2394 に示されている方法と原則に基づき算出されており，耐用期間を通じて風力発電設備の性能に関する信頼性を確保している。国際基準 IEC61400-1 では，設計強度に対する部分安全係数の最低値しか定められていないため，本指針では国内の基準類を参考にして荷重レベルに応じて設定

した。

3. 本指針 2010 年版の概要

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・定着部・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，13 章から構成され，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。以下，本指針 2010 年版について紹介する。

3.1 総則・設計方針（第 1 編 第 1~2 章）

本指針 2010 年版は，3 枚翼を持つ水平軸風車の支持物であるタワー，定着部，基礎を対象として，短期だけではなく，長期および極稀に発生する地震時における荷重評価および構造計算も行うこととした。

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。併せて，今回の改定の経緯，主な追加点を示した。2010 年版は，高さ 60m を超える風力発電設備の支持物の構造設計法を示し，高さ 60m 以下の風力発電設備支持の構造設計法は「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2007 年版」を参照することとした。

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。建築基準法の改正に合わせて，高さが 60m を超える風力発電設備支持構造物の要求性能，荷重レベル，使用材料，設計法も提示した。設計法は 2007 年版の仕様規定から 2010 年版の性能規定に変更した。また IEC61400-1 および建築基準法との整合を考え，設計供用期間 20 年を明記すると共に，損傷限界（短期）に加え，倒壊・崩壊限界（極稀），長期荷重，直交方向の振動，ねじれ振動，疲労に対しても照査することとした。さらに材料については，建築基準法・同施行令および関連告示の規定を準用することを明記した。IEC61400-1 との整合を図るために，暴風時の荷重係数には荷重低減係数を導入した。

3.2 荷重評価（第 2 編 第 3~6 章）

2010 年版では，風荷重，積雪荷重については 2007 年版と同様に等価静的荷重として評価しているが，地震荷重は建築基準法との整合性を考慮し，時刻歴応答

解析より評価することとした。

具体的に、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を基に、第4章に示す等価静的法により算定する。風荷重の評価では風力係数の評価を風荷重評価の章に取り入れるとともに、発電時のピーク風荷重の評価式および風による疲労荷重の評価方法を第4章に追加した。地震荷重の評価は第5章として新たに設け、建築基準法の改正に合わせて、時刻歴応答解析による地震荷重の評価手法について詳しく記述した。さらに港湾内に風力発電設備が設置されている現状を踏まえ、波荷重が主たる荷重とならない場合の波力の評価手法を第6章に示した。

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⁴⁾。

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。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-1には数値流体解析⁵⁾により求めた複雑地形上の風向別平均風速の割増係数の一例を示し、平均風速の割増係数の最大値は1.37である。

一方、日本では年最大風速の50年再現期待値が台風によって支配される。台風シミュレーション⁶⁾により年最大風速を求めることにより、台風時の風向特性と地形による平均風速の割増係数を同時に考慮することができ、2010年版では風向特性を考慮した地形による平均風速の割増係数評価手法を提案した。

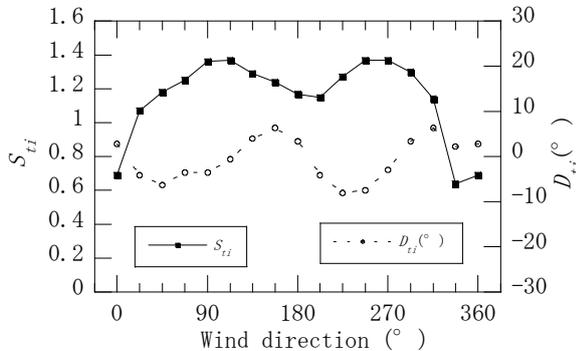


図-1 風向別平均風速の割増係数（室戸岬）⁷⁾

図-2には、台風シミュレーションから求めた地形による平均風速の割増係数の一例を示す⁷⁾。図中の細

い点線が平坦地形上の年最大風速の非超過確率、太い実線が実地形上の年最大風速の非超過確率、プロットは台風による年最大風速の観測値である。実地形上の年最大風速の50年再現期待値と平坦地形上の年最大風速の50年再現期待値との比から求めた割増係数は1.29である。このように、台風時の風向特性を考慮することにより、平均風速の割増係数が低減することが分かる。

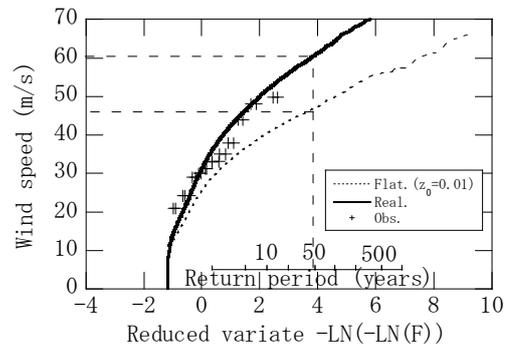


図-2 台風シミュレーションから求めた地形による平均風速の割増係数（室戸岬）⁷⁾

風車の健全性を評価する際には暴風時の風荷重だけではなく、発電時の風荷重も評価する必要がある。2007年版では暴風時の風荷重の評価式のみ提示されたため、2010年版では風車の制御方式を考慮した発電時の風荷重の評価式を提案した。具体的には、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明らかにすると共に、ガスト影響係数法より、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評価式を導出した。また発電時の最大風荷重の50年再現期待値を算定するための統計的外挿係数の評価式も提案した。

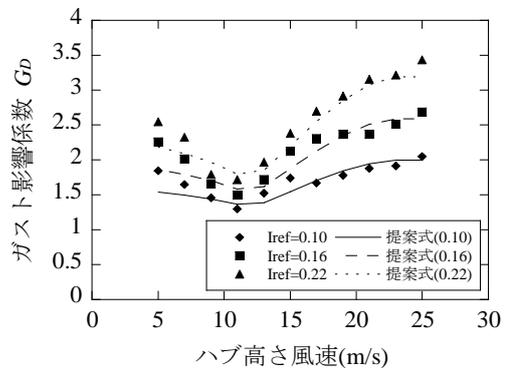


図-3 タワー基部転倒モーメントのガスト影響係数

図-3にはタワー基部転倒モーメントのガスト影響係数を示す⁸⁾。通常の構造物のガスト影響係数は風速によらず、一定の値を示すが、風車の場合にはガスト影響係数は定格風速付近で最も小さく、定格風速前

には風速の増大と共に減少し, 反対に定格風速後には風速の増大とともに増大する。定格風速後では, 風速が小さくなる時, 発電量を一定に保つように, ピッチ角が小さくなるように制御され, 大きな転倒モーメントが励起される。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。この現象はピッチ制御励起型振動と呼ぶことができる⁸⁾。

発電時最大風荷重を求めるために, 50 年再現期待値を推定する必要がある。時刻歴応答解析から求めることが可能であるが, 数百ケースの時刻歴応答解析を行わなければならない, 解析に時間を要する上, 風車の制御を含む時刻歴応答解析用のプログラムも必要である。2010 年版では, 発電時の風車に作用する最大風荷重および統計的外挿係数の評価式を提案し, 発電時の最大風荷重の期待値に最大風荷重の統計的外挿係数と風荷重の部分係数を乗じて, 発電時の最大風荷重の 50 年再現期待値を求めることとした。

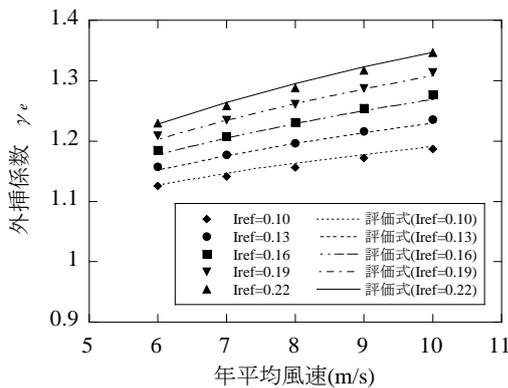


図-4 統計的外挿係数の年平均風速と乱流強度による変化⁸⁾

図-4 には, 統計的外挿係数の年平均風速と乱流強度による変化を示し, 年平均風速および乱流強度の増大に伴い, 増大していることが分かる。発電時の最大風荷重の平均値に比べ, 50 年再現期待値はその 1.35 倍にもなることから, 発電時の最大風荷重を正しく評価するため, 統計的外挿係数を求めることが不可欠である。

3.3 構造計算 (第3編 第7~9章)

2010 年版では, タワー, 定着部および基礎の構造計算は, 極稀地震時の荷重に対応できるように, 限界状態設計法に基づく照査法を提示するとともに, 構造部材の安全性照査については許容応力度法を併用した照査法も示した。その理由は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, 降伏後の変形に対する許容値設定が難しいことから

である。ただし, タワーの継手部や開口部, 定着部においては, 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。

具体的に, 第7章ではタワー筒身に対して座屈が発生しないように許容応力度を照査するとともに, 開口部やボルト等に対して部分的な塑性化を許容し, タワー全体の挙動が概ね弾性であることを目標に各部位の許容耐力を照査することとした。

図-5にはFEMによるタワーの座屈解析例を示す⁹⁾。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, 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。

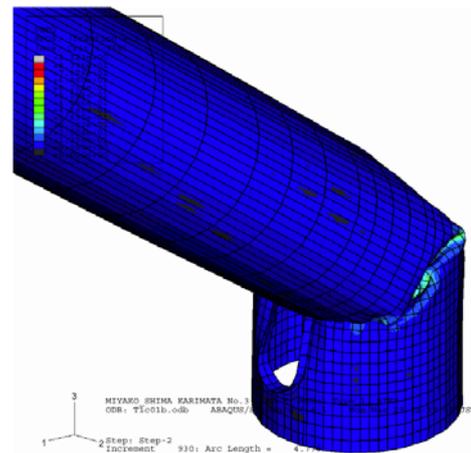


図-5 FEMによるタワーの応力解析例⁹⁾

また最近の風車の大型に対応するために, 開口寸法比4まで適用範囲を拡大することを目的として, 35m, 42mタワーを対象に開口寸法比が2.5から4までの風車タワーモデルを作成し, FEM解析によって座屈耐力を求めた¹⁰⁾。塔頂水平荷重と水平変位の関係から, 開口寸法比の増大に伴い, 座屈耐力の低下が見られた。2010年版では, 開口寸法比が3を超える風車タワーに

対して開口寸法比の増大の影響を考慮し、開口寸法比に応じた低減係数を新たに設定した。また極稀に発生する地震荷重に対して、軸圧縮座屈応力、曲げ座屈応力およびせん断座屈の連成を考慮した座屈耐力算定式を提案した。

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定着部（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、定着部の構造計算には特に注意を要する。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、2010 年版も定着部を基礎と切り離して設計指針を示した。具体的に、第 8 章では実際の定着部を対象とした FEM 解析を実施し、定着部の抜け出しに対する構造計算式の精緻化を行うとともに、せん断力およびねじれモーメントに対する照査法も新たに追加した。

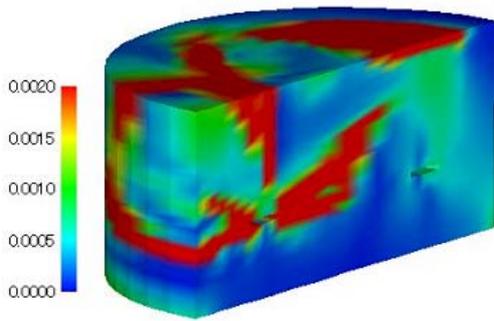


図-6 FEM による定着部の応力解析例¹¹⁾

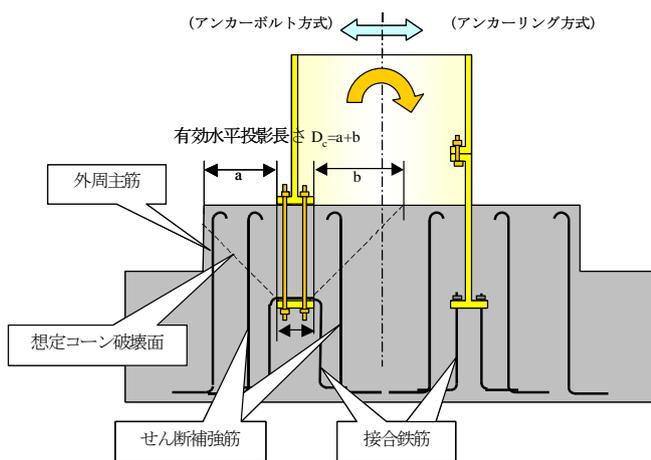


図-7 コンクリートのコーン状破壊面の有効水平投影長さとは各種鉄筋の定義

図-6にはFEMによる定着部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-7）。

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に示す特性を考慮し、評価式を作成した。

- 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、定着部の寸法比や埋込み深さ比の逆数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。

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の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定着部の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（第 9 章）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。極稀地震時の耐力および安定性の照査に対応するために、極稀地震時の基礎の安定性に対する照査法を示すとともに、杭に作用する曲げモーメントは杭の終局曲げモーメント以下、杭のせん断応力度は短期許容応力度以下とし、杭の支持力を確実に確保することとした。

3.4 設計・解析例（第 4 編 第 10～11 章）

2010 年版は、2007 年版と同様に、ユーザーの利便性を図り、山岳地に建設されるピッチ制御風車を対象とする設計例を第 10 章に掲載した。設計例ではまず設計に関する一般事項、設計方針、許容値、荷重の種類と組み合わせを示し、そして、固定荷重、積載荷重、

積雪荷重, 風荷重, 地震荷重の評価により, 設計用荷重を求める。最後に, 風車のタワー, 定着部, 基礎の構造計算(直接基礎と杭基礎)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, 数値流体解析による設計風速の評価, 時刻歴応答解析による風荷重および地震荷重評価, FEM によるタワーおよび定着部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, 土木学会, 日本道路協会等が発行する国内指針類の概要を述べると共に, 関連法令, 告示, 学会基準・指針等を最新のものに更新した。

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。また, 風力発電機メーカー 13 社の風力発電機(定格出力 100kW~3600kW, 全 42 機種)の一覧を示すと共に, 風力発電機仕様の更新および追加を行った。さらに第 13 章巻末には, 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。

4. おわりに

「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010 年版」の概要を紹介した。風力発電設備は巨大であり, 風力発電機から複雑な荷重を発生している。それを支える支持物構造設計の合理化を行うために, 風力発電設備に作用する各種荷重を正確に評価し, 風力発電設備の特性を考慮した構造設計法の高度化は不可欠である。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, わが国と同様な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も寄与する。本指針の活用により, 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。

風力発電の導入促進に伴い, 陸上の平野部において

は風力発電の適地が減少している。風力発電のさらなる導入拡大には, 洋上風力発電が不可欠であり, そのための指針策定は今後も続けていきたい¹²⁾。

最後に, 本指針の改定にあたり, 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。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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
- 2) International Electrotechnical Commission: IEC 61400-1 - Ed. 3.0 Wind turbines - Part 1: Design requirements, 2005.
- 3) ISO2394: General principles on reliability for structures, Third edition, 1998
- 4) 2007 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, 2007
- 5) 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.
- 6) 石原孟, ホタイホーム, チョンチーリョン, 藤野陽三: 台風シミュレーションのための混合確率分布関数と修正直交変換法の提案, 第 18 回風工学シンポジウム論文集, pp.5-10, 2004
- 7) 菊地由佳, 石原孟: 台風時の風向特性と複雑地形の増速特性を考慮した風速割増係数の評価手法の提案, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, pp.31-36, 2010.
- 8) 石原孟, 石井秀和: 風車タワーに作用する発電時最大風荷重の予測, 第 21 回風工学シンポジウム, pp.375-380, 2010.
- 9) 高原景滋, 銘苺壮宏, 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.
- 10) レアン トゥアン, 勝地弘, 山田均, 佐々木栄一: 大開口比を有する風力発電設備鋼製タワーの座屈耐力解析, 第 65 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 2010.
- 11) 松尾豊史, 金津努, 高原景滋, 銘苺壮宏: 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.
- 12) 風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会 HP: <http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/TCWRDW>

表-1 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010 年版における主な改定点

章	項目	2007 年版	2010 年版
1	1.1 概説	・指針策定の背景	・ <u>指針策定の背景および主な改定点</u>
	1.2 適用範囲	・最高高さ ≤ 60m	・ <u>最高高さ > 60m</u>
2	2.1 構造設計の基本方針	・要求性能：損傷限界（短期）の照査 ・荷重レベル：短期（雪・風・地震：50年） ・使用材料：－ ・設計法：仕様規定	・要求性能： <u>設計供用期間 20 年間を明記</u> ，損傷限界（短期）の照査， <u>倒壊・崩壊限界（極稀）の照査</u> ・荷重レベル： <u>長期（固定・積載・発電時）</u> ，短期（雪・暴風・ <u>発電</u> ・地震は 50 年）， <u>極稀（地震は 500 年）</u> ・使用材料： <u>建築基準法・同施行令および関連告示の規定を準用</u> ・設計法： <u>性能規定</u>
	2.2 荷重の種類	・暴風時の荷重係数： $\gamma_g = 1.0$ （ヨ一制御なし）	・暴風時の荷重係数： $\gamma_s \times \gamma_g$ ， $\gamma_g = 1.1$ （ヨ一制御なし）， $\gamma_s = 0.9$ （ <u>指針式を使う場合</u> ）
3	3.1 設計風速評価の基本	・適用範囲：暴風時および風車発電時の荷重のための設計風速，乱流強度および乱流統計量	・適用範囲：暴風時，発電時の最大風荷重および <u>疲労荷重</u> のための設計風速，乱流強度および乱流統計量
	3.2 暴風時風荷重評価のための設計風速	・粗度区分の設定：風向別に定める ・地形による割増係数：風向別の最大値	・粗度区分の設定： <u>全風向で同じ値</u> ・地形による割増係数：風向別の最大値および <u>台風シミュレーションによる強風の風向特性を考慮した値</u>
	3.3 疲労荷重評価のための設計風速	・風速別乱流強度：－	・風速別乱流強度： <u>IEC61400-1 のモデル</u>
	3.4 その他乱流統計量	・パワースペクトル密度：Karman スペクトル ・乱流の長さスケール：建築学会指針のモデル ・乱流の空間相関：建築学会指針のモデル	・パワースペクトル密度： <u>Kaimal スペクトル</u> ・乱流の長さスケール： <u>IEC61400-1 のモデル</u> ・乱流の空間相関： <u>IEC61400-1 のモデル</u>
4	全般	・風力係数の評価	・風力係数の評価を含む <u>風荷重の評価</u>
	4.1 風荷重評価の基本	・暴風時の風荷重，発電時の年平均風荷重（5.1）	・暴風時の風荷重，発電時の平均風荷重， <u>発電時の最大風荷重</u> ， <u>発電時の疲労荷重</u>
	4.3 暴風時の最大風荷重評価	・せん断力とモーメント（5.2）	・せん断力とモーメント， <u>ねじれモーメント</u> ， <u>P-Δ 効果</u>
	4.4 発電時の風荷重評価	・発電時の平均風荷重（5.3）	・発電時の平均風荷重， <u>発電時の最大風荷重</u>
	4.5 発電時の疲労荷重の評価	－	・ <u>疲労荷重評価の基本</u> ， <u>風車の空力弾性モデル</u> ， <u>風車の制御モデル</u> ， <u>風モデル</u>
5	全般	・風荷重の評価	・ <u>地震荷重の評価の章を新設</u>
	5.1 地震荷重の評価の基本	・基本的な考え方（6.2.1）	・ <u>基本的な考え方</u> ， <u>時刻歴応答解析による地震荷重評価の手順</u>
	5.2 工学的基盤面における地震動と地震地域係数	・工学的基盤面における水平地震動，地震地域係数（6.2.2 と 6.2.3）	・工学的基盤面における水平地震動， <u>工学的基盤面における上下地震動</u> ，地震地域係数
	5.3 入力地震動の評価	－	・ <u>スペクトル適合波</u> ， <u>観測地震波</u> ， <u>サイト波</u> ， <u>表層地盤による増幅</u>
	5.4 時刻歴応答解析による地震荷重の評価	・応答スペクトル法による地震荷重の評価（6.2.4 と 6.2.5）	・ <u>風車タワー・基礎・地盤のモデル化</u> ， <u>直接基礎用の地盤ばねの評価</u> ， <u>杭基礎用の地盤ばねと減衰係数の設定</u> ， <u>固有値解析</u> ， <u>応答解析</u> ， <u>地下震度の算定</u> ， <u>杭応答の評価</u>
5.5 付加的な荷重効果	－	・ <u>P-Δ 効果</u> ， <u>ねじれの影響</u> ， <u>上下動の影響</u> ， <u>荷重の組み合わせ</u>	
6	全般	・固定荷重，積載荷重，地震荷重の評価	・固定荷重，積載荷重， <u>波荷重の評価</u>
	6.4 波荷重の評価	・適用範囲および波荷重の評価の考え方：－ ・海象条件の設定：－ ・波の運動の評価：－	・適用範囲および波荷重の評価の考え方： <u>堤体上および防波堤背後に設置する風車</u> ， <u>波荷重が従荷重の場合</u> ・海象条件の設定： <u>設計潮位</u> ， <u>設計波</u> ， <u>沖波</u> ， <u>換算沖波の算定</u> ， <u>対象地点での波</u> ・波の運動の評価： <u>規則波</u> ， <u>不規則波</u> ， <u>ウェ</u>

		<ul style="list-style-type: none"> 波の運動の評価: - 	<ul style="list-style-type: none"> <u>ーラのストレッチ理論</u> 波の運動の評価: <u>杭状構造物の水中部分に作用する波力, 防波堤上のタワーに作用する波圧, 衝撃砕波力</u>
	6.5 静水圧	-	<ul style="list-style-type: none"> <u>静水圧による荷重の考慮</u>
7	7.2 タワーの設計条件	<ul style="list-style-type: none"> 高力ボルト穴径: - 	<ul style="list-style-type: none"> 高力ボルト穴径: <u>ボルト穴径の規定</u>
	7.3 タワーの構造計算	<ul style="list-style-type: none"> ボルトの許容耐力: 短期の許容耐力 継手部の耐力評価: フランジ継手の FEM 解析による回帰式 タワー筒身の許容応力度の算定式: 長期, 短期 開口部の適用範囲: 開口寸法比 ≤ 3 タワー脚部のベースプレート許容曲げ応力度: $F/1.3 \times 1.5$ 	<ul style="list-style-type: none"> ボルトの許容耐力: <u>長期, 短期, 極稀地震時</u>の許容耐力 継手部の耐力評価: <u>Petersen の研究成果をベースにした半理論式</u> タワー筒身の許容応力度の算定式: 長期, 短期, <u>極稀地震時</u> 開口部の適用範囲: <u>開口寸法比 ≤ 4</u> タワー脚部のベースプレート許容曲げ応力度: <u>F</u>
	7.4 疲労損傷度評価	-	<ul style="list-style-type: none"> <u>タワー筒身溶接部とボルトの疲労損傷度評価を追記</u>
8	全般	<ul style="list-style-type: none"> ペDESTALの構造計算 	<ul style="list-style-type: none"> <u>定着部の構造計算に変更</u>
	8.3 定着部の構造計算	<ul style="list-style-type: none"> アンカーボルトの構造計算: 日本建築学会鋼構造接合部設計指針 アンカーボルトまたはアンカーリングの抜け出し: 寸法比, 寸法効果, プレストレスの効果を考慮 せん断力およびねじれモーメント: - 	<ul style="list-style-type: none"> アンカーボルトの構造計算: <u>米国の鋼構造設計基準</u>, てこ反力判定式について <u>最低板厚評価式を提示</u> アンカーボルトまたはアンカーリングの抜け出し: <u>寸法比, 埋込み深さ比, 寸法効果</u>, プレストレスの効果を考慮 せん断力およびねじれモーメント: <u>耐力照査式を提示</u>
9	9.2 基礎の設計条件	<ul style="list-style-type: none"> 地盤物性地の推定方法: - 	<ul style="list-style-type: none"> 地盤物性地の推定方法: <u>直接基礎の場合に N 値を用いた地盤物性値の推定法を提案</u>
	9.3 直接基礎	<ul style="list-style-type: none"> 基礎の転倒に対する照査の基礎形状は長方形, 荷重状態は長期, 短期 剛体判定には判定式, 長辺の 1/5 程度 断面力の算出における有効幅は長期, 短期に対応 	<ul style="list-style-type: none"> 基礎の転倒に対する照査の基礎形状は正方形, <u>円形, 正八角形</u>, 荷重状態は長期, 短期, <u>極稀</u> 基礎底面地盤の支持力照査には <u>層状地盤の鉛直支持力, 傾斜地盤上の鉛直支持力, 岩盤の鉛直支持力の上限值を追加</u> 剛体判定には判定式, 長辺の 1/5 程度, <u>地盤反力分散度による判定を提示</u> 断面力の算出における有効幅は長期, 短期, <u>極稀</u>に対応
	9.4 杭基礎	<ul style="list-style-type: none"> 杭の許容支持力: 長期, 短期は指針式 断面力の算定: 長期, 短期 杭の曲げモーメント: 長期と短期の許容応力度 杭のせん断力: 長期と短期の許容応力度 杭体の計算方法: 長期, 短期 	<ul style="list-style-type: none"> 杭の許容支持力: <u>長期, 短期は告示式, 極稀地震時は指針式に変更, 液状化判定, 杭の細長比による支持力の低減, 開端杭の閉塞効果, 群杭の支持力, 杭の沈下に対する検討を提示</u> 断面力の算定: 長期, 短期, <u>極稀地震時の水平抵抗算定法</u> 杭の曲げモーメント: 長期と短期の許容応力度, <u>極稀地震時の終局曲げモーメント</u> 杭のせん断力: 長期, 短期, <u>極稀地震時の許容応力度</u> 杭体の計算方法: 長期, 短, <u>極稀地震時の弾塑性解析 (杭と地盤)</u>
10	全般	<ul style="list-style-type: none"> 400kW ストール制御風車 (60m 以下, 杭基礎) 500kW ピッチ制御 (60m 超, 直接基礎) 	<ul style="list-style-type: none"> <u>500kW ピッチ制御 (60m 超, 直接基礎と杭基礎) の改定</u>
	10.1 設計概要	<ul style="list-style-type: none"> 一般事項, 設計方針 	<ul style="list-style-type: none"> 一般事項, 設計方針, <u>許容値, 荷重の種類と組み合わせ</u>
	10.2 荷重の算定	<ul style="list-style-type: none"> 発電時の風荷重の評価: 発電時年平均風荷重 地震荷重の評価: 応答スペクトル法 	<ul style="list-style-type: none"> 発電時の風荷重の評価: 発電時の年平均風荷重, <u>発電時平均風荷重の最大值, 発電時のピーク風荷重</u> 地震荷重の評価: <u>時刻歴応答解析</u>

	10.3 構造計算	<ul style="list-style-type: none"> ・タワーの構造計算：短期 ・定着部の構造計算：せん断力、転倒モーメント ・基礎の構造計算：直接基礎 	<ul style="list-style-type: none"> ・タワーの構造計算：<u>長期</u>、短期、<u>極稀地震時</u> ・定着部の構造計算：せん断力、転倒モーメント：<u>ねじれモーメント</u> ・基礎の構造計算：<u>直接基礎</u>、<u>杭基礎</u>
11	11.1 数値流体解析に基づく設計風速の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・粗度区分の設定：風向別 	<ul style="list-style-type: none"> ・粗度区分の設定：<u>全風向で同じ値</u>
	11.3 時刻歴応答解析に基づく地震荷重の評価	—	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>直接基礎の設計に用いる地震荷重</u>、<u>杭基礎の設計に用いる地震荷重</u>、<u>地盤変形</u>、<u>ねじれの影響を提示</u>
12	12.4	<ul style="list-style-type: none"> ・土木学会：コンクリート標準示方書 [構造的照査編] (2002 年版) ・土木学会：鋼・合成構造標準示方書 [総則編・構造計画編・設計編] — — ・日本建築学会：鋼構造設計規準 (2002 年版) — — ・日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法— (1999 年版) ・日本建築学会：容器構造設計指針・同解説 (1996 年版) ・日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説 (1985 年版) ・日本建築学会：鋼製煙突構造計算基準・同解説 — — 	<ul style="list-style-type: none"> ・土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編] (2007 年版) ・土木学会：鋼・合成構造標準示方書 [総則編・構造計画編・設計編・<u>耐震設計編</u>・<u>施工編</u>] ・<u>日本道路協会：杭基礎設計便覧</u> ・<u>コンクリートパイル建設技術協会：既成コンクリート杭—基礎構造設計マニュアル</u> ・日本建築学会：鋼構造設計規準—許容応力度設計法— (2005 年版) ・<u>日本建築学会：高力ボルト接合設計施工ガイドブック</u> ・<u>日本建築学会：建物と地盤の相互作用を考慮した応答解析と耐震設計</u> ・日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2010 年版) ・日本建築学会：容器構造設計指針・同解説 (2010 年版) ・日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説 (2010 年版) ・日本建築学会：煙突構造設計指針 (2007 年版) ・<u>日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針 (2004 年版)</u> ・<u>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 年版)</u>
13	13.1 電気事業法の関連条文	<ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法：[施行規則]別表第 3 下欄 ・電気設備に関する技術基準を定める省令：(風車) [解釈]、(風車の自動停止) [解釈]、(風車を支持する工作物) [解釈] 	<ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法：[施行規則]別表第 3 下欄：<u>必要な説明書の追加</u> ・電気設備に関する技術基準を定める省令：(風車) [解釈]に<u>第 4 条の追加</u>、(風車の自動停止) [解釈]に<u>第 3 項～第 7 項の追加</u>、(風車を支持する工作物) [解釈]に<u>第 2 項の追加</u>
	13.2 建築基準法の関連条文	<ul style="list-style-type: none"> ・建築基準法の関連条文： 	<ul style="list-style-type: none"> ・建築基準法の関連条文：以下の条文の追加 <u>法令第 37 条 (主要構造部に使用する建築材料の品質に関する規定)</u> <u>施行令第 90 条 (鋼材等)</u> <u>施行令第 91 条 (コンクリート)</u> <u>施行令第 92 条 (溶接)</u> <u>平成 12 年建設省告示第 1446 号</u> <u>平成 12 年建設省告示第 2464 号</u> <u>平成 12 年建設省告示第 2466 号</u> <u>平成 13 年国土交通省告示第 1024 号</u> <u>平成 13 年国土交通省告示第 1113 号</u>
	13.4 風力発電機の仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・15 メーカー52 機種 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>13</u> メーカー<u>42</u> 機種