

風力発電設備支持物構造設計指針策定に向けて*

(その1) 背景及び概要

A Design Code for Wind Turbine Support Structures and Foundations
Part I Background and Outline

土谷 学**

石原 孟***

勝地 弘****

嶋田 健司*****

Manabu TSUCHIYA Takeshi ISHIHARA Hiroshi KATSUCHI Kenji SHIMADA

1. 指針策定の背景

近年、環境や代替エネルギーへの関心の高まりから、風力発電設備は、数と規模の両面において、急速に導入され続けている。その一方で、図-1及び表-1に示すような風力発電設備の台風による強風被害が多く報告されている^{1),2),3)}。代表的な強風被害としては、ブレードの折損、ナセルカバーの破損、タワーの座屈、基礎の崩壊である。また、被害風車は、1999年では250kW機であったものが、2004年には2,000kW機の被害が報告され、年々規模が大きくなっている。発電効率や建設単価などの観点から、風力発電設備の大型化は、暫く続くと予測され、その強風被害も必然的に大型化が懸念される。したがって、風力発電設備の構造安全性はますます重要となる。

国内におけるこれまでの風力発電設備の構造安全性の検討方法は、海外で作成された規・基準類をそのまま適用したり、土木、建築、電気、機械分野の既存の設計指針をそのまま適用した場合が多く、我が国特有の強風条件や地震条件、また、風力発電設備固有の特性に対する配慮という点では十分とは言えない状況にある。このことは、多くの風力発電設備が台風被害を受けていることから伺える。

このような状況から、各工学分野で従来から個別に培われていた耐風設計に関する考え方を統一し、日本国内における風力発電設備に適した合理的な設計手法の構築が求められている。

2. 委員会の目的と概要

このような状況の下、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」(委員長:石原孟,東京大学助教授)が設置され、活動を開始した⁴⁾。本委員会では、風力発電設備における構造設計手法の現状を

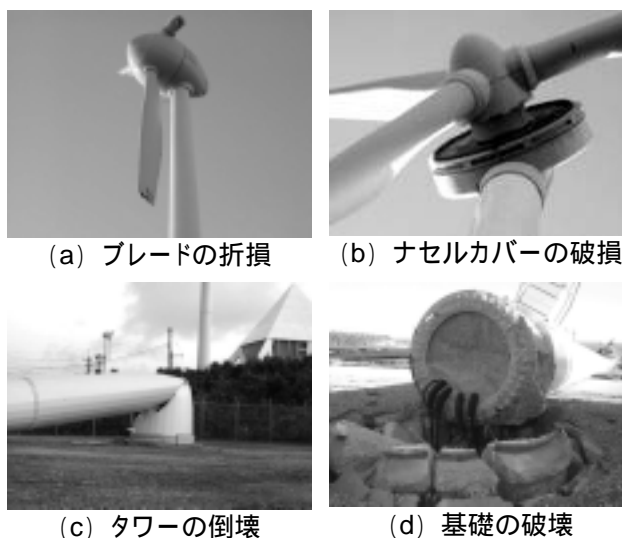


図-1 風力発電設備の台風被害の一例

表-1 風力発電設備の主な台風被害

| 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 | 基礎倒壊 |
| 2003 | 沖縄県 | 400kW, 500kW | タワー倒壊 |
| | | 500kW | 基礎倒壊 |
| | | 600kW × 3 基 | ブレード折損 |
| | | 400kW | ナセルカバー破損 |
| 2004 | 佐賀県 | 2,000kW | 火災 |
| | 宮崎県 | 750kW | ブレード亀裂 ナセルカバー破損 |
| | 高知県 | 600kW | ブレード折損 ナセルカバー破損 基礎亀裂 |
| | 愛媛県 | 1,000kW × 11 基 100kW | ハブカバー破損 ブレード破損 ナセルカバー破損 |
| 2006 | 鹿児島県 | 600kW | ブレード折損 |

* 平成18年11月 第28回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 非会員 鹿島建設(株) 〒107-8388 東京都港区元赤坂 1-2-7

*** 会員 東京大学大学院工学系研究科

**** 非会員 横浜国立大学大学院工学研究院

***** 会員 清水建設(株)

分析し、従来の耐風設計、耐震設計の問題点を明らかにした上で、暴風時や地震時における荷重の算定方法や、タワー・基礎の風車支持物の設計方法に関する指針を示すとともに、具体的な設計例を提示することを目的としている。

なお、当初は強風被害を念頭に、対象を耐風設計に絞り取りまとめる予定であったが、その後の委員会の議論において、耐風設計のみでは構造設計には不十分であること、日本では耐震設計が不可避であることから、耐風・耐震設計を含んだ「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」の策定を目指すこととした。

本委員会は、風力発電設備の導入及び建設を担当する電力会社、風力発電事業者、設計会社、建設会社の実務者、風力発電設備の製造及び販売を行う国内メーカーと代理店の技術者、そして大学、研究機関の研究者の幅広いメンバーで構成されている。委員及びオブザーバーの所属を表-2に示す。平成18年9月現在、委員38名、オブザーバー8名で活動を行っている。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、委員会の詳細については、ホームページ（図-2）をご覧ください。

3. 国内外の基規準と問題点

国内法規において、風力発電設備の構造安全性を規定しているのは、電気事業法と建築基準法である。また、風力発電設備を規定する国際規格として IEC・61400⁵⁾があり、認証機関として GL⁶⁾が有名である。

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 | | |

3.1 電気事業法

電気事業法では「発電用風力設備に関する技術基準を定める省令」及び「その解釈」⁷⁾において、風力発電設備の構造安全性が規定されている。

風車（ローターとナセル）については、省令第4条において「風圧に対して構造上安全であること」と規定されており、その解釈第4条では、「風圧とは風車の受風面の垂直投影面積が最大の状態において、風車が受ける最大風圧」と記されている。これは、停電時におけるヨー制御不能の状態を考慮したものである。

風車を支持する工作物（タワーと基礎）の構造耐力については、省令第7条において、「風車を支持する工作物は、自重、積載荷重、積雪及び風圧並びに地震その他振動及び衝撃に対して構造上安全でなければならない。」と規定されており、解釈第8条では、「高さが15mを超える風車を支持する工作物は、建築基準法第88条で準用される各規定に適合していること。」とされている。

この様に、電気事業法における発電用風力設備に関する技術基準では、風車や風車を支持する工作物についての安全性が規定されているが、風車に対しては、その具体的な数値は示されていない。ただし、500kW以上の風力発電設備を設置する場合には、工事計画届出が必要（法第48条）であり、風車や風車を支持する工作物の強度計算書の提出が求められている。

3.2 建築基準法

電気事業法の発電用風力設備に関する技術基準の解釈第8条においても示されているとおり、風車を支持

図-2 委員会ホームページ



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

する工作物は、建築基準法第 88 条で準用される各規定に適合していることが要求されている。これは、建築基準法第 88 条において、工作物のうち一定の用途または規模を超えるものは、建築物と同様に安全性を確保すべきという観点から、建築物に関する諸規定を準用するとしている。

建築基準法においては、設計風速や荷重の算定方法、材料強度などが具体的に規定されている。ただし、建築物を対象として規定されたものであるため、風力発電設備に適用することが困難な部分を多く含んでいる。

なお、法第 6 条の規定により、建築確認申請が義務付けられており、タワーと基礎の構造計算書を含む設計図書の提出が必要である。

3.3 IEC61400 及び GL Wind Guideline

IEC・61400 規格⁵⁾は、風力発電システムの安全思想、品質保証、及び技術的完全性を取り扱い、設計、据付け、保守及び指定環境下での運転を含む安全性に係る最低限の要求事項を規定しており、暴風時の安全性についても述べられている。1994 年制定時は、風況の多様性をあまり考慮されなかったために、米国、日本、イタリアなどでの風況と不整合が生じていた。その後、改訂が行われ、2005 年の 3rd 版では、360 度風向の強度評価やバックアップ電源の確保が要求されるなど、いくつかの配慮がなされてきているが、3rd 版においても、ハリケーン、サイクロン及び台風による暴風は、対象としていないことが明記されている。

GL Wind Guideline⁶⁾は、ドイツの民間団体であるドイツ船級協会 (Germanischer Lloyd) が、世界に先駆けて、1993 年に制定した風力発電設備の規格であり、風力発電システムの安全思想、品質保証、及び技術的安全性、設計、据付、保守および指定環境下での運転を含む安全性に関わる最低限の要求事項に関して規定している。

日本国内に建設される風力発電設備では、IEC 規格への適合や GL の認証取得の有無に係わらず、国内法を遵守しなければならない。このことは、GL においても明記されている。

4. 本指針の概要

本指針は、表 - 3 に示す 13 章から構成される。

4.1 総則及び基本的考え方 (第 1 章及び第 2 章)

本指針が対象とする風力発電設備は、「鋼製モノポール支持式のプロペラ式風車を用いた風力発電設備」とし、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。強度検討の対象部材は、建築基準法と同様にタワーと基礎であり、ロータ及びナセル

は対象外とした。また、対象とする荷重は、風荷重及び地震荷重である。

荷重算定においては、建築基準法の考え方を基本として、風力発電設備の特性を考慮した新しい算定式を規定している。

強度計算においては、許容応力度設計法を基本とした。ただし、FEM 解析や実験などによる安全確認により、許容応力度設計法によらないことも許容している。

4.2 荷重算定 (第 3 章～第 6 章)

暴風時風荷重のための設計風速は、建築基準法により規定された基本風速をベースに、日本建築学会・建築物荷重指針による地表面粗度の設定方法を採用した。更に、地表面粗度変化や地形による増速の評価法、風荷重評価に必要となる乱れの評価式を提示し、数値流体解析による設計風速と乱れの評価法の提案を行った。

支持物 (タワーと基礎) の設計に必要なブレード、ナセル及びタワーの風力係数を規定した。ブレードは、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風力係数を定めた。ナセルは、矩形及び卵形のモデル形状を設定し、風洞実験値をもとに、風力係数や風圧係数を規定している。

支持物に作用する風荷重を評価するために、風車制御方式 (ストール制御 or ピッチ制御、暴風時のヨー制御の有無) 別に、最大風荷重発生時の諸条件を規定した。タワーに作用する風荷重は、風車が停止していると仮定し、等価静的法に基づき、ローター、ナセル、タワーに作用する平均風荷重に、ガスト影響係数を乗じて求めるものとした。風荷重は、風方向と風直角方向の組合せによるものとし、ガスト影響係数は、タワーの 1 次振動モードと構造減衰を考慮した算定式を示すとともに、建築基準法と同様の一覧表を掲載した。

地震荷重の評価は、建築基準法の工作物に準拠するものである。ただし、地震荷重の算定においては、風力発電設備の運転状態における風荷重を考慮するものとし、その算定方法を規定している。

4.3 強度計算 (第 7 章～第 9 章)

タワー、ペDESTAL (定着部) 及び基礎について、強度計算の方法を規定した。風力発電設備のタワーは、典型的な静定構造物であることから、許容応力度設計法を基本としている。ただし、タワーの開口部やペDESTAL 部 (タワーと基礎の定着部) では、複雑な応力状態となり、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測される。そのような場合には、FEM 解析や実験などによって、詳細な応力状態を把握し、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許容している。

表 - 3 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 <p>第 2 章 設計の流れ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・荷重の種類および組合せ ・構造設計の基本方針 ・荷重評価 ・応力照査 <p>第 3 章 設計風速</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設計基準風速 ・地表面粗度区分と風速および乱れ強度の鉛直分布 ・地形及び地表面粗度変化の効果 ・平均風速及び乱れ強度の高さ補正 ・乱流統計量 <p>第 4 章 風力と風圧力係数</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 ・タワー風荷重の算定 | <p>第 5 章 風荷重の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・タワーの風荷重算定の考え方 ・最大風荷重時風車姿勢の定義 ・タワー構造諸元の算定 <p>第 6 章 地震とその他の荷重の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地震荷重 ・固定荷重 ・積載荷重 <p>第 7 章 タワーの強度計算</p> <ul style="list-style-type: none"> ・タワー形式 ・タワーの設計条件 ・タワー筒身の強度計算 ・継手部の強度計算 ・開口部の強度計算 <p>第 8 章 ペDESTALの強度計算</p> <ul style="list-style-type: none"> ・定着の設計条件 ・定着の強度計算 <p>第 9 章 基礎の強度計算</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基礎形式 ・基礎の設計条件 ・直接基礎の設計 ・杭基礎の設計 | <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 400kW ストール制御風車 ・山岳地に建設される 500kW 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"> ・数値流体解析による設計風速の評価 ・FEM 解析に基づく風荷重の評価 ・FEM 解析に基づくタワー強度の評価 ・FEM 解析に基づくペDESTAL強度の評価 <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"> ・許認可手続き ・暴風による風車の事故例 ・風力発電機の仕様 |
|---|---|---|

タワー部の材料強度は、日本建築学会・鋼構造設計規準に、ペDESTAL及び基礎部の材料強度は、日本建築学会・鉄筋コンクリート構造設計規準に準拠した。

4.4 設計例及び参考資料 (第 10 章～第 13 章)

ユーザーの利便性向上を目指して、本指針を用いた設計例を掲載している。また、本指針策定において裏付けとなった数値計算結果の解説も掲載した。

更に、参考資料として、電気事業法及び建築基準法の関連条文、風力発電設備の設計に関する国内外の規格や指針の解説、また、風力発電設備の強風被害事例や、主な風力発電機の仕様を掲載する予定である。

5. おわりに

(その1)では、風力発電設備支持物構造設計指針に関して、その策定の背景及び概要を紹介した。

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となる。本指針の活用により、風力発電設備の構造安全性と信頼性がより向上し、本指針が、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。

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) 奥田他：2003 年台風 14 号（マエミー）による宮古列島での強風被害，第 25 回 風力エネルギー利用シンポジウム，2003.11。
- 3) 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。
- 4) 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.31-36，2006.1。
- 5) International Electrotechnical Commission: IEC 61400-1 - Ed. 3.0 Wind turbines - Part 1: Design requirements，2005.08.31。
- 6) Germanischer Lloyd: Rules and Guidelines IV, Industrial Services 1, Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003.
- 7) 経済産業省原子力安全・保安院：発電用風力設備の技術基準の解釈について，平成 16・03・23 原院第 6 号 NISA-234c-04-2，平成 16 年 3 月 31 日

風力発電設備支持物構造設計指針策定に向けて*

(その2) 各種荷重の算定

A Design Code for Wind Turbine Support Structures and Foundations Part II Calculation of Design Loads

石原 孟**

嶋田 健司***

土谷 学****

勝地 弘*****

Takeshi ISHIHARA Kenji SHIMADA Manabu TSUCHIYA Hiroshi KATSUCHI

1. はじめに

近年新エネルギーの導入促進により風力発電設備がかなりのスピードで増えつつきている。その一方で、日本特有の自然環境および地形条件により風車の強風による被害も報告されている¹⁾。

現在国内に設置されている風力発電設備の殆どは国際規格 IEC61400-1²⁾ または国際認証機関 GL (Germanischer Lloyd) のガイドライン³⁾に従い、設計されている。しかし、これらの規準は欧州の自然環境に合わせて設定されており、台風、地震の多いわが国の自然環境を十分に反映していない可能性がある。一方、風力発電設備を建設するには建設地点での自然条件(設計風速、地震度、地盤条件)に合わせて風車の選定および風車の支持物であるタワーと基礎の構造設計を行う必要があり、その際に使用される各種荷重は建築基準法⁴⁾に基づき算出しているケースが多い。ただし、建築基準法にある風・地震荷重の評価式は建築物または煙突等の工作物を対象に設定されたものであり、アスペクト比、構造減衰、振動モード等の構造特性は風力発電設備と大きく異なる。

以上のことを踏まえ、本論文では、風力発電設備支持物の構造設計に必要な各種荷重の考え方を紹介し、風力発電設備の構造特性を考慮した各種荷重の算定式を提案すると共に、数値解析によりその妥当性を検証する。

2. 風力発電設備支持物に作用する各種荷重

風力発電設備支持物の構造設計を行う際には、風力発電設備(風車本体およびその支持物)に作用する固定荷重、積載荷重、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または変位

が許容値を超えないことを確かめる必要がある。

国際規格 IEC61400-1²⁾により風車の終局強度(Ultimate strength)を照査する際には、発電時、発電および故障発生、始動、正常停止、緊急停止、待機中(静止とアイドルリング)、待機中および故障条件、運送、組立、保守および修理中の風荷重の評価が対象となり、風荷重以外の荷重については必要に応じて考慮することとなっている。一方、風力発電設備支持物の構造設計を行う際には建築基準法に従い、暴風時の風荷重のみならず、地震時の荷重も評価する必要がある。

本指針ではわが国の自然条件および風車の動的特性を考慮し、風力発電設備支持物構造設計を行う際に考慮すべく荷重ケースおよびその組み合わせを提案し、建築基準法とIEC規格と合わせて表1と表2に示した。

表1 本指針で評価する荷重ケース

| 荷重ケース | 本指針 | 建築基準法 | IEC規格 |
|-------|-----|-------|--------------------|
| 1 | 暴風時 | 暴風時 | DLC 6.1 DLC 6.2 |
| 2 | 地震時 | 地震時 | 地震時 |

表2 荷重の組み合わせ

| 荷重ケース | 本指針 | 建築基準法 |
|-------|-----------|---------|
| 1 | $G+P+W$ | $G+P+W$ |
| 2 | $G+P+K+R$ | $G+P+K$ |

ここで、 G は固定荷重、 P は積載荷重、 W は暴風時の風荷重、 K は地震荷重、 R は発電時の風荷重を表す。またDLC(Design Load Case)6.1及び6.2は暴風時の荷重ケースを表し、電源あり・なしに対応している。

本指針では暴風時の風荷重についてIEC61400-1と

* 平成18年11月22日 第28回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 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

*** 会員 清水建設(株)

**** 非会員 鹿島建設(株)

***** 非会員 横浜国立大学大学院工学研究院

同様に二つの荷重ケースを想定した。まず 50 年再現期間の設計風速に対して、暴風時に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想定し、最も風荷重が大きくなるヨー角に対して風荷重を算定する。ピッチ制御の風車に関しては最も風荷重の大きいヨー角はフェザリング状態で横風を受ける場合であり、またストール制御の風車に関しては最も風荷重の大きくなるヨー角は風車ロータが風向きに正対する場合となる。この場合の安全係数は 1.0 とした。一方、暴風時にヨー制御を行う場合には、表 3 に示される条件を満たす必要がある。暴風時にヨー制御を行う場合の風荷重の算定に関する基本的な考え方は IEC61400-1 と同様であり、安全係数も 1.35 とした。

表 3 暴風時にヨー制御を行う時の付加条件

| 項目 | 条件 |
|----------|--------------------------------------|
| 風向・風速計 | 暴風時に正常に動作し、かつ設計風速に対して十分な耐力を有すること。 |
| ヨー駆動装置 | 暴風時に正常に動作し、かつ設計風速に対して十分な強度と容量を有すること。 |
| バックアップ電源 | 暴風時に正常に動作し、かつ十分な制御容量と持続時間を有すること。（*） |
| 制御ロジック | 暴風時の制御ロジックは風荷重の算定時に想定したヨーの状態に移行すること。 |

*：SmartYaw 及びダウンウィンドタイプの風車はこの限りではない。

地震荷重に関しては風荷重と同様に 50 年再現期間の最大加速度を採用し、安全係数を 1.0 とした。風車発電時に地震が発生する確率が高いことから、地震時の荷重には風車発電時の風荷重の年平均値を考慮することとした。また地震時の最大荷重は、地震力の方向と風荷重の方向と一致する時に発生することから、地震時の荷重は地震荷重に風車発電時の風荷重の年平均値を加算して求めることとした。

3. 暴風時の風荷重の評価

暴風時の風荷重の算定は、設計風速の設定、風車と支持物の各部分の空気力係数の評価、風車全体の動的効果を考慮した最大荷重の予測等のプロセスを経て実施される。以下、各項目の検討結果について報告する。

3.1 設計風速の評価

風力発電設備支持物の構造設計を行う際にはまず建設地点における設計風速を決める必要がある。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 年再現期待値は、建築基準法により図 1

に示すように基準風速として規定されている。基準風速の値は 30m/s ~ 46m/s の間にあり、具体的な値は市町村別に定められている。

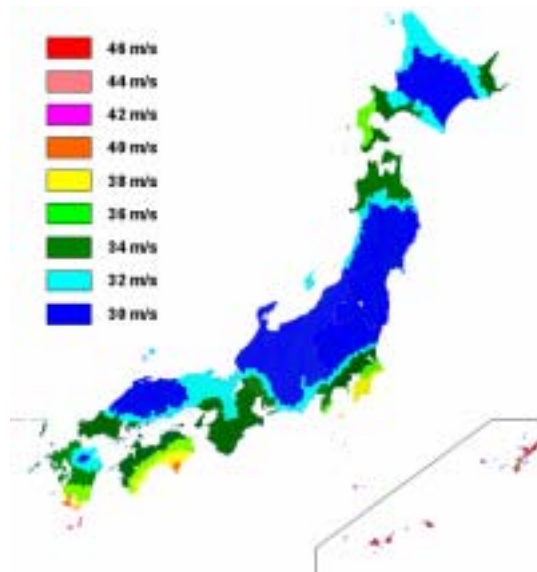


図 1 基準風速分布⁴⁾

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。建築基準法には「局地的な地形や地物の影響により平均風速が割り増しされるおそれのある場合においては、その影響を考慮しなければならない」と記されているが、具体的な評価方法が示されていない。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 E_{gV} 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。

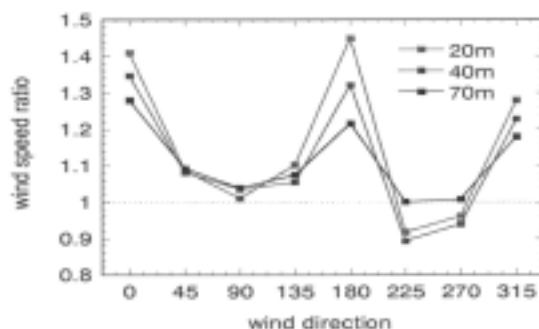


図 2 複雑地形上の風速の割増係数の解析例⁵⁾

図 2 には数値解析⁵⁾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 20m の高さでは風速の割増係数が 1.4 を上回る大幅な増速がみられ、70m の高さでも風速の割増係数が 1.2 を超えている。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り、注意を有する。

3.2 風荷重の評価

風力発電設備支持物に作用する風荷重を正確に評価するために、建設地点の風の特長、風力発電設備全体の動的特性、風車の制御方式を考慮する必要がある。

現状では風力発電設備支持物に作用する風荷重の評価に幾つかの問題がある。まず風車の耐風設計に採用されている国際規準^{2),3)}は欧州のような乱れの小さい平坦地形に合わせて作られており、乱れの大きい山岳地帯に適用できない問題がある。また風力発電設備支持物の耐風設計に採用されている建築基準法は、構造物の振動効果、規模効果、乱れの大きさを考慮してガスト影響係数を評価しているものの、評価式を作成する際に対象とした建築物のアスペクト比(1~4)や構造減衰(2%)は風力発電設備のアスペクト比(10~20)や構造減衰(0.5%~0.8%)と大きく異なる問題がある。更に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、ナセル及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という問題がある。

本指針では、ブレード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風力係数を定めると共に、ナセルは矩形及び卵形のモデル形状を設定し、風洞実験により風力係数や風圧係数を規定した⁶⁾。また風荷重の評価については、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、風車の固有振動数と構造減衰を考慮した風荷重の算定式を提案した。更に本指針で示されている評価式を多質点風応答解析プログラム⁷⁾より検証した、以下、本指針で採用した風荷重評価式の考え方及びその算定結果について紹介する。

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、風荷重の組合せにより最大風荷重を求めた。またガスト影響係数は、風車の規模と振動特性の他、ピークファクターに及ぼす変動風荷重の非線形成分の影響も考慮した。本指針

では、風車の支持物に作用する最大風荷重は等価静的法により次式から求める。

$$M_D = \overline{M_D} \times G_D \quad (1)$$

ここで、 $\overline{M_D}$ は平均風荷重、 G_D はガスト影響係数である。図3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 ~ における風荷重と風応答解析プログラム⁷⁾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。また正規確率過程を仮定した従来の評価式により求めた風荷重は過小に評価され、非正規確率過程を仮定した本提案式の値は風応答解析の結果に近い。特に乱れの大きい において風荷重の予測誤差は従来の評価式の1/3程度までに低減した。

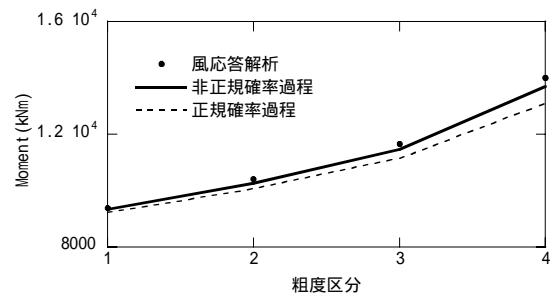


図3 タワーの転倒モーメントの乱れによる変化⁸⁾

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⁸⁾も提案した。建築基準法を模して、ガスト影響係数の簡便式を作成し、ストール制御及びピッチ制御風車を対象にガスト影響係数を求め、粗度区分毎におけるガスト影響係数の簡便式を表4に示した。表中の $\alpha = (\xi - 0.5)/3$ は構造減衰 ξ (%)の関数である。図4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が、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。

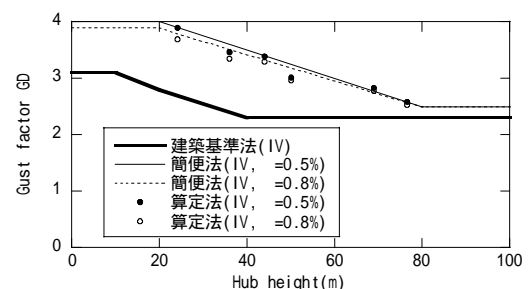


図4 ガスト影響係数のハブ高さによる変化(ピッチ制御風車, 粗度区分 IV)⁸⁾

表 4 粗度区分及びハブ高さに対応するガスト影響係数

| 地表面粗度区分 | ハブ高さ H_h | | (1) | (2) | (3) |
|---------|------------|---------|-----------|------------------------|-----------|
| | | | 20m 以下の場合 | 20m を超え 80m 未満の場合 | 80m 以上の場合 |
| | 2.5- | (2.6-) | 線的に補間した数値 | と(3)とに掲げる数値を直線的に補間した数値 | 1.8 (2.0) |
| | 2.8- | (2.9-) | | | 2.0 (2.1) |
| | 3.2- | (3.4-) | | | 2.1 (2.2) |
| | 3.8- | (4.0-) | | | 2.3 (2.5) |

()内の数値はピッチ制御風車のガスト影響係数

4. 地震時の荷重の評価

地震時の荷重の算定は、設計地震動の設定、支持物に作用する地震荷重の算定、地震時に考慮すべく風車の発電による風荷重の予測などのプロセスを経て実施される。以下、各項目の検討結果について報告する。

設計地震度は、水平地震度の標準値に地震地域係数を乗じて求める。水平地震度の標準値は 50 年再現期間の最大加速度に相当し、建築基準法では煙突などの工作物における水平地震度の標準値 C_0 を 0.3 としている。また地震度の地域による変化は地域係数 C_Z で表し、都道府県別に定めている。

地震時に風車に作用するせん断力と曲げモーメントは次式により求めることができる。

$$Q_{si} = C_0 C_Z C_b A_{qi} W \quad (2)$$

$$M_{si} = C_0 C_Z C_b A_{mi} W h_g \quad (3)$$

ここで、 C_b はベースシア係数、 A_{si} はせん断力鉛直方向分布係数、 A_{mi} は曲げモーメント鉛直方向分布係数、 h_g は重心高さ、 W は風車全体の重量を表す。せん断力の鉛直方向分布係数は、タワーの高さ方向における最大断面せん断力の平均値をタワー基部に作用するせん断力最大断面せん断力の平均値で無次元化し求めたものである。本指針では、ベースシア係数および地震荷重の鉛直方向分布係数は、8 基の風車モデルを対象に過去に記録された代表的な 6 つの地震波を用いて時刻歴応答解析により定めた。

図 5 には本指針により定めた鉛直方向分布係数と時刻歴応答解析結果との比較を示す。この図から、せん断力の鉛直方向分布係数はタワー頂部に向かって減少するが、風車がトップヘビーであることを反映し、煙突に比べその減少が緩やかであり、また風車の固有周期が短いほど、その減少が緩やかであることが分かる。

最終的に地震時の荷重は、風車静止時に受ける地震荷重に風車発電時の年平均風荷重を加算して求める。この荷重の組み合わせは Turkustra 経験則に対応するものであり、IEC61400-1 の考え方とも一致している。

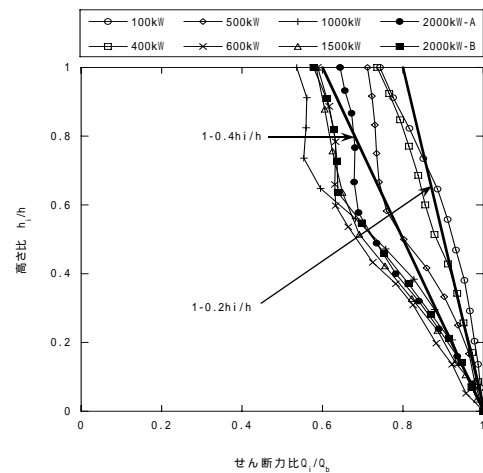


図 5 せん断力の鉛直方向分布係数

5. おわりに

本論文では、風力発電設備支持物に作用する各種荷重の算定方法を紹介し、数値解析によりその妥当性を検証した。本指針では、風車およびその支持物を一つのシステムとして捉え、風力発電設備の構造特性を考慮した風荷重・地震荷重の算定方法を示した。本指針の活用により、風力発電設備の構造安全性と信頼性がより向上することを願うものである。

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) IEC 61400-1: WIND TURBINES, Part 1, Design requirements, 3rd Edition, 2005.
- 3) GL2003: Guideline for the Certification of Wind Turbines, Germanischer Lloyd, 2003.
- 4) 建築基準法：2000。
- 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) 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，2006。
- 7) 石原孟，ファバンフック，他：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，2006。
- 8) ファバンフック，石原孟，他：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，2006。

風力発電設備支持物構造設計指針策定に向けて*

(その3) 支持物の構造設計

A Design Code for Wind Turbine Support Structures and Foundations
Part III Structural Design of Support Structures and Foundations

勝地 弘** 嶋田 健司*** 土谷 学**** 石原 孟*****

Hiroshi KATSUCHI, Kenji SHIMADA, Manabu TSUCHIYA and Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

近年、環境や代替エネルギーへの関心の高まりから、風力発電設備が数、規模の両面において増え続けている。その一方で、風力発電設備の損傷被害、特に強風による被害が多く報告されている^{1),2)}。代表的な台風被害としては、ブレード、ナセルカバーの破損、タワーの座屈、基礎の崩壊である(図-1参照)。また、被害風車の規模も1999年の250kW機から2004年の2,000kW機へと年々大きくなっている。風力発電設備の大型化は風車の発電効率とコストなどを考えた場合、今後も続くと思われ、その強風被害も必然的に大型化が予想される。したがって、風力発電設備の耐風安全性の確保はますます重要となる。

風力発電設備の耐風安全性の検討法は、海外で作成された規・基準類をそのまま適用したり、土木、建築、電気、機械分野の設計指針をそのまま適用した場合が多く、風力発電設備固有の特性の配慮や我が国特有の強風環境という点では十分とは言えない。このことは、多くの風力発電設備が台風被害を受けていることが物語っている。

このような状況から、土木学会では「風力発電設備耐風設計小委員会」(委員長:石原孟,東京大学助教授)を平成16年9月に設置し、活動を行っている³⁾。当初は強風被害を念頭に置いたため、検討対象を耐風設計に絞り、耐風設計指針として取りまとめる予定であったが、その後の委員会の議論で、耐風設計のみでは構造設計には不十分であること、日本では耐震設計が不可避であることから、耐風・耐震設計を含んだ風力発電設備支持物構造設計指針・同解説の策定を目指すこととしている。

本論文は、これまでに検討した風力発電設備支持物

の耐風設計部分の指針案とその考え方を紹介するものである。



(1) タワーの倒壊



(2) 基礎の破壊

図-1 風力発電設備の台風被害

2. 風力発電設備支持物の構造設計

風力発電設備は、大別して、ブレード(風車)、発電機、発電機を収納するナセル、タワー、基礎、タワーを基礎へ定着するペDESTALから構成される。このうち、本指針で対象とする風力発電設備支持物とは、タワー、ペDESTAL、基礎である。これは、風力発電設備を設置する場合には、風車、発電機部分は製品としてメーカーから購入し、設置者がタワーとペDESTALを含む基礎を構築するのが通常であるからである。ただし、支持物への風荷重を算定するためには、ブレード、ナセルの風荷重を算定する必要があることから、本指針ではそれらの風荷重を算定するための手法も提案している(図-2参照)。なお、先に述べたように本指針では、風荷重に対する構造設計法に加えて、耐震設計法に関しても含める予定であり、図-2のタワー・基礎の設計フロー部分には耐震設計(地震荷重の設定)フローが並列することとなる。

構造設計における応力照査は、許容応力度、限界状態、保有水平耐力などに基づく方法が考案されているが、風力発電設備支持物、特にタワーのような典型的

* 平成18年11月**日第28回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 非会員 横浜国立大学大学院工学研究院 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

*** 会 員 清水建設(株)

*** 非会員 鹿島建設(株)

*** 会 員 東京大学大学院工学系研究科

な静定構造物の場合には、その耐力が座屈で決定され、降伏後の変形に対する許容値設定が困難であるため、本指針では許容応力度設計法を用いることを基本とした。ただし、タワーの開口部やペDESTAL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、FEM 解析や実験などによって、詳細な応力状態を確認し、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ている。

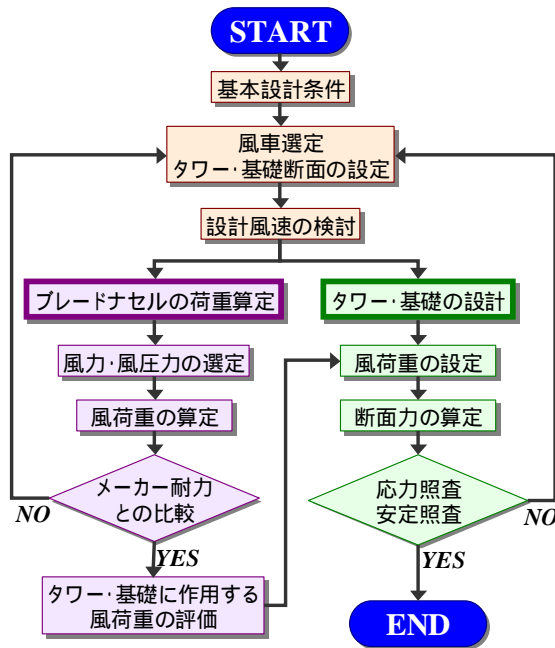


図 - 2 支持物の構造設計フロー

3. タワーの構造設計

風力発電設備支持物の強風被害の1つとして、タワーの座屈倒壊があげられる。タワーは、ブレードやナセルの風荷重を頂部に受ける片持ちばり構造であり、基部に大きな曲げモーメントが発生する。また、発電機やナセルの点検のためのマンホール（開口部）が基部近傍に設けられることが通常であり、座屈強度の低下が避けられない構造となっている。このようなことから、本指針では座屈に対する安全性を確保しつつ、全体として合理的な構造設計となるよう FEM 解析結果とも比較することで照査式を提案している。

1) 使用材料, 基準強度

使用材料は、鋼構造設計規準（日本建築学会）に示される JIS 規格材とし、鋼材の設計定数、基準強度 F 値についても鋼構造設計規準に準拠した。また、海外規格鋼材は、品質が国内規格と同等であることを確認の上、使用できるものとした。また、ボルトは、摩擦接合用高力ボルト（M48 まで）に加えて、強度区分 10.9

ボルト、スタッドボルトを追加規定した。さらに、PC 鋼棒、建築構造用アンカーボルトの使用を認めている。

2) タワー筒身の強度計算

タワー筒身の座屈に対する応力照査（式(1)）は、容器構造設計指針・同解説（日本建築学会）に準拠した。これは、曲げと圧縮を同時に受ける場合の弾性座屈を対象としており、弾性座屈応力度の下限値は、半径板厚比が十分に大きい薄肉円筒が軸圧縮を受ける際の古典理論局部座屈応力度に初期不整を考慮した NASA の実験式に基づいている。

$$\frac{c}{c f_{cr}} + \frac{b}{b f_{cr}} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{1}{s f_{cr}} \leq 1 \quad (1)$$

ここで、 c 、 b 、 s は、それぞれ平均圧縮応力度、圧縮側曲げ応力度、せん断応力度であり、また、 $c f_{cr}$ 、 $b f_{cr}$ 、 $s f_{cr}$ は、それぞれ許容圧縮応力度、許容曲げ応力度、許容せん断応力度である。

3) 継手部の強度計算

本指針での継手は、内側リブ無しフランジ継手および内外フランジ継手を標準とした。ボルト応力の算定には、タワー筒身の引張破断前にボルト破断を避けるためにテコ反力を考慮している。また、内側リブ無しフランジの応力は、機械工学便覧を参照して、フランジ外周を固定とした円輪板、円輪板内周にボルト引張力を輪形線荷重として算出している。なお、フランジ継手の応力伝達は不明な点も多いことから、FEM 解析や実験によって検証を行ってもよいこととしている。

4) 開口部の強度計算

タワー筒身下部の開口部に対する強度計算（座屈照査）は、タワー筒身の強度計算式を準用し、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提案した（式(2)）。ここで、許容応力度低減係数 C は $(GL)^4$ にならない JIS 規格材を対象に筒身半径、板厚、開口角度に応じた算定式を作成した。

$$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{C \cdot f_{cr}} \leq 1 \quad (2)$$

ここで、 $C = A - B \cdot (r'/t)$ 、 r' ：当該断面筒身の板厚中心半径、 t ：当該断面筒身の板厚であり、 A, B については、断面円周方向の開口角度に応じて、GL の規定にならった算出式を提示した。

開口部近傍は、一般に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。開口部が局部的に許容応力（短期では F 値）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容易に想像される。

図 - 3 は、台風によって倒壊した風車タワーを対象に FEM 解析を行い、タワー頂部に開口部方向に水平荷重を載荷し、荷重と頂部水平変位との関係を求めたものである^{5),6)}。これより、開口部が座屈（図中）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判る。

図 - 3 の風車タワーを対象に本指針式（式(2)）によって、限界水平荷重を求めると約 240kN となり、図 - 3 での最大荷重（約 360kN）の 2/3 である。また、同じ風車タワーを対象とした別の FEM 解析によると、頂部水平荷重 240kN を載荷したときの開口部近傍の応力分布は図 - 4 のようになり、開口上部の両側で応力集中による局部的な塑性域が認められる。このことは、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で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判る。また、さらに合理的な設計を行うために、本指針によらず、FEM 解析によって照査を行うことも可能とした。

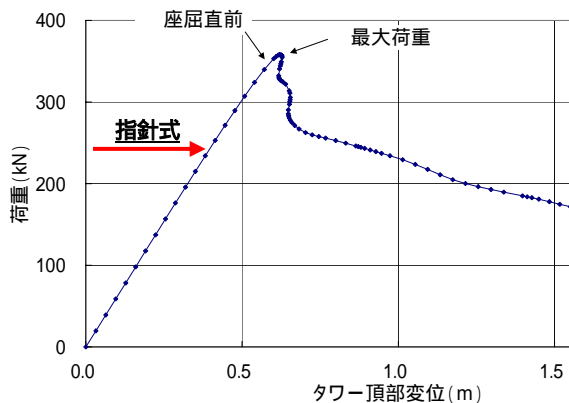


図 - 3 開口部方向への頂部水平荷重と変位の関係

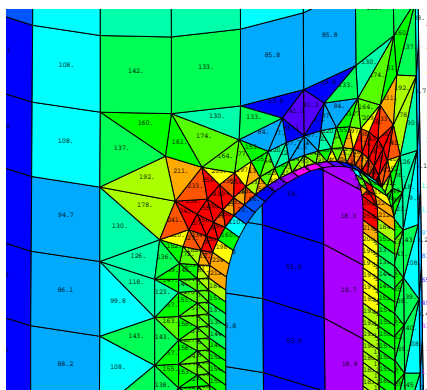


図 - 4 FEM 解析による開口部応力分布(指針式での耐力荷重(図 - 3)に対応)

4. ペDESTAL・基礎の構造設計

1) ペDESTALの構造設計

本指針でのペDESTALとは、図 - 5 に示すようにタワーを定着するための基礎台座部のことをいう。風力発電設備支持物の強風被害がタワー開口部での座屈倒壊とタワー定着部の破壊に集中するため、本指針では定着部のペDESTALを基礎と切り離して設計指針を示した。特に、コンクリートのコーン破壊に伴う定着部の抜け出しが問題視されているため、この点に関して重点的に検討を行った。

本指針では、アンカー材により定着する形式か、タワー脚部を直接基礎に埋め込んで定着する形式を対象としている(図 - 5)。定着部の強度計算においては、作用外力に対して許容応力度設計を行うことを基本としているが、アンカー材の降伏を先行させることは定着部の性能を十分に発揮させることになるため、ベースプレート、アンカープレート、定着部鉄筋コンクリートは、アンカー材の降伏荷重に対して許容応力度以下とすることが望ましいとしている。また、ペDESTAL部鉄筋コンクリートでは、これまでコーン破壊の被害が度々認められているため、コーン破壊の可能性がある領域の拘束という観点から、最小フープ筋の規定を FEM 解析の結果に基づいて、D13@100 またはそれ以上とした。

抜け出しに対するアンカーボルトの許容引張力 P_{al} (N/mm) (アンカーボルトの並ぶ円周単位長あたり) は、次の式(3)および(4)のうち、小さい方としている。

$$P_{al} = 0.187 \cdot \sqrt{F_c} \cdot D_c + \ell_{ab} \cdot K \cdot f_b \cdot \phi' \quad (3)$$

$$P_{al} = 0.187 \cdot \sqrt{F_c} \cdot D_c + 0.7 \cdot (A_t + A'_t) \cdot f_y \quad (4)$$

ここで、 F_c : コンクリートの設計基準強度、 $D_c = a + b$ 、 K : ペDESTAL外周縦方向鉄筋配置による修正係数、 f_b : 異形鉄筋のコンクリートに対する許容付着応力度で $F_c / 40 + 0.9$ 、 ϕ' : アンカーボルトの並ぶ円周単位長さ当りのペDESTAL外周縦方向鉄筋の周長、 A_t, A'_t : コーン状破壊面を横切る鉛直鉄筋の主筋、主筋以外の断面積、 f_y : 鉄筋の降伏強度である。

式(3)、(4)の第1項はともにコーン破壊強度を、第2項はそれぞれ鉄筋付着強度、鉄筋強度を表し、両式の強度の小さい方を取ることとしている。第1項は、各種合成構造設計指針・同解説(日本建築学会)の鉄筋がない場合のコーン破壊強度式を用いている。また、第2項は、コーン破壊領域に鉄筋があることによる補強効果を表し、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(日本建築学会)によっている。このうち、式(3)は横補

強筋に相当するペDESTAL外周フープ筋を無視した場合の鉄筋付着強度式であり、式(4)はせん断型定着破壊耐力で、コーン破壊面を横切る鉛直鉄筋の強度が抜け出し防止に寄与する効果を表している。式(3)、(4)での第1項と第2項の単純和の扱いに過大評価の感もあるが、鉄筋付着と鉄筋強度の小さい方を取ること、コーン破壊強度部分は、鉄筋コンクリート構造計算規準の60~75%程度と conservative な評価となっている。

なお、抜け出しに対する評価式の妥当性について、タワーの座屈検討と同様に、FEM 解析結果と比較検討を行っているところであり、今後、場合によっては若干の修正があり得る。図-6は、実際に倒壊した風車のペDESTALに対するFEM 解析結果^{6),7)}の一例であり、ひび割れ状況など実際をよく再現できている。式(3)、(4)のコンクリート強度分、鉄筋負担分のそれぞれについて、FEM 解析結果と比較検討を行い、より合理的な抜け出しに対する指針式を作成する予定である。

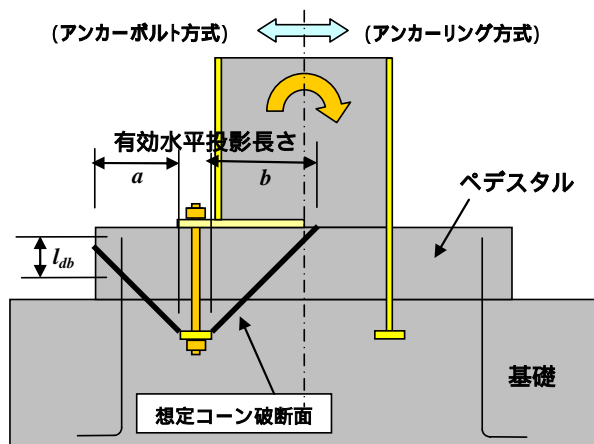


図-5 タワー定着構造

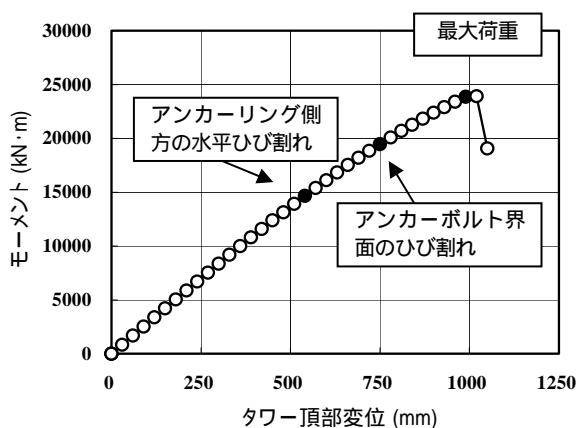


図-6 FEM によるペDESTALの強度解析(タワー基部モーメントと頂部変位の関係)

2) 基礎の構造設計

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、構造計算に関して指針と考え方を示している。指針の構造計算は許容応力度設計を基本としているが、限界状態設計法の適用を否定するものではない。

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、適切と考えられる設計手法を示している。

5. まとめ

本論文では、風力発電設備支持物：タワー、ペDESTAL、基礎の構造設計指針案での考え方について述べた。論文中では、耐風設計を対象とした検討結果を示したが、現在検討中の耐震設計に関する部分についても構造設計自体は変わらないものである。指針では、ほかに、策定された指針を用いた設計例を提示して使用者の便を図るとともに、数値計算による解析例によって、本指針の策定において裏付けとなった根拠データを解説している。

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，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めざして，日本風工学会誌，Vol.31，No.1，pp.31-36，2006。
- 4) Germanischer Lloyd, Rules and Guidelines IV, Industrial Services 1, Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003.
- 5) 松浦真一，中村秀治，小木曾誠太郎，大坪英臣：高速増殖炉容器の耐座屈設計法に関する検討(第5報，座屈解析法の適用性評価)，日本機械学会論文集(A編)，61巻585号，pp.1006-1014，1995.5
- 6) 松浦真一，松尾豊史，銘苅壮宏：被害分析に基づく風車タワーと基礎の安全性に関する検討，日本風工学会誌，Vol.31，No.1，pp.37-42，2006。
- 7) 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。