

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

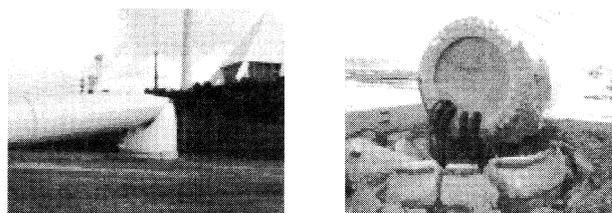
近年、環境や代替エネルギーへの関心の高まりから、風力発電設備が数、規模の両面において増え続けている。その一方で、風力発電設備の損傷被害、特に強風による被害が多く報告されている^{1), 2)}。代表的な台風被害としては、ブレード、ナセルカバーの破損、タワーの座屈、基礎の崩壊である(図-1参照)。また、被害風車の規模も1999年の250kW機から2004年の2,000kW機へと年々大きくなっている。風力発電設備の大型化は風車の発電効率とコストなどを考えた場合、今後も続くと予想され、その強風被害も必然的に大型化が予想される。したがって、風力発電設備の耐風安全性の確保はますます重要となる。

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、耐震設計法につい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、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。

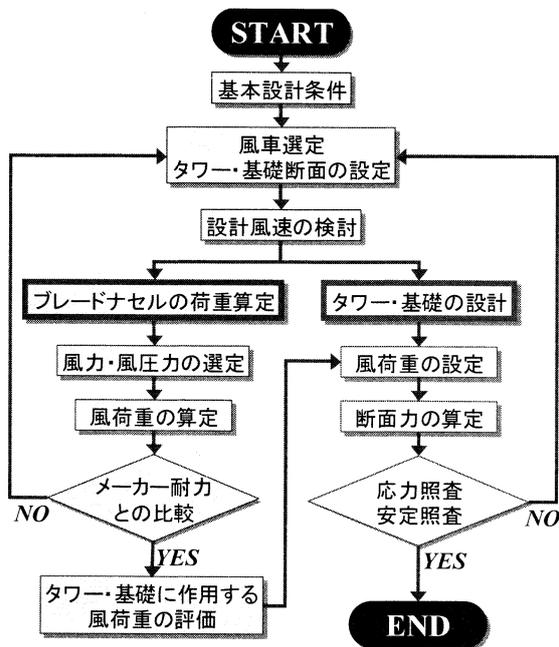


図-2 支持物の構造設計フロー

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。

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

ここで、 σ_c 、 σ_b 、 τ 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、GL⁴⁾ 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。

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

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。

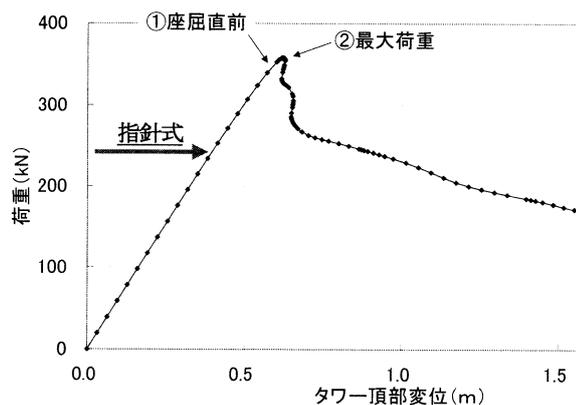


図-3 開口部方向への頂部水平荷重と変位の関係

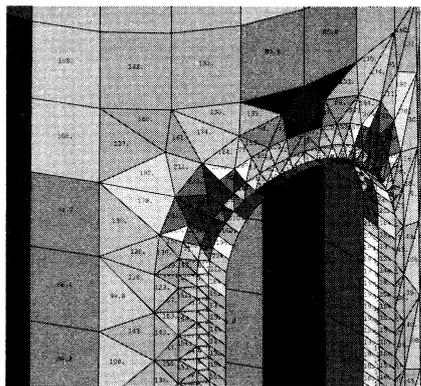


図-4 FEM 解析による開口部応力分布(指針式での耐力荷重(図-3)に対応)

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。

$$p_{al} = 0.187 \cdot \sqrt{F_c} \cdot D_c + \lambda_{db} \cdot K \cdot f_b \cdot \phi' \quad (3)$$

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

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

強筋に相当するペデスタル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デスタルに対する 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。

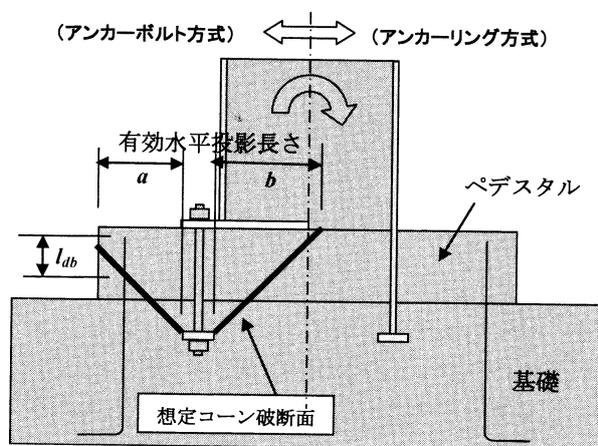


図-5 タワー定着構造

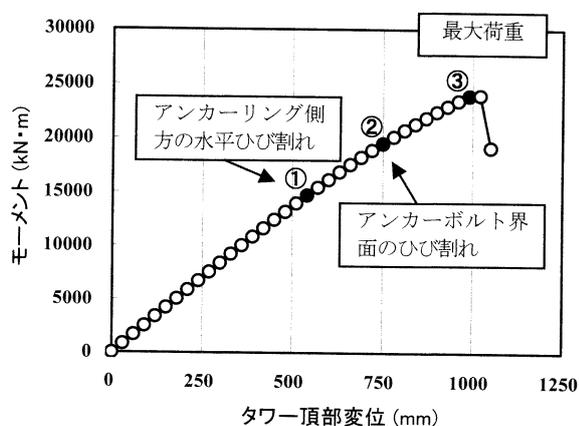


図-6 FEMによるペデスタルの強度解析(タワー基部モーメントと頂部変位の関係)

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、ペデスタル、基礎の構造設計指針案での考え方について述べた。論文の中では、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.