

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づけている。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際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して、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、①発電時、②発電および故障発生、③始動、④正常停止、⑤緊急停止、⑥待機中(静止とアイドリング)、⑦待機中および故障条件)、⑧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ー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が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建設地点における設計風速をまず決める必要がある。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。

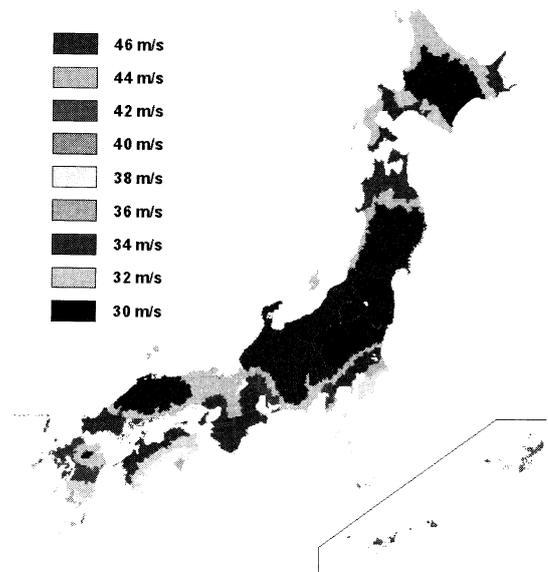


図 1 基準風速分布⁴⁾

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。

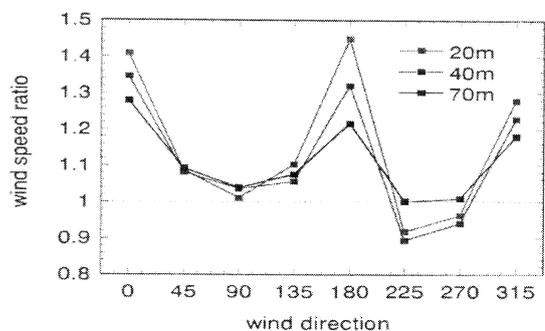


図 2 複雑地形上の風速の割増係数の解析例⁵⁾

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が誤ると、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I~IV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IV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。

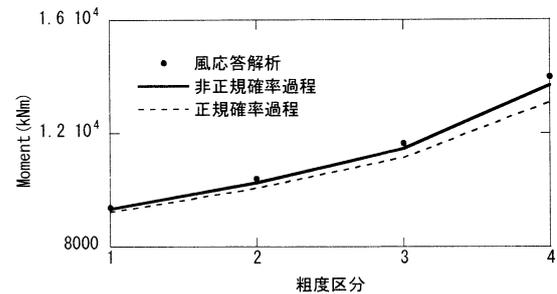


図3 タワーの転倒モーメントの乱れによる変化⁸⁾

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。

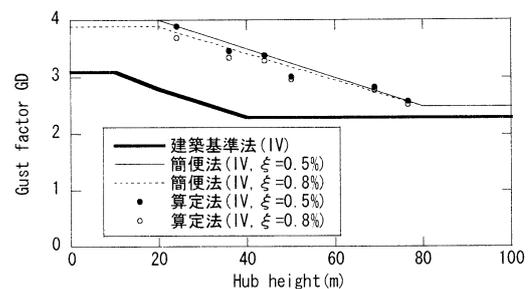


図4 ガスト影響係数のハブ高さによる変化(ピッチ制御風車、粗度区分IV)⁸⁾

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 \ 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 |
| I | $2.5-\alpha$ ($2.6-\alpha$) | (1)と(3)とに掲げる数値を直線的に補間した数値 | 1.8 (2.0) |
| II | $2.8-\alpha$ ($2.9-\alpha$) | | 2.0 (2.1) |
| III | $3.2-\alpha$ ($3.4-\alpha$) | | 2.1 (2.2) |
| IV | $3.8-\alpha$ ($4.0-\alpha$) | | 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に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二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、風車がトップベ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。

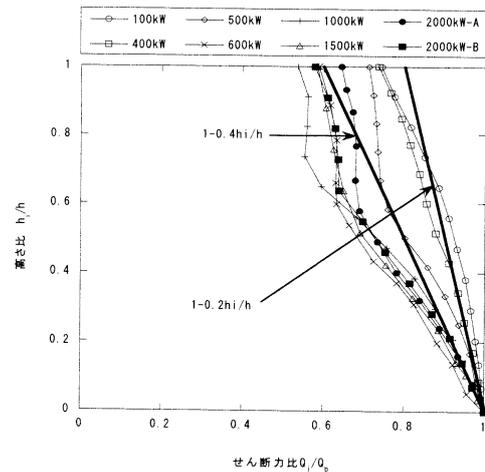


図 5 せん断力の鉛直方向分布係数

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值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.