

風車支持構造物の地震荷重評価に関する研究*

A study of seismic load of wind turbine supporting structures

竹井 由拓**

石原 孟***

Yuta TAKEI

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

近年、風力発電の導入拡大に伴い、地震発生地域での風車の建設が増えており、簡便かつ高精度の地震荷重評価式の提案が必要とされている。現行の風車の設計指針では、時刻歴応答解析により風車タワーに作用する地震荷重が評価されている¹⁾。しかし、時刻歴応答解析は入力地震動により解析結果に大きなばらつきがあり、地震荷重の信頼レベルを統計的に得るためには多くの数値解析が必要となる。一般的な土木建築構造物とは異なり、大規模ウィンドファームでは数十基の風車の地震荷重を評価する必要があるため、計算時間とコストのかからない地震荷重の評価手法の開発が望まれている。一方、これまで開発された簡便で解析的に地震荷重を求めることのできる応答スペクトル法は、計算精度の面において、いくつかの問題がある。

まず風車は一般に土木建築構造物に比べ、構造減衰比が非常に低く、応答スペクトルのばらつきが大きい。そのため、その不確実性を考慮した減衰補正係数が必要とされてきた²⁾。一方、減衰比5%以上では既存の減衰補正係数が用いられており、高次モードの寄与が大きい風車フーチングの地震荷重は過小評価されるという問題がある。また、国際基準 IEC61400³⁾では地震荷重を評価する際には、有効質量比の累積値が85%以上となるモードまで用いて応答と荷重を評価しているが、その条件を満足するようにモードを重ね合わせても、基礎固定モデルでは基礎付近の地震荷重は過小評価されるという問題が指摘されている。

そこで、本研究では、高次モードの応答スペクトルを精度よく評価するため、新たに高減衰における減衰補正係数を提案した。また基礎固定モデルにおいても基礎並進に寄与する高次モードを考慮できるように、

付加モードを提案し重ね合わせることで基礎付近の荷重を精度よく評価できるようにした。現行の指針で採用されている時刻歴応答解析による結果と比較することで、これら評価式の精度を検証する。

2. 応答スペクトル法と風車モデルの概要

2.1 応答スペクトル法

応答スペクトル法は、1 質点系モデルの加速度応答スペクトルをもとに、多質点系モデルの最大応答値を求める際に使われる。

多質点系モデルに対するモード解析で得られる、第*j*次モードの運動方程式は(1)式となる。

$$\ddot{q}_j + 2\zeta_j\omega_j\dot{q}_j + \omega_j^2q_j = -\gamma_j\ddot{x}_g \quad (1)$$

ここで、 ω は固有円振動数、 ζ_j は減衰比、 γ_j は刺激係数である。*j*次モードにおける第*i*層の絶対加速度、せん断力、曲げモーメントの最大値は式(2)～式(5)により導くことができる。

$$A_{ij} = \gamma_j X_{ij} S_a(T_j, \zeta) \quad (2)$$

$$D_{ij} = \gamma_j X_{ij} S_a(T_j, \zeta) \left(\frac{T_j}{2\pi}\right) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = \sum_{k=i}^n \gamma_j X_{kj} S_a(T_j, \zeta) m_k \quad (4)$$

$$M_{ij} = \sum_{k=i}^n \gamma_j X_{kj} S_a(T_j, \zeta) m_k (z_k - z_i) \quad (5)$$

ここで、 $\gamma_j X_{ij}$ は刺激関数、 $S_a(T_j, \zeta)$ は固有周期*T*、減衰比 ζ での加速度応答スペクトルである。

現行の指針で地震荷重を評価する際には、工学的基盤面での加速度応答スペクトルの、建設地表面地盤における増幅を適切に考慮しなければならない。また、応答スペクトル法で地震荷重を評価する際には、減衰による加速度応答スペクトルの変化も正しく評価する必要がある。本研究では、地盤と減衰による影響を考慮した加速度応答スペクトルを次式により求める。

*平成26年11月28日第36回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**学生会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

***会員 東京大学大学院工学系研究科

$$S_a(T, \zeta) = \begin{cases} a_0 G_s \left\{ 1 + (F_\zeta \beta_0 - 1) \frac{T}{T_B} \right\} & (T < T_B) \\ a_0 G_s F_\zeta \beta_0 & (T_B \leq T < T_C) \\ a_0 G_s F_\zeta \beta_0 \left(\frac{T_C}{T} \right) & (T_C \leq T) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 a_0 は工学的基盤面での基準化加速度応答スペクトル、 G_s は表層地盤による加速度の増幅率、 F_ζ は減衰補正係数、 β_0 は加速度応答が一定となる領域での加速度応答倍率、 T_B と T_C は地盤種類別の応答スペクトルの形状係数である。

本研究では、第一種地盤における500年再現期間の地震動を想定した。この地震動は平成12年建設省告示第1461号で定められた「極めて稀に発生する地震動」に対応する。表1には式(6)で示されたパラメータを、式(7)～(9)には G_s と F_ζ をそれぞれ示す。

表1 加速度応答スペクトルのパラメータ

a_0 (m/s ²)	β_0	T_B (s)	T_C (s)
3.2	2.5	0.16	0.64

$$G_s = \begin{cases} 1.5 & (T < 0.576) \\ 0.864/T & (0.576 \leq T < 0.64) \\ 1.35 & (0.64 \leq T) \end{cases} \quad (7)$$

$$F_\zeta(\zeta, T, \zeta) = \begin{cases} \left(\frac{7}{2 + 100\zeta} \right)^{-0.07T + 0.7\gamma + 0.5} & (\zeta \leq 0.05) \\ \left(\frac{7}{2 + 100\zeta} \right)^{0.5} & (\zeta > 0.05) \end{cases} \quad (8)$$

$$F_\zeta(\zeta, T, \zeta) = \begin{cases} \left(\frac{7}{2 + 100\zeta} \right)^{0.5} & (\zeta > 0.05) \end{cases} \quad (9)$$

なお、多層地盤においては、岡野ら⁴⁾が、重複反射理論を用いた簡易的な評価手法を提案し、加速度応答スペクトルの地盤による増幅率を精度よく評価できる。

各モードの重ね合わせは、モード間の相関関係を考慮した、CQC (Complete Quadratic Combination) 法により行う。また地震荷重を評価する際に考慮するモードの次数はIECの基準に従い、有効質量比の累積値が85%以上のモードとする。CQC法により評価した地震荷重を式(10)～(13)にそれぞれ示す。

$$A_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{jl} A_{ij} A_{il}} \quad (10)$$

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{jl} D_{ij} D_{il}} \quad (11)$$

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{jl} Q_{ij} Q_{il}} \quad (12)$$

$$M_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{jl} M_{ij} M_{il}} \quad (13)$$

ここで、 ρ_{jl} はモード間の相関係数であり、各モードの固有振動数比 $X(= \omega_l/\omega_j)$ を用いて次式により表わす。

$$\rho_{jl} = \frac{8\sqrt{\zeta_j \zeta_l} (\zeta_j + X \zeta_l) X^{3/2}}{(1 - X^2)^2 + 4\zeta_j \zeta_l X(1 + X^2) + 4(\zeta_j^2 + \zeta_l^2) X^2} \quad (14)$$

2.2 風車モデルの概要

風力発電設備のモデルには、ロータとナセルの質量をハブ高さに集中させた曲げせん断型多質点系モデルを使用した。また、タワー基部を固定とする基礎固定モデルの他に、風車・基礎および地盤の相互作用を考慮できるSway-Rocking (SR) モデルを用いた。図1に2つのモデルを示す。本研究では、500kWと2000kWの風車を代表的な風車モデルとして解析に用いた。

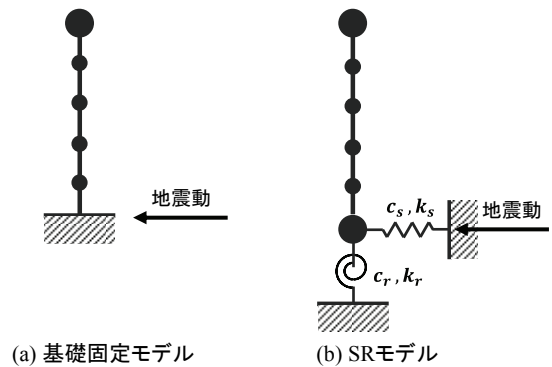


図1 解析に使用した風車モデル

3. 高次モード減衰補正係数の提案と検証

3.1 高次モード減衰補正係数の提案

風車の地震荷重を評価する際に必要となる、加速度応答スペクトルの計算には減衰補正係数が重要となる。低減衰での応答スペクトルは、応答の不確実性を考慮した減衰補正係数が石原ら²⁾の研究により提案され、その精度が検証された。一方、減衰比が5%以上での減衰補正係数は式(9)に示すEurocode⁵⁾の式を用いており、その精度は検証されていない。

そこで、本章では、1質点系モデルで時刻歴応答解析を実施し、減衰比5%以上における既往の減衰補正係数が加速度応答スペクトルを過小評価することを示した。さらに、加速度応答スペクトルを精度よく評価するため、高次モードの減衰補正係数を提案し、式(15)

に示した。図2には、既往評価式と提案式により求めた加速度応答スペクトルと、時刻歴応答解析から得られた加速度応答スペクトルの比較を示す。

$$F_{\zeta}(\zeta, T) = \left(\frac{2}{-3 + 100\zeta} \right)^{0.1 \log_{10} T + 0.3} \quad (\zeta > 0.05) \quad (15)$$

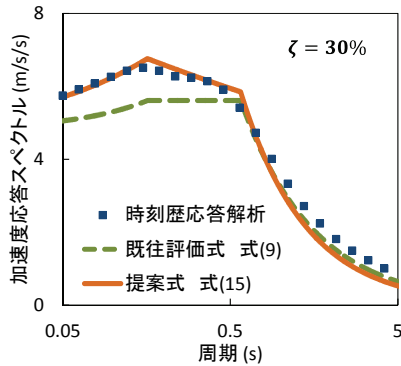


図2 各評価式で求めた加速度応答スペクトルの比較

高減衰では加速度応答スペクトルのばらつきが小さいため、提案した減衰補正係数は不確実性を考慮するためのクォンタイルは除いた。また、高次モードでの寄与が大きい低周期側での加速度応答スペクトルの過小評価を補正するため、減衰補正係数のべき指数を固有周期の常用対数の関数とし、基数も変更した。

3.2 提案式の検証

本項では、地震荷重の評価の際に高次モードの影響が大きくなる非常に固い岩盤上の風車モデルを用いて、提案式の検証を行った。表2には解析に用いたSRモデルの構造特性を示す。

表2 2000kW 風車の構造特性

モード	減衰比	固有振動数	有効質量比	累積値
1	0.5	0.40	0.091	0.091
2	2.5	3.05	0.025	0.116
3	7.4	9.11	0.013	0.130
4	14.5	17.8	0.007	0.137
5	25.4	31.3	0.026	0.163
6	31.0	38.2	0.832	0.995

表3には既往評価式と提案式をそれぞれ用いて計算した地震応答と荷重の最大値の予測誤差を、図3にはせん断力の鉛直方向分布をそれぞれ示す。加速度、変位、曲げモーメントの評価精度は向上しないが、せん断力の予測誤差は-12.2%から-4.4%と小さくなり、特に基礎底面での評価精度が大きく向上している。

表3 既往評価式と提案式による地震荷重の予測誤差

	A_{MAX} (%)	D_{MAX} (%)	Q_{MAX} (%)	M_{MAX} (%)
既往評価式	2.4	7.0	-12.2	6.8
提案式	2.4	7.0	-4.4	6.8

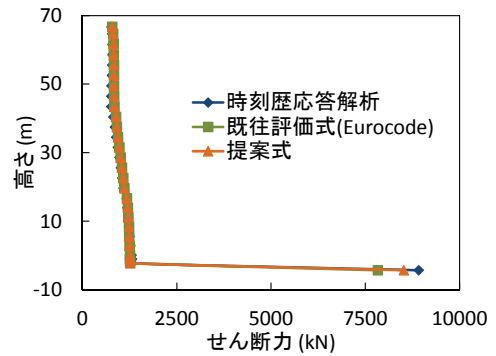


図3 せん断力の鉛直分布の比較

4. 基礎固定モデルの荷重評価式の提案と検証

建設サイトが不明で地盤特性が分からない状況では、一般的に図1に示した基礎固定モデルによって地震荷重の評価が行われる。本章では500kWの基礎固定モデルを対象に解析を行う。このモデルは、4次モードまでの重ね合わせで有効質量比の累積値がIECの基準である85%を満たす。図4には基礎固定モデルとSRモデルの刺激関数の鉛直方向分布を示す。

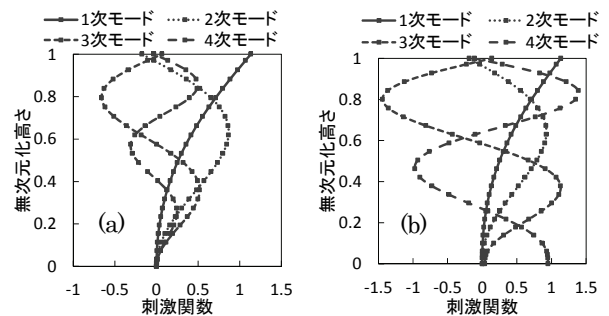


図4 (a)基礎固定モデルと(b)SRモデルの刺激関数

SRモデルでは4次モードで基礎並進を表わすモード形が励起され、このモードを重ね合わせることで基礎付近の地震荷重を正しく評価できる。一方、基礎固定モデルでは有効質量比の累積値が85%以上となる4次モードまでに、基礎付近の地震荷重評価に寄与するモード形が励起されない。地盤が固いほど、基礎並進モードは高次のモードで励起されるため、地盤ばねの剛性が非常に大きいと仮定する基礎固定モデルにおいても理論的には無限大のモードで基礎付近の地震荷重評価に寄与するモードが励起される。そして、そのモードまで重ね合わせることでSRモデルと同様に基礎付近の荷重を精度よく評価できる。しかし無限大のモードまでの重ね合わせではIECの基準を満たさず、応答スペクトル法の簡便性も失われる。

そこで、基礎並進モードの代わりにモードとして付加モードを提案し、重ね合わせた。式(16)には付加モードの刺激関数の評価式を、図5には付加モードも含

めた刺激関数の鉛直方向分布をそれぞれ示す。

$$\gamma_c X_{ic} = \frac{1.25}{1 + 3 \exp\{10(z_i/z_n) - 4\}} \quad (16)$$

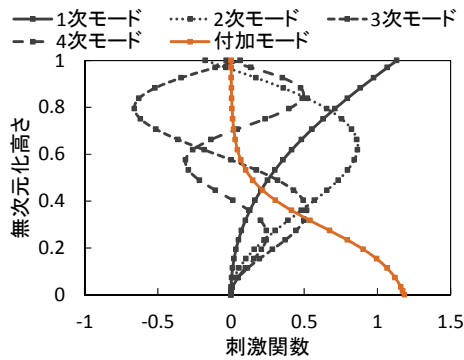


図5 付加モードを含めた刺激関数

提案した付加モードについては、各次モードの重ね合わせと同様に、モード間の相関を考慮して重ね合わせることにした。SRモデルでは、基礎並進モードと他のモードの相関係数の最大値が0.17~0.24であり、本研究では付加モードと他のモードとの相関係数を0.2と仮定して評価した。付加モードを考慮した荷重評価式を式(17)~(20)に示す。

$$A'_i = \sqrt{A_i^2 + 2\rho_c A_i A_{ic} + A_{ic}^2} \quad (17)$$

$$D'_i = \sqrt{D_i^2 + 2\rho_c D_i D_{ic} + D_{ic}^2} \quad (18)$$

$$Q'_i = \sqrt{Q_i^2 + 2\rho_c Q_i Q_{ic} + Q_{ic}^2} \quad (19)$$

$$M'_i = \sqrt{M_i^2 + 2\rho_c M_i M_{ic} + M_{ic}^2} \quad (20)$$

ここで、

$$A_{ic} = \gamma_c X_{ic} S_a(0, \zeta) \quad D_{ic} = A_c \gamma_c X_{ic} S_a(0, \zeta) \left(\frac{0}{2\pi}\right)$$

$$Q_{ic} = \sum_{k=1}^n A_{kc} m_k \quad M_{ic} = \sum_{k=i}^n A_{kc} m_k (z_k - z_i)$$

図6には、付加モードを考慮しない評価式と考慮する評価式による加速度とせん断力の鉛直方向分布の比較を示す。また、表4には応答と荷重の基礎付近における予測誤差を示す。図6から、付加モードの重ね合わせにより、基礎付近における加速度とせん断力の予測精度が向上していることが分かる。モーメントの予測精度についても僅かに向上した(表4)。

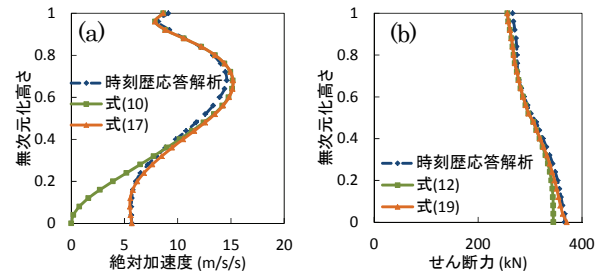


図6 (a)加速度と(b)せん断力の鉛直方向分布

表4 タワー下部における地震荷重の予測誤差

	A_{base} (%)	Q_{base} (%)	M_{base} (%)
付加モード考慮しない	-100	-5.9	-2.1
付加モード考慮する	-0.0	2.3	-1.1

5. まとめ

本研究では、高減衰における減衰補正係数と高次モードを考慮するための付加モードを提案することにより、応答スペクトル法による風車支持構造物の高精度な地震荷重評価を可能にした。主な結論を以下に示す。

1. 一質点系モデルでの時刻歴応答解析から求めた加速度応答スペクトルに一致するように、新たに減衰比5%以上での減衰補正係数を提案した。提案式により算出したフーチングでの地震荷重は時刻歴応答解析の結果とよく一致した。
2. 基礎固定モデルでは、IECの基準に従い各モードを重ね合わせても、地表面付近の地震応答と荷重を過小評価する。基礎並進モードに相当する付加モードを新たに提案し、重ね合わせることでタワー下部の荷重も精度よく評価できた。

参考文献

- 1) 土木学会：風力発電設備支持構造物設計指針・同解説 2010年版, 2010.
- 2) 石原孟, 高本剛太郎, ムハマド ワヒード サーワー: 応答スペクトルの不確実性と風車タワーの高次モードを考慮した地震荷重評価式の提案. 第33回風力エネルギー利用シンポジウム, pp139-142, 2011.
- 3) IEC61400-1. Wind turbines. Part 1: Third edition, 2005.
- 4) 岡野創, 酒向裕司: 表層地盤による応答スペクトルの増幅率の評価法の提案. 日本建築学会技術報告集, 第19巻 第41号, pp47-52, 2013年2月.
- 5) Eurocode 8, Design of Structure for Earthquake Resistance; Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, EN-1998-1:2004.