

風車支持構造物の地震荷重評価に関する研究

竹井 由拓* 石原 孟*

*東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻



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]が、解析結果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。一方、計算時間とコストのかからない地震荷重の評価手法として開発された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。

構造減衰比が非常に低い風車は、応答スペクトルのばらつきが大きいため、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%以上における既存の減衰補正係数では、高次モードの寄与が大きい風車フーチングの地震荷重が過小評価されるという問題がある。また、国際基準IEC61400^[3]で地震荷重を評価する際に求められている、有効質量比の累積値が85%以上となるモードまで重ね合わせても、基礎固定モデルでは基礎付近の地震荷重を過小評価されている。

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。

応答スペクトル法

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。

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

ここで、 ω_j 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、変位、せん断力、曲げモーメントの最大値は式(2)~(5)により導くことができる。

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

$$Q_{ij} = \sum_{k=1}^n \gamma_j X_{kj} S_a(T_j, \zeta_j) m_k \quad (4) \quad M_{ij} = \sum_{k=1}^n \gamma_j X_{kj} S_a(T_j, \zeta_j) m_k (z_k - z_i) \quad (5)$$

ここで、 $\gamma_j X_{ij}$ は刺激関数、 $S_a(T_j, \zeta_j)$ は固有周期 T_j 、減衰比 ζ_j の加速度応答スペクトルである。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」に相当する。このとき、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は次式となる。

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

式(6)で示されたパラメータを、表1と式(7)~(9)にそれぞれ示す。

表1 加速度応答スペクトルのパラメータ^[1]

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

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

$$F_{\zeta}(\zeta, T, \gamma) = \begin{cases} \left(\frac{7}{2 + 100\zeta} \right)^{-0.077 + 0.7\gamma + 0.5} & (\zeta \leq 0.05) \\ \left(\frac{7}{2 + 100\zeta} \right)^{0.5} & (\zeta > 0.05) \end{cases} \quad (8) \quad (9)$$

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。

$$A_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{jl} A_{ij} A_{il}} \quad (10) \quad D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{jl} D_{ij} D_{il}} \quad (11)$$

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{jl} Q_{ij} Q_{il}} \quad (12) \quad M_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{jl} M_{ij} M_{il}} \quad (13)$$

ここで ρ_{jl} は各モード間の相関係数である。

高次モード減衰補正係数の提案と検証

風車の地震荷重評価に必要となる、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。しかし、式(9)に示すEurocode^[4]の式を用いた減衰補正係数は、加速度応答スペクトルを過小評価する。そこで、1質点系モデルで時刻歴応答解析を実施し、加速度応答スペクトルを精度よく評価する高次モードの減衰補正係数を提案し、式(14)に示した。既往評価式と比べ、提案式により求めた加速度応答スペクトルは、時刻歴応答解析から得られた加速度応答スペクトルとよく一致している(図1)。

$$F_{\zeta}(\zeta, T) = \left(\frac{2}{-3 + 100\zeta} \right)^{0.1 \log_{10} T + 0.3} \quad (\zeta > 0.05) \quad (14)$$

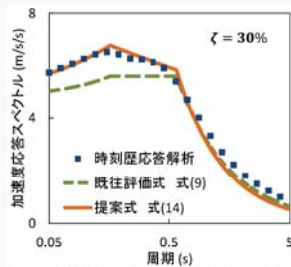


図1 各減衰補正係数の評価式で求めた加速度応答スペクトルの比較

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。本検証では、風車・基礎および地盤の相互作用を考慮できるSway-Rocking(SR)モデルを使用した。表2には、解析に用いた2000kW風車のSRモデルの固有値解析の結果を示す。

表2 2000kW風車のSRモデルにおける固有値解析の結果

モード	減衰比 (%)	固有振動数 (Hz)	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2には、せん断力の鉛直方向分布の比較をそれぞれ示す。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

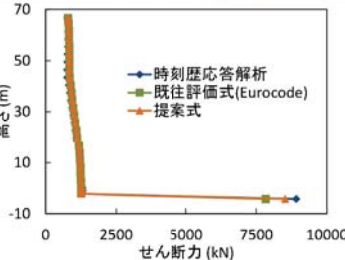


図2 せん断力の鉛直方向分布の比較

基礎固定モデルの荷重評価式の提案と検証

風車タワーの設計時には、基礎固定モデルが用いられている^[3]。本研究では、地震荷重評価式の基礎固定モデルへの適用性を確認するため、タワー基部を固定とする基礎固定モデルを用いて地震荷重の評価を行った。表4には、解析に用いた500kW風車の基礎固定モデルの固有値解析の結果を示す。

表4 500kW風車の基礎固定モデルにおける固有値解析の結果

モード	減衰比	固有振動数	有効質量比	累積値
1	0.5	0.52	0.629	0.629
2	2.5	4.12	0.143	0.772
3	7.4	12.3	0.057	0.829
4	15.5	25.9	0.031	0.860

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3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の比較を示す。

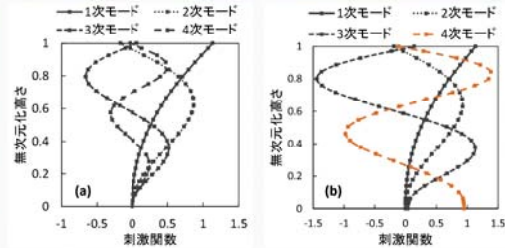


図3 (a)基礎固定モデルと(b)SRモデルの刺激関数の比較

基礎固定モデルでは、基礎付近の地震荷重評価に寄与する基礎並進モードが、SRモデルのように励起されない。そこで、基礎並進モードの代わりに付加モードを提案し、重ね合わせた。式(15)には、付加モードの刺激関数の評価式を、図4には、基礎固定モデルの各モードと、付加モードの刺激関数を示す。

$$Y_{Xic} = \frac{1.25}{1 + 3 \exp[10(z_i/z_n) - 4]} \quad (15)$$

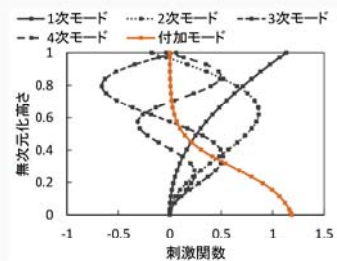


図4 基礎固定モデルの各モードと付加モードの刺激関数

SRモデルにおける、相関係数の最大値が0.17~0.24であることから、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と仮定し評価した。付加モードを考慮した荷重評価式を式(16)と式(17)に示す。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評価精度が向上している(図5)。

$$A'_i = \sqrt{A_i^2 + 2\rho_c A_i A_{ic} + A_{ic}^2} \quad (16) \quad Q'_i = \sqrt{Q_i^2 + 2\rho_c Q_i Q_{ic} + Q_{ic}^2} \quad (17)$$

$$A_{ic} = Y_{Xic} S_a(0, \zeta) \quad Q_{ic} = \sum_{k=1}^n A_{kc} m_k$$

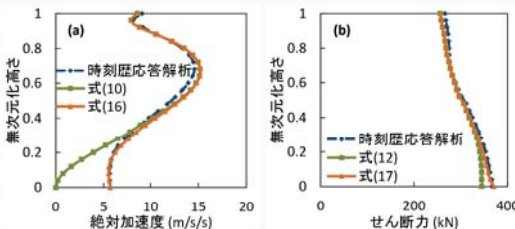


図5 (a)加速度と(b)せん断力の鉛直方向分布の比較

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、基礎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基礎付近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, 高木剛太郎, ムハマド フヒーダ 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. Eurocode 8, Design of Structure for Earthquake Resistance; Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, EN-1998-1:2004.