

# 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

Seismic Load Evaluation of Wind Turbine Support Structure Considering Uncertainty in Response Spectrum and Higher Modes

石原 孟\*\*      高本 剛太郎\*\*      ムハマド ワヒード サーワー\*\*  
Takeshi ISHIHARA      Gotaro Takamoto      Muhammad Waheed Sarwar

## 1. はじめに

近年、風力発電の導入の拡大に伴い、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を提案する必要がある。一般的に地震荷重を解析的に評価する際には、応答スペクトル法が用いられているが、風車に適用する際には2つの問題点がある。まず、風車は一般建築物に比べ構造減衰比が非常に低く、地震波の種類や風車の固有周期の変化による応答スペクトルのばらつきが大きく、既存の減衰補正係数ではこのような応答スペクトルの不確実性を評価できない<sup>1)</sup>。また、大型風車に作用する地震荷重の鉛直分布には、高次モードの影響が大きいと言われている<sup>1)</sup>。

そこで、本研究では、応答スペクトルの不確実性を考慮した減衰補正係数と高次モードを考慮した地震荷重の鉛直分布関数を提案するとともに、時刻歴応答解析により提案式の精度の検証を行う。

## 2. 地震荷重の評価

地震荷重の評価には、一般的に時刻歴応答解析と応答スペクトル法がある。時刻歴応答解析では地震波をタワー基部に作用させ、運動方程式を時々刻々と解くことにより、風車に作用するせん断力や曲げモーメントの最大値を求める方法である。構造物の高次振動モードの影響を厳密に再現し、材料非線形に対応できる利点があるが、計算に時間を要し、解析結果のばらつきを考慮するために多くの地震波を用いる必要がある。一方、応答スペクトル法では、最大地震荷重は応答スペクトル及び構造物の固有周期、モード形、質量分布等から解析的に求めることができる。

本章では、まず地震時の荷重評価における基本的な考え方を述べ、解析に用いる風車モデルを示すとともに、時刻歴応答解析と応答スペクトル法における運動方程式および加速度応答スペクトルの式を示す。

## 2.1 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析では、式(4)に示す加速度応答スペクトルに適合する地震波(以下、スペクトル適合波)をタワー基部に作用させ、運動方程式を時々刻々と解くことにより、風車に作用するせん断力、曲げモーメントの最大値を求める。解析モデルとして図-1に示す多質点系モデルを用い、質点と質点の間に減衰比と剛性をもつビーム要素を設けた。式(1)は風車停止時に加速度 $\ddot{x}_g$ の地震動を受ける多質点系モデルの運動方程式を示す。

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -[m]\{e\}\ddot{x}_g \quad (1)$$

ここで、 $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ はそれぞれ変位ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトル、 $[m]$ は質量マトリックス、 $[c]$ は減衰マトリックス、 $[k]$ は剛性マトリックスを表す。 $\{e\}$ は全要素が1のベクトルである。

## 2.2 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よく用いられている。

多質点系モデルに対してモード解析を行い、第 $j$ 次モードに関する運動方程式は式(2)により表す。

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

ここで、 $\omega_j$ は固有角振動数、 $\zeta_j$ は減衰比、 $\gamma_j$ はモード刺激係数である。

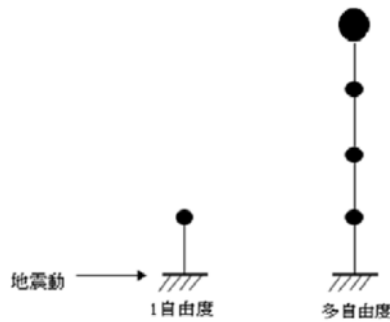
最大応答はモード形と応答スペクトルを用いて求めることができる。 $j$ 次モードに対応する第 $i$ 層の最大水平力は、 $j$ 次モードに対する $i$ 層の最大加速度 $\ddot{x}_{ij}(=\gamma_jX_{ij}S_a(T_j,\zeta))$ に $i$ 層の質量 $m_i$ を乗じて得られる。

$$F_{ij} = \gamma_jX_{ij}S_a(T_j,\zeta)m_i \quad (3)$$

ここで、 $X_{ij}$ は $j$ 次モード形、 $S_a(T,\zeta)$ は固有周期 $T$ 、減衰比 $\zeta$ の加速度応答スペクトルである。このように各次モードの応答を個別に求めて、それらの総和から全応答を求めることができる。この方法では固有値解析から各次の固有周期とモード形を求める必要があるが、本研究では固有値解析によらない方法を提案する。

\* 平成23年11月30日第33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 東京都文京区本郷 7-3-1



図－1 解析に使用した基礎固定モデル

## 2.3 加速度応答スペクトル

地震荷重を算定する際に用いる加速度応答スペクトルは次式により求める<sup>2)</sup>。

$$S_a(T, \zeta) = \begin{cases} a_0 \cdot S \cdot \left\{ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\beta_0 \cdot F_\zeta - 1) \right\} & (0 \leq T \leq T_B) \\ a_0 \cdot S \cdot F_\zeta \cdot \beta_0 & (T_B \leq T \leq T_C) \\ a_0 \cdot S \cdot F_\zeta \cdot \beta_0 \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right) & (T_C \leq T) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $a_0$ は工学的基盤面での基本最大加速度、 $S$ は表層地盤による加速度の増幅率、 $F_\zeta$ は減衰補正係数、 $\beta_0$ 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Ⅰ種地盤上に建設された風車を対象とし、500年再現期間の地震波を設定した。式(4)中の各パラメータは表－1に示す。

表－1 本研究で用いた各パラメータの値

| $a_0(\text{m/s}^2)$ | $S$ | $\beta_0$ | $T_B(\text{s})$ | $T_C(\text{s})$ |
|---------------------|-----|-----------|-----------------|-----------------|
| 3.2                 | 1.5 | 2.5       | 0.16            | 0.576           |

表－2 風車の質量に対するタワーの総質量の比

| モデル<br>特性 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| 定格出力(kW)  | 100  | 400  | 500  | 1000 | 1500 | 2000 |
| 質量比       | 0.44 | 0.46 | 0.45 | 0.41 | 0.45 | 0.44 |

## 2.5 風車のモデル

表－2には本研究で用いる風車のモデルを示す。風車は定格出力によらず、風車の質量に対するタワーの総質量の比はほぼ同じである。そこで、本研究では表－2に示す6種類の風車のうち400kWと2MWの2種類を代表的な風車モデルとして解析に用いた。

## 3. 地震荷重評価式の提案

解析的に地震荷重を計算する方法として、応答スペクトル法があるが、風車に適用する際には2つの問題がある。まず、一般建築物比べて非常に減衰比の低い風車では、加速度応答スペクトルが地震波の種類や固有振動数によ

って大きくばらついてしまう。式(4)に示すように加速度応答スペクトルを計算するには減衰補正係数を用いる必要があるが、既存の減衰補正係数ではこの不確実性を評価できない。また、大型風車に作用する地震荷重の鉛直分布には、高次モードの影響が大きい、従来の鉛直分布の評価は1次モードのみに基づいており、高次モードを考慮する必要がある。

そこで、本章では、応答の不確実性を考慮した減衰補正係数と高次モードを考慮した地震荷重の鉛直分布関数を提案する。

### 3.1 応答の不確実性を考慮した減衰補正係数の提案

本節では、構造物の減衰比、固有周期及び応答スペクトルの不確実性を考慮するために、式(5)に示す減衰補正係数 $F_\zeta$ を提案する。

$$F_\zeta(\zeta, T, \gamma) = \left( \frac{7}{2 + 100\zeta} \right)^\alpha, \quad \alpha = f(T, \gamma) \quad (5)$$

ここで、 $\zeta$ は構造減衰比、 $T$ は構造物の固有周期、 $\gamma$ はクォンタイル、すなわち信頼性レベルを表す。

べき指数 $\alpha$ を0.5とした場合、Eurocodeに用いられている減衰補正係数と同じ式となる。また、 $\alpha$ を $f(T)$ とした場合は、構造物の固有周期を考慮した減衰補正係数に対応する<sup>3)</sup>。本節では、構造物の減衰比と固有周期に加え、クォンタイルを減衰補正係数に導入することにより、応答スペクトルの不確実性を考慮した関数を提案する。以下関数を決定する際の手順を示す。

まず、図－1に示す1質点系モデルに複数のスペクトル適合波を入力し、加速度応答スペクトルを求めるとともに、加速度応答スペクトルの不確実性を表す確率分布を推定する。次に、求めた確率分布より応答加速度の各パーセンタイル値を計算し、各パーセンタイル値に対してベストフィッティングを行い、べき指数を表す関数を決定する。

#### (1) 加速度応答スペクトルの不確実性を表す確率分布

1質点系モデルに対して、計35種類の地震波を作用させ、加速度応答スペクトルを求めた。使用した1質点系モデルの減衰比は、0.5%、1%、2%、3%、4%、5%の6種類である。また、使用した35種類のスペクトル適合波のうち、5種類は観測波位相を用いて発生させたもので、残りの30波には乱数位相を用いている。図－2には減衰比が5%と0.5%のモデルにおける解析結果を示し、風車と同じ減衰比0.5%の加速度応答スペクトルでは、非常に大きな不確実性が存在することが分かる。

加速度応答スペクトルの不確実性を表す確率分布を求めるために、図－2に示すように、固有周期別に区間を分け、その区間内における加速度の累積相対度数を算出する。区間を分ける際には、式(4)に示す加速度応答スペクトルの形状に基づき、 $0.05 < T < T_B$ を区間 $I_A$ 、 $T_B \leq T \leq T_C$ を区間 $I_B$ 、 $T_C < T \leq 5$ を区間 $I_C$ とした。また、図－2に示

すように、スペクトルの形状が曲線となる区間  $I_A$  と  $I_C$  に関しては、さらに等比分割して各 10 個の区間  $I_A^{(i)} \cdot I_C^{(i)}$  ( $i=1 \sim 10$ ) を作成した。図-3 中のプロットは、区間  $I_A^{(5)}$ ,  $I_B$ ,  $I_C^{(5)}$  における累積相対度数であり、実線は各区間における平均値と標準偏差から求めた対数正規分布の累積分布関数を表している。プロットが実線とほぼ一致していることから、加速度応答スペクトルの不確実性が対数正規分布に従うことがわかる。なお、図-3 に例として示した 3 つの区間以外の区間に対しても同様の分析を行い、全ての区間において加速度応答スペクトルの不確実性が対数正規分布に従っていることを確認した。

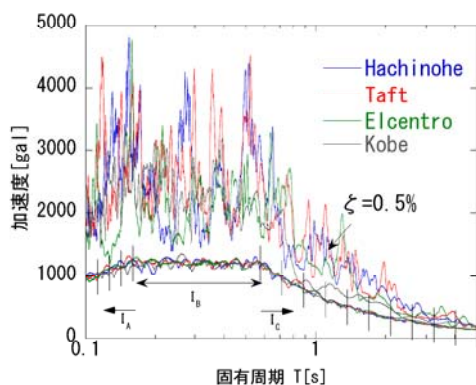


図-2 加速度応答スペクトルの解析結果と統計分析を行う各区間の位置

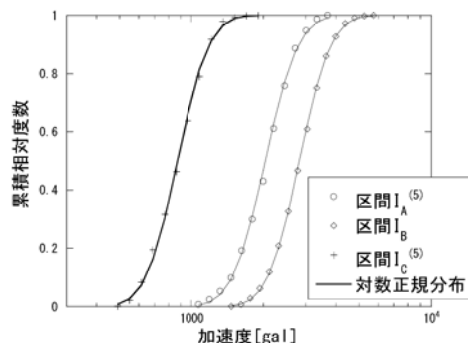


図-3 各区間における加速度の累積相対度数

## (2) 減衰補正係数における指数の同定

対数正規分布で応答の不確実性をモデル化することにより、加速度のパーセンタイル値を信頼性レベル  $\gamma$  で定義することができる。各パーセンタイル値を式 (4) の  $S_a(T, \zeta)$  に代入し、減衰補正係数  $F_\zeta$  を求め、クォンタイルと固有周期を変化させた場合の  $\alpha$  の値を式 (5) により算出し、図-4 と図-5 に示した。これらの図から、 $\alpha$  を  $\gamma$  の 1 次関数かつ  $T$  の 1 次関数で近似し、式 (6) に示す減衰補正係数を提案した。

$$\alpha = f(T, \gamma) = -0.07T + 0.7\gamma + 0.5 \quad (6)$$

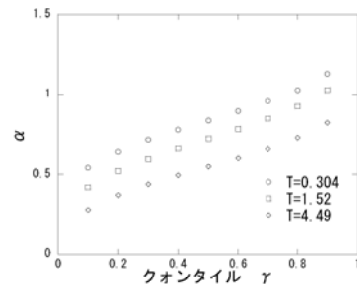


図-4 クォンタイル  $\gamma$  による  $\alpha$  の変化

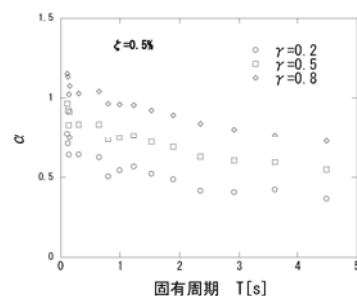


図-5 固有周期  $T$  による  $\alpha$  の変化

提案式により求めた応答スペクトル(実線)は応答加速度の各クォンタイルの計算結果(プロット)とよく一致している。構造物の固有周期  $T$  を考慮したことにより、長周期における応答スペクトルを精度良く評価し、クォンタイル  $\gamma$  の値を変化させることにより、応答スペクトルの不確実性の評価が可能になった。図中の点線は Eurocode の減衰補正係数を用いて求めた応答スペクトルの値を示し、ほぼ 20% クォンタイル値に対応していることが分かる。

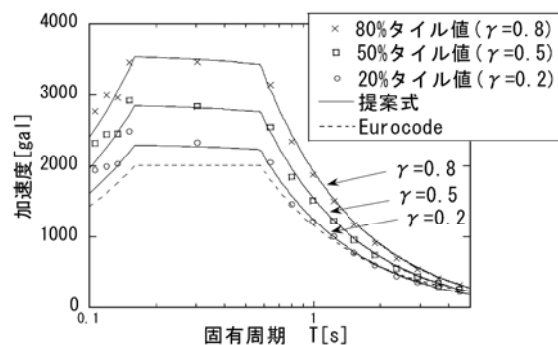


図-6 応答スペクトルの解析結果と予測式の比較

## 3.2 高次モードを考慮した鉛直分布関数の提案

風車タワーに作用する地震荷重を解析的に評価するには、鉛直分布関数が必要である。本節では、高次モードを考慮した鉛直分布関数を提案した。

まず、図-1 の多質点系モデルに対して固有値解析を行い、鉛直分布を求める際に必要な刺激関数  $\gamma_j X_{ij}$  と固有周期を計算し、刺激関数を表す多項式と高次モードの固有周期を計算するための固有周期比を提案する。次に、提案式と式(7)、式(8)より、風車のモデルの第  $i$  層に作用する  $j$  次モードによるせん断力  $Q_{ij}$  とモーメント  $M_{ij}$  を計算

し、式(9)に示す SRSS 法により、モードの重ね合わせを行い、高次モードを考慮した地震荷重を求める。

$$Q_{ij} = \sum_{k=1}^n F_{kj} = \sum_{k=1}^n \gamma_j X_{kj} S_a(T_j, \zeta) m_k \quad (7)$$

$$M_{ij} = \sum_{k=1}^n F_{kj}(z_k - z_i) = \sum_{k=1}^n \gamma_j X_{kj} S_a(T_j, \zeta) m_k (z_k - z_i) \quad (8)$$

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n Q_{ij}^2}, \quad M_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n M_{ij}^2} \quad (9)$$

#### (1) 刺激関数と固有周期比のモデル化

固有値解析によって、各風車モデルのモード形を求めることができるが、石原ら<sup>4)</sup>の研究によると、風車の規模によらず、1 次モード形を評価する刺激関数  $\gamma_1 X_{i1}$  は無次元高さの多項式で表すことができる。本研究では、風車タワーの  $j$  次モードの刺激関数  $\gamma_j X_{ij}$  は多項式によって表せると仮定し、式(10)により定式化した。

$$\gamma_j X_{ij} = \sum_{k=1}^n c_{jk} \left( \frac{z_i}{H} \right)^{k+1} \quad (10)$$

ここで、 $z_i$  は風車タワーにおける第  $i$  層の高さ、 $H$  はハブ高さ、 $c_{jk}$  は多項式の係数である。また、 $j$  次モードの固有周期は 1 次モードとの固有周期比  $T_j/T_1$  でモデル化した<sup>5)</sup>。表-3 には、式(10)の多項式の係数  $c_{jk}$  と固有周期比  $T_j/T_1$  を示す。

表-3 多項式の係数  $c_{jk}$  と固有周期比  $T_j/T_1$

| $j \backslash k$ | $c_{jk}$ |        |       | $T_j/T_1$ |
|------------------|----------|--------|-------|-----------|
|                  | 1        | 2      | 3     |           |
| 1                | 1.1      | 0      | 0     | 1         |
| 2                | 5.87     | -6.00  | 0     | 0.127     |
| 3                | 14.26    | -38.20 | 24.00 | 0.043     |

図-7 には、定格出力 400kW と 2MW の風車の多質点モデルを用いて、固有値解析により求めた 3 次モードまでの刺激関数と提案した刺激関数により求めた曲線を示す。図-7 から、風車の規模によらず、風車タワーの刺激関数が無次元高さの多項式により、精度良く表せることがわかる。

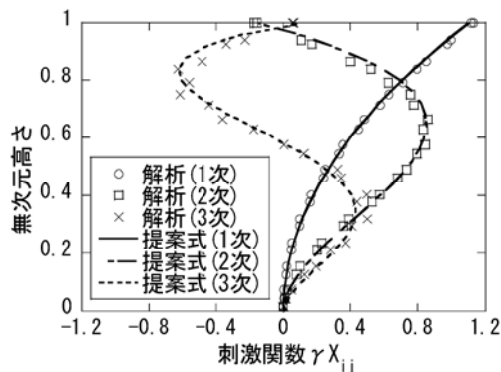


図-7 刺激関数の解析結果と予測値の比較

#### (2) 各モードによる地震荷重とモードの重ね合わせ

国際基準 IEC61400<sup>6)</sup>では、地震荷重を評価する際に考慮するモードの次数はモーダル質量の和が全質量の 85% 以上であることが望ましいと記述されている。本研究で対象とした 400kW から 2000kW の風車では、3 次モードまでを考慮すればこの条件を満足する。

本研究では、式(9)に示す SRSS 法を用いてモードの重ね合わせを行った。図-8 には、SRSS 法によるせん断力の鉛直分布を太線、時刻歴応答解析による結果を細線で示し、点線は 1 次モードのみを考慮した従来の評価式<sup>4)</sup>によるせん断力の鉛直分布を示す。図-8 から、高次モードの影響は大型風車ほど大きく、3 次モードまでを考慮した本研究の評価式の結果は時刻歴応答解析の結果とよく一致する。また、従来の評価式は概ね安全側の評価になっていることがわかる。

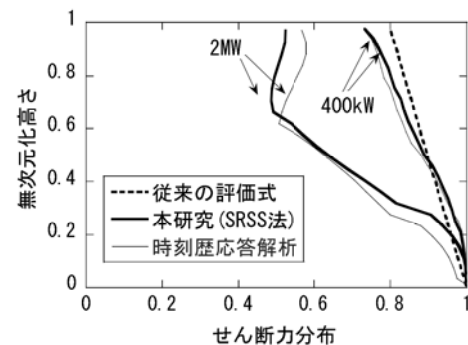


図-8 せん断力の鉛直分布の解析結果と予測値の比較

#### 4. 結論

本研究では、応答スペクトルの不確実性と風車の固有周期を考慮した減衰補正係数と 3 次モードまでを考慮した鉛直分布関数を提案した。時刻歴応答解析と比較することにより、本提案式は高い精度を有することを示した。

#### 参考文献

- 1) T.Ishihara, M.W.Sarwar: Numerical and Theoretical Study on Seismic Response of Wind Turbines, Proc. of EWEC 2008, 2008.
- 2) Eurocode 8: Design of structure for earth quake resistance; Part1: Genersl rules, seismic actions and rules for buildings, 1998-1:2004.
- 3) Nishimura,I, S.Noda, K.Takemura, S.Ohno, M.Tohdo, and T.Watanabe: Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, Trans. SMiRT16, paper No. 1133, 2001
- 4) 石原孟, 祝磊, ルウン ヴァン ビン: 風力発電設備停止時と発電時における地震応答予測に関する研究, 第 29 回風力エネルギー利用シンポジウム pp.187-190, 2007.
- 5) 石原直: 煙突の地震力ー変断面曲げ棒によるモデル化とそのモード解析ー, 2009 年度日本建築学会関東支部研究報告 pp.269-272, 2009.
- 6) IEC61400-1:wind turbines, Part 1,Third edition