

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

東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○高本 剛太郎
 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 正会員 石原 孟
 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 非会員 M.W.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、風車は一般建築物と比べて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^[1]。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^[1]。

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し、時刻歴応答解析により提案式の精度の検証を行うとともに、信頼性を考慮した地震荷重評価式を提案する。

2. 応答の不確実性を考慮した減衰補正係数の提案

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(1)に示す減衰補正係数 F_{ζ} を提案した。

$$F_{\zeta}(\zeta, T, \gamma) = \left(\frac{7}{2 + 100\zeta} \right)^{aT + b\gamma + 0.5} \quad (1)$$

ここで、 ζ は構造減衰比、 T は構造物の固有周期、 γ はクオンタイル(信頼区間)を表す。式(1)にある係数 a と b を 0 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、 b のみを 0 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^[2]。本研究では構造物の減衰比と固有周期に加え、クオ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ている。

まず、応答スペクトルの不確実性を統計的に評価するために、減衰比を 0.5% から 5% まで変化させ、35 種類の地震波を用いて、応答スペクトルを系統的に求めた。これらのデータを用いて固有周期別の応答加速度の確率分布を求め、対数正規分布に従うことが分かった。次に、

求められた対数正規分布より固有周期別の応答加速度の各パーセンタイルを計算し、ベストフィッティングによって式(1)の係数 a と b を -0.07 と 0.7 に決定した。

図 1 に示すように、提案式により求めた応答スペクトル(実線)は応答加速度の各パーセンタイルの計算結果(プロット)とよく一致している。また、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ていることがわかる。さらに、クオンタイル γ 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を可能にした。図中の点線は Eurocode の減衰補正係数より求めた応答スペクトルの値を示し、ほぼ 20 パーセンタイル値に対応していることが分かった。

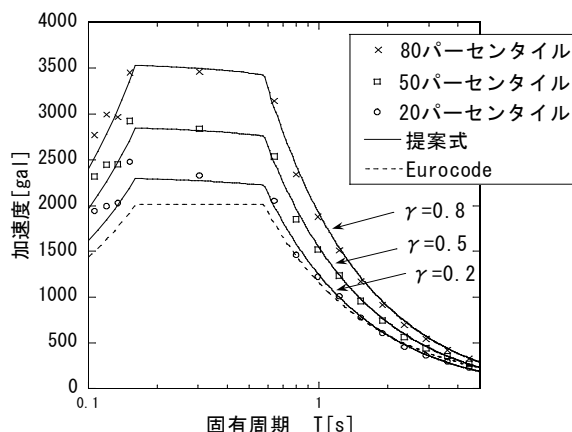


図 1 応答スペクトルの解析結果と予測値の比較

3. 高次モードを考慮した地震荷重の鉛直分布関数の提案

石原らの研究によると、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^[3]。本研究では、風車タワーの j 次モードの刺激関数 $\gamma_j X_{ij}$ も多項式によって表せると仮定し、式(2)により定式化した。

$$\gamma_j X_{ij} = \sum_{k=1} c_{jk} \left(\frac{z_i}{H} \right)^{k+1} \quad (2)$$

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^[4]。表 1 には、式(2)の多項式の係数 c_{jk} と固有周期比 T_j / T_1 を示す。

表 1 式(2)の多項式の係数と固有周期比

j	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 2 には、定格出力 400kW と 2MW の風車の多質点モデルを用いて、固有値解析による 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 2 より、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った。

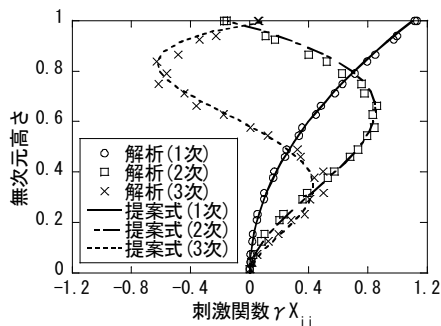


図 2 刺激関数の解析結果と予測値の比較

国際基準 IEC61400 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。そこで、本研究では、3 次モードまでの各次モードによる地震荷重への寄与を計算し、SRSS 法を用いて風車に作用する地震荷重を求めた。図 3 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(THA)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^[3]によるせん断力の鉛直分布を示す。図 3 から、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し、高次モードの影響は大型風車ほど大きいことがわかる。また、従来の評価式は概ね安全側の評価であるとわかる。

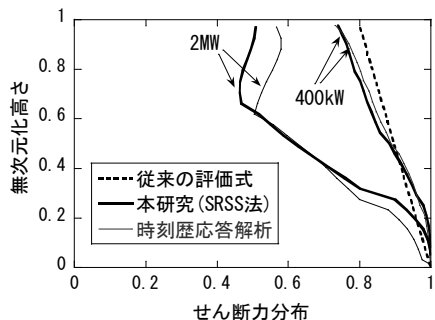


図 3 せん断力の鉛直分布の解析結果と予測値の比較

4. 信頼性を考慮した地震荷重評価式の提案

応答スペクトルの不確実性を評価する減衰補正係数におけるクォンタイルの値を決める必要がある。そこで、本研究では、現行の設計手法とのキャリブレーションを行った。図 4 より、クォンタイル γ の値を 70%として求めた地震荷重(実線)は、観測地震波の位相を用いて作成した地震波による時刻歴応答解析の全結果(点線)に対して、安全側の評価になっていることが分かる。したがって、クォンタイルの値を 70%とした減衰補正係数を用いれば、「平成 12 年建設省告示 1461 号」に基づく時刻歴応答解析と同等の信頼性を有すると言える。

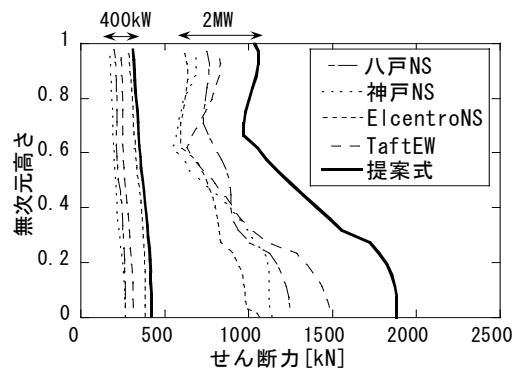


図 4 クォンタイルを 70%とした減衰補正係数を用いて計算したせん断力と解析結果の比較

5. 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 次モードまでのモード形を評価する鉛直分布関数を提案し、時刻歴応答解析により提案式の精度を検証するとともに、現行設計手法とのキャリブレーションを行い、信頼性を考慮した高精度の地震荷重評価式を確立した。

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] 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 [3] 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. [4] 石原直: 煙突の地震カー変断面曲げ棒によるモデル化とそのモード解析一, 2009 年度日本建築学会関東支部研究報告 pp.269-272,2009.