

第I部門

耐風・風工学(1)

[I-226] 風車支持構造物に作用する風と地震の組み合わせ荷重の数値予測
その1 連成解法による最大荷重の予測
Numerical study of combined aerodynamic and seismic loadings on wind turbine support structures Part 1 Prediction of maximum loading using coupled approach

○石原 孟¹、飯田 芳久¹ (1.東京大学大学院工学系研究科)

○Takeshi Ishihara¹, Yoshihisa Iida¹ (1.Graduate School of Engineering, The University of Tokyo)

キーワード：風荷重、地震荷重、連成解法、運転時、停止時

aerodynamic loading, seismic loading, coupled approach, operation time, down time

本研究その1では、地震時の風車運転状態および風方向を考慮した風と地震の組み合わせ荷重が最大となる荷重ケースを明らかにすると共に、運転時・停止時・緊急停止時における風と地震の最大荷重を連成解法により求めた。風と地震が同方向から作用する場合には緊急停止時に荷重が最大となった。これは、緊急停止時における風荷重の除荷が引き起こす振動と地震による振動が重なり合うことによるものである。一方、運転時には、地震が風直角方向から作用する場合、風荷重と地震荷重の合成により荷重が最大となった。これは、風直角方向の空力減衰が小さいことによるものである。

風車支持構造物に作用する風と地震の組み合わせ荷重の数値予測

その1 連成解法による最大荷重の予測

東京大学 正会員 ○石原 孟

東京大学 学生会員 飯田芳久

1. はじめに

風力発電の導入拡大に伴い、地震活動の活発な地域においても風車が建設されており、地震時の荷重評価が重要になっている。地震時に風車に作用する風荷重は無視できず、風と地震による組み合わせ荷重を評価することが求められている。国際規格 IEC61400-1 では運転時・停止時・緊急停止時の風荷重と地震荷重を組み合わせで最大荷重を評価することとしている。

運転時・停止時・緊急停止時には、風と地震を同時に入力する連成解法を用いた研究が行われてきた。Witcher¹⁾は、運転時・停止時・緊急停止時の時刻歴応答解析を行い、緊急停止時に応答が最大となる可能性を示唆した。一方 Asareh ら²⁾は運転時の組み合わせ荷重が最大となると結論付けている。このように、現時点で地震時に最大となる組み合わせ荷重が不明である。

本研究その1では地震発生時の風と地震の作用方向を変化させ、運転時・停止時・緊急停止時の解析を行うことにより、最大となる荷重ケースを明らかにする。

2. 解析モデルと解析条件

本研究では、図1に示す銚子沖の2.4MW風車を対象とする。並進・回転方向の地盤ばねと地盤減衰により地盤と構造物の相互作用を考慮した³⁾。

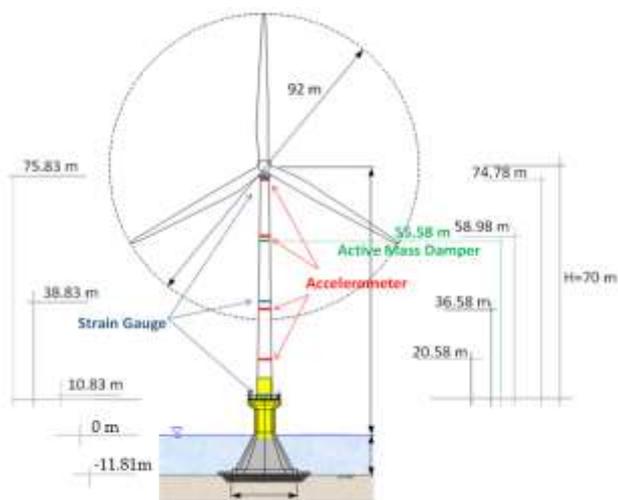
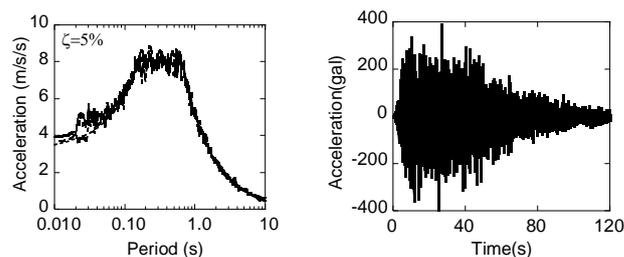


図1 銚子2.4MW風車

本研究では、定常一様流の風条件で解析を行った。また、地震はレベルII地震動を対象としている。図2に示されるように、工学的基盤に定義される設計用加速度応答スペクトルに適合する地震波を作成し、表層地盤に引き上げて風車の基礎に作用させた。



(a) スペクトル

(b) 時刻歴

図2 設計用加速度応答スペクトルと地震波

3. 解析結果

3.1 運転時の荷重

図3に定格風速11m/sで運転している時における風と地震のなす角0度と90度の場合の地震の方向の曲げモーメント時刻歴の一例を示す。風と地震が同方向(0度)のケースに比べ、風と地震が直角となっている(90度)のケースの荷重が大きくなっていることが分かる。これは、0度時に地震の方向における空力減衰が大きく、地震による変動モーメントが小さくなることによる。定格風速を11m/sとして、15波の地震動を作用させた時の平均値も同様な傾向を示す。

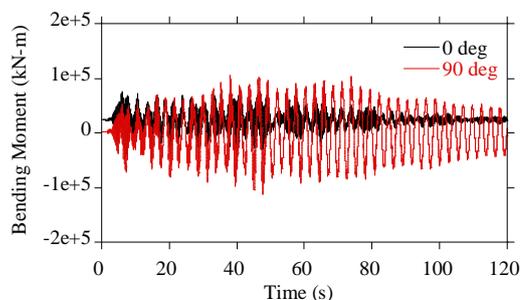


図3 運転時のタワー基部曲げモーメントの時刻歴

3.2 停止時の荷重

図4に停止時における風と地震のなす角0度と90

度の場合の地震方向の曲げモーメント時刻歴（風速 0m/s のケース）を示す。停止時にはブレードがフェザーとなっているため、風直角方向に大きな空力減衰が発生し、風と地震のなす角 90 度の場合に比べ、0 度の場合のモーメントは大きくなる。また、無風時とカットアウト風速 25m/s でのタワー基部荷重を表 1 に示す。停止時には風荷重よりも空力減衰の影響の方が大きく、無風時のタワー基部モーメントが最大となる。

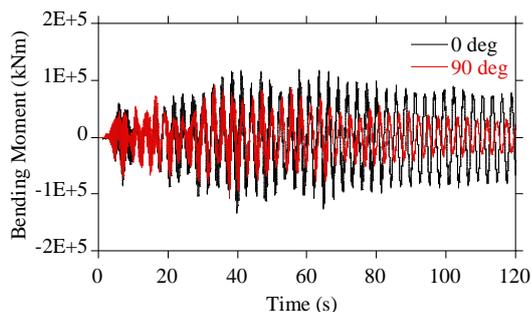


図 4 停止時のタワー基部曲げモーメントの時刻歴

表 1 風速と地震方向ごとのタワー基部モーメント

Wind Speed	Bending moment (kN·m)	
	0 degree	90 degree
0 m/s	99,004	91,347
25 m/s	92,485	77,697

3.3 緊急停止時の荷重

図 5 には地震による緊急停止が生じた場合の曲げモーメントの時刻歴を示す。風速は定格風速の 11m/s としている。緊急停止時には風荷重の除荷による振動が生じるため、風と地震のなす角が 0 度の場合には地震によるモーメントと重なり合うことにより応答が増大することがある。この場合には緊急停止によりブレードがフェザーとなるため、風方向には空力減衰が小さくなり、風と地震のなす角が 0 度の場合における緊急停止時のモーメントが大きくなる。

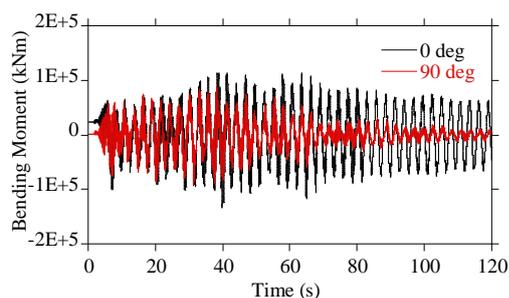


図 5 緊急停止時のタワー基部曲げモーメントの時刻歴

3.4 荷重最大を与える荷重ケース

地震荷重の最大値として、信頼性レベル 85% を考える。15 個の地震波を用いてそれぞれに対応する荷重を求め、荷重が正規分布に従うと仮定して、以下の式により信頼性レベル 85% に対応する最大曲げモーメントを計算した。

$$M_{85} = M_{ave} + 1.04\sigma \quad (1)$$

ここで、 M_{85} は信頼性レベル 85% の曲げモーメント、 M_{ave} 、 σ はそれぞれ曲げモーメントの平均値と標準偏差である。図 6 に風と地震のなす角ごとのタワー基部モーメントの最大値を示す。0 度では緊急停止時が、90 度では運転時の荷重が最大となることが分かる。

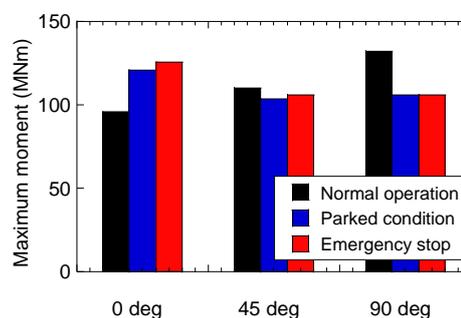


図 6 タワー基部曲げモーメント最大値のまとめ

4. まとめ

本研究その 1 では、風と地震の角度を考慮した運転時・停止時・緊急停止時の解析を行い、空力減衰が風と地震の組み合わせ荷重に大きな影響を与えることを示した。風と地震が同方向な場合には緊急停止時に最大荷重となるが、地震が風と直角方向となる場合には運転時の荷重が最大となることを明らかにした。

参考文献

- 1) D. Witcher: Seismic Analysis of Wind Turbines in the Time Domain, Wind Energy 8, 81-91, 2005.
- 2) M. A. Asareh, W. Schonberg and J. Volz: Effects of Seismic and Aerodynamic Load Interaction on Structural Dynamic Response of Multi-Megawatt Utility Scale Horizontal Axis Wind Turbines, Renewable Energy 86, 49-58, 2016.
- 3) T. Ishihara, L. Wang: A Study of Modal Damping for Offshore Wind Turbines Considering Soil Properties and Foundation Types, Wind Energy, Volume 22, Issue 12. pp.1760-1778, 2019.