

[I-227] 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2 分離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 2 Prediction
of maximum loading using uncoupled approach

○飯田 芳久¹、石原 孟¹ (1.東京大学大学院工学系研究科)

Olida Yoshihisa¹, Takeshi Ishihara¹ (1.Graduate School of Engineering, The University of Tokyo)

キーワード：風荷重、地震荷重、分離解法、SRSS法、ベクトル和

aerodynamic loading, seismic loading, uncoupled approach, SRSS, Vector sum

風荷重と地震荷重を別々に計算し、2つの荷重を組み合わせることにより最大荷重を分離解法から予測した。ブレードとナセルの質量分布を再現する多質点モデル（SLM）を用いて求めた最大荷重は、空力減衰の空間分布を考慮することにより、連成解法による最大荷重と一致する結果が得られた。ブレードとナセルの質量分布を1質点に集約する集中質量モデル（ALM）は最大荷重を過大評価している。運転時における風荷重と地震荷重のベクトル和および緊急停止時ににおける風荷重と地震荷重のSRSS法による合成値は、連成解法の結果とよく一致した。

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2 分離解法による最大荷重の予測

東京大学 学生会員 ○飯田芳久

東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

空力弾性解析を用いた連成解法により、風と地震の組み合わせ荷重を厳密に評価できるが、材料の非線形性を考慮することが難しい。一方、風荷重と地震荷重を別々に計算する分離解法では、材料の非線形性を考慮した解析を行うことができるが、風と地震応答の相互作用を考慮する必要がある。

現状では、風と地震応答の相互作用を厳密に考慮できる分離解法が提案されておらず、国際基準 IEC61400-1 に示れている風荷重と地震荷重の組み合わせ方法の妥当性も検証されていない。また、地震荷重の評価にはロータとナセルを 1 質点に集約した簡易モデル¹⁾ (以下、ALM モデルと呼ぶ) が利用されてきたが、ロータとナセルの質量と空力減衰の分布が風と地震応答に与える影響は明らかにする必要がある。

本研究その 2 ではロータとナセルの質量と空力減衰分布を再現したモデル (以下、SLM モデルと呼ぶ) を作成し、時刻歴応答解析を行うと共に、ALM モデルの結果を比較することにより、質量と空力減衰の分布の影響を明らかにする。また、分離解法における風荷重と地震荷重の組み合わせ方法を提案し、連成解法との比較により、提案手法の推定精度を明らかにする。

2. 風車モデル

本研究では、地盤と構造物の相互作用を地盤ばねと地盤減衰で考慮できる SR モデルを用いた、風荷重は空力弾性解析ソフトを用いて計算し、地震荷重は図 1 に示す ALM モデルと SLM モデルを用いて計算した。

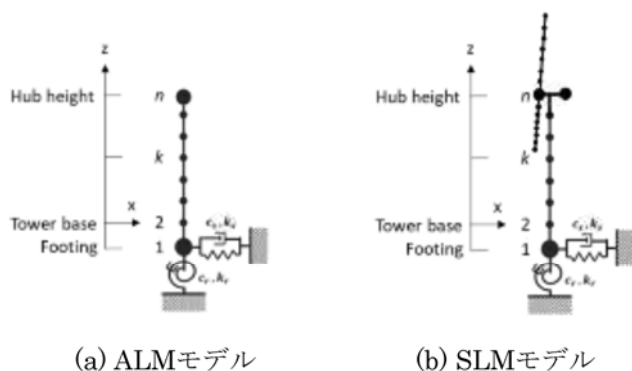


図 1 風車の SR モデル

空力減衰は Valamanesh and Myers²⁾により提案された方法を用いて計算した。ALM モデルでは空力減衰をハブ高さに集約された 1 つのダッシュポットとして与え、SLM モデルではブレードに分布させて与えた。

3. 分離解法による地震荷重の推定

本研究その 1³⁾では、地震時に最大荷重を与えるケースとして運転時または緊急停止時を示したため、ここでは、この 2 つのケースに着目して分離解法による地震荷重の推定を行い、連成解析の結果と比較する。

3.1 運転時の荷重

運転時の曲げモーメントは、風荷重と地震荷重のベクトル和として、式(1)により計算する。

$$M_i = \sqrt{(|M_{si,x} \cos \theta| + M_{wi})^2 + (M_{si,y} \sin \theta)^2} \quad (1)$$

ここで、 M_i は第*i*層の曲げモーメント、 $M_{si,x}$ と $M_{si,y}$ はそれぞれ風方向と風直角方向から地震が作用した場合の第*i*層の曲げモーメント、 M_{wi} は風による第*i*層の曲げモーメントである。また、 θ は地震の作用方向と風向がなす角である。

連成解法および ALM モデルと SLM モデルを用いた分離解法により曲げモーメントを求めた。図 2 と図 3 には、地震と風のなす角 0 度と 90 度の時の曲げモーメントの鉛直分布を示す。ALM を用いた分離解法は、タワー基部の曲げモーメントを過大評価するが、SLM モデルを用いた分離解法は連成解法に近い結果を示した。ALM モデルの荷重の過大評価は、ロータの慣性 2 次モーメントと空力減衰の空間分布の影響を無視したことによるものである。

図 4 には、曲げモーメントのスペクトルを示す。SLM モデルを用いた分離解法から得られたスペクトルは連成解法のそれとよく一致するが、ALM モデルは 2 次モードを過大評価することが分かる。ロータとナセルの質量および空力減衰分布を単純化することで、荷重を過大評価したと思われる。

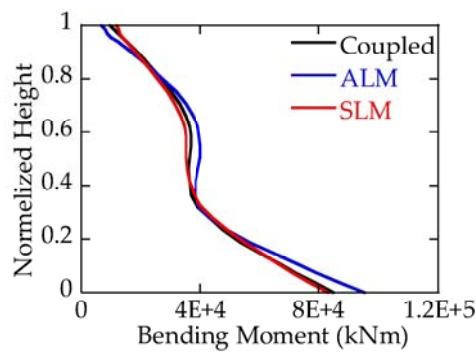


図2 風と地震のなす角0度での曲げモーメント

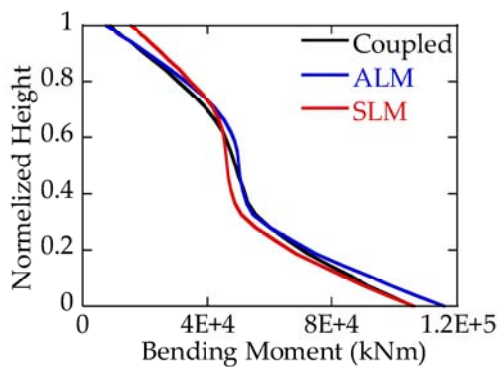


図3 風と地震のなす角90度での曲げモーメント

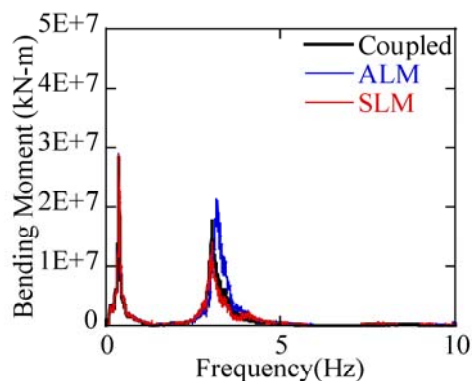


図4 タワー基部曲げモーメントのスペクトル

3.2 緊急停止時の荷重

緊急停止時の荷重は、緊急停止により発生するモーメントと地震によるモーメントが重なり合うことにより生じる。緊急停止により発生する最大荷重と地震により発生する最大荷重は無相関であることを考え、分離解法による求めた地震荷重の最大値と緊急停止により発生する最大荷重は、式(2)に示すSRSS法により計算出した。

$$M_i = \sqrt{M_{ES,i}^2 + M_{S,i}^2} \quad (2)$$

ここで、 $M_{ES,i}$ は緊急停止による第*i*層の曲げモーメント、 $M_{S,i}$ は地震による第*i*層の曲げモーメントである。

図4には分離解法で推定した緊急停止時の曲げモーメントと連成解法で求めた緊急停止時の曲げモーメントの比較を示す。SLMモデルを用いて分離解法により求めた風と地震の組み合わせ荷重は、連成解法により求めた組み合わせ荷重に比べ、タワー基部において若干大きいものの、分布はよく一致することが分かる。

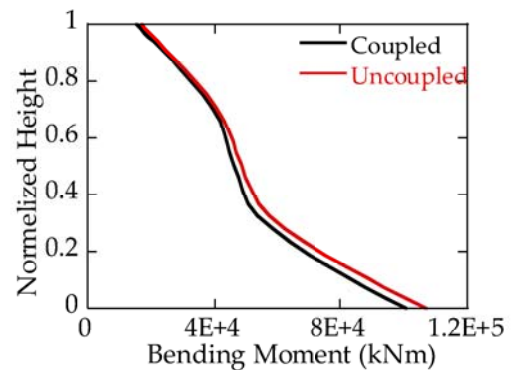


図5 緊急停止時曲げモーメント

4. まとめ

本研究では、ロータとナセルの質量と空力減衰分布を無視したALMモデルと、ロータとナセルの質量と減衰空力分布を再現したSLMモデルを用いて分離解法により地震荷重を求め、連成解法により求めた風と地震の組み合わせ荷重と比較した。SLMモデルは連成解法による最大荷重と一致する結果が得られたが、ALMモデルは最大荷重を過大評価する。また、運転時における風荷重と地震荷重のベクトル和および緊急停止時における風荷重と地震荷重のSRSS法による合成値は、連成解法の結果と一致することを明らかにした。

参考文献

- 1) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010年版，2010。
- 2) V. Valamanesh and A. T. Myers: Aerodynamic Damping and Seismic Response of Horizontal Axis Wind Turbine Towers, Journal of Structural Engineering, Vol. 140, No.11, 2014.
- 3) 石原孟，飯田芳久：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 荷重最大となる組み合わせの検証，第75回土木学会年次学術講演会講演概要集，2020。