

審査の結果の要旨

論文題目

精緻化した乱流モデルと空力弾性モデルを用いた風車の動的応答予測に関する研究
(Prediction of dynamic response of wind turbines by using updated turbulence model and
aero-elastic model)

氏名 福王 翔

近年風力発電の導入が急速に進んでいる。一方、国内において疲労による風車の倒壊事故が発生しており、風車の変動荷重および疲労寿命を求めるための動的応答予測の精度向上が急務となっている。風車の動的応答を予測するには空力弾性解析が広く用いられるが、風車構造パラメータおよび乱流モデルについていくつかの問題点が指摘されている。まず風車の構造パラメータについては、風車 1 次モードの減衰比の値は国内外の設計指針において 1.0%から 0.2%の間で大きくばらついている。また風車の 2 次モードは風により励起されにくいため、各指針では経験的に 1 次モードと同じ値が用いられているのが現状である。次に風速場モデルについては、平均風速や乱流強度に関するパラメータが建設地点の風況を考慮して決められているのに対して、乱流スペクトルおよびそのスケールに関しては風況への依存性について不明な点が残されている。

そこで、本研究では、まず風車の構造パラメータは実風車の加振試験により求めるとともに、空力弾性解析を実施することにより、実風車の空力減衰比と構造減衰比を評価する。次に銚子沖の洋上観測タワーの複数高度から得られた 3 成分の風速データから三次元風速場の乱流モデルを作成することにより、風車の動的応答予測の精度向上を目指す。最後に、精緻化されたモデルを用いて、風車の構造パラメータおよび乱流モデルが地震荷重および発電時の変動荷重に与える影響を定量的に評価する。

第 1 章は、本研究の背景および既往研究をレビューし、これまでの問題点について明らかにするとともに、本論文の構成を示した。

第 2 章では空力弾性解析に必要な三次元風速場の生成手法、風車に作用する空気力の評価手法、風車の制御モデルおよび空力弾性解析について概説した。

第 3 章では、2.4MW 風車においてアクティブマスダンパーを用いた強制加振試験を実施し、ピッチフェザー時の 1 次モード減衰比が 0.2%、2 次モード減衰比が 2.4%であるのに対し、

ピッチファイン時の 1 次モード減衰比が 1.0%, 2 次モード減衰比が 2.4%であることを示した。またブレード振動に伴う非定常効果を考慮した等価空気力係数を用いることにより、風車の減衰比の異方性を再現することに成功し、風車 1 次モードの固有周期と減衰比との関係式を提案した。構造パラメータの精緻化が地震荷重に与える影響は 500kW の中型風車と 2MW 大型風車を用いて評価した。

第 4 章では、3 成分の風速スペクトルと相関関数を同時に評価できるカルマンモデルの修正式を提案するとともに、洋上風況観測データを用いて提案したモデルの検証を行った。次に、洋上風況観測のデータからカルマンモデルにおける 3 成分の乱流スケールを評価し、既存の設計指針により規定された値より小さいことを示した。乱流モデルが風車の変動荷重に与える影響は、静止時の風車に対する空力弾性解析の結果と観測値の比較を行い、提案モデルにより予測精度が向上することを示した。

第 5 章では、倒壊事故が発生した太鼓山風力発電所の風車を対象に精緻化した空力弾性解析を適用するとともに、FEM 解析を行うことにより、ボルトの導入軸力の低下に伴い応力の変動幅が増加したことを明らかにした。疲労解析の結果から、軸力が 30%以下に低下した場合には 1 年程度で高力ボルトが疲労破壊する定期点検の記録と一致した。また高力ボルトおよびタワー筒身の疲労寿命について、乱流スケールを系統的に変化させ、その影響を明らかにした。

第 6 章では、これまでの章で得られた結論についてまとめた。

以上のように、本論文は、風車の構造パラメータは実風車の加振試験を行うことにより明らかにするとともに、空力弾性解析により風車の空力減衰比と構造減衰比を明らかにし、風車の 1 次モードの固有周期と減衰比との評価関係式を提案した。また銚子沖の洋上観測タワーの複数高度から得られた 3 成分の風速データから三次元風速場における新しい乱流モデルを作成し、風車の動的応答予測の精度を向上させた。最後に、精緻化されたモデルを用いて、風車の構造パラメータおよび乱流モデルが地震荷重および発電時変動荷重に与える影響を明らかにした。

これらの研究成果は、風車の動的応答予測の高精度化を可能にし、今後洋上における風力発電所の構造設計に大きく貢献するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認める。