

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 祝 磊

風力発電設備支持物の構造設計においては通常風荷重が支配的である。しかし、日本は地震活動の活発な地域であり、地震荷重が支配的となる可能性があるが、これまでに風力発電設備支持物の地震応答に関する研究はほとんどない。地震時の風力発電設備支持物に作用する荷重を評価する手法としては、時刻歴応答解析が挙げられる。この手法を用いた過去の解析例では、ローターとタワーの間の弱連成を仮定したモーダルモデルと、ローターの質量分布を無視した集中質量モデルが使われてきたが、いずれも近似モデルであり、地震応答を過大に評価する傾向がある。もう一つの方法は等価静的法であり、UBC モデル（ユニフォームビルディングコード）や IEC の簡易モデル（IEC 61400-1 に推奨されているモデル）が用いられてきた。しかし、UBC モデルは一律に 5% の減衰比を仮定しており、風力発電設備支持物のそれと大きく異なる。また IEC の簡易モデルはせん断力の分布を一様と仮定したため、風車タワーに作用する地震荷重を過大評価する問題がある。

そこで、本研究では非線形有限要素法に基づく地震応答予測プログラムを開発し、風車ローターとタワーの間の連成効果、ローターの質量分布の効果、ローター回転による空力減衰効果、風と地震の作用方向の違いによる影響を明らかにするとともに、風車停止時と発電時における地震荷重を求めるための半理論式を提案した。

第 1 章は序論であり、本研究の背景並びに風力発電設備の動的特性について述べるとともに、本研究の目的と構成を記述している。

第 2 章は、既往研究のレビューを述べている。従来の風力発電設備の動的解析に関する数値モデルをまとめるとともに、風力発電設備における時刻歴応答解析手法や、等価静的力を予測するための応答スペクトル法についてのレビューを行った。

第 3 章は、風力発電設備支持物構造設計のための応答スペクトルを提案した。工学的基盤上に定義された基準化応答スペクトルに、表層地盤による増幅率と減衰補正係数を乗じることにより、基礎底面での応答スペクトル求めた。本研究で提案した応答スペクトルは、大型風車の固有周期に対応する長周期領域において、6 つの代表的な地震波から算出した応答スペクトルを包含することがわかった。

第 4 章は、風車のローターとタワーの詳細構造を含む非線形有限要素法に基づく地震応答予測プログラムを開発し、風車ローターとタワーとの連成効果を忠実に再現し、ローターの回転に伴う幾何学非線形性の効果をニュートンラプソン法を用いて反復計算により厳密に求めた。その結果、風車ローターとタワーとの連成効果や、ローターの質量分布の効果は風車タワーの 1 次固有モードにはほとんど影響を与えないことや、高次モードに大きな影響を与えることを明らかにした。

第 5 章は、第 4 章で開発したプログラムを用いて風力発電設備の時刻歴応答解析を行い、

風車停止時における地震応答を精度良く予測できることを示すとともに、弱連成を仮定したモーダルモデルと、ローター質量分布を無視した集中質量モデルが、地震応答を過大に評価する理由を明らかにした。風車発電時においては、風の方向と地震力の作用方向がなす角度が 45 度のとき、最も大きい地震応答が現れることや、ローターの回転効果により、その値が 0 度のときより若干高いことを明らかにした。一方、風車ローターの回転に起因するスラスト力を考慮した数値解析モデルは、風の方向と地震力の作用方向が一致する場合の応答を正しく予測できるが、風の方向と地震力の作用方向が一致しない場合の応答を過小評価することを明らかにした。また、風と地震力が同時に作用する場合の応答は、それぞれの荷重による応答の単純和より小さいことや、地震動が大きい時には、地震力のみ作用した場合の地震応答よりも小さいことを明らかにした。

第 6 章では風力発電設備支持物構造設計のための半理論式を提案した。風車タワー基部のせん断力と、曲げモーメント及びその鉛直分布を求めるための式を理論的に導出するとともに、高次モードがタワー基部のせん断力に与える影響を考慮した補正係数を提案した。また、風車発電時の地震荷重に関しては、風車ローターの回転に起因する空力減衰を考慮した理論式を導出した。本研究で提案した半理論式は、数値解析の結果とよく一致し、UBC モデルや IEC の簡易モデルより予測精度が高いことを明らかにした。最後に、日本に設置される風車の設計風荷重と地震荷重を比較することにより、規模の小さい風力発電設備は設計風速の低い地域において地震荷重が支配的であり、規模の大きい風力発電設備はいずれの地域においても風荷重が支配的であることを明らかにした。

第 7 章は結論であり、第 6 章までに得られた結論をまとめるとともに、今後の課題に言及している。

以上のように、本論文では、幾何学非線形性およびローターとタワーの連成を厳密に考慮した地震応答予測プログラムを開発し、それを用いて風車停止時および発電時の地震応答解析を行うことにより、ローターとタワー間の連成効果、ローターの質量分布の効果、ローター回転による空力減衰の効果並びに風と地震力の作用方向の違いによる影響を明らかにするとともに、風車停止時および発電時における地震荷重を評価するための半理論式を提案し、数値解析結果と比較することにより、従来の設計コードと比較して高い予測精度を有することを示した。これらの研究成果は風力発電設備の地震応答予測に有用な解析ツールを提供し、風力発電設備の耐震安全性の向上に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。