

## 審査の結果の要旨

### 論文題目

#### Numerical study of dynamic loading on wind turbine supporting structures considering nonlinear soil-structure interaction

(地盤と構造物の非線形相互作用を考慮した風力発電設備支持構造物に作用する動的荷重の数値予測)

氏 名 王 立林

近年、風力発電の導入拡大に伴い、台風および地震による風力発電設備支持構造物の損傷が世界各地で報告され、その対策は急務である。風力発電設備支持構造物の設計では、疲労限界状態 (FLS)、終局限界状態 (ULS) および地震による偶発荷重状態 (ALS) を考慮する必要がある。疲労限界状態および終局限界状態を対象とする動的解析では、風車と地盤の相互作用を考慮したモード形とモード減衰比を正確に設定する必要がある。地盤特性と基礎形式がモード減衰比に与える影響を調べた研究例が少なく、その評価方法は確立されていないのが現状である。一方、地震による偶発荷重状態を対象とする動的解析では、地盤バネおよび減衰に関する非線形モデルが必要であり、また大地震の時ににおける基礎の浮き上がりに起因する地盤のバネおよび減衰の不連続性を考慮できるモデルが必要である。現在の耐震設計では、風車と地盤の相互作用を表す SR モデル (Sway-Locking model) では地盤バネと減衰について等価線形モデルを用いており、基礎の浮き上がりを正確に表現できず、風車タワーおよび基礎フーチングに作用する荷重を過大または過小評価する可能性がある。

そこで、本研究では、まず実際の洋上風力発電設備を対象に風車と地盤の相互作用を考慮する線形モデルを構築し、モード形状とモード減衰比を正確に予測すると共に、地盤特性と基礎形式がモード減衰比に及ぼす影響を系統的に調べ、モード減衰比の生成メカニズムを明らかにした。そして、重力基礎を対象に、地盤の非線形性と基礎の浮き上がりに起因する幾何学非線形性を考慮できるモデルを構築し、室内試験により、その予測精度を検証した。最後に、地震荷重時における基礎の浮き上がりが風車支持構造物に作用する地震荷重への影響を調べ、現在の耐震設計で用いられている SR モデルは風車タワーおよびフーチングに作用する荷重を過大または過小評価するメカニズムを明らかにした。

第1章では、風力発電の現状および地震による風車タワーと基礎の損傷事例を示すと共に、本研究の目的を述べる。

第2章では、現行の風車指針および既往研究の問題点を整理し、本研究で解決すべき課題を設定すると共に、本論文の構成を示す。

第3章では、まず実際の洋上風車モデルを作成し、重力式およびパイル式洋上風車の1次と2次モードにおけるモーダル減衰比と周波数を求めた。遺伝的アルゴリズム (GA) から同定した地盤パラメータを用いることにより、予測されたモーダル減衰比と周波数およびモード形状は、2種類の基礎とも現地観測から得られた値とよく一致した。次に、地盤特性と基礎形式がモーダル減衰比に与える影響を明らかにするために、感度分析を実施した。重力式洋上風車の場合には、地盤特性が2次モードのモーダル減衰比に大きな影響を与えるが、1次モードのモーダル減衰比にほとんど影響を及ぼさない。一方、モノパイル式洋上風車の場合には、地盤特性が1次と2モードのモーダル減衰比の両方に大きな影響を及ぼすことが分かった。最後に、簡易モデルにより、地盤特性と基礎形式が1次モードのモーダル減衰比に与える影響を調べ、地盤剛性の減少に伴うモノパイル式洋上風車の1次モードのモーダル減衰比が増大する理由は、モノパイルのローキング運動によるものであることを明らかにした。

第4章では、まず、重力式基礎の動的解析を行うために、地盤の非線形性を表す PySimple3 モデルと基礎の浮き上がりに起因する幾何学的非線形性を表すギャップモデルと組み合わせる新しい Winkler モデルを提案すると共に、異なる地震動下における橋脚の振動台試験の結果により、予測精度を検証した。提案したモデルは、実験から得られた  $q$ - $z$  曲線とよく一致するのに対し、従来の QzSimple2 モデルは線形領域において過大評価していることを示した。提案したモデルにより予測された上部構造と基礎の応答が両方とも実験値とよく一致しているのに対して、従来のモデルにより予測された基礎の沈下量が過小評価され、上部構造の加速が過大評価されることが分かった。

第5章では、地盤と構造物の相互作用モデルを用いて、基礎の浮き上がりを考慮する場合と考慮しない場合の風車タワーと基礎フーチングに作用する地震荷重を調べた。地震動が小さい場合には、浮き上がりが発生せず、本研究で提案したモデルと従来の SR モデルから求めた風車タワーと基礎フーチングに作用する地震荷重に殆ど差が見られない。一方、地震動が大きい場合には、基礎の浮き上がりが発生し、従来の SR モデルが基礎フーチングに作用する地震荷重を

過小評価し、風車タワーに作用する地震荷重を過大評価することが分かった。

第 6 章では、本研究から得られた結論をまとめている。

本研究から得られた成果は、風力発電設備支持構造物の耐風設計に必要なモーダル減衰比の評価方法および風車基礎の浮き上がりに伴う地震荷重の評価手法を提供し、風力発電設備支持構造物の耐風・耐震設計の高度化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られる。