

風力発電設備の風荷重評価に関する数値的及び理論的研究

その1 実風車における現地観測と風応答解析

Numerical and theoretical study of the evaluation of wind load on wind turbine: Part 1 Onsite measurement and wind response analysis

○ 石原 孟¹⁾ ファバンフック²⁾ 高原景滋³⁾ 銘苺壮宏³⁾
Takeshi ISHIHARA¹⁾ Pham Van PHUC²⁾ Keiji TAKAHARA³⁾ Takehiro MEKARU³⁾

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの導入促進により風力発電設備が急速に増えている。一方、風力発電設備の被害も報告され、風車の耐風安全性の向上が緊急の課題となっている¹⁾。風車を設置する際には、風車のタワーと基礎に作用する風荷重を厳密に評価する必要がある。しかし、風車本体(ブレード、ナセル、制御機構など)に関する詳細データはメーカーの秘密事項となっているため、風車の耐風設計に必要な情報が不足しているのが現状である。また我が国においては、実風車に関する観測例が少なく、風車の固有振動数、構造減衰数については不明な点が多く残されている²⁾。

本研究では、400kW ストール制御の風車を対象に風向・風速、タワー頂部の応答加速度、タワー脚部の動歪みの計測を実施し、応答加速度の観測データに基づき風車の固有振動数、構造減衰を推定すると共に、動歪みからタワー基部における転倒モーメントを求めた。また、風車の多質点モデルを作成し、風応答解析を行うことにより、風車の振動特性を明らかにすると共に、観測結果と比較することにより、本研究で開発された風応答解析手法の予測精度を検証した。

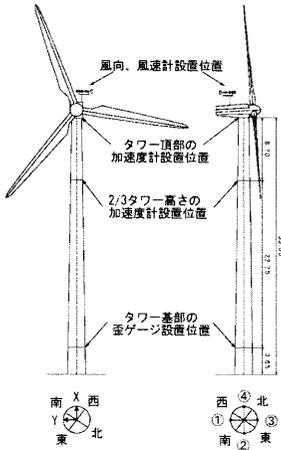


図1 風車の全体図と計測機器の設置位置

2. 現地観測の概要

現地観測は宮古島にある沖縄電力が所有する狩俣4号風車を対象に、2004年1月16日から2004年3月16日にかけて、2ヶ月にわたり実施した。図1には風車の全体図と各計測装置の設置位置を示す。観測項目は風向・風速の他、風車タワーの頂部(35.1m)と2/3の高さ(26.4m)における応答加速度、タワー脚部(3.65m)における動ひずみである。加速度の計測にはサーボ型加速度計(SS-500)を採用し、それぞれの高さにおいて2台ずつを設置し、ナセル方向(X方向)とナセル直角方向(Y方向)の測定を行った。また、風荷重を評価するためにタワーの基部にはX方向とY方向に2箇所ずつに圧縮引張用ひずみゲージを設置し、動ひずみ計測を行った。

3. 風車の振動特性

3.1 風車の固有振動数 図2には観測により得られた応答加速度の波形から求めたパワースペクトル密度を示す。この図から、タワー頂部では低い周波数(0.81Hzと2.43Hz)のところにはっきりしたピークが見られ、最も低い周波数0.81Hzのピークは風車タワーの1次固有振動数に対応していると思われる。一方、タワーの2/3の高さでは2つの低周波数のピークに加え、4.62、5.58、6.42、6.85、7.59Hzのところにも明確なピークが見られる。風車の場合にはブレードとタワーとの連成振動モードが存在し、複雑な振動特性をもっていることが分かる。

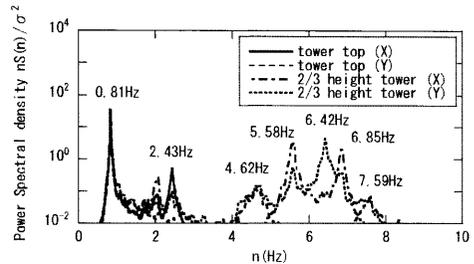


図2 応答加速度のパワースペクトル密度

1) 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 助教授
Assoc. Prof. Institute of Eng. Innovation, Univ. of Tokyo
2) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 大学院生
Graduate Student Dept. of Civil Eng., Univ. of Tokyo

3) 沖縄電力株式会社、研究開発部
Research & Development Dept., Okinawa Electric Power Co., Inc

3.2 風車の減衰 風車の減衰には構造減衰と空力減衰の二つの部分が含まれ、厳密に分けることが難しい。本研究では RD 法³⁾を用い、応答加速度から求めた減衰比を風速の関数として図 3 に示した。減衰比は風速によりバラツキが大きく、はっきりした傾向が見られない。X 方向の減衰比の平均値は約 1%、Y 方向の減衰比の平均値は約 0.6%である。本研究では風速が比較的低い日 (6m/s) を選び、人力加振試験を実施し、ナセル方向 (X 方向) の構造減数は約 1%であることを確認した。

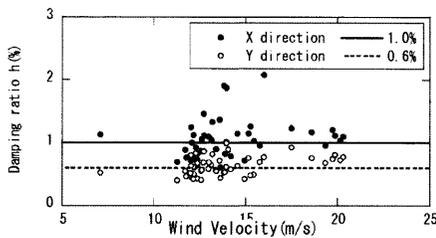


図 3 風速による減衰比の変化

表 1 固有振動数の現地観測と固有値解析との比較

No	観測 (Hz)	固有値解析 (Hz)		
		ブレード	タワー	風車全体
1	0.81	2.575	0.854	0.81
2	0.81	6.187	0.854	0.81
3	2.43	-	6.938	2.41
4	2.43	-	6.938	2.53
5	2.43	-	-	2.62
6	4.62	-	-	4.51
7	5.58	-	-	5.26
8	5.58	-	-	5.73
9	6.42	-	-	6.21
10	6.85	-	-	6.35

4. 風車の風応答解析

4.1 固有値解析 風車の固有振動数と振動モードを明らかにするために、本研究で開発された多質点風応答解析プログラムを用いて、ブレード(ブレードのみ)、タワー(ブレード、ハブ、ナセルはタワー頂部の集中質量として簡略化)、風車全体(ブレード、ハブ、ナセル、タワーをモデル化)のモデルを作成し、固有値解析を行った。表 1 には各モデルの解析結果と観測値との比較を示した。この表から観測により得られた 1、2 次また 9、10 次モードはタワーモデルの 1、2 次また 3、4 次モードに対応し、3、4、5 次モードはブレードの 1 次モードに対応していることが分かる。また風車全体のモデルは風車の各部分を詳細にモデル化したことにより、観測された風

車のすべての振動数を再現することができた。

4.2. 風応答解析の結果 本研究で開発された多質点風応答解析プログラムの予測精度を検証するため、風車全体のモデルを用いて、風応答解析を行った。タワー及びナセルの抗力係数についてはそれぞれ 0.7、1.3 の一定値を用い、またブレードの各断面における抗力と揚力係数は翼厚比 12%と 21%の翼断面の空気力係数から内挿して求めた。風車全体に作用する 3 成分の変動風速は文献 4 に従い発生し、北風に対して風応答解析を行い、現地観測から得られた風車タワーの転倒モーメントの最大値、平均値、標準偏差と比較した。各風速レベルにおいては予測された転倒モーメントの最大値、平均値、標準偏差とも観測値とよく一致し、本プログラムの有効性が示された。

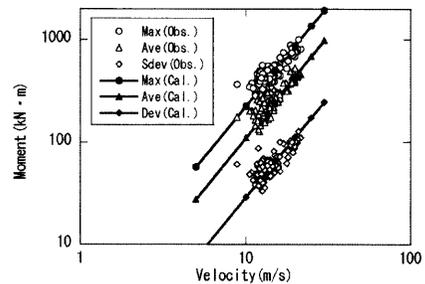


図 4 タワー基部の転倒モーメントの風速による変化

5. まとめ

本研究では 400kW ストール制御の風車を対象に現地観測を行い、実風車の固有振動数と減衰を明らかにした。また固有値解析により観測された振動数を精度よく再現し、更に風応答解析により観測されたタワー基部における転倒モーメントも精度よく再現した。

謝辞 本観測の実施にあたり、サンシステムサプライ(株)岸尚弘氏、清水建設(株)の嶋田健司主任研究員、また風応答解析においては電力中央研究所(財)の清水幹夫主任研究員にご指導及びご助言を頂いた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献 1) 石原孟:我が国の風力開発における技術課題と将来展望、電力土木、No.314、pp3-9、2004。2) 棚邊隆、他:風力発電設備の動的特性と耐震設計の基礎的考察、NKK 技報、No.177、2002。3) 勝地弘、他:常時微動データによる明石海峡大橋の固有振動特性、構造工学論文集、Vol.50A、pp.637-646、2004。4) 岩谷祥美:任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション、日本風工学会誌、No.11、pp5-18、1982。