

風力発電タワー振動長期計測に基づく基礎疲労照査のための作用の推定

法政大学 学生会員 ○米津 薫 法政大学 正会員 藤山知加子
 日本大学 正会員 子田 康弘 日本大学 学生会員 前島 拓
 日揮(株) 正会員 門 万寿男

1. はじめに

風力発電設備は発電効率や経済性の面から長寿命化・耐久性の向上が期待されており、風車支持構造物の疲労破壊に対する適切な照査が求められている。照査には、複雑な風況が構造物へおよぼす作用を把握して構造物の応答解析を行う必要がある。そこで本研究では、高感度加速度センサやひずみ計を用いた実風車の長期振動計測から構造物の応答を分析することで、今後の疲労照査に必要な作用を逆推定することを試みた。

2. 実測概要

2.1 計測項目

実測の対象は、福島県郡山市日本大学工学部の40kW級風力発電設備1基である。ハブ高さ21mの小型風車であり、鋼製タワーとRC基礎はアンカーボルト方式により接合されている。表1、図1に設備の概要を示す。

2.2 計測条件

タワーの頂部と中間部に位置する2箇所の踊り場に、加速度センサを振動の水平成分の各2成分ずつ設置した。計測条件は毎時5分間計測のインターバル計測と、相対値で $\pm 0.7 \text{ m/s}^2$ の応答が観測された前後5分間の計測を行うトリガー計測を併用し、サンプリング周波数は200Hzとした。また、東西南北に位置するアンカーボルト4箇所のナット部に、ひずみゲージを設置し計測を行った。計測条件は加速度センサに準じる。計測期間は2013年5月17日から2014年3月現在まで継続して計測を行っている。

3. タワーと基礎部の風応答特性

3.1 風速と加速度の相関

図2に10月の最大加速度と最大風速の関係を示す。黒点で示される運転風速範囲(2~20m/s)では、ばらつきはあるものの応答加速度と最大風速には線形関係が確認された。一方、線形関係から離れた赤色のプロットは風車のフェザリング時のものであり、応答加速度は風速に対して小さい。

図3にタワー頂部と中間部の時刻歴応答加速度の波形の例を運転風速範囲別に示す。カットイン風速後では風速に伴い応答値が大きくなるが、定格風速を越えると既往の研究と同様に風車の制御運動(フェザリング)によるタワーの振動は抑制されることが確認できた。

3.2 風車タワー振動特性

応答加速度にフーリエ変換を施し、スペクトル図を算出した一例を図4に示す。風車の1次、2次固有周波数は、固有値解析の結果よりそれぞれ1.8Hz、13Hzである。発電時のスペクトル形状は多くの場合、図4のように1次モードが卓越するが、1次モードから2次モードまでの間にもいくつかの周波数ピークが見られた。

表1. 風車規格

設置場所	日大工学部(郡山)
ロータ位置	アップウィンド
ロータ回転数	18~69rpm
定格出力	40kW
運転風速範囲	2.0~25m/s
定格風速	11m/s

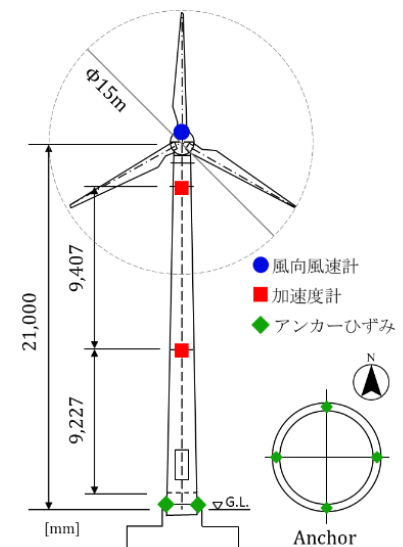


図1. 計測概要

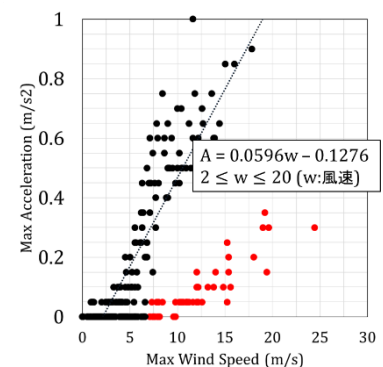


図2. 10月風速-加速度

キーワード 風車, 振動計測, 応答加速度, アンカーボルト, フーリエスペクトル

連絡先 162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33 法政大学大学院 TEL 050-3136-4675

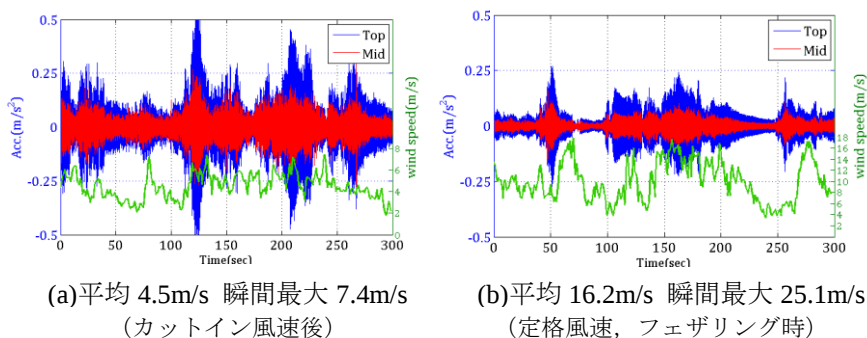


図 3. 運転風速範囲における応答加速度

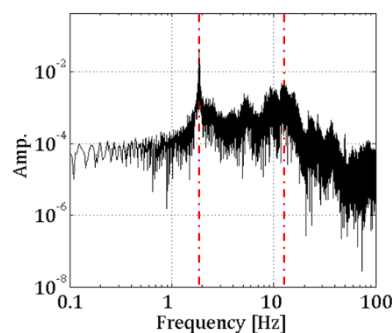


図 4. フーリエスペクトル図の一例

3.3 基礎アンカー部の応答

アンカーボルトにおけるひずみ時刻歴波形とフーリエスペクトルを図 5, 図 6 に示す. ここでは, 比較的风速の大きい 2013 年 12 月 15 日のデータ (平均風速 7.9m/s, 瞬間最大風速 26.6m/s) を用いた. ひずみ波形は加速度と同様な変動を示しているが, スペクトル図では加速度で見られたような高周波数のピークはなく 1 次モードのみ卓越していた. つまり, 基礎部では 1 次モードの振動の影響が支配的であると言える. なお, ひずみの値が 1μ 以下と極めて小さいのは, 計測可能なアンカーボルトが東西南北の 4 か所のみであるため, 最大風速を示した風向とアンカーボルトの位置関係が合致しなかったためと考えられる.

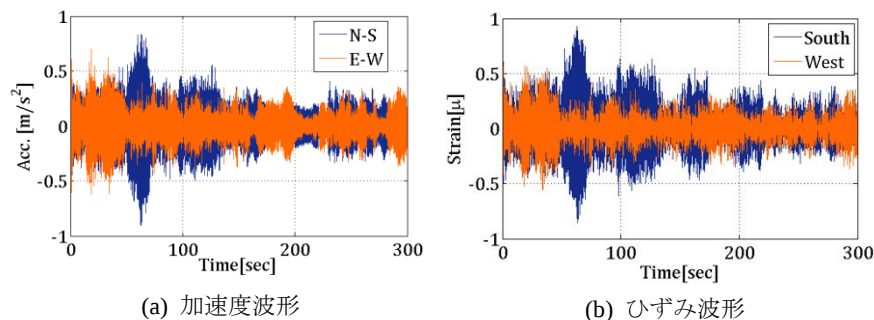


図 5. アンカー部ひずみ計測の相関

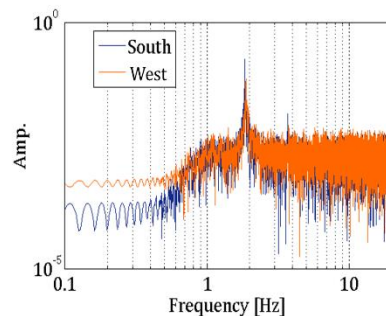


図 6. ひずみスペクトル図

4. 応答変位の検討

図 5 に示す加速度を用いて, 時間領域における 2 階積分によりタワーの応答変位を算出した (図 7). 積分時にはノイズ除去のため低域, 高域遮断周波数をそれぞれ 0.1Hz, 30Hz のバンドパスフィルタ²⁾を施した.

応答変位の軌跡は楕円状を示し, 頂部と中間部の間に位相差はほとんど見られなかった. また, 最大加速度観測時のタワー頂部の最大応答変位は 0.5cm となった. このときのタワー基部のたわみ角を, 片持ち梁のたわみ角として算出した理論値は $\Phi_{\text{theory}} = 1.4 \times 10^{-5}$ であり, FEM 解析³⁾で得られた $\Phi_{\text{FEM}} = 3.2 \times 10^{-5}$ と同等であった.

5. まとめ

実風車に対する長期振動計測を行い, タワーおよび基礎の応答特性の把握を行った. これにより, 観測される最大風速とタワー振動最大加速度との線形関係が明らかになった. また, タワー加速度分析では複数の周波数のピークが見られたが, 基礎アンカーのひずみは 1 次モードが卓越していた. 以上より, 基礎の疲労照査用荷重は, タワーに 1 次モード振動をもたらす強風の大きさと頻度に着目して設定するのがよい.

謝辞: 計測にあたり日揮株式会社阿南誠一氏のご協力を頂いた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 山内ら: 実測に基づく風力発電コンクリートタワーの風応答特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 No. 607, 2006
- 2) A. V. Oppenheim (伊達玄訳): デジタル信号処理 (上・下), コロナ社, 1978
- 3) 藤山ら: FEM を用いた実風車タワーおよび基礎の応答再現解析, 第 69 回土木学会年次学術講演会, 2014.9 (予定)

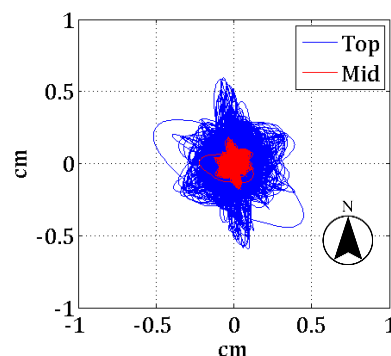


図 7. 応答変位の軌跡