

風車の荷重特性とタワー接合部の非線形性を考慮した 太鼓山風車タワー疲労破断原因の解明

東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○山崎 慈生
東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 正会員 石原 孟

1. はじめに

2013年には風車の重大事故が3件発生し、中でも2013年3月に発生した京都府太鼓山風力発電所の風車ナセルの落下事故¹⁾では、同型の風車が国内に120基程度あるため、今後同型の風車を安全に運用していくためには事故原因の解明が急務である。図1に示すように太鼓山風車は主風向の西風に対して風下側のタワー東側に疲労破断が発生したが、通常風車の風下側は風荷重により圧縮されると考えられるため、疲労破断が風下側で発生した理由が不明である。また、耐用年数20年の風車タワーが12年程度で疲労破壊した原因が不明である。さらに、太鼓山風車ではタワーと風車を接合するボルトが損傷しており、疲労評価の際にはボルト損傷による接合部の非線形特性を考慮する必要がある。

そこで、本研究では太鼓山風車のタワー疲労破断原因を解明するため、太鼓山風車の空力弾性モデルを構築し、時刻歴応答解析により風車の荷重特性を明らかにすると共に、接合部ボルトの損傷によるタワー接合部の非線形特性を考慮した疲労解析を実施し、太鼓山風車タワー疲労破断の原因を明らかにする。

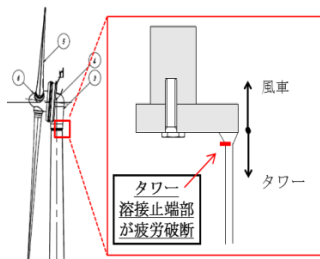


図1 太鼓山風車のタワーの破断箇所

2. 荷重特性の解明

風車の制御モデルは、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説²⁾に基づき構築した。ただし、本風車では、乱れの影響を低減させるため、ピッチ角制御により発電出力を低減させており、風車メーカーはパワーカーブの設計値と実測値を一致させるために、計測し

た風速に0.88を乗じていた。超音波風速計の観測結果と比較した結果、このような風速の補正に根拠がないことがわかったため、本研究では同様の低減効果を再現するために0.88の3乗を発電機トルクの機械損失として与えてモデル化した。

構築した制御モデルを組み込んだ空力弾性モデルにより推定した発電出力およびピッチ角を観測値と比較したものを図2に示す。このモデルにより予測した発電出力とピッチ角は観測値とよく一致しており、構築した制御モデルが妥当であることを検証した。

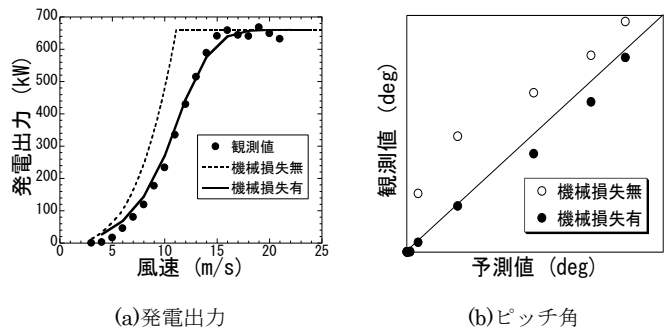


図2 発電出力とピッチ角の予測値と観測値の比較

構築した風車モデルを用いて IEC の ClassIIA の風条件の下で風速階級別に時刻歴応答解析を実施し、タワートップに発生する荷重を算定した(図3)。その結果、太鼓山風車は通常と異なりロータとナセルの自重の偏心によりタワーに風荷重と逆向きの負のモーメントが発生し、主風向である西風の場合にはほとんどの時間、タワー東側に引張応力が発生することが分かった。

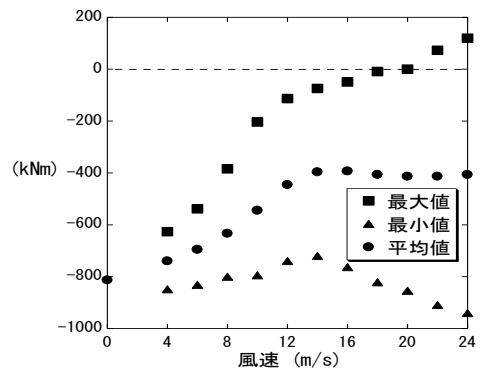


図3 タワートップ風方向モーメントの最大・最小・平均値

キーワード 風車, 事故調査, 疲労評価

連絡先〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 03-5841-1146

3. 風車タワーの疲労寿命評価

算出されたタワートップに発生する軸力とモーメントの時刻歴から断面積および断面係数を用いてタワー破断部の公称応力 (σ_{cal}) の時刻歴を算定することができるが、今回の事故ではタワー破断は応力集中の発生するフランジ直下の溶接止端部で発生したため、タワーの疲労寿命評価には公称応力を局部応力 (σ_{local}) に換算する必要がある。この一連の流れを図4にまとめる。

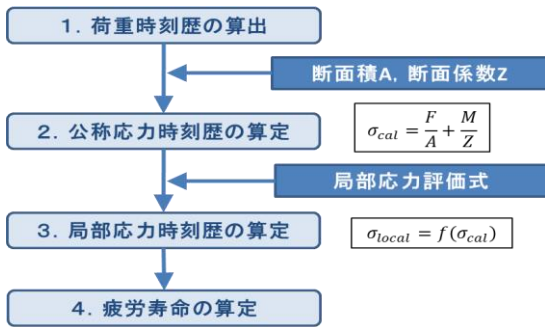


図4 疲労寿命評価フロー

溶接止端部に作用する局部応力を算定するため、ヨーベアリング、タワートップフランジおよびタワーを再現した FEM モデルを構築した (図5)。太鼓山風車ではヨーベアリングとタワートップフランジを接合するボルトの損傷 (最大 17 本) が確認されていることから、ボルト正常時とタワー東側ボルト 17 本損傷時について FEM 解析を実施し、公称応力と局部応力との関係性を評価した。局部応力は引張応力が最大となる位置で評価し、ボルト正常時には引張最外縁であるタワー東側、ボルト損傷時にはボルト損傷端であるタワー東側から 53.6° 位置とした。また、ボルトの損傷は剛結を解除することでモデル化した。FEM 解析の結果、図6に示すように、ボルト正常時には公称応力と局部応力の関係は線形であるが、ボルト損傷時には公称応力と局部応力の関係は非線形となり、またボルト損傷時にはボルト正常時の3倍程度の局部応力が発生することが分かった。

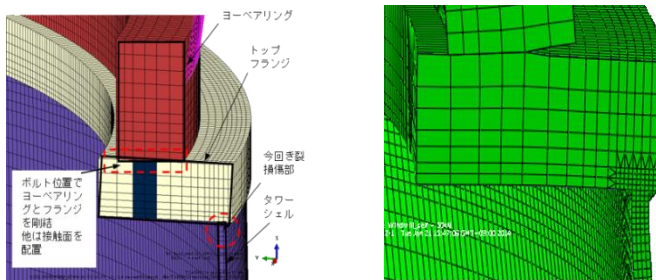


図5 FEMモデルのメッシュ詳細図とタワー変形図

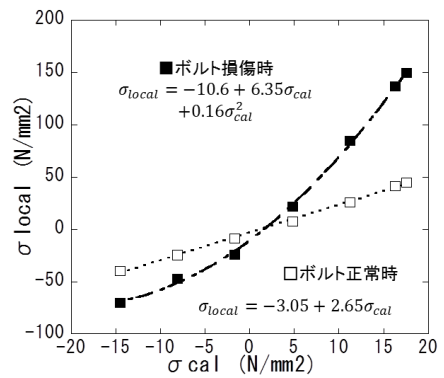


図6 局部応力と公称応力の関係

構築した局部応力評価式を用いてボルト正常時とボルト損傷時の局部応力時刻歴を算出し、太鼓山風車タワーの疲労寿命を算定した。その結果、タワーの疲労寿命はボルト正常時には 21 年であるのに対し、ボルト損傷時には 3 倍程度に応力変動幅が増加したことで、応力変動幅の約 4 乗に反比例する疲労寿命が極端に減少し、疲労寿命の推定値は 0.25 年(3.0 ヶ月)となり、ボルト損傷時には疲労寿命が正常時の 1/100 程度まで減少することが分かった。またボルト損傷時の疲労寿命は、3 号機のボルト損傷期間 (17 本損傷: 約 2 ヶ月間, 14 本損傷: 約 3 ヶ月間, 合計約 5 ヶ月間) と一致したことから太鼓山風車タワーの疲労破断が接合部ボルトの損傷に起因すると考えられる。

4. 結論

本研究では太鼓山風車の制御特性を考慮した空力弾性モデルを構築し、通常の風車と異なる荷重が太鼓山の風車タワーに作用したことを解明した。また、ボルト損傷による風車接合部の非線形特性を考慮した疲労評価を実施し、太鼓山風車タワー疲労破断の原因はボルト損傷に起因することを明らかにした。

謝辞：本研究は京都府との共同研究により実施されたものである。また、本研究では構造計算にあたり JFE エンジニアリング株式会社にご協力頂いた。

参考文献

- 1) 京都府：京都府太鼓山風力発電所 3 号機ナセル落下事故報告 (報告書), 2013
- 2) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010 年版], 2010