

太鼓山風力発電所の風車タワー疲労破断の原因解明について

石原 孟¹ 山崎 慈生¹ 平田 達也² 長砂 龍次²

1 東京大学大学院工学系研究科, 2 京都府文化環境部建設整備課



目的

2013年3月に京都府太鼓山風力発電所において、風車タワーが破断し、風車ロータおよびナセルが脱落する重大事故が発生した^[1]。



太鼓山風力発電所の風車事故の状況

本研究では太鼓山風力発電所の風車タワーの疲労破断の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風荷重特性を明らかにすると共に、FEM解析によりタワー頂部の応力の特性および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、太鼓山風車タワーの疲労破断の原因を明らかにする。

風車の空力弾性モデルの構築

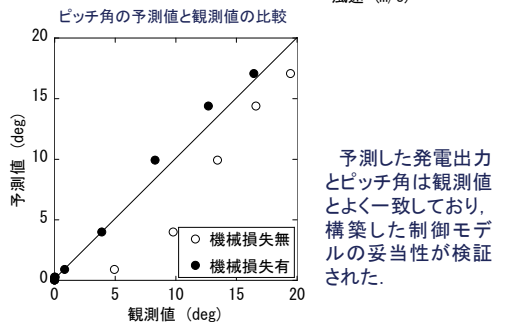
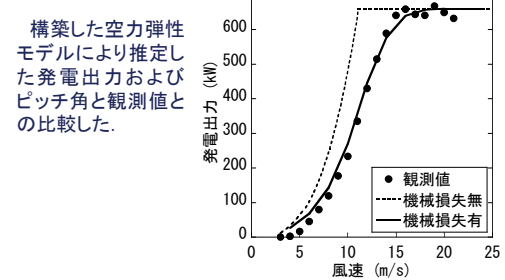
太鼓山風力発電所建設時の各種図面および風力発電設備支持物構造設計指針・同解説2010年版^[2]に基づき、風車の構造モデルおよび制御モデルを作成した。

■ 構造モデルの検証

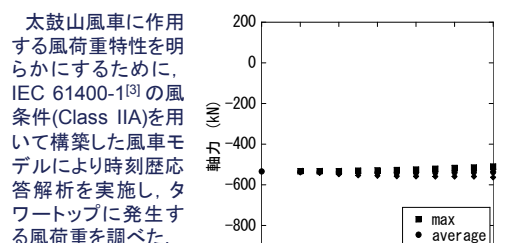
固有振動数の予測値と観測値の比較		計測値		解析値	
		予測値	観測値	解析値	観測値
	タワー1次(東西)	0.515Hz	0.543Hz		
	タワー1次(南北)	0.518Hz	0.542Hz		
	タワー2次(東西)	3.838Hz	3.611Hz		
	タワー2次(南北)	3.832Hz	3.750Hz		

解析から得られた1次モードおよび2次モードの固有振動数の値は計測とよく一致しており、作成した構造モデルの妥当性が示された。

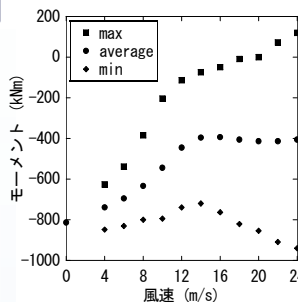
■ 制御モデルの検証



■ 風荷重特性の解明



風車トップに作用する風方向モーメント

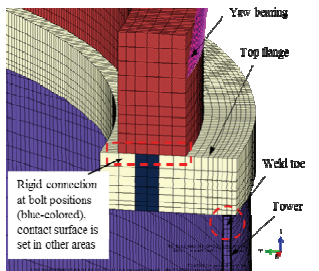


風方向のモーメントの最大値はほとんどの風速に対して負であることから、ロータとナセルの自重の偏心による負のモーメントが発生し、風下側タワーに変動引張力が発生したことが分かる。これより、主風向である西風に対して風下側であるタワー東側が疲労破断した原因になると考えられる。

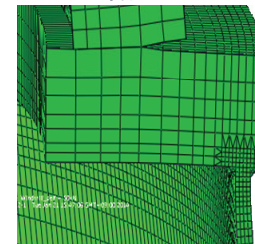
風車タワーのFEM解析

■ 三次元FEMモデルの構築

太鼓山風車のヨーベアリング、タワートップフランジおよびタワーを再現した三次元FEMモデルを構築し、タワー溶接止端部に発生する局部応力を求めた。



タワートップの変形

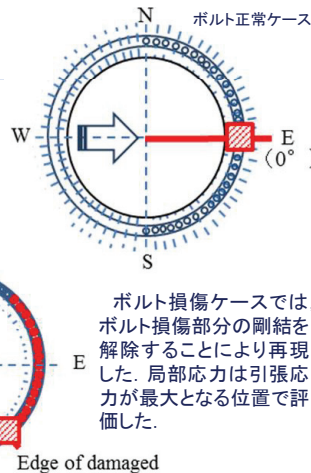
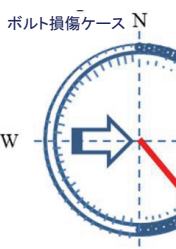


タワートップの構造

ヨーベアリングとタワートップフランジの境界面においては、60箇所ボルトにより剛結し、その他の面には接触要素を設けることによりボルト接合をモデル化し、タワーの径方向分割数は4とした。

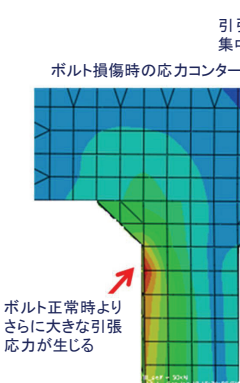
■ 解析ケース

太鼓山風車のボルト損傷による影響を考慮するため、太鼓山風車の点検とボルト損傷の履歴から、ボルト損傷ケースを設定した。



■ 解析結果

ボルト正常ケースにおいてもタワー内側の溶接止端部に大きな応力が発生している。

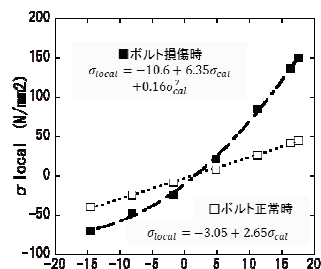


ボルト損傷ケースではさらに応力が大きくなる。また、タワー変形図から、てこ作用によりタワー内面側に引張応力が発生していることが分かる。

溶接止端部の局部応力は、溶接止端部の5mm下位置の応力値から直線補間により算出した。またタワー公称応力はタワートップに作用する軸力とモーメントにより次式から算出した。

$$\sigma_{cal} = N/A - M/Z$$

ここで、
N: 軸力, A: 断面積
M: モーメント, Z: 断面係数



局部応力と公称応力の関係

ボルト正常のケースでは局部応力と公称応力の関係は線形であるのに対して、ボルト損傷ケースではその関係が非線形であり、引張時にはボルト正常ケースの約3倍の応力が発生している。

風車タワーの疲労寿命評価

風車モデルより得られた風荷重時刻歴およびFEM解析より得られた局部応力と公称応力の関係式を用いて、20年間のタワートップ溶接止端部の累積疲労損傷度および疲労寿命を算定した。鋼材のS-N曲線^[4]から、疲労損傷度が変動応力の約4乗に比例し、疲労寿命は変動応力の約4乗に反比例する。ボルト損傷時には変動応力が3倍程度に増加していることから、ボルト損傷時の疲労寿命は約1/81程度に減少することが考えられる。

正常時とボルト損傷時の20年間の累積損傷度及び疲労寿命の比較

	20年間の	
	累積疲労損傷度	疲労寿命(年)
ボルト正常時	0.940	21
ボルト損傷時	79.3	0.25

20年間の累積疲労損傷度および疲労寿命は、ボルト正常ケースでは疲労寿命が21年であるのに対して、ボルト損傷ケースでは疲労寿命は0.25年であり、ボルト損傷時の疲労寿命は1/100程度に極端に減少することが分かる。

結論

本研究では、太鼓山風力発電所の風車タワーの疲労破断原因を解明を行い、以下の結論を得た。

1. 太鼓山風車の空力弾性モデルを構築し、風荷重を算定した結果、ロータとナセルの自重の偏心により、主風向である西風の場合でも、通常の風車と異なり風車タワー東側にはほとんどの時間帯において引張応力が発生することが分かった。
2. タワー頂部の三次元特性とフランジ接合部のボルト損傷を考慮したFEM解析の結果から、てこ作用によりタワー内面側に引張応力が発生していることが分かった。またボルト正常時には局部応力と公称応力の関係は線形であるのに対し、ボルト損傷時にはボルト損傷端に正常時の3倍程度の応力が発生し、局部応力と公称応力の関係も非線形となることが分かった。
3. ボルト損傷を考慮した疲労寿命評価を実施した結果、ボルト損傷時にはボルト正常時の1/100程度までに疲労寿命が減少することが分かった。ボルト損傷時の疲労寿命とボルト損傷期間がほぼ一致したことから、太鼓山風車タワーの疲労破断の原因がトップフランジ接合部ボルトの損傷に起因することが分かった。

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FEM解析にあたりJFEエンジニアリング株式会社にご協力を頂いた。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

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.
- [3] IEC 61400-1, Third edition, Part 1: Design requirements, 2005.
- [4] Eurocode1 3, Design of Steel Structures Part 1.1: General rules and rules for buildings, p 228, 1992.