
第I部門

耐風・風工学(1)

[I-224] タワー筒身のひずみ計測を用いた風車高力ボルトの異常検知・異常診断に関する研究

Anomaly detection and prediction of high-tension bolts by using strain of tower shell

○菊地 由佳¹、石原 孟¹ (1.東京大学)

○Yuka Kikuchi¹, Takeshi Ishihara¹ (1.The University of Tokyo)

キーワード：風車、高力ボルト、損傷検知、損傷予測、ひずみ変化量

wind turbine, high-tension bolt, anomaly detection, anomaly prediction, strain difference

本研究では、タワー筒身のひずみ変化量を用いて高力ボルトの異常検知および異常診断を行うことを目的とした。ヨーブレーキ、玉軸受、ピニオンギアを考慮した詳細な数値タワー・ナセルモデルを構築し、軸力低下とひずみ変化量との関係を予測することにより、異常検知の閾値およびボルト軸力の予測式を評価した。評価した閾値と予測式を、現地観測を実施することにより、高精度な異常検知および異常診断が可能なことを検証した。

タワー筒身のひずみ計測を用いた風車高力ボルトの異常検知・異常診断に関する研究

東京大学 正会員 ○菊地 由佳
東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

2013年3月12日、太鼓山風力発電所3号機の風車支持物タワー頂部において、フランジ直下のタワー筒身の疲労破壊による風車ナセル落下事故が発生した¹⁾。事故調査において、疲労破壊の原因は、タワー頂部フランジに設置されているタワートップボルトの損傷によるタワー筒身への応力集中であることが明らかになった。実際に、倒壊した事故機の損傷ボルト周囲のボルトの軸力は、初期導入軸力の0%~70%であった。

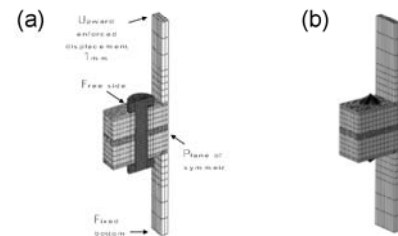
事故予防のため、早期のタワートップボルトの異常検出および軸力評価が求められる。従来のタワートップボルトの軸力の評価手法は、超音波ボルト軸力計を用いる軸力計測およびトルクレンチを用いたトルク計測による軸力評価が一般的であるが、現地計測が必要となる。また、ひずみゲージ埋込ボルトを用いた軸ひずみ計測による軸力評価が可能だが、全てのボルトに導入することは経済性がない。

そこで、本研究では、タワートップボルト直下におけるひずみを計測することにより、タワートップボルトの異常を検出する。まず、数値ナセル・タワーモデルを構築し、タワートップボルト直下におけるひずみを評価し、異常検知および異常予測アルゴリズムを構築する。次に、得られたひずみを基にパターン認識技術を用いて、タワートップボルトの異常検知アルゴリズムを構築する。最後に、予測技術を用いて、ひずみの計測値からボルトの残存軸力を予測する手法を提案する。

2. 数値モデルの構築

2.1 数値ボルトモデルの構築

接合部のボルトの応力-ひずみ関係を正しくモデル化できるか検証するため、既往文献を参照し、ソリッド要素を用いて、ボルトモデルを構築した²⁾。また、60本のボルトを評価するためには、ソリッドモデルでは計算コストが高いため、図1(b)に示すように、ビーム要素によるボルトのモデル化を行った。ビーム要素モデルで評価したボルト軸力はソリッド要素で評価したボルト軸力と一致し、精度の高いモデルであることが検証された。



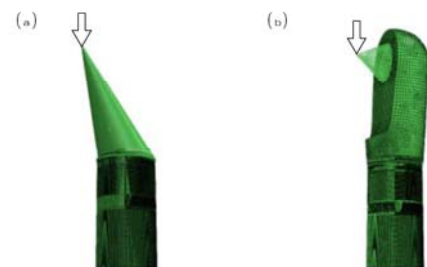
(a) ソリッドモデル (b) ビームモデル

図1 数値ボルトモデル

2.2 数値モデルの構築

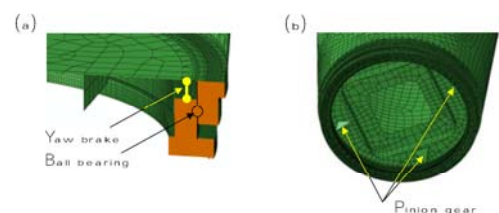
タワートップの剛体モデルと弾性体モデルを図2に示す。弾性体モデルの詳細を図3に示す。ナセルとヨーベアリングはボールベアリング、ヨーブレーキ、ヨーピニオンギアの3つの経路でモデル化されている。停止時にかかる荷重は小さいためボールベアリングは弱いばねでモデル化した。ヨーブレーキはばね要素でモデル化され、ナセル床とヨーベアリングを結んだ。ピニオンギアは強い剛性のばね要素でモデル化した。高力ボルトは前節で説明したようにビーム要素でモデル化した。

構築したモデルを用いて、フランジ下20mmの位置のタワーひずみを評価した結果を図4に示す。剛体モデルが非対称性を再現していないのに対し、弾性体モデルは非対称性をよく再現した。



(a) ナセル剛体モデル (b) ナセル弾性体モデル

図2 数値ナセル・タワーモデル



(a) ヨーブレーキと玉軸受 (b) ピニオンギア

図3 弾性体モデルの詳細

図 5 には、構築したタワーモデルを用いて評価したボルト軸力低下とひずみ変化量の予測値との関係を示す。予測したひずみ変化量のパターン分布を数値化し、MT法におけるT法(3)³⁾を用いてマハラノビス距離(MD)を評価する。軸力が低下するとパターンが類似する性質を利用して、損傷検知の閾値をフランジ下 20mm で 0.119, フランジ下 100mm で 0.152 と評価した。また、T法(a)を用いて、ひずみ変化量を変数としたボルト軸力低下量の予測式を構築した。

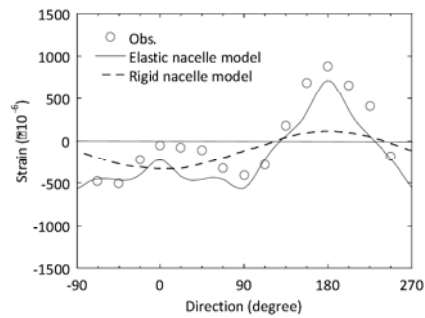


図 4 ひずみの観測値と予測値との比較

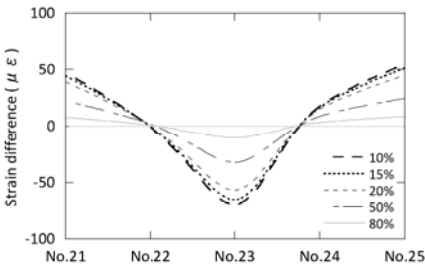


図 5 軸力低下とひずみ変化量の予測値との関係

3. 現地観測を用いた検証

2015 年 2 月 2 日～5 日に太鼓山風力発電所 1 号機において現地観測を実施した。ボルトの軸力をトルクレンチにより設定し、前節で構築した異常検知手法により異常検知を行った結果を表 1 に示す。フランジ下 20mm および 100mm において、軸力 50%以下の場合を異常と判断し、構築した手法の妥当性を示した。

表1 フランジ下 20mm および 100mm でのひずみ変化量を用いた異常検知の結果

軸力低下量	20 mm		100 mm	
	MD	状態	MD	状態
10 %	0.15	異常	0.27	異常
15 %	0.15	異常	0.27	異常
20 %	0.15	異常	0.26	異常
50 %	0.12	異常	0.17	異常
80 %	0.06	正常	0.06	正常
100 %	0.06	正常	0.06	正常

観測したひずみ変化量を用いて予測値と実測値との比較を図 6 に示す。予測した軸力は観測値とよく一致し、構築した予測式の妥当性を示した。

表 2 には、提案した損傷予測手法を用いた異常診断を示す。軸力が 50%以下と診断された場合は 1 ヶ月以内に補修を実施する。50～70%と補修された場合は定期点検時に補修を実施する。70～80%と診断された場合は、補修は必要ない。

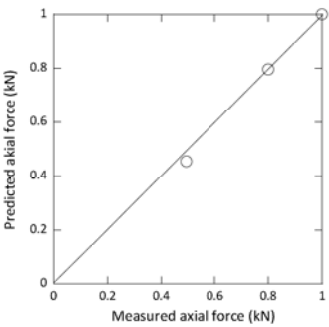


図 6 軸力の予測値と実測値との比較

表 2 軸力予測を用いた異常診断		
レベル	残存軸力	対応
危険	<30 %	1 週間以内に補修
警告	30~50 %	1 ヶ月以内に補修
注意	50~70 %	定期点検
正常	70~80%	不必要

4. まとめ

本研究では、タワー筒身のひずみ変化量を用いて高力ボルトの異常検知および異常予測を行うことを目的とした。ヨーブレイキ、玉軸受、ピニオンギアを考慮した詳細な数値タワーモデルを構築し、軸力低下とひずみ変化量との関係を予測することにより、異常検知の閾値および異常予測式を評価した。評価した閾値と予測式を、現地観測を実施することにより、高精度で異常検知および異常診断が可能であることを検証した。

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書，2013.

2) 石原孟，難波治之，太鼓山風力発電所における風車ナセルとタワートップフランジ接合部の FEM 解析に関する研究，第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム，2016.

3) 立林和夫編，手島昌一，長谷川良子著，入門 MT システム，日科技連，2008.