

京都府太鼓山風力発電所1号機と3号機ボルト損傷調査報告書

2014年5月29日

1. ボルト損傷原因調査の目的

平成25年3月12日に発生した太鼓山風力発電所3号機ナセル落下事故の原因調査の結果、タワートップボルトの損傷がタワー本体の累積損傷度の加速を招き、破断に至ったものと推定されたが、引き続きタワートップボルトの損傷原因を明らかにする必要があるため、3号機のタワートップボルトの施工状況及び損傷履歴を確認するとともに、タワートップボルトに損傷履歴がある1号機を対象に現地試験及び現地観測を実施するものである。

(1) 調査内容

室内及び実機の試験により施工方法による締付トルクと導入軸力の関係の調査及び風車発電時の風荷重に関する風車の観測を実施する。また、FEM解析によりタワートップボルトへの作用力とタワートップボルトの軸力の関係を明らかにし、風車の空力弾性モデルを用いた時刻歴応答解析結果と合わせ、タワートップボルトの疲労寿命評価を行う。

(2) 調査項目

- 1号機と3号機のタワートップボルトの施工及び交換等の状況
- ボルト軸力に関する室内と実機の調査
- タワートップボルト交換後の緩みの確認
- 実機における発電量、回転数、歪みの計測によるモデルの検証
- FEM解析によるボルト軸力の評価
- ボルト疲労寿命の算定

2. 1号機と3号機のタワートップボルトの施工及び交換等の状況

(1) タワートップボルトの点検状況

表2-1にタワートップボルトの点検履歴を示す。現状のタワートップボルトの点検は、サービスマニュアルに従い、9倍力レンチを使用して680Nmでトルク確認及び合いマークの確認を行っている。

過去の定期点検の結果から、トルク確認を実施していなかった平成17~20年度上期までの期間を除き、合いマーク及びトルク確認によりボルトの異常が発見されたことはなかった。

(2) タワートップボルトの施工及び交換の状況

建設時の施工は、4倍力レンチを使用して850Nmでタワートップボルトを締結し、サービスマニュアルに従い運転開始から約500時間後に同様の工具とトルクでトルク確認（増締め）を実施している。

3号機のタワートップボルトについて、平成20年6月に損傷が最初に確認されたことから、9倍力レンチを使用してボルト交換を実施し、これ以後に発生したタワートップボルト損傷時のボルト交換は、同様の方法で施工しているが、交換から約500時間後に同様の工具とトルクでトルク確認（増締め）を実施していなかった。

1号機については、平成22年4月にヨー軸受交換時にタワートップボルト全数を交換しており、その際の施工は油圧レンチにより実施している。交換後の増締めは実施していなかった。

図2-1にタワートップボルトの施工及び取替の履歴を示す。この図から1号機及び3号機においては、ボルト交換後に増締めを実施していない状況で、東側を中心に5本以上のボルト損傷が繰り返し発生している。

表2-1 タワートップボルトの点検履歴

点検時期	H14		H15		H16		H17		H18		H19		H20		H21		H22		H23		H24	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
合いマーク	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
トルク確認	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	680Nm				トルク確認未実施				680Nm				任意の3本				任意の6本					

ボルトNo.	施工/取替	方位
H311, H312	4倍力レンチ 850Nm	北
H20.6.9, H24.2.4	9倍力レンチ 850Nm	北
H22.4.22, H24.5.20, H25.8.7	油圧レンチ 850Nm	北

図2-1 タワートップボルトの施工履歴(取替含む)

3. ボルト軸力に関する室内と実機の調査結果

室内と実機において、歪みゲージを埋め込んだボルトを用いて、締付工具による締付トルクと導入軸力の差異の確認を行った。

試験方法を図3-1、実機において得られた各締付工具による平均値を図3-2に示す。室内においてもほぼ同様の結果が得られた。

(1) 軸力調査の内容

＜施工方法(締付工具)＞

- 4倍力レンチ(建設時に用いた締付工具)
- 油圧レンチ(1号機ヨー軸受交換時に用いた締付工具)
- 9倍力レンチ(現在太鼓山風力発電所で使用している締付工具)

(2) 軸力調査結果

- 締付工具によって導入軸力に10%程度のばらつきがあるが、実用上問題のない範囲にある。
- 太鼓山風力発電所におけるボルト締付方法について試験した結果、軸力は基準値を満足しており、ボルト交換時の締付工具に問題がないことを確認した。

(3) タワートップボルト交換後の緩みの確認(交換から約500時間後)

1号機実機の試験及び観測に当たり、軸力調査(No. 18~25)及び加速度計の設置(No. 36, 51)のために交換したタワートップボルトについて、建設時と同様に運転再開から約500時間後に、締付時と同条件(ローター東向き、トルク 850Nm)で増締めを実施した結果、10本のうち3本で座金の外周で2~3mm程度の回転(緩み)が確認された。この回転量は、図3-3から10~20%程度の軸力低下に対応する。

さらに、ローター向きを、ボルト締付時のローター向き(東)と正反対の向き(西)にヨーイングさせ、再度増締めを実施した結果、西側のボルトNo. 51で4mmの回転(緩み)が確認された。これは、ローターの自重によるボルトに作用する力が、ボルトNo. 51においては、ローター東向きでは引張側であったものが、ローター西向きでは圧縮側となったため、軸力が低下したものと推測される。表3-1に増締め実施結果及び緩みによる軸力残存率を示す。なお、表3-1に示す以外のボルト全てについても増締めを行い、回転しないことを確認した。

表3-1 増締め実施結果及び緩みによる軸力残存率

ボルトNo.	ローター向き(東) [締付時と同一]		ローター向き(西) [締付時の対角]
	増締め回転量(mm)	軸力残存率(%)	
18	0	-	0
19	0	-	0
20	0	-	0
21	3	80	0
22	2	87	0
23	3	80	0
24	0	-	0
25	0	-	0
36	0	-	0
51	0	-	4



写真3-1 増締め実施状況(締付日:H26.3.11、増締め日:H26.4.17)

(4) 3号機の事故調査におけるボルトの調査結果

3号機ナセル落下事故の原因調査において、損傷したボルト及びその近隣のボルトにおいて調査を実施した。その結果、ボルトの損傷及び緩みの状態に応じて、ボルト回転量は4から45mmの範囲にあったことが分かった。事故機のボルト回転量と推定軸力を表3-2に示し、ボルト回転量と軸力の関係を図3-3に示す。表3-2からき裂のあったボルト回転量は15mm以上であり、軸力が完全に抜けていると推定された。また、緩みのあったボルト回転量は10mm以下であり、軸力は30%以上が残っていると推定された。

表3-2 事故機のボルト回転量と推定軸力

ボルトNo.	増締め回転量	軸力残存率(%)	備考
9	0 mm	-	き裂(ねじ部)
14	6 mm	60%	緩み
15	6 mm	60%	緩み
16	10 mm	33%	緩み
17	30 mm	0%	き裂(首下)
18	- mm	-	ボルト無し
19	- mm	-	折損(首下)
20	45 mm	0%	き裂(首下)
21	- mm	-	折損(首下)
22	25 mm	0%	き裂(ねじ部)
23	7 mm	53%	緩み
24	7 mm	53%	緩み
25	7 mm	53%	緩み
26	4 mm	73%	緩み

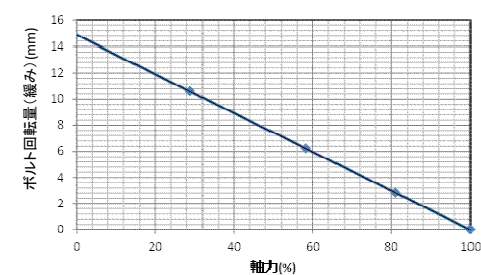


図3-3 ボルト回転量と軸力の関係



写真3-2 事故機ボルトの調査状況

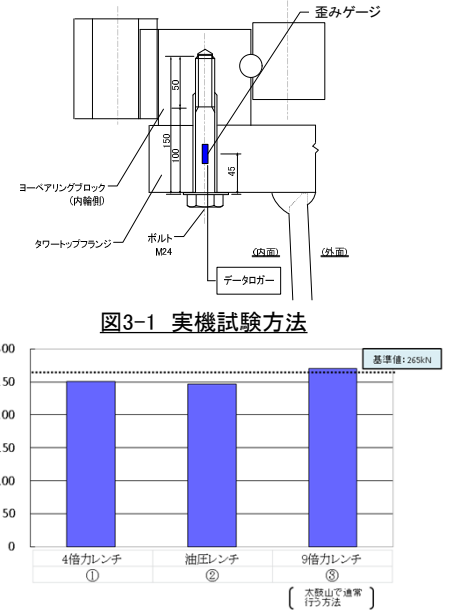


図3-1 実機試験方法

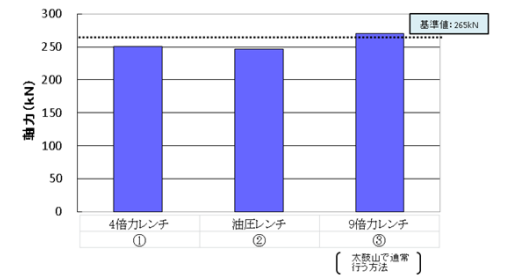


図3-2 実機試験結果

4. FEM解析と空力弾性解析によるボルト疲労寿命の評価

運転中の1号機を対象に、発電時の風荷重に関する現地調査を実施した。また、タワートップの3次元モデルを用いたFEM解析により、タワートップボルトへの作用力とボルト軸力の関係を明らかにし、空力弾性解析結果に基づき、タワートップボルトの疲労寿命評価を実施した。

(1)ボルトの疲労寿命評価の流れ

太鼓山風力発電所実機における空力弾性モデルを構築し、1号機の発電時の風車運転データ及び現地観測より得られたタワー基部の転倒モーメントから空力弾性モデルの予測精度を検証した。

また、ボルトの導入軸力の低下を考慮した、タワートップボルトへの作用力と軸力の関係についてFEM解析により求めると共に、太鼓山の風況、風車に作用する風荷重及びボルト軸力低下の影響を考慮したタワートップボルトの疲労寿命を評価した。図4-1に疲労寿命評価のフローを示す。

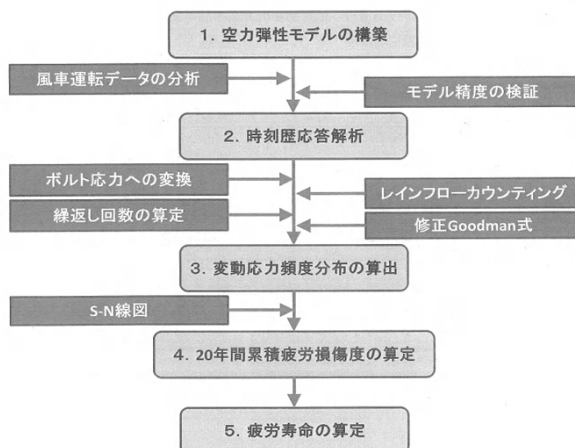


図4-1 疲労寿命評価フロー

(2)実機における発電量、回転数、歪みの計測によるモデルの検証

1) 風車の空力弾性モデルを検証するため、太鼓山風力発電所1号機を対象に現地計測を実施した。

- ① 風車タワーNo.2ステージ (高さ約11.6m) より約0.5m上方のタワー鋼板 (8方位) に歪みゲージを設置して歪み値を計測
- ② 風車タワーNo.4ステージ上 (高さ約35.6m) 中央部に加速度計を設置し、南北及び東西方向の2軸の加速度を計測

2) 構築した空力弾性モデルを用いて、SCADAから得られた平均風速と乱流強度、風車の発電量、回転数及び現地観測から得られた同時刻の風車タワー基部のモーメントの計測値と比較することによりモデルの検証を行った。

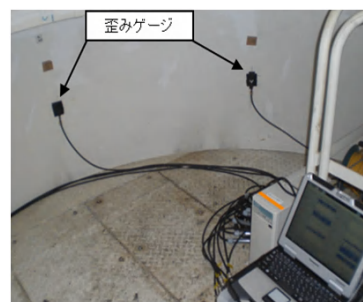


写真4-1 歪み計測(No2ステージ)

図4-2に乱流強度、発電量、回転数、モーメントの平均値と標準偏差の観測値と予測値の比較を示し、予測値は観測値とよく一致したことから、空力弾性モデルの予測精度が確認された。

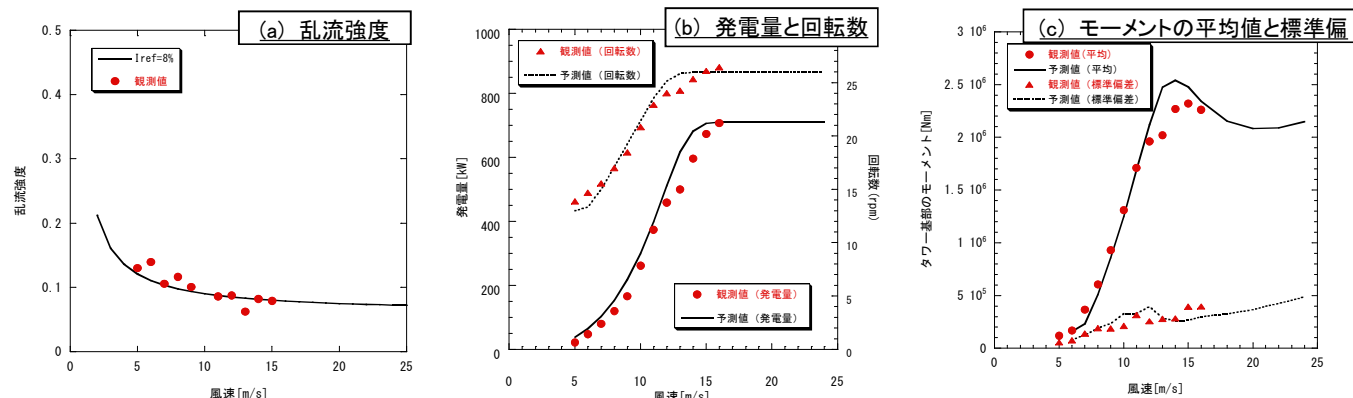


図4-2 観測値と予測値との比較

(3)FEM解析によるボルト軸力の評価

風車全体をFEMモデルとして構築し、今回評価対象となるトップフランジ部分のFEMモデル拡大図を図4-3に示す。

なお、FEM解析の精度を検証するため、ボルトへの作用力とボルト軸力の関係を既往論文と比較し、一致していることを確認した。

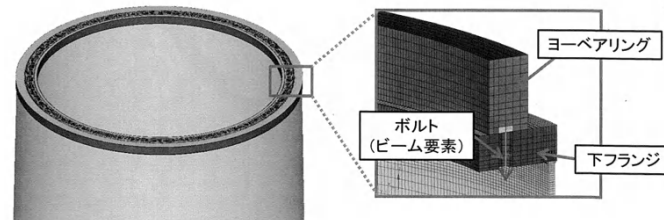


図4-3 風車全体モデルのタワートップ部分拡大図

また、事故が発生した3号機ではNo.17から22までの6本のボルトが繰返し損傷していることから、6本のボルトの導入軸力を基準値の80%から0%まで変化させ、ボルト軸力とタワートップへの作用力との関係をFEM解析により算出した。他のボルトの導入軸力は、ばらつきを考慮して、基準値の80%程度と設定した。図4-4には疲労寿命評価対象ボルトの位置を示す。また図4-5にはFEM解析により算出したボルト軸力とタワートップ作用力との関係を示し、図中の縦の実線はそれぞれタワートップ作用力の最小値と最大値を表わす。

(4)ボルト疲労寿命の算定

図4-6に西風時のボルト疲労寿命の予測結果を示す。年平均風速及び乱流強度は、1号機の風観測から得られた値、 $U=8\text{m/s}$ 、 $I_{ref}=0.16$ と設定し、IECの標準乱流モデルを用いた。

図4-6から、ボルトの導入軸力が基準値の30%以上であれば、設計寿命20年を十分に満たす。一方、ボルトの導入軸力が基準値の0%になった場合には、数日の間にボルトの疲労寿命が消失し破断する。この結果は3号機のボルトの調査結果をよく説明している。

以上のことから、ボルト軸力がある値を下回ると、ボルト軸力の変動幅が増大し、疲労寿命が大幅に短くなることが確認された。

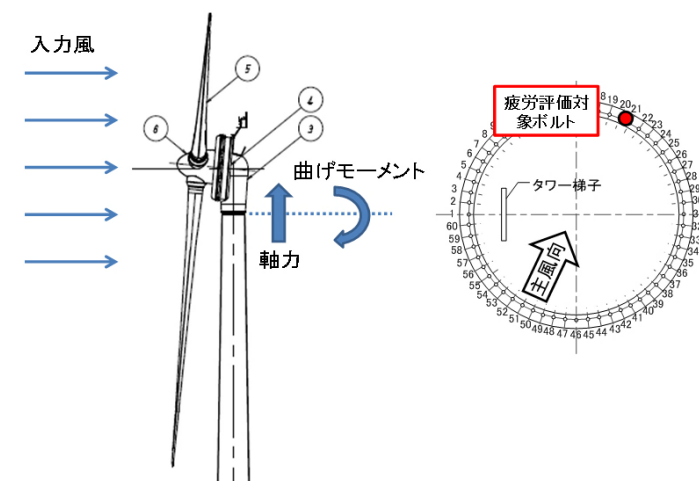


図4-4 疲労寿命評価対象ボルトの位置

【ボルトの疲労寿命予測結果】

○ ボルトの導入軸力が基準値の30%以上であれば、ボルトの設計寿命20年を十分に満たす。一方、ボルト軸力が基準値の0%まで低下した場合、ボルトは短期間に破断することが確認された。

○ ボルトの疲労寿命予測結果は、3号機のボルト調査結果、すなわち、き裂のあるボルト軸力が基準値の0%、緩みのあるボルト軸力が基準値の30%以上であったことをよく説明している。

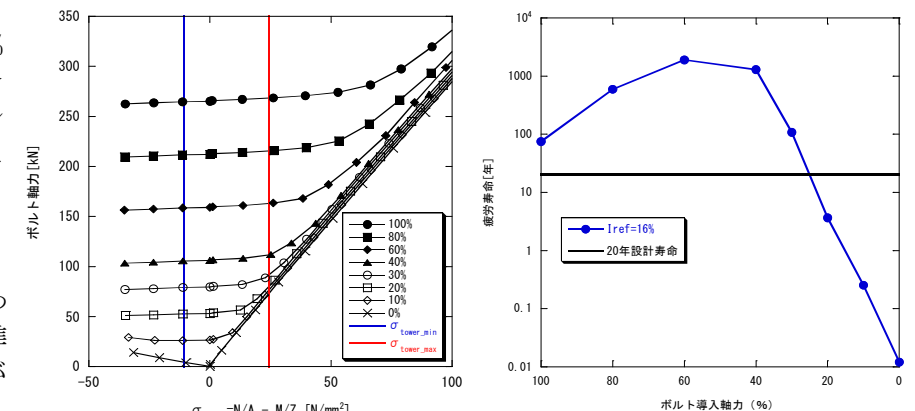


図4-5 ボルト軸力とタワートップ作用力との関係

図4-6 タワートップボルト疲労寿命の予測結果

5. ボルト損傷原因のまとめ

1) ボルト損傷履歴及びボルト交換時の施工記録の調査から、ボルト交換時には、増締め(運転開始から約500時間経過後)を実施していなかったことが、ボルト軸力の低下を招き、ボルトが短期間で損傷した原因であることを明らかにした。なお、今回の調査で実施した増締めにより、ボルト交換後にはボルトの緩みが生じることが確認された。また、ボルトの導入軸力は、ローター方向によって変動することが確認された。

2) FEM解析及び空力弾性モデルによるボルトの寿命予測から、ボルトの緩みが進むと、ボルトの軸力が急速に低下し、基準値の10%程度まで低減した場合、疲労寿命は極端に短くなり、更に0%に達した時点でボルトは短期間で破断することが確認された。

3) ボルトの疲労寿命予測結果は、事故機の損傷ボルト調査から得られた結果とよく一致し、ボルト損傷が短期間で発生したと推定された。また、ボルトの緩みがあっても、合いマークの目視及び打音検査からボルトの軸力低下を発見できないことが判明した。

これらのことから、合いマークの目視や打音検査等の従来の点検ではボルトの緩みを検知することができない可能性があり、トルク確認による点検内容を強化・充実させる必要があることが判明した。

6. 再発防止策

タワートップボルト交換後の緩みによるボルト軸力低下に対し、増締めを行っていないことが及び従来タワートップボルト定期点検内容では、ボルト軸力低下を発見できなかったことがボルト損傷の原因であることから、タワートップボルトの交換手順及び点検頻度、点検本数等の点検内容を見直し、タワートップボルト定期点検要領に加えることにより、ボルトの健全性を担保し、風力発電所の安全運転に努める。

項目	問題点	対策
タワートップボルト交換後の増締め	ボルト締付け後、緩みにより、軸力が低減する可能性がある。	建設時と同様、締め付けから概ね500時間経過後に増締めを実施する。
定期点検におけるタワートップボルトのトルク確認の強化	トルク確認は、全本数のうち5%程度であり、全数の目視確認だけではタワートップボルトの緩みを検知することができない可能性がある。	定期点検時にトルクレンチで確認するボルトの割合を見直し、15本のボルトを6か月毎に点検する。(15本×2回/年) ただし、損傷履歴がある場合は、3ヶ月毎に、損傷履歴のあるボルトを中心とした点検を実施する。

※ タワートップボルトの損傷履歴がある太鼓山風力発電所では、タワートップボルトのき裂の有無を確認するため、超音波探傷試験も実施する。