

タワートップボルトにおける締付トルクと導入軸力の関係について*

A Study on the Relationship between Tightening Torque and Axial Force of Bolts at the Tower Top

石原 孟^{*1} Takeshi ISHIIHARA 吉村 豊^{*2} Yutaka YOSHIMURA 剣持 良章^{*3} Yoshiaki KENMOCHI

1. はじめに

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は、調査結果からタワートップボルトの損傷によりタワートップフランジ溶接部内側の引張応力が著しく増大することで短期間に疲労寿命に達し、タワートップ溶接部の破断が引き起こされたと結論付けられている¹⁾。風力発電設備用のタワートップボルトをヨーベアリング本体に締付ける場合、締付けトルクに基づくボルトの導入軸力を管理している。高力ボルトの損傷は軸力低下によるものであるため、トルク管理下のボルト締付により、実際にどの程度の軸力が導入されるのか、更に理想的な条件及び風車実機での作業条件を考慮した場合での導入軸力のバラツキについて明らかにする必要がある。また、ボルトの再締付けを実施する際には、軸力の低減度合いを何等かの方法で評価する必要がある。

そこで、本研究では、これらの問題を解決するために、室内試験および3号機と同様にタワートップボルト損傷が発生した1号機を対象にボルト軸力と締め付けトルクの関係进行调查する。具体的には、まず実機の対象構造部を再現した室内試験モデルを構築し、理想的な条件下での室内試験にて、締付トルクと導入軸力の関係および軸力のバラツキを調べる。次に1号機風車において、建設施工時及び損傷ボルト交換時の施工方法の再現を試み、締付トルクと導入軸力の関係及び軸力のバラツキを確認する。最後に、ボルト軸力が低下した際に、ボルトの回転量と軸力の低減量との関係を定量的に評価する。

2. 室内試験と実機試験

2.1 試験に使用する機材の概要

実施工におけるボルト軸力と締め付けトルクの間を調べるため、実際に使用されている潤滑剤及びトルクレンチを選定した。潤滑剤は、東レ・ダウコーニングのモリコートG-nペーストとGラピッドスプレー

を用い、その性能を比較することとした。締付器具としては、倍力機構や油圧装置を持たない構造の片ロスパナのトルクレンチを基準とし、通常メンテナンスやボルトの交換に用いている4倍力トルクレンチ及び風車建設時に用いた油圧式のトルクレンチを室内試験の対象とし、実機試験ではこれらに9倍力トルクレンチを追加し、その性能を確認することとした。

各試験に使用した潤滑剤を表1に示す。潤滑区分として座金(座部)を含むボルトのネジ部とめねじ部に区分し、これらの潤滑剤の塗布の有無、めねじについては残留の有無について比較することとした。各試験に使用したトルクレンチを表2に、写真を図1に示す。

表1 各試験に使用した潤滑剤

項 目	条 件	
	室内試験	実機試験
ボルト・座金の潤滑	潤滑剤ペースト、スプレー、無し	潤滑剤ペースト
めねじの潤滑	潤滑剤の残留有り、残留無し	潤滑剤の残留有り

表2 各試験に使用したトルクレンチ

ケース		トルクレンチ種類	備考
室内実験	実機試験		
1-1~3-3	1	片ロスパナレンチ	基準レンチとして設定
4-1	2	4倍力レンチ	設置会社のボルト交換条件
4-2	3	油圧レンチ	建設時使用
	4	9倍力レンチ	保守管理会社のボルト交換条件



a) 片ロスパナレンチ



b) 4倍力レンチ



c) 油圧レンチ

図1 各試験に使用したトルクレンチ

*平成27年11月27日第37回風力エネルギーシンポジウムにて発表

*1 会員 東京大学大学院工学系研究科 教授

(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

*2 会員 東京大学大学院工学系研究科 研究員

*3 会員 日本海事協会再生可能エネルギー部

2.2 試験体及び試験装置の概要

室内試験ではまず実機のフランジ及びベアリングブロックを模擬したボルト締付体を用いて、ボルト締付トルクと導入軸力の関係を求めた。ボルトは実機に使用されている F10T-M24 のボルトと同型として、頭部を削孔し、ボルト用ひずみゲージ（東京測器研究所製 BTM-6C ゲージ長さ 6mm）を埋め込んだものを用いた。ひずみゲージ埋込ボルトとボルト締結体の概要を図 2 に示す。

ボルトは、トルクレンチを用いて締め付け、その時に得られるひずみの値をデータロガー（東京測器研究所製 TC-32K）を用いて収録した。本試験に用いた「ひずみゲージ埋込ボルト」は、製作時に基準軸力を負荷させた時に得られるひずみ値を校正しており、試験では、その校正値を用い、測定されたひずみ値から軸力を算出した。

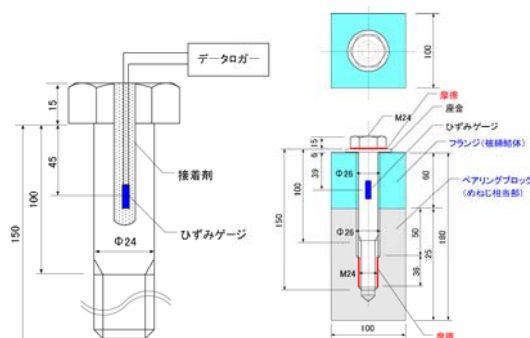


図2 ひずみゲージ埋込ボルトと同締結体の概要

2.3 室内試験の結果

室内試験におけるボルト締付は、ボルト締付施工要領に基づき実施した。施工要領では「ヨーベアリングねじ部のハンドタップさらい及び清掃（エアー吹き、クリーナー吹付）を行い、ボルトねじ部及び座面にモリコート塗布」と規定されている。試験に使用した潤滑剤とトルクレンチを表 1 及び表 2 に示し、表 3 には各試験条件の組み合わせと試験結果を示す。

ボルト・座金部に塗布する潤滑剤のペーストとスプレーによる違いに関しては 1-2 及び 2-1 から、めねじに潤滑剤が無い状態との比較は 1-3 と 2-2 で行う。また、めねじ部の潤滑剤の違いに関しては 1-1 及び 1-2 により比較する。ボルト・座金に潤滑剤が無い状態におけるめねじの潤滑剤有無の影響を 3-1 と 3-2 で、トルクレンチによる違いを 1-2、4-1 及び 4-2 において確認する。なお、めねじの潤滑剤の有無は潤滑剤の残留状態を示すものであり、ボルトねじ部に潤滑剤を塗布して締付を行い、その後ボルトを抜いて新しいボルトに交換或いは同ボルトによる再締付を行う場合、めねじの状態は潤滑剤の残留を意味し、残留が無い場合

は潤滑剤が除去されていることを意味する。

試験は同一条件下で原則 3 回繰り返して行い、バラツキの程度を確認した。締付トルクと軸力との関係を求めるため、250、450、650、及び 850 Nm の 4 点で軸力の計測を実施した。締付トルク 850 Nm は風車メーカーの指定値であり、基準軸力 265 kN に対応し、ボルト耐力の 80% に相当する。各試験ケースにおいて締付トルク 850 Nm で得られた導入軸力を基準軸力 265 kN に対する比率を表 3 に示した。図 3 にはケース 1-1～1-3 及びケース 3-1～3-2 における締付トルクと軸力の関係を示す。

表 3 各試験ケースにおける導入軸力と摩擦係数

ケース	ボルト 座金 潤滑剤		めねじ 潤滑剤		トルク レンチ			導入軸力対基準値* (%, 上段) トルク係数 (下段)		逆算 摩擦係数
	ペースト	無し スプレー	ペースト 残	スプレー 残	残留 無し	片口 スパナ	4 倍力 油圧	平均値	計測値 (最小～最大)	
1-1	○		○			○		104 0.128	102～105 0.126～0.132	0.0786
1-2	○			○		○		106 0.127	101～110 0.122～0.132	0.0775
1-3	○				○	○		89 0.151	84～95 0.142～0.159	0.0948
2-1		○		○		○		104 0.128	102～108 0.123～0.131	0.0784
2-2		○			○	○		93 0.144	85～102 0.132～0.158	0.0902
3-1			○		○	○		90 0.151	77～102 0.132～0.174	0.0946
3-2			○			○		60 0.224	53～65 0.205～0.251	0.1475
4-1	○			○			○	106 0.127	98～112 0.119～0.137	0.0777
4-2	○			○			○	109 0.123	109 0.123	0.0744

*: 基準軸力 265 kN を指す

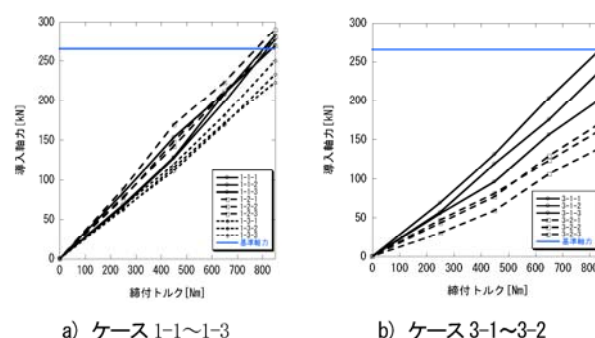


図 3 締付トルクとボルト軸力の関係

試験結果から潤滑剤に関しては、ペーストとスプレーの性能に差がなく、また締付器具に拘らず、ボルト・座金及びめねじ共に、潤滑剤が塗布又は残留している場合は所定の基準軸力が導入され、バラツキは 10% 程度であることが分かる。めねじに潤滑剤が無い

状態でも、ボルトに潤滑剤があれば、最低で 85%程度の導入軸力が得られた。ただし、ボルト・座金とめねじともに潤滑剤が無い状態では基準軸力の 53～65%しか軸力が導入されず、バラツキも大きくなることが分った。従って、潤滑剤の有無は基準軸力に大きな影響を与えることが分かる。トルクレンチに関しては、片ロスバナレンチ、4 倍力レンチ及び油圧レンチの差が小さいことが分かった。

2.4 実機試験の結果

太鼓山風力発電所1号機のタワートップフランジにおいて、3号機及び1号機でボルト損傷が発生した東側部の No. 18～No. 25 のタワートップボルトを対象に、ひずみゲージ埋込ボルトに交換し、ボルト締付トルクと導入軸力の関係について調べた。試験では、ロータ及びナセルの自重による作用力が試験対象ボルトに対して圧縮となるように、ロータを移動させて実施した。締付トルクと軸力の関係は表 2 に示す条件で求めた。各試験とも、ボルト締付施工要領により実施した。なお、ボルトの締付によりめねじの損傷がないことを確認されたため、実機試験ではめねじ損傷を想定したハンドタップさらいを省略した。各試験における締付トルク 850 Nm で得られた導入軸力を表 4 に示す。試験結果から導入軸力は締付器具の差異からのバラツキが 10%程度、また同一締付器具においても、室内試験と同様に導入軸力のバラツキは 10%程度であることが分かった。

表 4 実機における導入軸力の試験結果

ケース	導入軸力対基準値(%, 上段) トルク係数(下段)	
	平均値	計測値 最小～最大
1	106	101～109
	0.126	0.123～0.132
2	95	90～99
	0.141	0.135～0.148
3	93	93
	0.143	0.143
4	102	100～105
	0.131	0.128～0.134

2.5 締付トルク管理と摩擦係数

設計で要求されるボルト軸力は、次式から締付トルクにより管理することが可能である。

$$T = kdN \quad (1)$$

ここで、 T は締付トルク、 k はトルク係数、 d はボルトの呼び径、 N は締付ボルト軸力である。さらにトルク係数は次式により表すことができる³⁾。

$$k = \frac{1}{2d} \left[\left(d_2 \left(\frac{\mu}{\cos \alpha} + \tan \beta \right) + \mu_n d_n \right) \right] \quad (2)$$

ここで、 k はトルク係数、 d_2 はボルトの有効径、 μ は

ネジ部摩擦係数、 α はネジ山の半角、 β はリード角、 μ_n は座部摩擦係数、 d_n は座部有効径である。式(1)及び式(2)からわかるように、ボルトの諸元は既知であることから、締付トルクおよびボルト軸力はネジ部摩擦係数と座部摩擦係数がわかれば、設定することが可能である。実際の施工管理では、摩擦係数が接合部材の材質と潤滑剤等により変動することからトルク係数を用いるのが一般的である。

ここで、本試験で直接計測したボルト軸力を利用し、室内試験結果からトルク係数及び摩擦係数を算出し、そのバラツキを調べた。トルク係数については、トルクレンチで設定された 850Nm の締付トルクと計測された軸力の値を用いて、式(1)により計算し、表 3 に示す。摩擦係数については、ネジ部及び座部に二種の摩擦係数が存在するが、ボルトと被締結体に用いた鋼材の組合せが同一であることから、同じ値を適用することが可能と考えた。これにより先に求めたトルク係数(平均値)と表 5 に示すボルト諸元を用いて、式(2)により摩擦係数を逆算した結果を表 3 に示した。

潤滑剤が正常に存在する場合の摩擦係数は 0.08 以下であり、本試験で用いた二硫化モリブデン系潤滑剤を用いる場合には一般的とされる値である 0.10 を下回っていることが分かる。めねじに潤滑剤が無い場合でも、ボルトに潤滑剤があれば、摩擦係数は正常時の 20%程度増大するが、0.10 以下である。一方、潤滑剤が全くない場合には摩擦係数は 0.15 まで大きくなり、軸力の大きな低下をもたらす。このことから、締付トルクによりボルト軸力を管理するためには適切な潤滑剤の使用は不可欠であることが分かる。

表 5 摩擦係数の算出に用いたボルト諸元

諸元名	記号	値
ボルト呼び径	d	24 mm
ボルトの有効径	d_2	21.688 mm
ネジ山の半角	α	30°
リード角	β	2.433°
座部有効径	d_n	41.6 mm

3. ボルトの回転量と軸力の低減量の関係

3.1 軸力低下率の評価手法の提案

軸力の低減率はボルトの回転量から算出することができれば、ボルトの維持管理および交換判定に役に立つ。表 6 に示すボルトの諸元および計算式を利用することにより、軸力低下率 $R(\%)$ と座金部における緩みの周長 $L(\text{mm})$ の関係は次式により表せる。

$$R = 1 - \frac{L}{15} \quad (3)$$

導入軸力と締付トルクが線形関係にあることから、締付トルクを 850 kN で除する項に置き換えても、式(3)が有効である。

表 6 座金部の周長さと軸力の低減度合いの関係

諸元	仕様・値
使用ボルト/ピッチ	F10T-M24/3.0mm
導入軸力・発生ひずみ	268kN, 2923 μ
ネジ締結部長さ	116 mm
同部伸び	$116 \times 2923 \times 10^{-6} \approx 0.34$ (mm)
軸力268kN時ボルト回転角度	$360 \times 0.34 / 3.0 \approx 41 (^{\circ})$
座金直径	42 mm
軸力268kN時座金相当周長	$42 \times \pi \times 41 / 360 \approx 15$ (mm)

3.2 ボルト軸力低下率の評価例

3.1 節に示す軸力低下率の算出方法を利用し、事故風車である3号機のタワートップボルトの損傷状況と残存軸力の関係を調査した。この調査では、850Nmに設定した片口スパナレンチを用いてボルトを締め付けて、ボルトの緩み(回転量)を求めるとともに、ボルトを取り外して折損や亀裂の有無を確認した。ボルトの緩み及び残存軸力とボルトの損傷の関係を表7に示す。緩み及び残存軸力の値を示していないボルトはボルト折損が発生したものである。

図7から分かるように、ボルト緩み、すなわち、ボルト回転量は4mmから45mmの範囲にあり、亀裂のあったボルトの回転量は15mm以上であるのに対して、外傷の無いの回転量は10mm以下であり、残存軸力は30%以上であると推定された。これらの結果は文献2の結論によく対応している。すなわち、ボルトの残留軸力は30%以下になると、ボルトの疲労寿命は急速に低下し、短時間に亀裂または折損が発生することになる。

表 7 緩みおよび残存軸力とボルト損傷の関係

ボルト No.	緩み (mm)	軸力残存率 (%)	損傷状況
9	—	—	ボルトねじ部き裂
14	6	60	ボルト外傷なし
15	6	60	ボルト外傷なし
16	10	33	ボルト外傷なし
17	30	0	ボルト首下き裂
18	—	—	ボルトねじ部折損
19	—	—	ボルト首下折損
20	45	0	ボルト首下き裂
21	—	—	ボルト首下折損
22	25	0	ボルトねじ部き裂
23	7	53	ボルト外傷なし
24	7	53	ボルト外傷なし
25	7	53	ボルト外傷なし
26	4	73	ボルト外傷なし

最後に、太鼓山風力発電所1号機ではボルト交換後500時間が経過した時点の緩み測定を行い、式(3)を用いて軸力低下率を求め、表8に示した。表から、ボルト交換後に運転時間が500時間を経過した時に20%程度の軸力低下が発生したことが分かる。実際20%程度の軸力低下による累積疲労損傷が小さいことは文献2に示されているが、この状態を放置すると、ボルト軸力低下が進み、最終的にボルトの破断に至る²⁾。従って、風

車に使用される高力ボルトは本締め後に増締めが必要であることが分かる。

表 8 500 時間運転後の軸力残存率

ボルト No.	増締め回転量 (mm)		軸力残存率 (%)	備考
	①ロータ東方向時	②ロータ西方向時		
18	0	0	—	
19	0	0	—	
20	0	0	—	
21	3	0	80	振動計設置、東方向
22	2	0	87	
23	3	0	80	
24	0	0	—	
25	0	0	—	
36	0	0	—	振動計設置、南方向
51	0	4	73	振動計設置、西方向

4. まとめ

太鼓山風力発電所風車におけるタワートップボルト導入軸力と締付トルクとの関係について、室内試験及び実機試験により調べると共に、損傷ボルトの軸力低下量およびボルト締付後の軸力低下量を調べ、以下の結論を得た。

- 1) 室内及び実機においてボルト軸力と締付トルクを直接計測することにより、その関係を明らかにした。潤滑剤の有無がボルト軸力に大きな影響を与えるが、トルクレンチの種類による影響は小さい。トルク法を用いた施工管理基準に基づき適切な施工を行った場合、規定のボルト軸力を得ることができ、そのバラツキは10%程度であることが分かった。
- 2) ボルト軸力の低下量をボルトの回転量により定量的に評価する手法を考案した。3号機の損傷ボルトにおいては損傷又は亀裂の発生したボルトの軸力が完全に喪失し、緩みに留まっているボルトの軸力が30%以上であることを明らかにした。また1号機においてはボルト交換後500時間が経過した時点では約20%程度の軸力低下が発生し、ボルト締付後の増締めが必要であることを明らかにした。

謝辞

本研究は NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託研究として行われた。試験の実施にあたり、(株)JFE エンジニアリングにご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

引用文献

- 1) 石原孟、山崎慈生、平田達也、長砂龍次、太鼓山風力発電所の風車タワー疲労破断の原因究明について、第36回風力エネルギーシンポジウム、pp. 470-473、2014
- 2) 福王翔、石原孟、風車発電時の風荷重とタワー高力ボルトの疲労荷重に関する研究、第23回風工学シンポジウム論文集、pp. 355-360、2014
- 3) 株式会社東日製作所、東日トルクハンドブック、Vol.7、P-32