

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*

FEM Analysis for the joint between nacelle and tower top flange of the Taikoyama Wind Turbine

石原 孟** 難波 治之***
Takeshi ISHIHARA Haruyuki NAMBA

1. はじめに

2013 年 3 月 12 日に京都府太鼓山風力発電所内 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の落下が発生した。筒身に過大な疲労荷重が生じた理由については、ナセルとタワートップフランジ接合部の高力ボルトが破断したことで、筒身に生じる引張応力の変動幅がボルト健全の場合に比して 3 倍に増大したためであることが FEM 解析により示された¹⁾。またボルト軸力の低下により、ボルトの軸力変動幅が増大し、それによりボルトの寿命が大きく低下することが示された²⁾。

そこで、本研究では、ボルト損傷の原因を明らかにするために、ボルトの初期導入軸力を系統的に変化させ、その影響を FEM 解析により評価した。また本研究で用いた FEM の妥当性を検証するために、既存の文献との比較を行い、精度検証も行った。

2. 解析の概要

当該発電所タワーは、ドーナツ状の発電機がロータ前面に付いており、ナセル重心が前面に偏っていることで、タワートップフランジとナセルの接合部において、風下側であっても殆ど常時鉛直方向引張力を受け

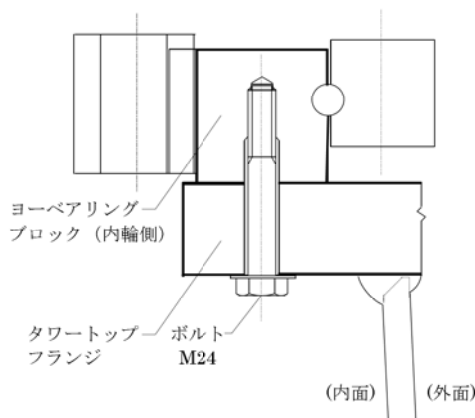


図1 タワートップフランジ断面

ている¹⁾²⁾。図1にその接合部断面を示す。そこで、ボルトの疲労寿命評価のためには、タワートップフランジにおける作用力とボルト軸力の関係を FEM 解析により明らかにする必要がある。

タワートップフランジにおける作用力とボルト軸力の関係を求めることを目的として、タワー全体の FEM モデルを構築するにあたり、まず、タワートップの接合ボルトについては、ソリッド要素を用いてモデル化し、既往文献と同様の FEM モデルを作成し、解析結果を比較することでモデルの精度および解析手法の妥当性を検証した。次に、風車全体をモデル化するにあたり、計算時間の短縮のため、数多いボルトをビーム要素で表わすことを検討し、ボルトをソリッド要素とした場合とビーム要素とした場合の再現性について検証した。得た知見に基づき、タワーとナセルの接合部分を含む風車全体をモデル化し、FEM 解析により、初期導入軸力を変化させた場合のタワートップフランジにおける作用力とボルト軸力の関係を求めた。

3. ボルトのモデル化

3.1 ソリッド要素を用いたボルトモデルの検証

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どうか検証するため、既往文献³⁾を参照し、Test Flange 1（中間フランジボルト1本分の部分モデル）を図2のように再現した。文献では FEM コードとして ANSYS を採用している。本解析では ABAQUS/Standard を用いる。

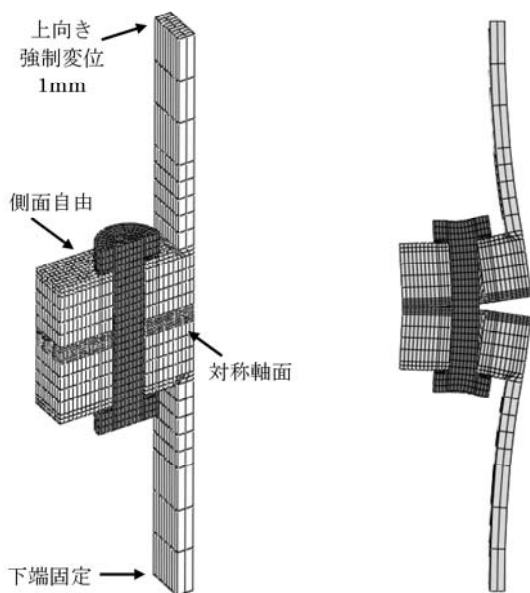
図2(a)に示す解析モデルは、L 型フランジ（上下）、M36 ボルト及びワッシャで構成されている。ボルト中心断面で対象であることから 1/2 モデルで作成した。境界条件として、下フランジ下端にて完全固定、上フランジ上端では論文に従い約 310kN の荷重を与えるために強制変位 1mm を設定した。変形図（表1ケース1に対応、変位を 50 倍に拡大して表示）を図2(b)に示す。

フランジ側面は自由端とし、ボルト対称軸断面上には対称条件を設定した。また、上下のフランジ間、フ

*平成 27 年 11 月 27 日 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

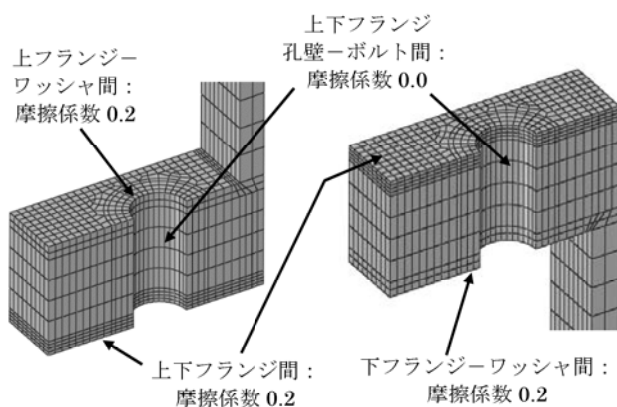
** 会員 東京大学大学院工学系研究科 教授
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

***会員 東京大学大学院工学系研究科 研究員



(a) 解析モデル (b) 変形図

図2 2次元解析モデルと変形図



(a) 上側フランジ (b) 下側フランジ

図3 接触条件

ランジとワッシャ間には、それぞれ接触を考慮し、摩擦係数 0.2 を設定した。フランジ孔壁とボルト間（ねじ部）にも接触を考慮するが、その摩擦係数は 0 とした。接触条件を図 3 に示す。ボルトの導入軸力は、文献に従いを表 1 に示す 2 ケースを設定した。

図 4 にはボルト軸力と作用する軸力の関係を示し、本解析の結果は文献の結果とよく一致していることが分かる。図に示す非線形性は、フランジ接合面の接触と離間によるものである。

3.2 ビーム要素を用いたボルトモデルの精度検証

風車全体をモデル化するにあたり、計算時間の短縮のため、ボルト要素をビーム要素とすることを検討し、ビーム要素とした場合の精度について検証する。

表 1 ボルト導入張力

ケース 1	485 kN
ケース 2	490 kN

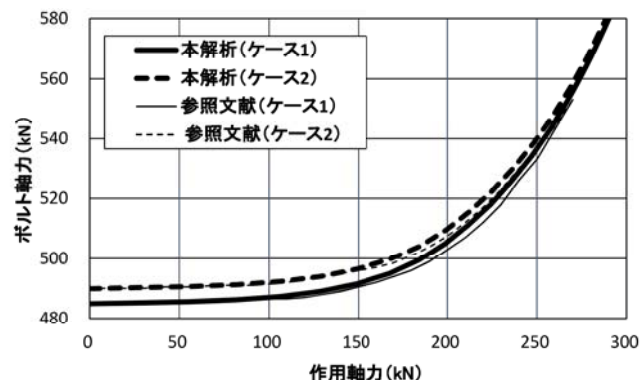


図4 ボルトの軸力と作用軸力の関係

解析モデルは図 2(a)に示したモデルを基本とするが、ビームで表わしたボルトは対称性を考慮した半割りモデルではなく、1 本モデルとした。またボルトを表すビーム要素の長さについては、ワッシャ厚とボルト頭厚の影響を確認するために、表 2 に示す 2 ケースを設定し、精度検証を行った。

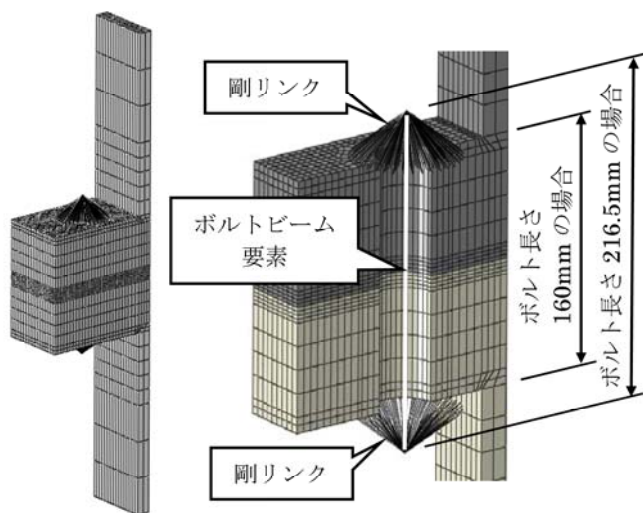
表 2 ボルトを表すビーム要素長さの設定

長さ(mm)	対応する長さの採り方
160.0	接合母材(フランジ)厚
216.5	上記+ワッシャ厚+ボルト頭厚

図 5 にモデル全体図とボルト部拡大図を示す。ボルトをビーム要素でモデル化する場合、ワッシャのモデル化を省略し、ワッシャとフランジの接触面のすべての節点から、ボルトビーム要素端を剛体接合するようモデル化している。ボルトをソリッド要素でモデル化した場合とビーム要素でモデル化した場合のモデル条件及び接触条件の違いを表 3 にまとめた。

表 1 に示したケース 1 の導入軸力において、図 4 のボルトをソリッド要素とした解析結果（本解析(ケース 1)）と、ボルトをビーム要素でモデル化した解析結果（ボルト長 2 ケース）を比較して図 6 に示す。

また、図 2(b)からわかるようにボルトには曲げ変形を生じている。ボルトに生じる曲げモーメントについてもボルト軸力と同様に、ボルトをソリッド要素とした場合と、ビーム要素とした場合の比較を行った。ソリッド要素の場合の曲げモーメントは最外縁の軸方向



(a) 全体図 (b) 拡大図 (半割り表示)

図 5 ビーム要素を用いた解析モデル

表 3 モデル条件および接触条件の比較

項 目		ソリッド要素	ビーム要素
モデル条件	ボルト	ソリッド	ビーム
	フランジ	ソリッド	ソリッド
	ワッシャ	ソリッド	無し(剛接)
	モデル範囲	1/2 範囲	全体
接触条件	上下フランジ間	有り	有り
	フランジ・ワッシャ間	有り	無し
	フランジ・ボルト間	有り	無し

応力度とボルトの断面係数により、平面保持を仮定して評価した。図 7 に曲げモーメントの比較を示す。

導入軸力の差異に拘わらず、ボルト長 160mm とした場合のボルトビーム要素の解析結果は、ソリッド要素の結果よりも軸力、曲げモーメントが高く出る結果となるが、ボルト長を 216.5mm としたビーム要素の解析結果はソリッド要素とほぼ一致する結果となった。

従って、風車全体モデルの解析では、ボルト長を 216.5mm としたモデルを採用し、ビーム要素によりすべてのボルトを再現することとした。

4. 風車全体モデルによるボルト軸力の評価

風車全体をモデル化するにあたり、詳細な評価を行うタワートップフランジ部分はソリッド要素とし、ボルトはビーム要素としてモデル化する。それ以外のタワー全体はシェル要素、ナセル及びロータはその重心に位置する質点としてモデル化する。タワートップフランジの上のヨーベアリングとロータ質点は、剛梁で接合するものとした。

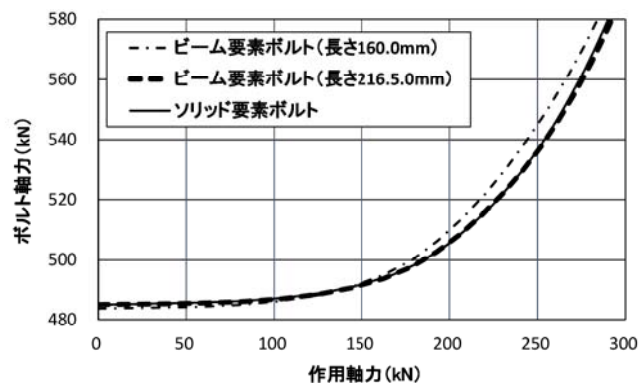


図 6 ソリッド要素とビーム要素を用いた場合のボルトの軸力と作用軸力の関係の比較

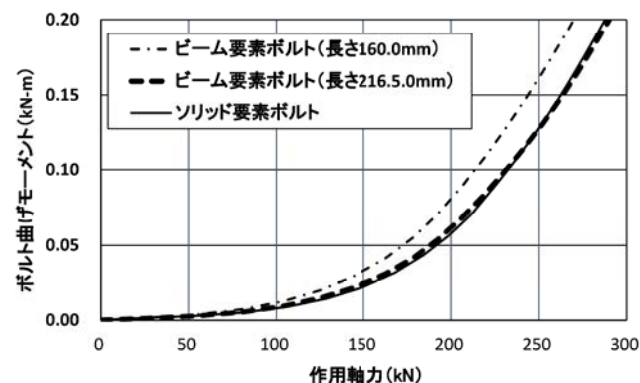


図 7 ソリッド要素とビーム要素を用いた場合のボルトの曲げモーメントと作用軸力の関係の比較

境界条件及び接触条件としては、タワー下端を完全拘束とし、ヨーベアリングブロック下面(図 1)とタワートップフランジ上面の間には接触を考慮し、摩擦係数は 0.2 とした。

モデルの全体、タワートップの拡大、およびヨーベアリングブロックとタワートップフランジ接合部分の断面拡大を図 8 に示す。太鼓山風力発電所でタワー筒身の疲労破壊がフランジ直下で発生したことから、フランジ下の筒身は、溶接部隅角での応力集中の影響を評価できるよう板厚方向の要素分割数を 4 とした。風荷重は、ロータと発電機の重心位置に水平方向のスラスト力を増分荷重として与えた。

ボルトの導入軸力に関しては、ボルトの降伏強度の約 8 割として、設計軸力は 265kN であるとされている。一方、現地調査の結果から、ボルト施工のバラツキは 10 数%程度であり、正常なボルトは設計軸力の 80%以上であることを明らかにしている。

過去の損傷事例から、ボルトの導入軸力の低下が観測されており、その代表、およびその状況から、軸力が低下した場合におけるボルトへの作用荷重とボルト軸力の関係を考慮するため、代表的に 6 本のボルトの

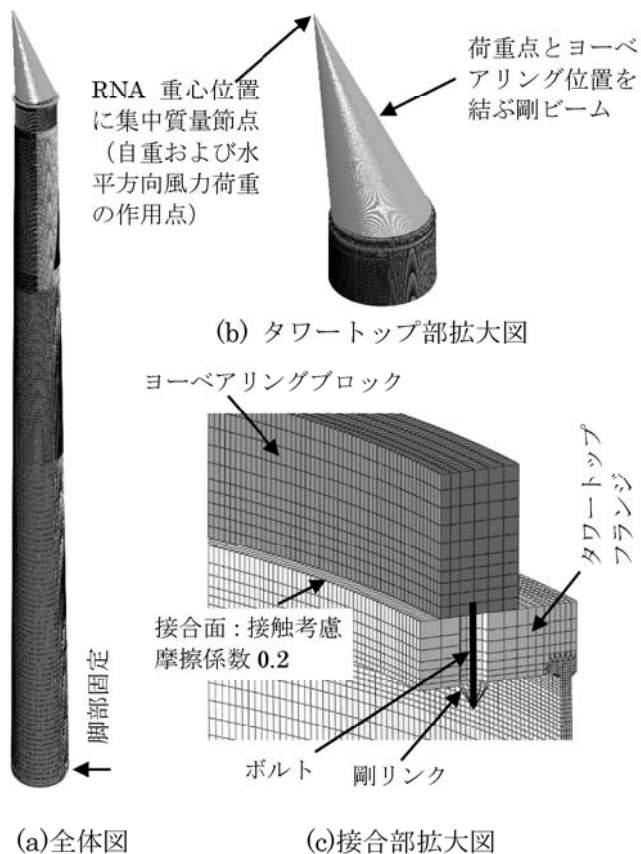


図 8 3次元解析モデル

表 4 全体モデルの解析ケース

ケース	ボルトの導入軸力	ボルト 6 本の軸力
1	設計軸力の 100%	設計軸力の 100%
2	設計軸力の 80%	同 80%
3		同 60%
4		同 40%
5		同 30%
6		同 20%
7		同 10%
8		同 0%

軸力が低下することを仮定し、表 4 に示す解析ケースを設定した。なお、6 本のボルトの位置は、実際損傷時の荷重条件を鑑み、引張力を受けるロータの反対側とする。

それぞれのケースにおいてボルト位置での作用荷重とボルト軸力（軸力が最大となるボルト）の関係を図 9 に示す。ここで、ボルト位置での作用荷重は、当該ボルト 1 本分の範囲に生じる鉛直方向力である。

導入軸力が正しく導入されていれば、ボルトの軸力変動が小さく、導入軸力が低下すると、荷重が小さい場合での軸力の変化が大きくなることがわかる。従っ

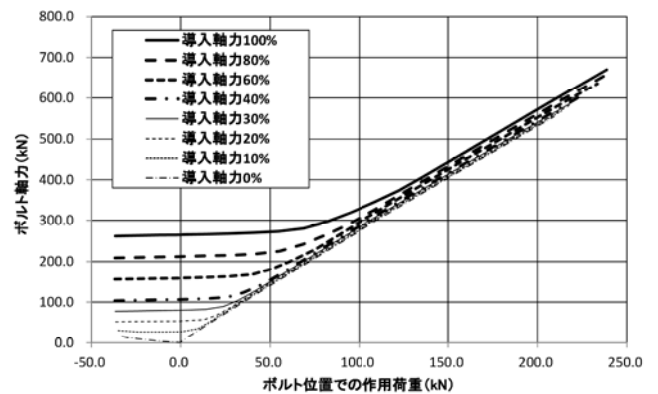


図 9 ボルト軸力と作用荷重の関係

て導入軸力の低下がボルトの疲労を促進する²⁾。

5. まとめ

本研究では、ボルト損傷の原因を明らかにするために、実機風車の全体モデルを構築し、ボルト軸力とタワートップに作用する荷重との関係を調べると共に、ボルトの初期導入軸力を系統的に変化させ、その影響を FEM 解析により評価した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ソリッド要素を用いたボルトの解析結果、既往文献とよく一致した解を得た。またワッシャ厚とボルト頭厚を含めるビームモデルは同様な精度が得られた。
- (2) 初期導入軸力が低下した場合、ボルト軸力はボルト位置における作用荷重の増加に伴い、大きく変化する。

謝辞

本研究は NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託研究の一部として行われた。FEM 解析の実施にあたり(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。

参考文献

- 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解明について, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, 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, pp.355-360, 2014
- 3) Seidel M., Schaumann P., "Measuring fatigue loads of bolts in ring flange connections", EWEC 2001