ピッチ差を有するボルト・ナット締結体の
ねじ込み過程の3次元有限要素法解析野田 尚昭^{*1}, 劉 溪^{*2}, 佐野 義一^{*3}, 久保 周太郎^{*2}, 黄 雲霆^{*2}, 立石 孝介^{*4}, 高瀬 康^{*3}

Three-dimensional finite element analysis for prevailing torque in the screwing process of bolt and nut connections with pitch difference

Nao-aki NODA^{*1}, Xi LIU^{*2}, Yoshikazu SANO^{*3}, Shutaro KUBO^{*2}, Yunting HUANG^{*2},
Kosuke TATEISHI^{*4} and Yasushi TAKASE^{*3}^{*1,*2,*3,*4} Dept. of Mechanical Engineering, Kyushu Inst. Of Tech.
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8550, Japan

Received: 3 April 2019; Revised: 26 May 2019; Accepted: 12 July 2019

Abstract

In the previous studies, a bolt-nut connection with slight pitch difference was considered towards realizing anti-loosening performance and high fatigue strength through axisymmetric finite element method (FEM) as well as experiment. In this study, screwing process before the nut touching the clamped body is analyzed through three dimensional FEM. Then, it is found that the prevailing torque during this screwing process is in good agreement with the experimental result. The prevailing torque varies depending on the pitch difference from 5 to 25 Nm and anti-loosening behavior is confirmed. After the nut toughing a clamped body, the tightening process is also analyzed. For normal nut, the tightening force coincides with the empirical formula. The tightening torque and tightening force relations are discussed with varying the pitch difference.

Keywords : Bolt-nut joint, Pitch difference, Anti-loosening performance, Prevailing torque, Three dimensional finite element method

1. 緒 言

ボルト・ナット締結体は、使用頻度、重要度が高い機械要素であり、低価格であることから、例えば自動車 1 台に 2000 本程度使用されるなど、幅広く使用され、標準化が行われている。しかし、ボルト締結体に衝撃や振動等の動的外力が作用すると、その大きさによって、ねじの螺旋形状に基づく戻り回転力がボルト・ナットねじ面間の摩擦力を上回る場合があり、締結力を失いその機能を果たさなくなる。その結果、現在でも車両や航空機等において緩みに起因する事故が散発している。そのため、緩みにくく破損しにくいボルト締結体が依然として求められており、これまでも多くの緩みの発生とその防止に関する研究(Goodier and Sweeney, 1945)(Pai and Hess, 2002a, 2002b)(Izumi et al., 2005)(泉他, 2006)(木村他, 2006)(肖他, 2008)(石村他, 2011)(Ranjan et al., 2013)(Noda et al., 2016)や疲労強度の向上に関する研究(Kenny and Patterson, 1985a)(Kenny and Patterson, 1989)(Grosse and Mitchell, 1990)(Hobbs et al., 2000)(Majzoobi et al., 2005)がなされてきた。

耐疲労・耐緩みを向上させる研究として、図 3 に示すピッチ差を設けたボルト・ナット締結体は古くから提案されていた(Stromeyer, 1918)(Sopwith, 1948)(Maruyama, 1976) (Kenny and Patterson, 1985b)(Patterson and Kenny, 1986)。しかし、それを実証した研究はほとんど見当たらなかった。そこで、著者らは先に適切なピッチ差を与えることで緩み防止効果が得られることを示すと同時に、疲労実験によって、ある範囲のピッチ差では疲労寿命も向上させ得ることを示した(野田他, 2015a)(Chen et al., 2016)。さらに、軸対称有限要素法(FEM)解析によって、ねじ谷底

No.19-00149 [DOI:10.1299/transjsme.19-00149], J-STAGE Advance Publication date : 23 July, 2019

^{*1} 正員, フェロー, 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)^{*2} 九州工業大学大学院工学研究科^{*3} 正員, 九州工業大学工学部^{*4} 学生員, 九州工業大学大学院工学研究科

E-mail of corresponding author: noda@mech.kyutech.ac.jp

の応力を求め、ピッチ差による疲労強度向上のメカニズムを考察した(Chen et al., 2015).

一方、ボルト破損の主要因は、ナットの緩みに関係することはよく知られている。そこで著者らは、緩み止め効果を評価する上で、ナットのねじ込み過程におけるプリベリントルクが密接に関係することを実験的に明らかにしてきた(Noda et al., 2016). 例えば、プリベリントルクによる緩み止め効果を利用し、広く使用されている特殊ナットとして U ナットが 1962 年に開発されている(U-NUT 製品情報(参照日 2018 年 8 月 5 日)). U ナット以外にもプリベリントルクを利用した特殊ナットが見られるものの、緩み止め効果を定量的に明らかにしたものはない。ナットにおけるプリベリントルクの解析には、螺旋系のねじ形状を有するモデルを用いる必要があり、ねじ底の応力解析に用いた軸対称 FEM モデルに代わって、三次元 FEM モデルで解析することになる。

そこで、本論文では、ねじ込み過程におけるプリベリントルクの詳細な挙動を実験的に把握するとともに、3 次元有限要素解析によるプリベリントルクのシミュレーションを試みる。なお、「ねじ込み過程」の解析は後続の「締め込み過程」や「緩め過程」にも有用であり、今後の応用が可能と考える。よって、本論文の手法を拡張して、最終的にはピッチ差付きナットの緩み性能を解析と実験の両面から解明する予定である。

2. ねじ込み過程の解析方法

2・1 過去に行われたねじの 3 次元解析

本研究では実験では耐緩み性が確認されているピッチ差付ボルト締結体の「ねじ込み過程」におけるプリベリントルクの 3 次元 FEM 解析を行う。ここで「ねじ込み(Screwing)過程」は図 1 に示すように、ナットをボルトに挿入していき、被締結体に接する迄の過程であり、被締結体に接触した後の「締め付け(Tightening)過程」と区別して用いる。通常のボルト・ナットでは、ねじ込みに要するトルクは $T_p = 0$ であるが、ボルト・ナットのピッチ差を大きくすると、いわゆる「プリベリントルク(Prevailing torque) $T_p \neq 0$ 」が生じる。ここでは、このプリベリントルク T_p を締め付け過程で生じる「締め付けトルク(Tightening torque) T 」と区別して用いる。

ボルト締結体の 3 次元 FEM 解析について、これまでに Chen らによる締結力発生時のねじ山荷重分担率に関して 3 次元有限要素モデルと軸対称有限要素モデルを用いた解析(Chen, 1999)を始めとして、泉らによるボルト締結体の軸直角方向荷重による座面の完全すべりの緩みについての三次元数値解析が行われてきた(Izumi et al., 2005). また、完全座面すべり以前の微小な緩みが進行することを指摘した研究(泉他, 2006)がある。また、JIS 規格以外の特種緩み止めボルト締結体を対象にプリベリントルクについて報告されている(泉他, 2005)(Noda et al., 2008)(陳他, 2012). しかし、これらの研究では、その発生過程や実験との整合にまで言及したものはない。

2・2 解析方法

図 2 に本研究で使用するボルト・ナット M12 の寸法を示し、図 3 にボルト・ナット間のクリアランスおよびピッチ差の説明を示す。軸方向のクリアランスは、片側 $C_s = 59 \mu\text{m}$ とした。ナットには、ボルトに比べて α だけ大きいピッチを与えた。その結果、M12 ボルトのピッチ $p = 1750 \mu\text{m}$ に対して、ナットのピッチ $1750 + \alpha \mu\text{m}$ となる(図 3 参照)。付与したピッチ差 α は、小さい順に $30 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ とする。図 4 にナットねじ込み過程におけるプリベリントルク発生後のボルトとナットの接触状態を示す。表 1 に用いたボルト・ナットの物性値を示し、図 5 にボルト・ナットの応力ひずみ線図を示す。プリベリントルクは、ピッチ差によるボルト・ナット間ねじ同士の接触力が最大となるナット端部から順次生じ始める。

図 6 に有限要素解析モデルと境界条件を示す。ナットについてはねじ込む際にトルクを作用させる六角部分を簡略化し、2 面幅を丸ナットとしてモデル化する(図 6(a)). 要素分割は 3 次元ソリッド要素を用いて、ボルト・ナットねじ山の螺旋形状を考慮し、ねじの螺旋部には最小 0.048 mm の四面体要素を用いて作成した。要素数は 9.3×10^4 個、ノードは 15.1×10^4 個である。解析ソフトは ANSYS16.2 を使用し、準静的、弾塑性、接触を考慮した非線形解析を用いる。図 5(b)に示すように境界条件はボルト頭部を拘束し、ナットを時計回り(締め付け方向)に回す。

(1) プリベリントルクの解析は、プリベリントルクが発生し始める位置で解析を始め、ナット全高(ねじ山数約 5.7)が 8 周回った位置すなわち全体が入った後約 2.3 周余分にねじ込んで解析を終える。余分にねじ込み解析したのは、ナットの全ねじ山が入った後、トルクに変動が見られるためである。

(2) プリベリグトルクの解析に当たり、適切な摩擦係数を用いる必要がある。これまでの研究ではボルト・ナット間での摩擦係数は 0.05~0.15 の広範囲にわたる値が報告されている(泉他, 2005)(Noda et al., 2008)(Yokoyama et al., 2012)(赤石他, 2013)(野田他, 2015a, 2015b)(Chen et al., 2016)が、本実験で用いる二硫化モリブデンペーストに限定すれば、ボルト・ナット間の摩擦係数は 0.09~0.12 とされている(日本ねじ研究協会, 1982)。ここでは、ボルト・ナット間の実験後の面荒れ状態を考慮して、高い値 $\mu=0.12$ を用いて解析する。

(3) (2) においてプリベリグトルクの解析で使用した摩擦係数 $\mu=0.12$ が適当であるかを検証する必要がある。そこで、摩擦係数を変化させて、ねじ込み過程のトルクの解析を行い、実験結果と比較する。この解析に用いる摩擦係数には、事前検討を経て、次の $\mu=0.10, 0.12, 0.14$ に絞った。

Fig.1 Schematic illustration for (a) screwing process and (b) tightening process.

Fig.2 M12 Bolt-nut specimen (unit:mm).

Fig.3 Pitch difference and clearance between bolt and nut threads (unit:μm).

Fig.4 Contact status when the prevailing torque appears between bolt and nut.

Table 1 Material properties of bolt and nut.

	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Yield strength σ_y (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)
SCM435 (Bolt)	206	0.3	800	1200
S45C (Nut)	206	0.3	530	980

Fig.5 Stress strain relation for SCM435 and S45C.

(1) FEM model M12 bolt and nut

(b) Boundary conditions

Fig.6 FEM model and boundary conditions for prevailing torque analysis.

3. ねじ込み過程におけるプリベリントルクの実験と解析の比較

3・1 試験片と実験条件

ねじ込み試験に用いる JIS M12 のボルト・ナットは、ボルトは強度区分 8.8 の SCM435、黒染処理材、ナットは強度区分 8 の S45C 材で、精密切削にて精度 ± 0.003 mm を目標にねじ加工を施した。ナット高さ 10 mm、ねじ山数 5.71(面取りを除き 4.34 山)のものを用いる。

試験方法は JIS B 1056 に規定されている(JIS B 1056: 2011)がここでは、図 7 に示すように、ダイヤル式トルクレンチ((株)東日製作所製 DB50N) (図 7)を用い、ボルト・ナット端面のねじ開始位置を合わせ(回転角 0°)、そこからナット回転数とトルク T_p の関係をピッチ差 α 毎に計測する。 45° 回転させる毎にトルクを読み取り記録した。ナット全高(ねじ山数約 5.7)がボルトにねじ込まれた後、さらに回転させ計 8 回転させた。潤滑油には二硫化モリブデングリーススプレー PRO((株)エーゼット製)を用いた。

Fig.7 Torque measuring method and device (Torque wrench).

3・2 プリベリントルクの実験結果

図 8 にプリベリントルク T_p を実験で求めた結果を、ナットの回転数との関係として示す。ここで、図 8(a)~(c) 中の A→B→C→D→E は、図 8(d) に示すねじ込み過程のナットの位置である。すなわち点 A はナットがボルトに初めて接触した位置、点 B はプリベリントルク T_p が初めて発生する位置、点 C は T_p が増加している途中の位置、点 D はナットのねじ山が全部ねじ込まれた位置、点 E はナットが 8 周した位置である。図 8(a)~(c) にはナットねじ込み過程(Screwing process)のトルクの他に、ナットねじ戻し過程(Unscrewing process), E→D→C→B→A のトルクも示している。

図 8 に示すように、プリベリントルク T_p はねじ込み過程の進行に応じて変化する。まず、ねじ込み方向のプリベリントルクは、7 周から 8 周にかけてほぼ一定となるので、その平均値に注目し T_p^{EXP-S} とする。一方、ねじ戻し方向のプリベリントルクは、5 周から 7 周の平均値に注目し T_p^{EXP-U} 、ねじ戻し初期の値に注目し T_p^{EXP-U} とする。

図 8(a)~(c) より、ねじ込み過程において、ピッチ差 α が大きくなるにつれ、プリベリントルク T_p^{EXP-S} が大きくなることが確認できる。ねじ戻し過程では、プリベリントルク T_p^{EXP-U} がねじ込み過程のこの T_p^{EXP-S} とほぼ一致しているが、図 8 (c) のように、その後急激に減少する場合がある。ピッチ差が大きくなるほどその減少量は大きくなることわかる。

プリベリントルクの変動を見ると、点 B から点 D にかけて線形的に増加している。これは、点 B 時点における未ねじ込み部(図 8(d)の点 B 参照)のピッチ差により、点 D まで接触面と接触圧力が増加しているためと考えられる。また、点 D 以降のトルクの変動は、接触面に介在する摩耗片の生成、変形、脱落による現象と考えられる。この様なトルクの変動は摩耗片が生じやすいピッチ差 α が大きいときほど大きくなっている(図 10(b)参照)。

図 9 にねじ込み実験後のボルトねじ面の観察結果を示す。図 9(a)より、 $\alpha = 0 \mu\text{m}$ では、ねじ面には目立った傷はない。図 9(b)~(d)より、用いたピッチ差すべてで凝着を伴う引っかき摩耗(Scratch wear)が見られる。図 10 に $\alpha = 30, 50 \mu\text{m}$ における引っかき摩耗が見られる部分の比較を示す。図 10(a)の $\alpha = 30 \mu\text{m}$ ではボルトねじ面にわずかの筋が見られ、これが引っかき摩耗と考えられる。この引っかき摩耗の痕は図 10(b)の $\alpha = 50 \mu\text{m}$ ではより明確に見られ、さらに引っかき摩耗による摩耗片(Scratch with adhesion)の付着が観察される。図 9, 10 から、ピッチ差が大きくなると、ボルト・ナット間の接触圧力が大きくなり、潤滑油の限界を大きく超えた強い金属接触が生じることが示唆される。これらの摩耗は、ねじ込み、ねじ戻し過程において接触していたと思われるボルト・ナット間のねじ面にのみ生じていることから、磨耗はねじ込み過程の点 B から生じていると考えられる。

Fig.8 Prevailing torque experimentally obtained. The red points show the result of tightening process. The blue points show the result of loosening process. Prevailing torque $T_p=0$ during A to B. Prevailing torque T_p gradually increase during B to D. Prevailing torque T_p converge during D to E.

S: Scratch wear T: Top of threads
Fig.9 Bolt thread surface after screwing experiment.

Ad: Scratch with adhesion S: Scratch wear
Fig.10 Detail of bolt thread surface in Fig. 9.

3・3 プリベリグトルクの解析結果

実験と同様、FEM シミュレーションで $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ のナットのねじ込みと、 $E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ のナットのねじ戻しを解析し、図 11 にプリベリグトルクのナットの回転数との関係として示す。図 11(a)(b)より、ピッチ差 $\alpha = 30, 40 \mu\text{m}$ ではねじ込み方向の解析結果と実験結果がほぼ一致している。図 11(c)より $\alpha = 50 \mu\text{m}$ では解析結果が実験結果と比べて小さくなった。これは、ピッチ差が大きくなり接触圧力が大きくなることで、実際の摩擦係数が、解析で用いた摩擦係数 $\mu = 0.12$ より大きくなったと考えられる。ねじ戻し過程において、プリベリグトルクの実験値はねじ込み過程と非対称的な挙動で減少しているのに対して、解析では対照的に減少している。これは、解析では摩耗片が生成されないため、摩耗片の影響によるトルクのばらつきが表現できていないと考えられる。

以上の解析では、摩擦係数 $\mu = 0.12$ を用いているが、本件では以下で摩擦係数の及ぼす締め込み過程への影響を議論する。

Fig.11 Prevailing torque obtained by 3D FEM simulation with friction coefficient $\mu = 0.12$ in comparison with experimental results.

4. 摩擦係数に関する考察とプリベリグトルクに関する他の研究結果との比較

4・1 簡易方法による解析

実験結果に適合する摩擦係数を求めるために摩擦係数 μ を変化させ、ねじ込み過程のトルクの解析を行う。本解析では、計算時間を節約するために、以下のようにねじ込み初期段階を省略させた方法(簡易解析)をとる。ここで、点 D はナットのねじ山が全部ねじ込まれた位置である。計算時間を節約するために、点 D までのナットのね

じ込み過程を省略する．図 12(a)~(c)はこの短縮された過程 $D^-(\theta=0^\circ) \rightarrow D \rightarrow D^+(\theta=1.5^\circ)$ の説明図である．図 12(a)の位置 D^- は，ナットが全部ボルトにねじ込まれているけれども，プリベリングトルク T_p が作用していない状態であり，これを解析の原点とする．図 12(b)の位置 D はナットがねじ込まれ，かつ T_p が作用している状態である． D^- にトルクを加えトルクが一定になるまでねじ込む．その結果，ナットの位置は D^- から D に移動する．図 12(c)の位置 D^+ は，プリベリングトルクが安定した値になる位置($\theta=1.5^\circ$)である．

図 13 に各ピッチ差におけるプリベリングトルクに対する摩擦係数 μ の影響を横軸にナットの回転角度 θ ，縦軸にプリベリングトルク T_p をとって解析した結果を示す．図 13 より実験値に近いプリベリングトルクの解析結果は $\alpha=30, 50 \mu\text{m}$ では，摩擦係数 $\mu=0.12$ ， $\alpha=40 \mu\text{m}$ では，摩擦係数 $\mu=0.10$ である．この結果は，ねじ込み開始位置を含めた解析結果(図 11)と異なるが，その原因については本章で後述する．この結果により，プリベリングトルクのシミュレーションで用いるべき摩擦係数を以下のように考察する．

Fig.12 Shortened screwing process $D^- \rightarrow D \rightarrow D^+$ in Fig. 13.

Fig.13 Effect of friction coefficient μ on the prevailing torque during the shortened screwing process $D^- \rightarrow D \rightarrow D^+$ in Fig.12.

4・2 仮定した摩擦係数の評価

図 14 にピッチ差と摩擦係数 $\mu=0.10, 0.12, 0.14$ に対するプリベリングトルクの解析と実験の比 T_p^{FEM-S}/T_p^{EXP-S} をプロット点で示す. 3本の直線は最小二乗法で直線近似した結果である. 図 14 より, 摩擦係数 $\mu=0.12$ の場合が最も $T_p^{FEM-S}/T_p^{EXP-S}=1$ に近く, 実験結果に近い解析結果が得られていることが分かる. また, 二硫化モリブデンペーストのねじ部の摩擦係数は $\mu=0.09\sim0.12$ と報告されており(日本ねじ研究協会, 1982), $\mu=0.12$ はこの範囲内である. 以上の考察より, 本研究では摩擦係数 $\mu=0.12$ を用いて行った解析結果(図 11)の妥当性が示された.

ここで, 図 11 のねじ込み開始位置を含めた解析結果と, 図 13 ナットのねじ込み過程 (図 8(d)の A→D) を省略した簡易解析結果の違いを比較すると, 両者のプリベリングトルクの違いは 5~16%である. 一方, 図 11 の解析結果と実験結果の比較ではピッチ差 $\alpha=30\mu\text{m}$ と $40\mu\text{m}$ がほぼ一致しており, $\alpha=50\mu\text{m}$ は実験とは異なる. これに対し, 図 13 の解析結果と実験結果の比較ではピッチ差 $\alpha=30\mu\text{m}$ と $50\mu\text{m}$ が一致しており, $\alpha=40\mu\text{m}$ が異なる. このように図 11 と図 13 の結果に違いが生じているのは, 点 D までのねじ込み過程を省略したことによるものである.

Fig.14 Relationship between pitch difference α and T_p^{FEM-S}/T_p^{EXP-S} .

5. プリベリングトルクに関する他の研究との比較

これまでの著者らの研究では, プリベリングトルクの大きさが緩み止めに効果があることが実験的に明らかにされている(Noda et al., 2016). また, 1962 年から使われている U ナットにおいて, そのゆるみ止め機構として, プリベリングトルクによる緩み止め効果が実証されて評価されてきた(U-NUT 製品情報(参照日 2018 年 8 月 5 日)). 具体的には, 著者らによるピッチ差を有する M16 ボルト・ナットにおける NAS3350 の規格に準拠した緩み試験(株式会社 NKE にて実施)では, プリベリングトルク $T_p=30\text{Nm}$ では, 21000 サイクルでナットが脱落したが, $T_p=57\text{Nm}$ と 67Nm では 30000 サイクルに達しても脱落しなかった(Noda et al., 2016). ここでは, ピッチ差付ナットと他の緩み止め性能にすぐれた特殊ナットのプリベリングトルクを比較して評価する.

表 2 にピッチ差付ナットの結果をまとめて示す. この表にはピッチ差付ナットと同様に, プリベリングトルクを利用した, U ナット(富士精密, 2018), スーパースリットナット(泉他, 2005), アウターキャップナット(Noda et al., 2008)と比較して示す. 安定した値が得られたねじ込み過程のトルク T_p^{FEM-S} を用いて参考までに比較すると, ピッチ差付ナット以外では, スーパースリットナットが最も大きい. 呼び径が M16 のスーパースリットナットと M12 のピッチ差付ナットとのプリベリングトルクを比較するためにここでは, このトルクが呼び径に比例すると過程し, 補正して比較する. スーパースリットナットの最大値 19Nm を補正した 14.3 Nm に対してピッチ差付ナットのピッチ差 $\alpha=50\mu\text{m}$ が 60%ほど大きい. 以上の結果から, 他の特殊ナットとの緩み止め性能の優位性が示唆される.

Table 2 Comparison of prevailing torque for pitch difference nut, U-nut, super slit nut and outer cap nut.

Type	Pitch difference α (μm)	Material (bolt/nut)	Yield Strength σ_y (MPa)	Prevailing torque by experiment		Prevailing torque by FEM	
				T_p^{EXP-S} (Nm)	T_p^{EXP-U} (Nm)	T_p^{FEM-S} (Nm)	T_p^{FEM-U} (Nm)
Pitch difference nut JIS M12 (This study)	30	SCM435 S45C	800 530	4.7	7.0	4.2 ($\mu=0.12$)	4.1 ($\mu=0.12$)
	40			14.6	15.0	16.8 ($\mu=0.12$)	15.5 ($\mu=0.12$)
	50			29.9	32.0	23.2 ($\mu=0.12$)	21.2 ($\mu=0.12$)
U-nut JIS M12	—	SCM435	800	1.5	0.6	not indicated	not indicated
Super slit nut JIS M16	—	S45C SGD3M	530 320	13.5	not indicated	17-19 ($\mu=0.15$)	15-18 ($\mu=0.15$)
Outer cap nut JIS M12	—	SUP9	785	not indicated	not indicated	0($\mu=0.15$)	1.2($\mu=0.15$)
	—	SUP10	1080	not indicated	not indicated	0($\mu=0.15$)	3.3($\mu=0.15$)

6. ねじ込み過程に続く締め付け過程の解析

6・1 締め付け過程の解析方法

図 15(a)にねじ込み過程に続く被締結物の締め付け過程の解析に用いる有限要素解析モデルを示す。モデルは前節と同じボルト・ナット間に SCM435 からなる被締結物を介在させたものである。図 15(b)に示すように、境界条件は被締結物の左面とボルト頭部の右面を完全拘束する。図 15(c)に締め付け過程 E→F→G を示す。点 E は被締結物の位置までねじ込んだ状態、点 F は被締結物を締め付けている状態、点 G は締め付けにより、ナット頭部端のねじ面接触力が開放された状態である。解析ソフト、解析条件は 2・2 節のプリバリングトルクの解析と同様である。

ここでは、ボルトの降伏点 $\sigma_y=800$ MPa の 30% である $\sigma=240$ MPa が生じる締結力 $F=22$ kN を、ボルトの締結の目安とする。この締結力を通常のボルト $\alpha=0$ μm に導入するために要するトルクは $T=45$ Nm である。ねじ面の摩擦係数 $\mu=0.12$ 、座面の摩擦係数 $\mu_w=0.12$ を使用する。FEM 解析により、締め付け過程 E→F→G の締め付けトルク T と締結力 F の関係を求める。

Fig.15 FEM model and boundary conditions for tightening process continued from Fig.8 (d)with the nut position E→F→G.

6・2 通常のボルト・ナット ($\alpha=0$) におけるトルク T の数値解析と理論計算式の比較

通常のボルト・ナットにおける被締結体を締め付ける際に生じる締め付けトルク T の計算式を式(1),(2),(3)に示す(山本, 1970).

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

$$T = \frac{F}{2} \left(\frac{d_2}{\cos \beta} \mu + \frac{p}{\pi} + d_w \mu_w \right) \quad (2)$$

$$d_w = \frac{2(d_o^3 - d_h^3)}{3(d_o^2 - d_h^2)} \quad (3)$$

ここで, 締め付けトルク T , 締結力 F , ねじの呼び径 d , トルク係数 K , ねじの有効径 d_2 , ねじのピッチ p , 座面における摩擦の等価直径 d_w , ねじ山の半角 β , ボルト座面外径 d_o , ボルト孔径 d_h である. 表 3 に M12 ボルト・ナットにおけるそれぞれの値を示す.

式(2)のように, 締め付けトルクはねじ面摩擦トルク $F/2 \cdot d_2 / \cos \beta \cdot \mu$, 軸力トルク $F/2 \cdot p / \pi$, 座面摩擦トルク $F/2 \cdot d_w \cdot \mu_w$ の三つから構成される. 図 16 に計算式(2)で求められる $\alpha=0 \mu\text{m}$ の締め付けトルクの他に, 解析で求められた締め付けトルク T と締結力 F の関係を同時に示す. 通常の $\alpha=0 \mu\text{m}$ においては締め付けトルク T 計算式(2)と FEM 解析結果とは誤差 5 % 以内で一致する.

Table 3 Each value of M12 bolt and nut used for calculation.

Pitch diameter d_2 (mm)	Half angle of thread β (°)	Friction coefficient		Pitch difference p (mm)	Bolt bearing surface outer diameter d_o (mm)	Bolt hole diameter d_h (mm)
		thread surface μ	bearing surface μ_w			
10.863	30	0.12	0.12	1.75	18	13.2

Fig.16 Relationship between torque and tightening force of M12 bolt and nut.

6・3 締め付け過程の解析結果 ($\alpha > 0$)

図 16 よりピッチ差付ナットにおける締め付け過程の解析では、締め付けトルク T がプリベリングトルク T_p^{FEM-S} を超えてから締結力が発生し始める。そのため、通常のナットと比べると、同じトルクの大きさを締め付けたとき、締結力が小さくなる。また、ピッチ差が大きくなると、締結力を付加するために必要なトルクが大きくなるので、同じトルクの大きさでは、ピッチ差が大きいほど、締結力が小さくなる。

通常のナットと比べ、ピッチ差付ナットではトルク T に対する締結力増加の傾きが大きい。また、ピッチ差 $\alpha = 30, 40 \mu\text{m}$ で、トルク T を大きくすると、通常のナット $\alpha = 0 \mu\text{m}$ の挙動と一致する。ピッチ差付加によるこれらの変化は、図 15(c)に示すように、締め付けにより、接触していたナットの両端のねじ山の接触状態が変化し、ナット頭部側のねじ山の接触圧力が小さくなり、その分が軸力に加算される。その後ナット頭部側のねじ面接触力がなくなること、通常のナットと同様の挙動になる。これらから、実際の締め付けでは降伏点の 60~70 % まで締め付けることを考慮すると(山本, 1970), ピッチ差付ナットでも高い締結力を得ることができると考えられる。

7. 結 言

ナットにピッチ差を付加した締結体について、そのねじ込み過程を 3 次元 FEM 解析によりプリベリングトルクの発生の過程とその大きさを求め、実験と比較してピッチ差による影響を明らかにした。また、ナットねじ込みに続き、被締結物の締め付け過程における締め付けトルクと締結力との関係についても言及した。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) ピッチ差を付加したナットでねじ込むと、ボルトねじ山とナットの両端のねじ山が接触したときからプリベリングトルクが発生し、増加した後、略々一定値に達する。一方、ナットにねじ戻しトルクを与えると、最初の 1 周ほどでプリベリングトルクがほぼ半減する。その後はねじ込み過程と対称的な挙動で減少していく。
- (2) プリベリングトルクの実験ではピッチ差の最も大きな $\alpha = 50 \mu\text{m}$ の場合、プリベリングトルクは一定値をとらず不安定な挙動をする。しかし解析では不安定な挙動は見られず、安定している。これは、ボルト・ナット間に生じる強圧接触に伴う変形と、凝着摩擦による磨耗生成物の介在による影響が主な原因と考えられる。
- (3) ねじ込み過程のシミュレーションにおける摩擦係数 μ 設定のため、ねじ込み過程 A~D(図 8(d)参照)を省略したモデルを用いる方法を考案した。そして、実測値に近いトルクが得られる摩擦係数 $\mu = 0.12$ を選定した。
- (4) ねじ込み過程の解析結果は $\alpha = 50 \mu\text{m}$ を除いて、実験結果とほぼ一致した。ピッチ差 $\alpha = 50 \mu\text{m}$ では、ピッチ差増加にともなう接触圧力が大きくなり、実際の摩擦係数が、解析で用いた $\mu = 0.12$ より大きくなったためと考えられる。
- (5) 締め付け過程の解析により、通常のナットの締結力とトルクの関係は、既存の理論計算式と誤差 5%以内で一致し、解析精度を確認できた。

比較的耐緩み特性に優れる特殊ナットと比較して、本研究締結体ではプリベリングトルク大きいことから緩み止め性能において優れることが示唆される。

文 献

- 赤石雄一郎, 陳鑫, 于洋, 玉崎英俊, 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 異なるピッチを有するボルト・ナットの組み合わせによる疲労強度向上とクリアランスの影響, 自動車技術会論文集, Vol.44, No.4 (2013), pp.1111-1117.
- 陳玳珩, 清水英輔, 増田健一, 円周スリットナットのねじ山変形とゆるみ防止効果の関係, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.78, No.788 (2012), pp.390-402.
- Chen, J. J. and Shin, Y. S., A Study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis, Nuclear Engineering and Design, Vol.191, No.2 (1999), pp.109-116.
- Chen, X., Noda, N.-A., Wahab, M.A., Akaishi, Y., Sano, Y., Takase, Y. and Fekete, G., Fatigue failure analysis for bolt-nut connections having slight pitch differences using experimental and finite element methods, Acta Polytechnica Hungarica, Vol.12, No.8 (2015), pp.61-79.
- Chen, X., Noda, N.-A., Wahab, M.A., Sano, Y., Maruyama, H., Wang, H., Fujisawa, R. and Takase, Y., Fatigue life improvement by slight pitch difference in bolt-nut connections, Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol.37, No.1 (2016), pp.11-19.

- 株式会社富士精密, U-NUT 製品情報, available from <<http://www.fun.co.jp/products/detail.php?no=Ng==>>, (参照日 2018 年 8 月 5 日).
- Goodier, J. N. and Sweeney, R. J., Loosening by vibration of threaded fastenings, *Mechanical Engineering*, Vol.67 (1945), pp.798-802.
- Grosse, I. R. and Mitchell, L. D., Nonlinear axial stiffness characteristics of axisymmetric bolted joints, *The American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design*, Vol.112, No.3 (1990), pp.442-449.
- Hobbs, J. W., Burguete, R. L., Heyes, P. F. and Patterson, E. A., The effect of eccentric loading on the fatigue performance of high-tensile bolts, *International Journal of Fatigue*, Vol.22, No.6 (2000), pp.531-538.
- 石村光敏, 山中啓司, 正司康雅, 小林隆志, 沢俊行, 軸直角方向繰返し変位を受けるボルト締結体のゆるみについて, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.77, No.781 (2011), pp.1444-1452.
- 泉聡志, 木村成竹, 酒井信介, 微小座面すべりに起因したボルト・ナット締結体の微小ゆるみ挙動に関する有限要素法解析, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.72, No.717 (2006), pp.780-786.
- Izumi, S., Yokoyama, T., Iwasaki, A. and Sakai, S., Three-dimensional finite element analysis on tightening and loosening mechanism of threaded fastener, *Engineering Failure Analysis*, Vol.12, No.4 (2005), pp.604-615.
- 泉聡志, 横山喬, 寺岡卓也, 岩崎篤, 酒井信介, 斎藤金次郎, 名川政人, 野田秀樹, ゆるみ止め性能を有するスーパースリットナットの有限要素法による機能検証, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.71, No.703 (2005), pp.380-386.
- JIS B 1056: 2011, プリベリングトルク試験・試験方法, 日本規格協会.
- Kenny, B. and Patterson, E. A., Load and stress distribution in screw threads, *Experimental Mechanics*, Vol.25 No.3 (1985a), pp.208-213.
- Kenny, B. and Patterson, E. A., Stress analysis of some nut-bolt connections with modifications to the nut thread form, *A Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol.20, No.1 (1985b), pp.35-40.
- Kenny, B. and Patterson, E. A., The Distribution of load and stress in the threads of fasteners, *Journal of Mechanical Behaviour of Materials*, Vol.2, No.1-2 (1989), pp.87-105.
- 木村成竹, 泉聡志, 酒井信介, 三次元有限要素法によるダブルナットの締め付けおよびゆるみ挙動解析, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.72, No.719 (2006), pp.967-973.
- Majzoobi, G. H., Farrahi, G. H. and Habibi, N., Experimental evaluation of the effect of thread pitch on fatigue life of bolts, *International Journal of Fatigue*, Vol.27, No.2 (2005), pp.189-196.
- Maruyama, K., Stress analysis of a bolt-nut joint by the finite element method and the copper-electroplating method: 3rd Report, Influence of Pitch Error or Flank Angle Error, *Bulletin of JSME*, Vol.19, No.130 (1976), pp.360-368.
- Noda, N.-A., Chen, X., Sano, Y., Wahab, M.A., Maruyama, H., Fujisawa, R. and Takase, Y., Effect of pitch difference between the bolt-nut connections upon the anti-loosening performance and fatigue life, *Materials & Design*, Vol.96, No.15 (2016), pp.476-489.
- Noda, N.-A., Kuhara, M., Xiao, Y., Noma, S., Saito, K., Nagawa, M., Yumoto, A. and Ogasawara, A., Stress reduction effect and anti-loosening performance of outer cap nut by finite element method, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.2, No.6 (2008), pp.801-811.
- 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 陳鑫, 丸山光, 王寰, 藤澤良太, 異なるピッチ差によって疲労寿命を向上させたボルト・ナット締結体における緩み止め性能の研究, *自動車技術会論文集*, Vol.46, No.1 (2015a), pp.121-126.
- 野田尚昭, 佐野義一, 陳鑫, 丸山光, 王寰, 藤澤良太, ボルト・ナット締結体の疲労強度に及ぼすピッチ差の影響とその解析モデルの提案, *日本機械学会論文集*, Vol.81, No.831 (2015b), DOI:10.1299/transjsme.15-00240.
- Pai, N. G. and Hess, D. P., Experimental study of loosening of threaded fasteners due to dynamic shear loads, *Journal of Sound Vibration*, Vol.253, No.3 (2002a), pp.585-602.
- Pai, N. G. and Hess, D. P., Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load, *Engineering Failure Analysis*, Vol.9, No.4 (2002b), pp.383-402.
- Patterson, E. A. and Kenny, B., A Modification to the theory for the load distribution in conventional nuts and bolts, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol.21, No.1 (1986), pp.17-23.
- Ranjan, B. S. C., Vikranth, H. N. and Ghosal, A., A novel prevailing torque threaded fastener and its analysis, *The American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design*, Vol.135, No.10 (2013), 101007-9.
- Sopwith, D. G., The distribution of load in screw threads, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.159, No.1 (1948), pp.373-383.
- Stromeyer, C. E., Stress distribution in bolts and nuts, *Transactions of the Institution of Naval Architects*, Vol.60 (1918), pp.112-121.

- 日本ねじ研究協会, 高強度ボルトの締結性能に関する標準化のための調査報告書(第 V 報), (1982), p.91.
- 肖陽, 久原昌浩, 野田尚昭, 齊藤金次郎, 名川政人, 湯本淳, 緩み止め植込みボルトにおける薄肉変形部の最適寸法について, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.743 (2008), pp.954-960.
- 山本晃, ねじ締結の理論と計算, (1970), pp.5,39,養賢堂.
- Yokoyama, T., Olsson, M., Izumi, S. and Sakai, S., Investigation into the self-loosening behavior of bolted joint subjected to rotational loading, Engineering Failure Analysis, Vol.23 (2012), pp.35-43.

References

- Akaishi, Y., Chen, X., Yu, Y., Tamasaki, H., Noda, N.-A., Sano, Y. and Takase, Y., Fatigue strength analysis for bolts and nuts which have slightly different pitches considering clearance, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.44, No.4 (2013), pp.1111-1117 (in Japanese).
- Chen, D., Shimizu, E. and Masuda, K., Relation between thread deformation and anti-loosening effect for nut with circumference slits, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.78, No.788 (2012), pp.390-402 (in Japanese).
- Chen, J. J. and Shin, Y. S., A Study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis, Nuclear Engineering and Design, Vol.191, No.2 (1999), pp.109-116.
- Chen, X., Noda, N.-A., Wahab, M.A., Akaishi, Y., Sano, Y., Takase, Y. and Fekete, G., Fatigue failure analysis for bolt-nut connections having slight pitch differences using experimental and finite element methods, Acta Polytechnica Hungarica, Vol.12, No.8 (2015), pp.61-79.
- Chen, X., Noda, N.-A., Wahab, M.A., Sano, Y., Maruyama, H., Wang, H., Fujisawa, R. and Takase, Y., Fatigue life improvement by slight pitch difference in bolt-nut connections, Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol.37, No.1 (2016), pp.11-19.
- Fuji Seimitsu Co., Ltd., U-NUT Product information, available from <<http://www.fun.co.jp/products/detail.php?no=Ng==>>>, (accessed on 5 August, 2018).
- Goodier, J. N. and Sweeney, R. J., Loosening by vibration of threaded fastenings, Mechanical Engineering, Vol.67 (1945), pp.798-802.
- Grosse, I. R. and Mitchell, L. D., Nonlinear axial stiffness characteristics of axisymmetric bolted joints, The American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design, Vol.112, No.3 (1990), pp.442-449.
- Hobbs, J. W., Burguete, R. L., Heyes, P. F. and Patterson, E. A., The effect of eccentric loading on the fatigue performance of high-tensile bolts, International Journal of Fatigue, Vol.22, No.6 (2000), pp.531-538.
- Ishimura, M., Yamanaka, H., Syoji, Y., Kobayashi, T. and Sawa, T., Loosening of bolted joints under transverse repeated displacements, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.77, No.781 (2011), pp.1444-1452 (in Japanese).
- Izumi, S., Kimura, M. and Sakai, S., Small loosening of bolt-nut tightening system due to micro bearing-surface slip: Finite element method study, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.72, No.717 (2006), pp.780-786 (in Japanese).
- Izumi, S., Yokoyama, T., Iwasaki, A. and Sakai, S., Three-dimensional finite element analysis on tightening and loosening mechanism of threaded fastener, Engineering Failure Analysis, Vol.12, No.4 (2005), pp.604-615.
- Izumi, S., Yokoyama, T., Teraoka, T., Iwasaki, A., Sakai, S., Saito, K., Nagawa, M. and Noda, H., Verification of anti-loosening performance of super slit nut by finite element method, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.71, No.703 (2005), pp.380-386 (in Japanese).
- JIS B 1056: 2011, Test method - prevailing torque test, Japanese Standards Association (in Japanese).
- Kenny, B. and Patterson, E. A., Load and stress distribution in screw threads, Experimental Mechanics, Vol.25 No.3 (1985a), pp.208-213.
- Kenny, B. and Patterson, E. A., Stress analysis of some nut-bolt connections with modifications to the nut thread form, A Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol.20, No.1 (1985b), pp.35-40.
- Kenny, B. and Patterson, E. A., The Distribution of load and stress in the threads of fasteners, Journal of Mechanical Behaviour of Materials, Vol.2, No.1-2 (1989), pp.87-105.
- Kimura, M., Izumi, S. and Sakai, S., Tightening and self-loosening behavior of double-nut tightening system by three-dimensional finite element method, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.72, No.719 (2006), pp.967-973 (in Japanese).

- Majzoobi, G. H., Farrahi, G. H. and Habibi, N., Experimental evaluation of the effect of thread pitch on fatigue life of bolts, *International Journal of Fatigue*, Vol.27, No.2 (2005), pp.189-196.
- Maruyama, K., Stress analysis of a bolt-nut joint by the finite element method and the copper-electroplating method: 3rd Report, Influence of Pitch Error or Flank Angle Error, *Bulletin of JSME*, Vol.19, No.130 (1976), pp.360-368.
- Noda, N.-A., Chen, X., Sano, Y., Wahab, M.A., Maruyama, H., Fujisawa, R. and Takase, Y., Effect of pitch difference between the bolt–nut connections upon the anti-loosening performance and fatigue life, *Materials & Design*, Vol.96, No.15 (2016), pp.476-489.
- Noda, N.-A., Kuhara, M., Xiao, Y., Noma, S., Saito, K., Nagawa, M., Yumoto, A. and Ogasawara, A., Stress reduction effect and anti-loosening performance of outer cap nut by finite element method, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.2, No.6 (2008), pp.801-811.
- Noda, N.-A., Sano, Y., Takase, Y., Chen, X., Maruyama, H., Wang, H. and Fujisawa, R., Anti-loosening performance of special bolts and nuts having enhanced fatigue life by introducing pitch difference, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.46, No.1 (2015a), pp.121-126 (in Japanese).
- Noda, N.-A., Sano, Y., Takase, Y., Chen, X., Maruyama, H., Wang, H. and Fujisawa, R., Fatigue strength for bolts and nuts having slight pitch difference considering incomplete threads of nut, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol.81, No.831 (2015b), DOI:10.1299/transjsme.15-00240.
- Pai, N. G. and Hess, D. P., Experimental study of loosening of threaded fasteners due to dynamic shear loads, *Journal of Sound Vibration*, Vol.253, No.3 (2002a), pp.585-602.
- Pai, N. G. and Hess, D. P., Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load, *Engineering Failure Analysis*, Vol.9, No.4 (2002b), pp.383-402.
- Patterson, E. A. and Kenny, B., A Modification to the theory for the load distribution in conventional nuts and bolts, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol.21, No.1 (1986), pp.17-23.
- Ranjan, B. S. C., Vikranth, H. N. and Ghosal, A., A novel prevailing torque threaded fastener and its analysis, *The American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design*, Vol.135, No.10 (2013), 101007-9.
- Sopwith, D. G., The distribution of load in screw threads, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.159, No.1 (1948), pp.373-383.
- Stromeyer, C. E., Stress distribution in bolts and nuts, *Transactions of the Institution of Naval Architects*, Vol.60 (1918), pp.112-121.
- The Japan Research Institute for Screw Threads and Fasteners, Survey report for standardization on fastening performance of high strength bolts (Report V) (1982), p.91 (in Japanese).
- Xiao, Y., Kuhara, M., Noda, N.-A., Saito, K., Nagawa, M. and Yumoto, A., Optimum dimensions. of thin walled tube on the mechanical performance of super stud bolt, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.74, No.743 (2008), pp.954-960 (in Japanese).
- Yamamoto, A., Theory and calculation of screw fastening (1970), pp.5,39, Yokendo (in Japanese).
- Yokoyama, T., Olsson, M., Izumi, S. and Sakai, S., Investigation into the self-loosening behavior of bolted joint subjected to rotational loading, *Engineering Failure Analysis*, Vol.23 (2012), pp.35-43.