

ピッチ差を有するナットのねじ込み過程で生じる プリベリングトルクに及ぼすナット高さの影響*

野田 尚昭¹⁾ 王 彪¹⁾ 乾 湧人¹⁾ 劉 溪¹⁾ 立石 孝介¹⁾ 佐野 義一¹⁾ シュウ ペイフェン¹⁾ 高瀬 康¹⁾

Effect of Nut Height on Prevailing Torque in Screwing Process of Pitch Difference Nut

Nao-Aki Noda Biao Wang Yuto Inui Xi Liu Kosuke Tateishi Yoshikazu Sano Beifen Siew Yasushi Takase

The authors' previous studies revealed that the bolt nut connections having pitch difference may realize fatigue life improvement and anti-loosening performance. However, the suitable pitch difference for improving the fatigue life is relatively smaller than the suitable pitch difference for improving anti-loosening performance. In other words, there is no pitch difference improving both fatigue life and anti-loosening performance. Therefore, in this paper, the effect of nut height on the anti-loosening performance is newly considered. The results show that the most suitable pitch difference for anti-loosening performance can be reduced by increasing the nut height. This nut height may realize both anti-loosening performance and high fatigue strength.

KEY WORDS: Safety, Bolt-Nut Connections, Pitch Difference, Anti-loosening performance, Prevailing torque, Three dimensional finite element method (C1)

1. 緒言

ねじ締結体は、使用頻度と重要度が高い機械要素で産業界に広く普及しているが、低価格で、緩みにくく損傷しにくい特性が常に求められている。ボルト・ナット締結体に衝撃等の動的外力が作用すると、その大きさによっては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り、締結力を失いその機能を果たさなくなる。車両や航空機等においてゆるみに起因する事故が散発しているため、優れた緩み止め性能と高い疲労強度が求められている。これまでも多くの緩みの発生とその防止に関する研究^{(1) - (10)}や疲労強度の向上^{(11) - (15)}に関する研究がなされてきた。緩み止めに特化した特殊ナットは、複数の部品または特殊な幾何学的形状を必要とするため、複雑な製造プロセスおよび高コストであるという問題が挙げられる。

緩み止めの研究として、ボルト・ナット締結体で積極的にピッチ差を設けることによる、耐緩みの向上が提案されてきた^{(16) - (20)}。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ともに、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^{(21) - (22)}。また、3次元FEM解析によって耐緩みに直接関係するプリベリングトルク T_p を求め、実験とよく一致す

ることを示した⁽²³⁾。図1に先の研究によって得られた疲労強度及び緩み止め性能とピッチ差の関係を示す。図1のように疲労強度を向上させるには、比較的小さいピッチ差を付与する必要があり、また、緩み止め性能を向上させるには比較的大きいピッチ差を付与しなければならないため、通常のナット形状へのピッチ差付加では疲労強度と緩み止め性能の両立は難しい。そこで、本研究では、ナット高さを高くすることで、緩み止め性能に最適なピッチ差範囲を小さくさせること、具体的には図1の緩み止め性能の青い曲線を左側に移動させることとする。

本論文では、異なるナット高さのピッチ差を有するM12ボルト・ナット締結体を用いてねじ込み実験を行い、3次元FEM解析の結果と比較して、プリベリングトルクの大きさを明らかにして、ピッチ差とナット高さによる影響を明らかにする。

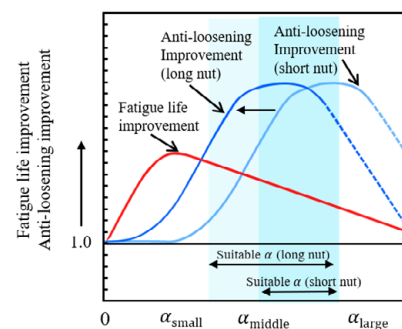


Fig. 1 Schematic illustration of the fatigue life improvement and anti-loosening improvement.

*2020年3月11日受理。

1)九州工業大学(804-0093 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

2. ナット高さの異なるナットのねじ込み実験と解析方法

ここで扱う問題は、ナットをボルトに挿入して”ねじ込む (Screwing)”過程であり、被締結体に接触した後の”締め付け (Tightening)”過程と区別する。

2.1 試験片

ねじ込み試験には JIS M12 のボルト・ナットを用い、ボルトの強度区分 8.8, 材料は SCM435, またナットは強度区分 8, 材料は S45C で, 高さ 10.5mm, と高さ 14mm のものを用いる。表 1 に用いたボルト・ナットの物性値を示す。ピッチ差は, ボルトに比べて, ナットにピッチ差 α だけ大きいピッチを与えた。付与したピッチ差 α は, 高さ 10.5mm のナットでは 30 μ m, 38 μ m, 45 μ m, 高さ 14mm のナットでは 30 μ m とし, ナット端の面取りは全て 1.5mm とする。図 2 にボルト・ナット間のピッチ差とクリアランスを示す。ボルト・ナット間のクリアランスは, 片側 59 μ m とした。また, 図 3(a), (b)に本研究で使用するボルト・ナット M12 の寸法を示す。

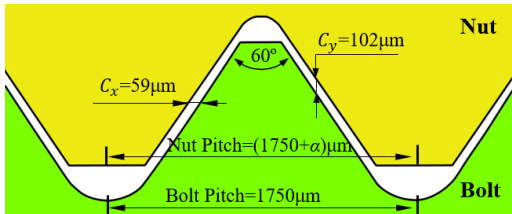


Fig. 2 Pitch difference and clearance between bolt and nut threads.

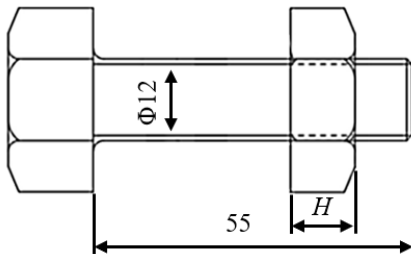


Fig. 3 M12 Bolt-nut specimen $H=10.5, 14.0$ (unit:mm).

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

2.2 ねじ込みと締め付け過程

図 4 に示すように(a)ねじ込み過程(Screwing process)とナットがボルトから外れるまでの(b)ねじ戻し過程(Unscrewing process)を対象とする。図 5 にナット高さ $H=10.5$ mm と $H=14.0$ mm におけるねじ込み過程とねじ戻し過程におけるねじ山の接触状態を示す。ある程度ピッチ差が大きければ, 被

締結体にナットが接触する前の段階でトルク (ナットの回転抵抗) が生じる。このようなねじ込む途中で生じるトルクをプリベリングトルク(Prevailing torque) といい, ピッチ差が集結するナット両端部がボルトのねじ山を軸方向に押し広げようとして生じる。このトルクがナットの緩み防止に効果を発揮する。点 A はナットがボルトに初めて接触した位置, 点 B はプリベリングトルクが初めて発生する位置, 点 C はトルク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, ナットが被締結体と接触する位置である。点 E~A は, ねじ戻し過程を示す。図 5 に示すようにナット高さ $H=10.5$ mm と $H=14.0$ mm それぞれの場合において, プリベリングトルクが発生するときのねじ込んだねじ山数は異なる (図 5(a), (b)ナット位置 B 参照)。しかし, ナット高さが異なるので, ナット全体をねじ込んだ際に $H=10.5$ mm, $\alpha=45 \mu$ m と $H=14.0$ mm, $\alpha=30 \mu$ m において同程度の T_p が得られることが期待できる。実験は, 回転数 0 の点 A (図 6 参照) を始点としてピッチ差 α の仕様それぞれについてナット回転数とトルク T_p の関係を 45° 回転させる毎に計測した。

2.3 試験条件と方法

トルクの計測には, ダイアル式トルクレンチ(TOHNICHI DB50N)を用い, 潤滑油には二硫化モリブデン(MoS2)を用いた。ナット回転数とトルク T_p の関係をピッチ差 毎に計測する。ダイアル式トルクレンチ((株)東日製作所製 DB50N)を用いる。図 6 はナット高さ $H=14.0$ mm における $\alpha=0$ と $\alpha=30 \mu$ m のトルク T_p とナット回転数 n の関係である。図 6 の赤線に示すように, $\alpha=30 \mu$ m では, トルク T_p は図 6 のナットを約 4 回転させた点 B から発生する。その後, トルク T_p はナットを約 7 回転させた点 D の位置まで増加し, その後一定値をとる。

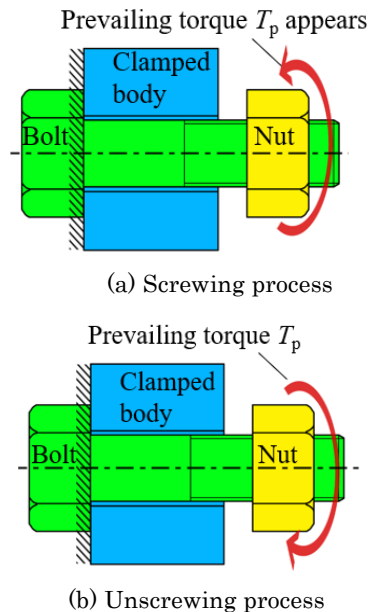


Fig. 4 Schematic illustration for (a) screwing process (b) unscrewing process.

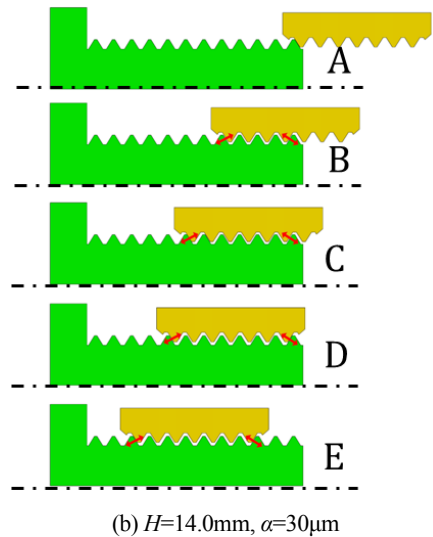
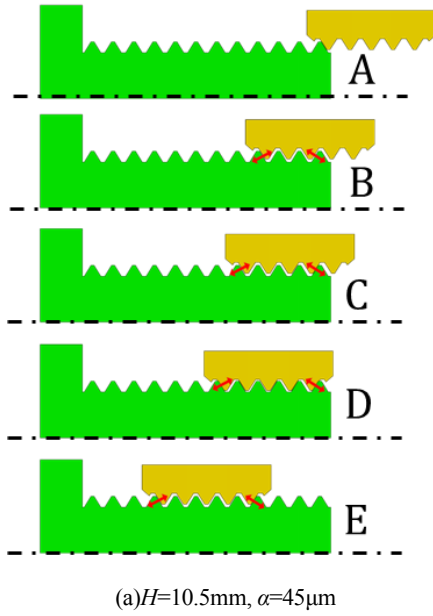


Fig. 5 Screwing and tightening process of the nut when (a) $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=45\mu\text{m}$ and (b) $H=14.0\text{mm}$, $\alpha=30\mu\text{m}$.

2.4 解析方法

図7に有限要素解析モデルを示す。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。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0.048mmの四面体要素を用いて作成した。要素数は 2.3×10^4 個、ノードは 4.4×10^4 個である。解析ソフトはANSYS16.2を使用し、準静的、弾塑性性、接触を考慮した非線形解析を用いる。なお、摩擦係数は実験での測定値がねじ面摩擦係数 $\mu_s=0.11\sim 0.15$ 、座面摩擦係数 $\mu_w=0.16\sim 0.18$ であった。実験で使用した二硫化モリブデングリーススプレーのねじ面における摩擦係数⁽²⁴⁾を考慮して、解析には摩擦係数 $\mu=0.12$ に絞りピッチ差 $\alpha=30$,

45(μm)でそれぞれプリベリントルクの解析を行う。なお、解析時間を節約するため、過程A-Dまでの解析を省略する。

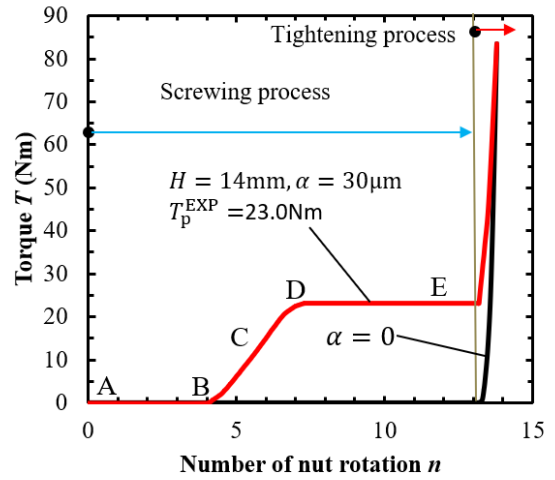
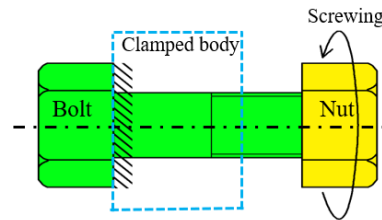


Fig. 6 Variation of torque in screwing process of nut when $H=14\text{mm}$, $\alpha=30\mu\text{m}$.



(a) FEM model M12 bolt and nut



(b) Boundary conditions

Fig. 7 FEM model and boundary conditions for prevailing torque analysis.

3. ねじ込み過程における実験と解析結果

3.1 実験結果と解析結果

表2に実験と解析から得られたプリベリントルクを示す。図8に実験と解析から得られたプリベリントルク計測結果を示す。プリベリントルクとナットの回転数の関係を以下の3通りにて示す。また図8, 9中のDは図5中の位置Dを意味する。

- (1) $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=30\mu\text{m}$
- (2) $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=38\mu\text{m}$
- (3) $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=45\mu\text{m}$

図8に示すように(1)高さ $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=30\mu\text{m}$ では、解析値 $T_p^{\text{FEM}}=4.0\text{Nm}$ であり、(2)高さ $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=38\mu\text{m}$ では、実験

値 $T_p^{EXP} = 17.5\text{Nm}$, 解析値 $T_p^{FEM} = 15.3\text{Nm}$ となった. また(3) 高さ $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=45\mu\text{m}$ では, 実験値 $T_p^{EXP} = 27.7\text{Nm}$, 解析値 $T_p^{FEM} = 24.7\text{Nm}$ となった. 図 8 の実験値と解析値の誤差は 15%以内であり, ほぼ一致しているといえる. なお, 図 8, 9 でそれぞれの解析結果で点 D の $\theta=0$ で $T_p=0$ となっている. これは解析では図 5 の過程 A-D を省略しているため, 開始後ボルトがナットと共に回転しねじれた後, 通常のプリベリントルク T_p が生じるためである. 通常のねじ込み実験では, 過程 A-D(図 6 参照)で既にボルトがナットと共にねじれているので, 点 D にて $T_p \neq 0$ となる.

3.2 ナット高さのプリベリントルクへの影響

図 9 に高さ $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=45\mu\text{m}$ と高さ $H=14.0\text{mm}$, $\alpha=30\mu\text{m}$ の実験と解析から得られたプリベリントルク計測結果を示す. 高さ $H=14.0\text{mm}$, $\alpha=30\mu\text{m}$ におけるプリベリントルクは高さ $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=45\mu\text{m}$ におけるプリベリントルクとほぼ一致しており同程度の緩み止め性能があることが示唆される.

図 10 にプリベリントルク T_p とピッチ差 α の関係を示す. $H=10.5\text{mm}$, $H=14.0\text{mm}$ いずれにおいてもピッチ差 α が大きくなるにつれてプリベリントルク T_p は増加する. また, 同じピッチ差 α において $H=14.0\text{mm}$ のプリベリントルク T_p ほうが $H=10.5\text{mm}$ より大きくなる. このことから, ナット高さを大きくすることで緩み止めに必要なピッチ差を小さくすることが可能であることがわかる.

4. ナット高さを大きくした際の疲労強度への影響

これまで, ピッチ差付ナットのナット高さの及ぼす緩み止め性能への影響を議論してきた. しかし, 本研究の目的は緩み止め性能と疲労強度の両立であるため, 疲労強度への影響も議論する必要がある. そこで, 前章で用いたナット高さを高くしたピッチ差付ナットを用いてボルトねじ谷の応力を有限要素法により解析する. 図 11 に解析対象であるボルト・ナット締結体の概略図を示す. ナットのの高さが異なるため, ナットのねじ山数が変わり, 接触するねじ山数も変わる. そのため, ボルトねじ谷に番号を付けて考察する. 図 12 にナット高さ $H=10.5\text{mm}$, ピッチ差 $\alpha=30\mu\text{m}$ 及び $H=14.0\text{mm}$, $\alpha=15\mu\text{m}$ それぞれの解析結果を耐久線図と対比して比較する.

Table 2 Prevailing torque obtained by experiment and 3D FEM simulation.

Nut height H (mm)	Pitch difference α (μm)	T_p^{EXP} (Nm)	T_p^{FEM} (Nm)
10.5	30.0	-	4.0
10.5	38.0	17.5	15.3
10.5	45.0	27.7	24.7
14.0	30.0	23.0	23.7

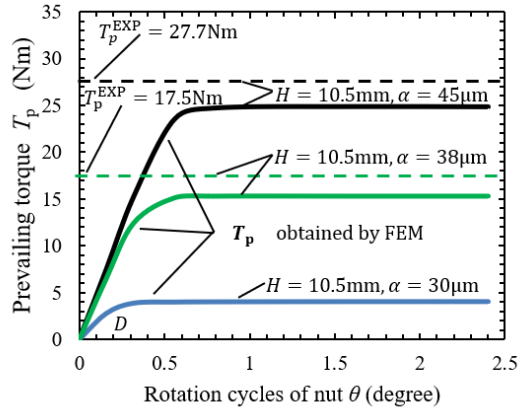


Fig. 8 Prevailing torque with a nut height of 10.5mm

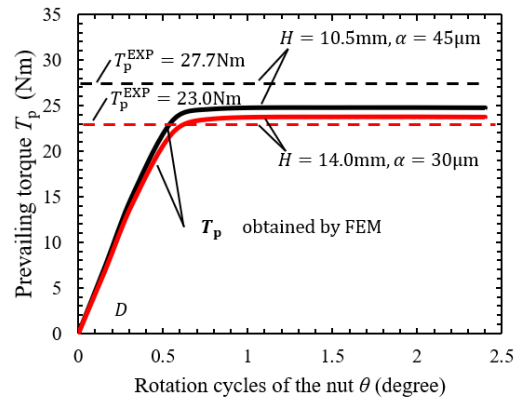


Fig. 9 Comparison of prevailing torque when $H=10.5\text{mm}$, $\alpha=45\mu\text{m}$ and $H=14.0\text{mm}$, $\alpha=30\mu\text{m}$.

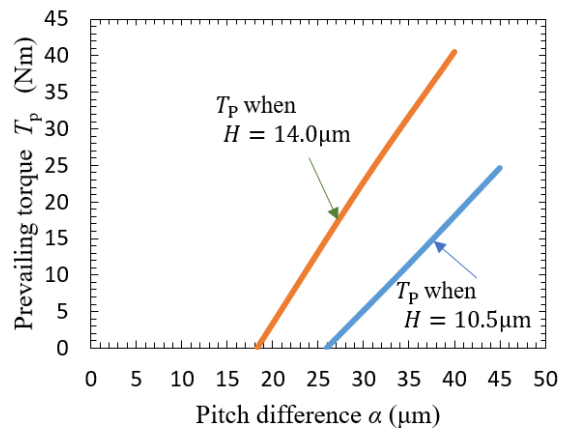


Fig. 10 Relationship between pitch difference and prevailing torque with different nut height.

図 12 には, ピッチ差の影響も比較するため, ナット高さ $H=10.5\text{mm}$, ピッチ差 $\alpha=0$ の解析結果も示している. 図 12 において, (a)と(b)を比較すると通常ナット($\alpha=0$)に比べて, ピッチ差を付与した場合($\alpha \neq 0$) 2 番目のボルトねじ谷は安全側に移動し、疲労強度を向上させることができた.

また、ナット高さを比較すると、図 12(b)に示す結果で最も低い安全率は 5 山目の 0.43 であった。一方、図 12(c)で最も低い安全率は 7 山目の 0.48 であった。両者を比較すると、大きな違いはなくほぼ一致していると言える。つまり、ナット高さを高くしてピッチ差を小さくしても疲労強度は変わらないことがわかった。

以上から、前章の結果を考慮すると、ナット高さを高くすることで、緩み止め性能と疲労強度を両立できることが示唆される。

5. 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トルクの発生過程とその大きさを求め、実験と比較してピッチ差とナット高さによる影響を明らかにした。得られた結論を以下にまとめる。

(1) 実験により、ピッチ差付きナットのねじ込み及びねじ戻し過程のプリベリントルクの詳細な挙動を明らかにした。ナット高さを高くしてもトルクは通常の高さの場合と同様の挙動になることを明らかにした。

(2) ねじ込み過程の 3 次元 FEM シミュレーションを行った結果、一定値に達したプリベリントルクの値は解析と実験結果を比べてほぼ一致した。

(3) ナットの高さを高くすることで、ピッチ差が小さくても、プリベリントルクが大きくなり、耐緩み性は損なわれないことが明らかになった。

(4) ピッチ差付きナットの疲労強度は、ナット高さを高くしても変わらず、すなわち疲労強度に対する有効なピッチ差範囲は変わらないことが明らかになった。

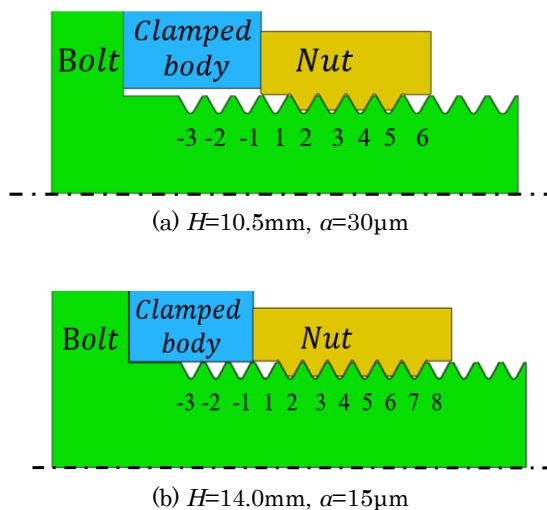
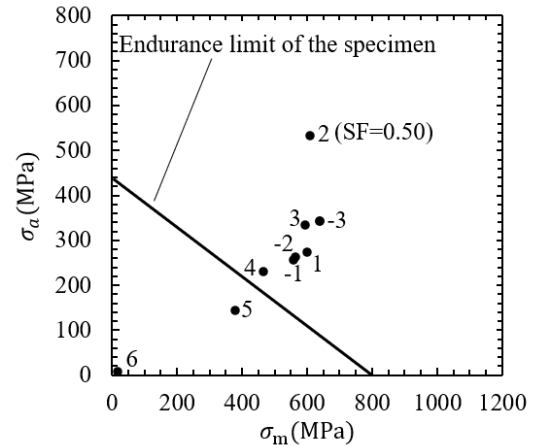
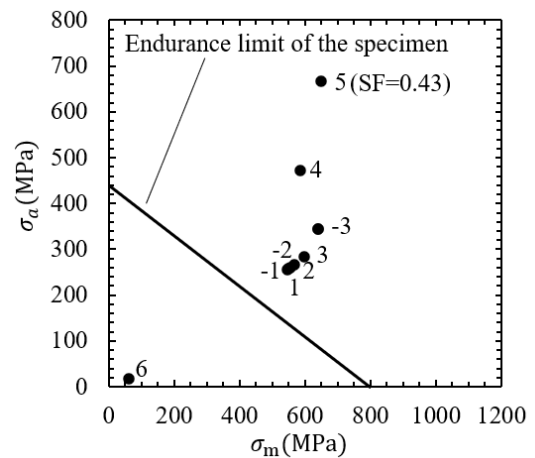


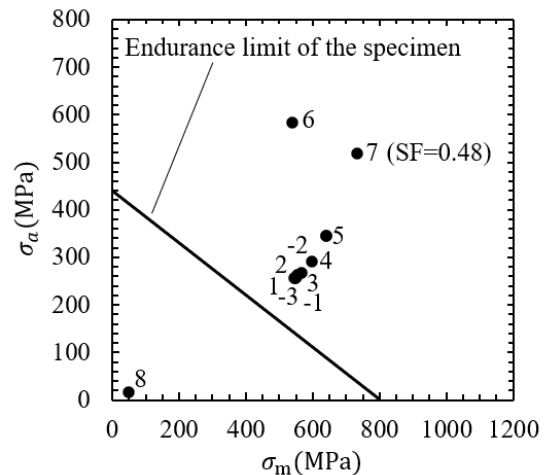
Fig. 11 Illustration of bolt and nut with $H=10.5$ and $H=14.0$ mm



(a) $H=10.5$ mm, $\alpha=0\mu\text{m}$



(b) $H=10.5$ mm, $\alpha=30\mu\text{m}$



(c) $H=14.0$ mm, $\alpha=15\mu\text{m}$

Fig. 12 Endurance limit diagram for the bolt at the bolt thread root No. -3 ~ No. 8.

参 考 文 献

- 1) Goodier, J. N. and Sweeney, R. J., Loosening by vibration of threaded fastenings, Mechanical Engineering, Vol. 67, p. 798-802. (1945)

- 2) 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, p.585-602. (2002)
- 3) 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, p.383-402. (2002)
- 4) 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, p.604-615. (2005)
- 5) 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, p.780-786. (2006)
- 6) 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.
- 7) 肖陽, 久原昌浩, 野田尚昭, 斉藤金次郎, 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, p.954-960. (2008)
- (8) 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, p.1444-1452. (2011)
- 9) 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, p101007-9. (2013)
- 10) 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, p.476-489. (2016)
- 11) Kenny, B. and Patterson, E. A., Load and stress distribution in screw threads, *Experimental Mechanics*, Vol.25 No.3, p.208-213. (1985)
- 12) 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, p.87-105. (1989)
- 13) 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, p.442-449. (1990)
- 14) 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, p.531-538. (2000)
- 15) Majzoobo, 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, pp.189-196. (2005)
- 16) Stromeier, C. E., Stress distribution in bolts and nuts, *Transactions of the Institution of Naval Architects*, Vol.60, p.112-121. (1918)
- 17) Sopwith, D. G., The distribution of load in screw threads, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.159, No.1, p.373-383. (1948)
- 18) 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, p.360-368. (1976)
- 19) 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, p.35-40. (1985)
- 20) 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, p.17-23. (1986)
- 21) 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, p.121-126. (2015)
- 22) 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, p.11-19. (2016)
- 23) 野田尚昭, 劉溪, 佐野義一, 久保周太郎, 黄雲霆, 立石孝介, 高瀬康, 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, *日本機械学会論文集*, Vol.85, No.876, p.19-00149(2019)
- 24) 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), p.91. (1982)