

ピッチ差を与えることによるボルト・ナット締結体の疲労強度と緩み止め効果*

(その4：緩み止め効果に密接に関係する緩み抵抗トルクについて)

野田 尚昭** 高瀬 康***

NODA, Nao-Aki and TAKASE, Yasushi

1 はじめに

低コストで耐疲労・耐緩みを向上させる研究として、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が、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ともに、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^{(1)~(3)}。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グ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⁽⁴⁾。さらに、ピッチ差を変えることによる、ねじ込み過程におけるプリベリングトルクの詳細な挙動と大きさに与える影響を、実験的に把握し3次元有限要素解析により解明した⁽⁵⁾。しかし、ねじ込み過程に続いて考察が必要な締め付け過程や、緩みに直接関係する緩ませ過程に関しては、プリベリングトルクに比べて十分な議論なされていない。そこで、本稿では、ねじ込み過程に続く締め付け過程

における締結力 F と締め付けトルク T 発生過程とその大きさを3次元 FEM 解析により求め、実験で得られた結果と比較してピッチ差による影響を明らかにする。

2 締め付けおよび緩ませ過程の実験方法

2.1 ねじ込み過程と締め付け過程

図1に示すように、本論文ではナットが被締結物に接触した後の「締め付け過程」を取り扱う。ここで、「締め付け過程」は、ナットを挿入する「ねじ込み過程」と区別して用いる。図2にナット回転角とトルクの関係を示す。図3に、ねじ込み過程と締め付け過程におけるねじ山の接触状態を示す。図3に示すように、ナットによる締結や取り外しは、4つの過程に分けることができる。ナットが被締結物と接触するまでを(a)ねじ込み過程、ナットが被締結体に接触した後を(b)締め付け過程、その後、ナットを逆回転させ締結力が完全になくなるまでを(c)緩ませ過程、締結力が完全になくなってナットがボルトから外れるまでを(d)ねじ戻し過程とする。図3において、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

* 原稿受付：2022年1月26日

** 九州工業大学教授

***九州工業大学野田研究室職員

る位置、点 F は、締め付け力が増加している位置、点 G は締め付け終了の位置である。点

G-A は、(c)緩ませ過程および(d)ねじ戻し過程を示す。図 2 に示すように、通常のナットを

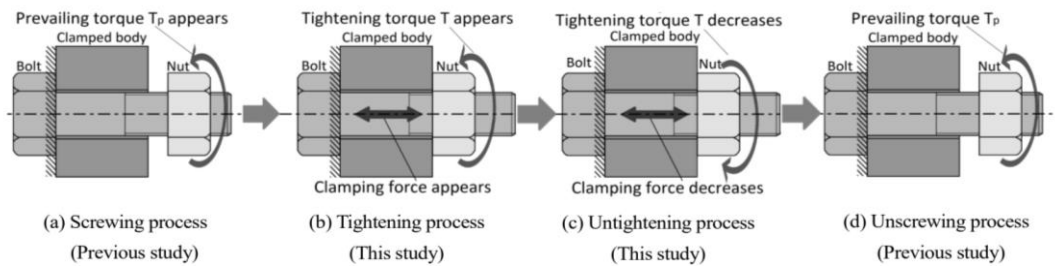
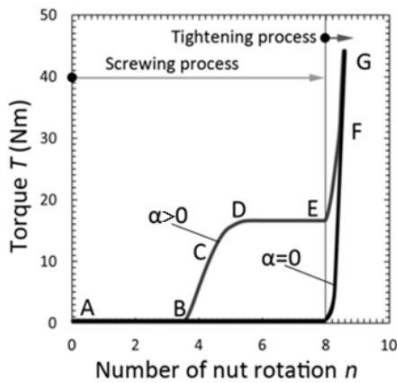
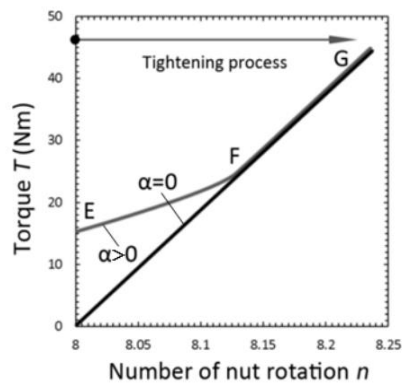


図 1 ねじ込み、締め付け、緩ませ、ねじ戻し過程の概略図



(a) Variation of torque T in screwing process.



(b) Variation of torque T in tightening process (This study).

図 2 ナット回転角とトルクの関係

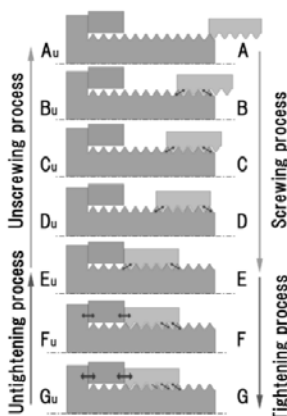


図 3 ねじ込み過程と締め付け過程におけるねじ山の接触状態

回転させると、トルクは点 E から発生し、図 2 の下側の線に示すように急激に増加する。しかし、ピッチ差付きナットを回転させると、トルクは図 2 の上側の線に示すように点 B から発生する。その後、トルクは点 D の位置まで増加し、点 E で被締結物に接触した後、トルクは急激に増加する。

2.2 試験片

この研究では、JIS M12 ボルト・ナット締結体を採用している(図 4)。図 5 のように通常の M12 ボルト・ナット締結体はボルト・ナット共にピッチ $P=1750\mu\text{m}$ であるが、ピッチ

差付きナットでは、ナットのピッチがボルトよりわずかに大きくしている。本論文では、3種類のピッチ差 $\alpha=35, 40, 50\mu\text{m}$ を採用している。ボルトとナットのクリアランスは、 $C_x=59\mu\text{m}$ である。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 $\pm 0.003\text{mm}$ を目標にねじ加工を施した。図 6 にボルト・ナットの応力ひずみ線図, 表 1 に材料特性を示す。

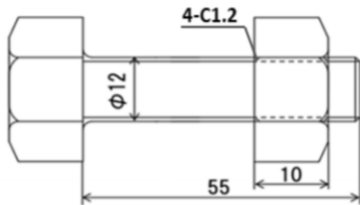


図 4 ピッチ差付きボルト・ナット締結体

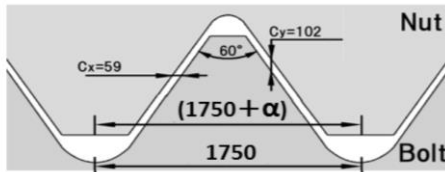


図 5 ピッチ差とボルト・ナット間のクリアランス (μm)

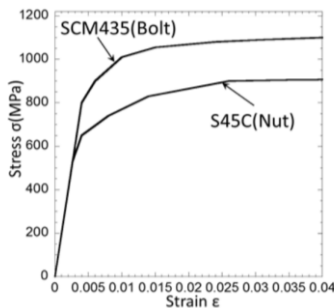


図 6 ボルト・ナットの応力ひずみ線図

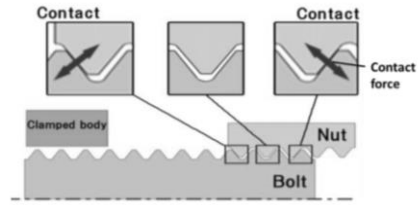


図 7 プリベリントルク発生時のボルト・ナットの接触状態

表 1 ボルト・ナット材料の機械的性質

	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

図 7 に締め付け時のボルトとナットにおけるねじ山の接触状態を示す。プリベリントルクは、ピッチ差によるボルト・ナット間の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。このプリベリントルクは、ナットの緩み止め性能に効果があることが実験的に実証されている⁽⁶⁾。

2.3 実験条件と方法

図 8 に実験条件を示す。被締結物とボルト頭部は固定する。ナットが被締結物と接触するまでトルクレンチでねじ込み、その後、実験装置でナットを締める。実験装置にセンサーを用いて、締め付け過程の締結力を測定する。図 9 に試験機を示す。ねじ締め付け試験機 NST シリーズは「JIS B 1084」の規格に示された測定項目を採用し、締め付けトルク・締結力・ナットの回転角の計測をする。また、ねじ面摩擦係数 μ_s , 座面摩擦係数 μ_w も測定可

能である。なお潤滑油は二硫化モリブデングリーススプレーをねじ面にのみ使用する。ボルトに生じる引張応力が降伏応力 $\sigma_y=800\text{MPa}$ に達したときのボルト締結力は $F_{100\%}=68\text{kN}$ である。ボルトの引張応力が降伏応力の 25%(200MPa)と降伏応力の 50%(400MPa)であるときの締結力 $F_{25\%}=16.8\text{kN}$, $F_{50\%}=33.7\text{kN}$ を通常のボルトにおける実験結果を用いて選定する。ここで、降伏応力の 25%と 50%の締結力を採用した理由は、ピッチ差付きナットでは点 F(図 3 参照)でトルク増加

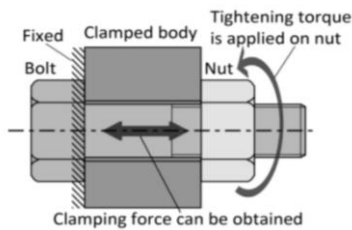
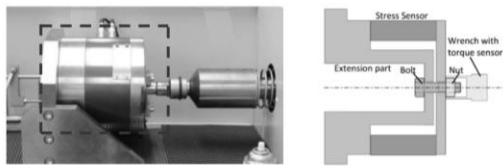


図 8 ねじ込み過程の境界条件



(a) Photo of tightening experiment device. (b) Schematic illustration of tightening experiment device.

図 9 ねじ締め付け試験機

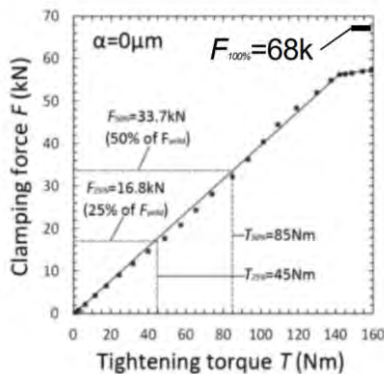
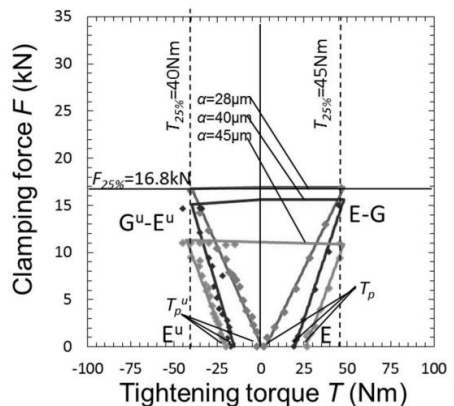


図 10 締結力と締め付けトルクの実験結果

に変化が起こることがわかっており、その確認のためである。図 10 に $\alpha=0\mu\text{m}$ における締結力と締め付けトルクの実験結果を示す。図 10 より、締結力 $F_{25\%}$, $F_{50\%}$ を導入するような締め付けトルクはそれぞれ $T_{25\%}=45\text{Nm}$ 及び $T_{50\%}=85\text{Nm}$ であった。この締め付けトルク $T_{25\%}=45\text{Nm}$ 及び $T_{50\%}=85\text{Nm}$ までナットを締め付けて実験を行う。緩ませ過程のトルクは、実験に用いた装置では測定できないため、トルクレンチを用いて測定する。トルクレンチでナットを緩め、締め付けトルクが 10Nm 低下するごとに装置から締結力を確認し、ナットが被締結物と離れるまで緩める。

2.4 締め付けおよび緩ませ過程の実験結果

図 11 に、締め付けおよび緩ませ過程におけるピッチ差付きナット $\alpha=28, 40, 45\mu\text{m}$ の締め付けトルク T と締結 F の関係を示す。図 11(a) は、 $T_{25\%}=45\text{Nm}$ ($F_{25\%}=16.8\text{kN}$) で締め付けたときの結果を示し、図 11(b) は、 $T_{50\%}=85\text{Nm}$ ($F_{50\%}=33.7\text{kN}$) で締め付けたときの結果を示す。プロット点は、実験点であり、実線は、最小二乗法により求められている。



(a) $T < T_{25\%} = 45\text{Nm}$

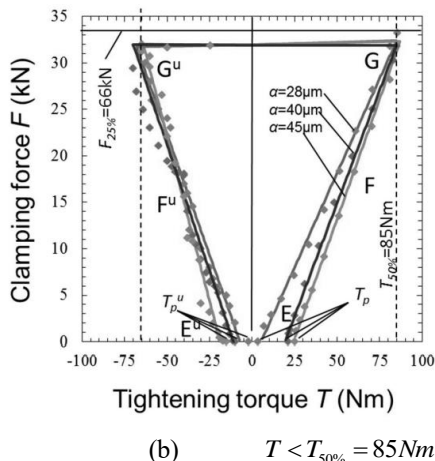


図 11 締め付けトルク T と締結 F の関係

そのプリベリングトルクの値から、 $\alpha = 28 \sim 45 \mu\text{m}$ では、良好な緩み止めの効果が得られている。

表 2, 3 にピッチ差 $\alpha = 0, 28, 40, 45 \mu\text{m}$ におけるプリベリングトルク T_p と緩み抵抗トルク T_R^u の実験値をそれぞれ示す。また、図 12 にピッチ差 $\alpha = 28, 40, 45 \mu\text{m}$ における締め付けトルク $T_{25\%}$, $T_{50\%}$ に対するプリベリングトルクと緩み抵抗トルクの関係を示す。図 12 から緩み抵抗トルク T_R^u は、締め付けトルク $T_{25\%}$, $T_{50\%}$ 双方、ピッチ差とともに増加する。

表 2 プリベリングトルク T_p と緩み抵抗トルク T_R^u の実験値 ($T_{25\%}$)

	① T_p^{FEM} (T_p^{EXP}) (Nm)	② $T_{25\%}^{FEM}$ ($T_{25\%}^{EXP}$) (kN)	③ $T_{50\%}^{FEM}$ ($T_{50\%}^{EXP}$) (Nm)	④ T_R^{FEM} (T_R^{EXP}) (Nm)
$\alpha = 28$ (μm)	4.7 (4.3)	17.0 (16.8)	33.5 (35.0)	2.1 (2.0)
$\alpha = 40$ (μm)	21.5 (19.5)	15.2 (14.9)	36.0 (40.0)	16.5 (17.0)
$\alpha = 45$ (μm)	27.0 (26.9)	12.5 (10.9)	39.2 (45.0)	23.5 (26.0)

表 3 プリベリングトルク T_p と緩み抵抗トルク T_R^u の実験値 ($T_{50\%}$)

	① T_p^{FEM} (T_p^{EXP}) (Nm)	② $T_{50\%}^{FEM}$ ($T_{50\%}^{EXP}$) (kN)	③ $T_{50\%}^{FEM}$ ($T_{50\%}^{EXP}$) (Nm)	④ T_R^{FEM} (T_R^{EXP}) (Nm)
$\alpha = 28$ (μm)	4.7 (4.2)	33.0 (31.8)	66.1 (65.0)	0 (2.0)
$\alpha = 40$ (μm)	21.5 (21.3)	33.5 (31.8)	66.8 (70.0)	10.8 (10.0)
$\alpha = 45$ (μm)	27.0 (24.9)	32.9 (33.2)	66.5 (65.0)	16.4 (15.0)

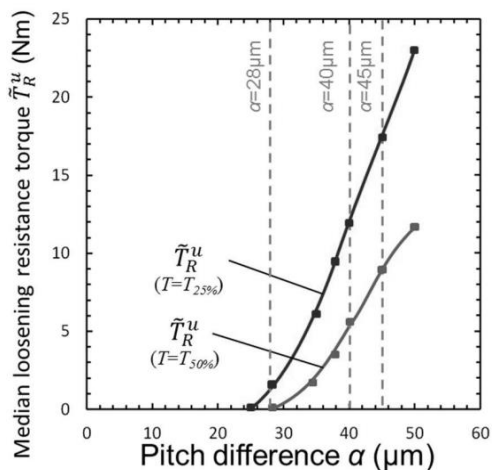


図 12 プリベリングトルクと緩み抵抗トルクの関係 ($T = T_{25\%}$, $T_{50\%}$ のとき)

これは、プリベリングトルク T_p の傾向と一致する。つまり、ピッチ差付きナットは緩み止め性能において優れていることが示唆される。

3 締め付けおよび緩ませ過程の解析

3.1 解析方法

図 13 に境界条件を示す。有限要素解析モデルは、前の解説記事(その 3)⁽⁷⁾と同じであるので省略する。図 13 に示すように境界条件はボルト頭部と被締結物の左側を拘束し、ナットを時計回り(締め付け方向)に回す。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

ペーストスプレーのねじ面での摩擦係数の報告⁽⁸⁾を考慮して、ねじ面摩擦係数 $\mu_s=0.12$ 、座面摩擦係数 $\mu_w=0.17$ を使用した。前出の図3に示すねじ込み過程Aから解析を行うと、計算に時間がかかる。そこで、計算時間を短縮するために、以下のようにねじ込み過程を省略した方法をとる。この方法は、前報のねじ込み過程に関する研究において、摩擦係数に関する考察で用いた簡易解析と同様である⁽⁵⁾。

図14(b)の点E₀はナットと被締結物が0.05mmだけ離しており、プリベリングトルク T_p が作用していない状態である。この点E₀を解析の始点とする。まず、点E₀にトルクを加え、被締結物に接触した後、点G(図14(b)参照)まで締め付ける。その結果、点E₀→Eの過程でプリベリングトルクを取得でき、点E→Gの過程で締め付けトルクと締め結力を得ることができる。図14に点E₀→Gにおける回転角度とトルクの関係と締め付け過程を示す。点E₀→Eの解析はねじ込み過程であるため、後述の解析結果ではE→Gの結果のみ記述する。解析は締め付け過程点E₀→Gを行った後、続けて緩ませ過程点G→E₀を行う。解析するにあたって、ナットの境界条件である回転角度 θ が必要である。しかし、締め結力 $F_{25\%}$ 、 $F_{50\%}$ に達するまでのナットの回転角度 $\theta_{25\%}$ 、 $\theta_{50\%}$ が不明である。そこで、ピッチ差 $\alpha=28, 40, 45\mu\text{m}$ において以下の(i), (ii)に分けて解析を行う。(i)ナットに十分大きい回転角 θ_{large} ($=100\sim 200^\circ$)を与える。回転角 θ_{large} は非常に大きな締め付け角度であり、このときボルトの引張応力は必ず降伏応力を超えているため、締め結力 $F_{25\%}$ 、 $F_{50\%}$ に対応する回転角度 $\theta_{25\%}$ 、

$\theta_{50\%}$ が求まる。(ii)回転角度 $\theta_{25\%}$ 、 $\theta_{50\%}$ を選定

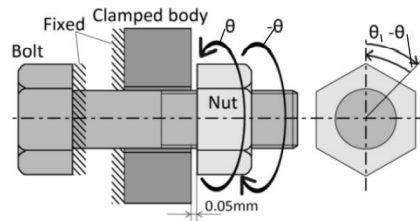
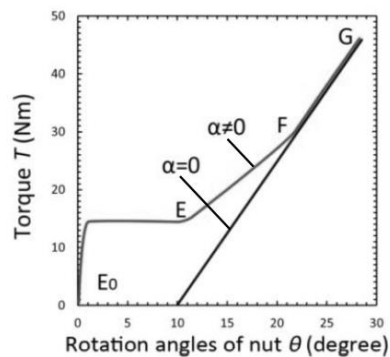
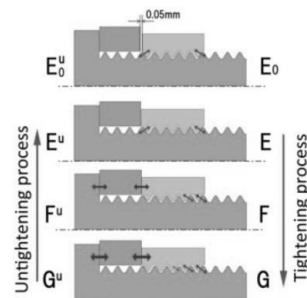


図13 境界条件



(a) 回転角度とトルクの関係



(b) 締め付け過程

図14 E₀→Gにおける回転角度とトルクの関係と締め付け過程

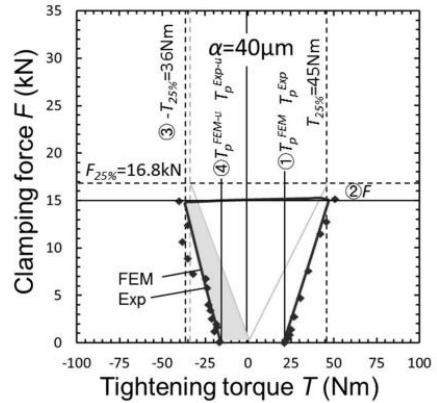
し、この回転角度を用いてナットを締め付ける。締め結力が $F_{25\%}$ 、 $F_{50\%}$ に達した後、ナットに締め付け防止角度 $-\theta_{25\%}$ または $-\theta_{50\%}$ を与える。

3.2 解析結果と実験結果の比較

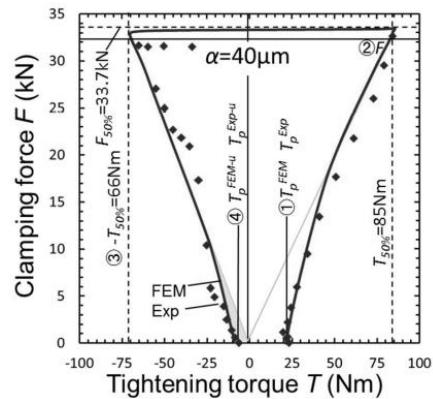
図 15 にピッチ差 $\alpha=40\mu\text{m}$ における締結力 F とトルク T の関係を示す。図 15 において、(a)はボルトの降伏応力(800MPa)の 25%相当の締め付けトルク $T_{25\%}=45\text{Nm}$ (軸力 $F_{25\%}=16.8\text{kN}$)、(b)は 50%相当の締め付けトルク $T_{50\%}=85\text{Nm}$ (軸力 $F_{50\%}=33.4\text{kN}$)まで締め付けた結果で、プロット点に実験結果、実線に解析結果を示す。図 15 には参考のため、ピッチ差 $\alpha=0\mu\text{m}$ の結果も同時に示す。図 15 の $\alpha=40\mu\text{m}$ においては、締め付け過程において、解析値と実験値のトルクはほぼ等しい。しかし、緩ませ過程では、締結力 F とトルク T の関係に違いが見られる。これは、解析において境界条件を途中で変更することができず、摩耗片の生成、成長、脱落、粉碎や塑性変形によるねじ面の接触状態などの複雑なねじ面の状況変化を再現できないためと考えられる。図 15 いずれも実験値と解析値に少し誤差はみられるが、ほぼ一致していると言える。また、図 15 において、実験と解析でプリベリングトルクに違いが見られる。これは、実験において締め付けを行う前のねじ込み過程で、ボルト・ナットのねじ面間に摩耗片が介在し、プリベリングトルクにばらつきが現れることが原因と考えられる⁽⁵⁾。

3.3 F-T関係に及ぼす塑性変形の影響について

解析結果と実験結果は、よく一致するので、以下では、 $F-T$ 関係をFEM解析によって議論する。図 16(a), (b)に、 $\alpha=28, 40, 45\mu\text{m}$ での $F-T$ 関係を示す。ピッチ差 α を増加させると、残留プリベリングトルク T_p^u とプリベリ



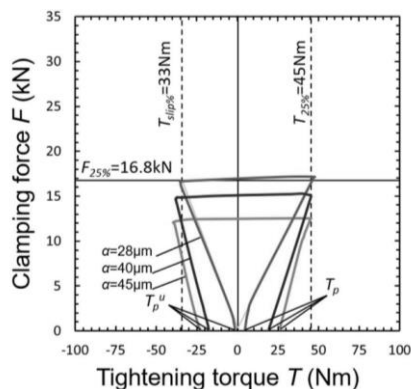
(a) $T < T_{25\%} = 45\text{Nm}$



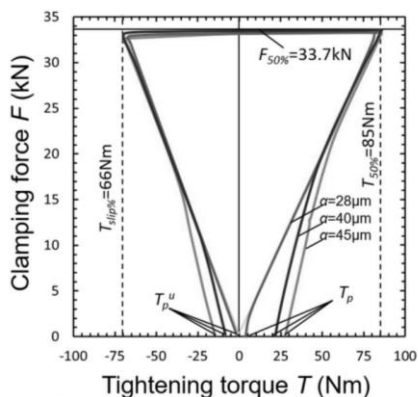
(b) $T < T_{50\%} = 85\text{Nm}$

図 15 締結力 F とトルク T の関係 ($\alpha=40\mu\text{m}$)

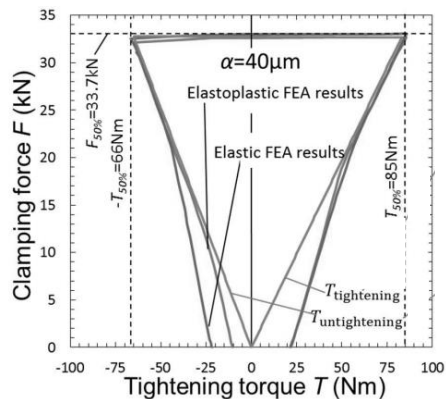
グトルク T_p の両者とも増加する。塑性変形の影響を明らかにするために、図 16(c)に弾性解析によって得られた $F-T$ 関係を図 16(a), (b)の弾塑性解析のそれと比較して示す。弾性解析では、残留プリベリングトルク T_p^u は、プリベリングトルク T_p とほぼ等しい ($T_p^u \cong T_p$)。一方、弾塑性解析では、残留プリベリングトルク T_p^u は、プリベリングトルク T_p より小さい ($T_p^u < T_p$)。以上より、ピッチ差付きナットの弾性締め付けが緩み止めに効果的であることがわかる。



(a) $T < T_{25\%} = 45 \text{ Nm}$ (弾塑性解析)



(b) $T < T_{50\%} = 85 \text{ Nm}$ (弾塑性解析)



(c) 弾性解析と弾塑性解析の比較

図 16 締結力 F とトルク T の関係

4. おわりに

本稿では、ピッチ差付きボルト・ナット締結体のねじ込み過程と緩ませ過程過程における締結力 F と締め付けトルク T の関係を議論した。その結果、ピッチ差 α を大きくすると、プリベリントルク T_p だけでなく、緩み抵抗トルク T_R^u も増加することやピッチ差付きナットの弾性締付けが緩み止めに効果的であることを明らかにした。

付録 A $\alpha=0$ (通常ナット) の締付け過程と緩ませ過程の $F-T$ 関係

締付け過程と緩ませ過程の違いを理解するために、通常のナット $\alpha=0$ の式(1), (2)によって得られる $F-T$ 関係を示す。式(1)は、通常ナット $\alpha=0$ の締付け力の式である。式(1)と同様に、緩ませ過程での $F-T$ 関係は、式(2)で表される。

$$T_{\text{tightening}} = \frac{F}{2} \left(\frac{d_2}{\cos \beta} \mu_s + \frac{p}{\pi} + d_w \mu_w \right) \quad (1)$$

$$T_{\text{untightening}} = \frac{F}{2} \left(\frac{d_2}{\cos \beta} \mu_s - \frac{p}{\pi} + d_w \mu_w \right) \quad (2)$$

式(1)と式(2)の違いは、第2項の締結力を発生させるために必要なトルクに正負が生じるためである。なお、第1項は、ねじ面間における摩擦によるトルクであり、第3項は、ナットと被締結物間で発生する摩擦によるトルクである。

付録 B ピッチ差付きナットの緩み抵抗トルク T_p^u について

付図 1(a), (b)に, ピッチ差 $\alpha = 45\mu\text{m}$ の $F-T$ 関係を $\alpha = 0$ と比較して示す. プリベリングトルク T_p , 残留プリベリングトルク T_p^u については, 本文で議論した. たとえば, 最

で定義できる.

$$T_p \equiv \sup T \quad \text{when } F=0, T>0 \quad (3)$$

同様に, 残留プリベリングトルク T_p^U は, 式(4)で定義できる.

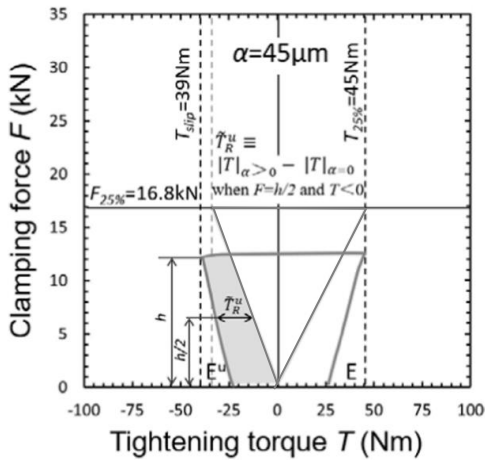
$$T_p^U \equiv \sup |T| \quad \text{when } F=0, T<0 \quad (4)$$

残留プリベリングトルク T_p^U はプリベリングトルク T_p よりも密接に耐緩み性能を表現するものと考えられるが, 耐緩み性能は締結力 $F=0$ に限定されない. むしろ締結力が低下する以前の, 付図 1 に示す $0 \leq F \leq h$ の範囲の $\alpha = 0$ と $\alpha = 45\mu\text{m}$ の違いが, 耐緩み性能に寄与するものと考えられる. これを緩み抵抗トルク T_R^u と呼び, 式(5)で定義する.

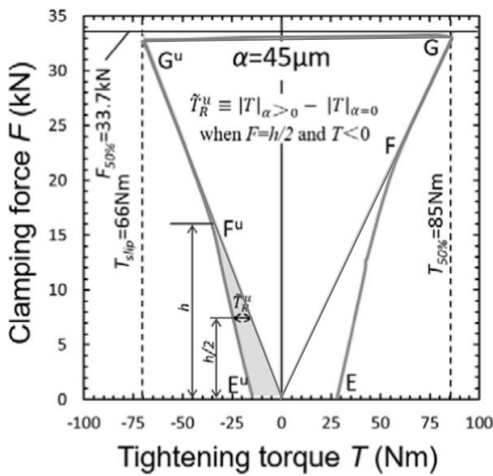
$$T_R^u \equiv |T|_{\alpha>0} - |T|_{\alpha=0} \quad \text{when } T<0, 0 \leq F \leq h \quad (5)$$

付図 1 に示す式(5)に示す範囲を灰色のゾーンで示す. 緩み抵抗トルク T_p^u の代表値として, 中間値 \tilde{T}_R^u , すなわち $F = h/2$ の T_p^u の値を用いるのが良い,

$$\tilde{T}_R^u \equiv |T|_{\alpha>0} - |T|_{\alpha=0} \quad \text{when } T<0, F=h/2 \quad (6)$$



(a) $T \leq T_{25\%} = 45\text{Nm}$



(b) $T \leq T_{50\%} = 80\text{Nm}$

付図 1 締結力 F とトルク T の関係 ($\alpha = 45\mu\text{m}$)

もよく用いられるプリベリングトルク T_p は, 締結力 $F=0$ でのトルクの上限值として式(3)

参考文献

(1) 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 (2016), pp.476-489.

(2) 野田尚昭, 佐野義一, 陳鑫, 丸山光, 王震, 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 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00240.

(3) 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・ナットの組合せ による疲労寿命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.

(4) 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 (2016), pp.476-489.

(5) 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 (2019), DOI:10.1299/transjsme.19-00149.

(6) 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 (2016), pp.476-489.

(7) 野田尚昭, 高瀬康, ピッチ差によるボルト・ナットの疲労強度向上と緩み止め効果(その3: 緩み止め効果を表すプリベリングトルクについて), *日本ねじ研究協会誌*, (2022),

(8) 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.