

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 3 年 8 月 27 日現在

機関番号： 1 7 1 0 4
研究種目： 奨励研究
研究期間： 2020 ~ 2020
課題番号： 2 0 H 0 0 9 1 2
研究課題名 ピッチ差付ボルト・ナットのねじ込み過程に生じるプリベリングトルクの3次元FEM解析

研究代表者

高瀬 康 (TAKASE, Yasushi)

九州工業大学・戸畑・若松キャンパス技術部・技術専門職員

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 480,000 円

研究成果の概要： ボルト・ナット接合のナットの緩みの問題は、「ピッチ差付ボルト・ナット」によって、耐緩み性・強さとコストの3つを満たす接合法の実現を目指す研究である。ここでは、「ピッチ差付ボルト・ナット」を対象にしてプリベリングトルクの大きさを耐緩み性を評価するために、締め込み実験と3次元モデルでプリベリングトルクのシミュレーションを行う。また、実用化に際して必要とされる寸法の違いにより、適切なピッチ差を推定できる計算式についても述べる。

ボルト・ナット間のピッチ差を大きくすると、ねじ込み抵抗が生じる現象。プリベリングトルクの大きさが、耐ゆるみ性を支配することは、耐緩み性試験を用いた試験で実証済である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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産業界に広く普及しているが、振動の激しい条件では、緩み易いという欠点がある。破損事例の90%以上は、疲労に起因しており、そのほとんどはボルトの緩みが原因であるとも言われている。従って、ボルトの信頼性・安全性を確保するためには、主に耐緩み性に勝れ、かつ疲労強度を兼備し、なおかつ安価であることが理想的であるが、これまでそのようなねじ締結体は、実用化されていない。そこで、本研究では、「ピッチ差付ボルト・ナット」によって、耐緩み性・強さ・コストの3つを満たす接合法の実現を目指すとともに、ピッチ差が緩み止めに及ぼす影響やそのメカニズムを解明する。

研究分野： 材料力学

キーワード： Bolt-nut connection Pitch difference Prevailing torque

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

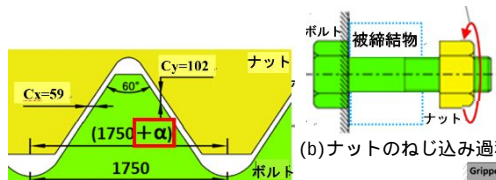
1. 研究開始当初の背景

ボルト・ナット締結体は、産業界に広く普及しているものの、低価格で、緩みにくく破損にくい特性が常に求められている。緩みは、振動により生じ、その解析も進んでいる。著者等は、図1に示すようなピッチ差を設けることによる、耐疲労・耐緩みの研究を行ってきた。その結果、適当なピッチ差を与えることで疲労寿命を向上させることを明らかにした。また、緩み止めに関してピッチ差付与による有効性を確認し、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 T_p が密接に関係することを実験的に明らかにしてきた。ボルト・ナットの寸法やねじ形状の多様さを考えると、実験のみでは限界があり、シミュレーションによる原理的な解明が、実用上欠かせない。

2. 研究の目的

(1) 緩み止め効果を検証するための 3 次元シミュレーション：ナットの緩みは、(1) ねじ込み、(2) 締め付け、(3) 緩みの各過程に分けて考える必要がある。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、「プリベリントルク $T_p \neq 0$ 」が生じる。このような締め付け途中で生じる T_p の大きさが、耐緩み性を支配することは、耐緩み性実験を用いた試験で実証済である。ここでは、ねじ込み過程について、M12 のピッチ差付ナットを対象に螺旋形状のシミュレーションが可能な 3 次元有限要素法解析を行い、 T_p の発生過程とその大きさを求め、既知の実験結果と比較して α の影響を明らかにする。

(2) 緩み止めに有効な α 値の設計方法の提案：ここでは、寸法の違いに伴う緩み止めに効果的なプリベリントルクを既知の結果(M16)から考察し、種々のボルト寸法での適切なピッチ差範囲の算出式を求める。そして、実験データのないボルト・ナット締結体で、寸法が異なる場合の緩み止めに必要なピッチ差付ナットの設計を、可能にすることを実験と解析によって実証する。



(a) ピッチ差とクリアランス
図 1 ピッチ差付ボルト・ナット (M12, $\alpha=30, 40, 50\mu\text{m}$)

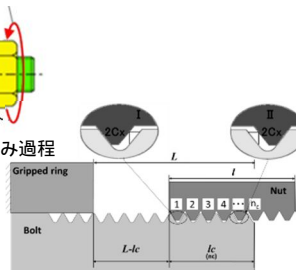


図 2 ピッチ差付ボルト・ナットの概略



図 3 M12 ボルト・ナットの FEM モデル
表 1 3DFEM ボルト・ナットモデルの材料特性

	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

3. 研究の方法

(1) 3 次元 FEM モデルを用いたねじ込み過程の解析方法：ここでは、実験で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 (図 1 参照)」におけるプリベリントルクの 3 次元 FEM 解析を行う。試験片は、JIS 規格 M12 ボルト・ナットを使用し、図 1 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 $C_x=59\mu\text{m}$ 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 1 参照)。付与したピッチ差 α は、小さい順に 30、40、50 μm とする。図 2 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 3 に有限要素解析モデルを示す。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 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 1(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。

(2) 緩み止めに有効な α 値の計算方法 (ピッチ差付 M12、16、24、39)：ここでは、JIS 規格 M16 のボルト・ナットを用いる。ナットは、ねじ山数 8 山、長さ 16mm のものを用いる。ナットのピッチ p は、M16 ボルトのピッチ $p=2000\mu\text{m}$ に対して、 $p=(2000+\alpha)\mu\text{m}$ である。ボルト・ナット間の軸方向クリアランス C_x は、最大値の 60%、片側 $72\mu\text{m}$ とした (図 1)。そして、耐緩み性に有効なピッチ差の範囲を求め、それを数式化する。次いで、この数式に基づき寸法が異なるボルト・ナット締結体に対して適切なピッチ差範囲を推定し、その精度を確認する。最後に、M12 を用いて行ったユンカー式緩み試験 (DIN65151 (または DIN25151)) を基に、求めた適切な α を比較検討し、提案した計算式の有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) 3 次元 FEM モデルを用いたプリベリントルクの解析結果：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 4(d) にプリベリントルクのナットの回転数との関係として示す。図 4 に示すように、プリベリントルクはねじ込み過程の進行に応じて変化し、ねじ込み方向のプリベリントルクは、7~8 周にかけてほぼ一定となる。図 4(a) ~ (c) より、ピッチ差 α が大きくなるにつれ、プリベリントルクが大きくなることが確認できる。図 4(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 4(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。

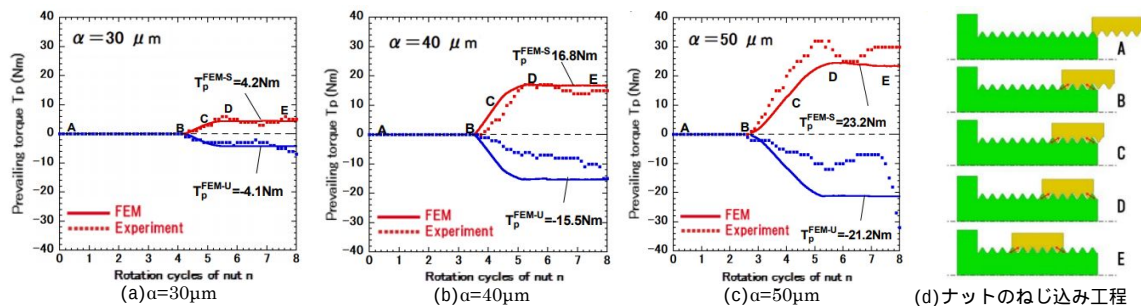


図4 実験結果と比較した3次元 FEM シミュレーションの解析結果

(2) 緩み止めに有効な α 値の計算結果：まず、プリベリントルクとピッチ差 α の関係を明らかにする。図 2 は、ピッチ差を有するボルト・ナット締結体の接触状態を示している。ボルト T_p が生じ始める位置をボルト端からナット先端までの距離 l_c (ねじ山数 n_c) とする。ナットを挿入し始めてナットの第 1 山斜面と第 n_c 山斜面がボルトのねじ山斜面に同時に当たり始める条件 (図 2 の、) から l_c を求める。式(1)に l_c の求め方を示している。ここで、式(1)は、M16 ボルトにおけるナットの長さ 16mm 以下 (n_c が 8 山以下) で成り立つ。式(1)より、 T_p の発生条件が求まる。 $(n_c - 1)\alpha = 2C_x(1)$ 。次に、ボルト・ナットのサイズに応じた、最適なピッチ差 α の算出を検討する。そのため、緩みに関係するボルト・ナットそれぞれの呼び径 d 以外の寸法要素を呼び径 d によって表示することを考える。JIS 規格に基づき、M16 ボルト・ナットのクリアランス C_x は、 $C_x = 1.4882d + 41.239$ 、ナットの厚さ h は、 $h = 0.3099d + 0.4253$ と表示できる。これまでの研究で行った NAS3350 (米国宇宙航空規格) の規格に準拠した衝撃型振動試験機を用いた緩み試験の結果を表 2 に示す。表 2 より、ピッチ差が大きい方が、プリベリントルクが大きく、より緩み止めに効果的であるが、大きすぎても軸力が低下する。これより、有効なピッチ差範囲として $33 \sim 42 \mu m$ を求めている。また、軸力・トルク試験より、図 5 に示すピッチ差 α と最大プリベリントルク T_{pmax} の関係を得た。本研究では、既知の図 5 と表 2 の緩み試験結果から、実験誤差を考慮した最適なピッチ差範囲を求める。緩み防止に有効な T_{pmax} の範囲として、実験より求めた範囲 ($25 \sim 67$) を修正し、より狭めた範囲 $30 \sim 60$ とする。この範囲内の T_{pmax} では緩まず、軸力も導入できることを示すものである。この範囲の T_{pmax} に対応するピッチ差 α は $34 \sim 41$ である。この α の有効な範囲を用い、式(1)の関係から、 α の上、下限値は次式(2)で表すことができる。以下に、その進め方について述べる。 $2C_x/n_{cmax} < \alpha < 2C_x/n_{cmin} - 1$ (2)。緩み止め効果のある T_p に対応するピッチ差 $34 \sim 41$ の範囲と式(1)より、ナットに接触している (T_p が生じ始める) ボルトのねじ山数は $4.5 \sim 5.2$ となる。 n_c は実験により求める数値で、 n_r 、 l_c も同様であり、これらを含まない寸法表示できる式を導く必要がある。ナット余長部の山数は $n_r = 8 - n_c$ 、ナット余長部 $l_r = p \cdot n_r$ より次式が求まる。 $30 \leq l_r \leq 60$ (3)。緩み防止のためには、ボルト・ナット各部の寸法が満たさねばならない条件がある。これは、緩みの原因と、その阻止に必要な条件との釣り合いで決まる。まず、緩み生成要因を求める。締結後の接合面の摩擦、へたりや変形によって生じる緩みは除き、主たる緩み発生因子は、ナットの戻り回転によるものとする。戻り回転は主としてボルト軸方向及び直角方向それぞれの振動や衝撃に起因する。いずれの場合もナットの重量 ($YV = (\pi d h l)$) に比例して戻り回転への影響は大きくなる。一方で、緩みを防ぐ、耐緩み因子として、ナット自身の強さ (降伏点) とボルトと強接触するねじ山数、すなわち T_p 発生後のナット残り山数 n_r (ナット余長 l_r) に比例すると考える。これらが等しいとにおいて、その比例係数を K とすれば、同じボルト・ナット材でできている場合には、この 2 つの釣り合い $K(\pi d l_r) \tau_s = (\pi d h l) Y$ から次式が成り立つ。 $K = h l_r / l_r$ (4)。ここでは、 l ナット長さ、 h ナット厚さ、 $A = \pi d l_r$ ナット余長部面積、 $V = \pi d h l$ ナットの体積である。この K は寸法によらず成立すると考えてよい。ここで K は M16 のナット試験片寸法により、 $l = 16mm$ 、 $h = 5mm$ 、式(3)と式(4)により、次式が得られる。 $11.4 \leq K \leq 14.3$ (5)。また、 $l_r = l - l_c = h/k$ から、 $n_c = n(1 - h/k)$ となり、これを式(2)に代入して、 $2C_x / n(1 - h/K_{max}) - 1 < \alpha < 2C_x / n(1 - h/K_{min}) - 1$ (6) となる。また、ねじの呼び径 d と C_x 、 h の関係式、 $C_x = 1.4882d + 41.239$ 、 $h = 0.3099d + 0.4253$ を式(6)に代入すると一般式 (7) が得られる。 $2.9764d + 82.478 / n(1 - 0.3099d + 0.4253 / 14.3) - 1 < \alpha < 2.9764d + 82.478 / n(1 - 0.3099d + 0.4253 / 11.4) - 1$ (7)。最後に、計算式より求めた M10 ボルト・ナットを対象に、前述の方法を用いて有効ピッチ差を求める。式(7)に $d=10$ 、 $n=6$ を代入すると $31.8 < \alpha < 35.6$ が得られる。今後、実験によって実証する予定である。

<引用文献> 野田尚昭、佐野義一、高瀬康、陳鑫、丸山光、王震、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、46 巻、2015、121 - 126

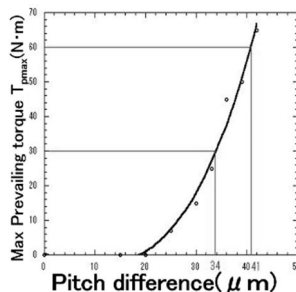


図 5 トルクとピッチ差の関係 (M16)

表 2 衝撃型振動緩み試験結果 (M16)

Pitch difference α	Cycles for dropping	Prevailing torque (N·m)	Axial force (kN)
0	751	0	24
	876		
15	813	0	24
	1528		
33	30000	25	14~24
	30000		
42	30000	67	1~4
	30000	57	

主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1．著者名 野田尚昭，王彪，佐野義一，劉涇，立石孝介，乾湧人，シュウ ベイフェン，高瀬康	4．巻 52
2．論文標題 ピッチ差を有するナットの締め付け/緩ませ過程におけるナット高さの緩み止め性能の影響	5．発行年 2021年
3．雑誌名 自動車技術会論文集	6．最初と最後の頁 58-63
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11351/jsaeronbun.52.58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1．著者名 野田尚昭，劉涇，佐野義一，立石孝介，王彪，高瀬康	4．巻 34
2．論文標題 Three-dimensional finite element analysis for prevailing torque of bolt-nut connection having slight pitch difference	5．発行年 2020年
3．雑誌名 Journal of Mechanical Science and Technology	6．最初と最後の頁 2469-2476
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12206-020-0522-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

研究組織（研究協力者）

氏名	ローマ字氏名
劉 涇	(LIU Xi)
久保 周太郎	(KUBO Shutarou)
立石 孝介	(TATEISHI Kousuke)
乾 湧人	(INUI Yuto)
王 彪	(WANG Biao)
川野 凌	(KAWANO Ryou)