

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1：疲労寿命向上について)

野田 尚昭**, 高瀬 康***

NODA, Nao-Aki and TAKASE, Yasushi

1 はじめに

ねじ締結体は、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、便利な反面、破損や緩み防止に注意を要する。破損は特定のねじ底に高い応力が集中し、ねじ底の強さが大幅に低下することが原因である。このためこれまでボルト・ナット締結体の疲労強度向上に関する研究は、比較的少なく、その研究の多くはねじ締結理論⁽¹⁾や特殊ボルトの緩み止め効果^{(2), (3)}に関するものである。

表1に、いくつかの特殊ボルト・ナット締結体の比較を示す。ほとんどの特殊ボルト・ナットは、多くの部品や特殊な形状を備えているため、製造プロセスが複雑になり、通常のボルト・ナットの5倍以上の高コストになる。本解説で対象とするピッチ差付きナットは通常のナットと同じ方法で製造でき、ねじタップの変更やピッチ差の確認手順を考慮す

ると、コストは通常のナットの約1.5倍程度と予測される。

図1にピッチ差付きボルト・ナット締結体の概略図をJIS M16の場合について示す。ナットに微小ピッチ差 α を与えることによって、緩み防止と疲労強度向上を低価格で提供する。本稿では、まず、疲労寿命の向上^{(4)~(9)}を取り上げる。ここで、図1には、各ボルトねじ谷底の番号-3, -2, ..., 7, 8を示している。図2は本研究で用いたM16ナットの断面写真である。M6以上のナットには、図示するような両端ねじ部を面取りすることが作業性向上のため一般的であるので、それを考慮する。

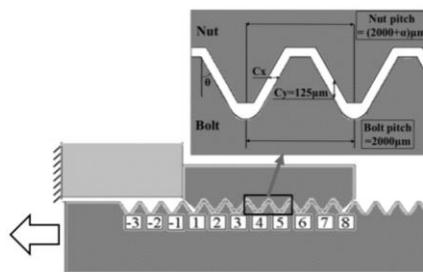


図1 ピッチ差付きボルト・ナット締結体

表1 特殊ボルト・ナット締結体の比較

	Anti-loosening performance	Fatigue strength improvement	Machinability	Low cost
This study	◎	○	○	○
CD bolt	△	○	△	△
Super slit nut	○	△	×	×
Hard lock nut	○	△	×	×
Standard bolt-nut	△	○	○	◎

×: bad, △: fair, ○: pretty, ◎: remarkable.

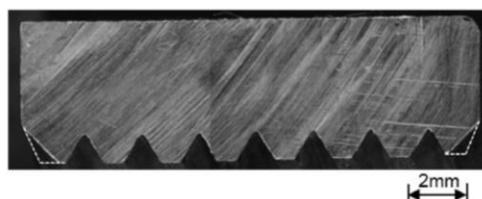


図2 ナット両端の不完全ねじ部

* 原稿受付：2022年1月15日

** 九州工業大学教授,

***九州工業大学野田研究室職員

2 疲労試験方法

2.1 試験材と試験片

試験には、M16 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、ねじ山数 8 山 (但し両端は面取り), 長さ 16mm のものを用いる。そして、疲労試験片のき裂観察より明らかとなった疲労寿命向上のメカニズムを本稿では解説する。

表 2 に材料の物性値を示す。ナットのピッチは、通常ピッチのものに比べて、ピッチ差 α だけ大きくする。ボルトのピッチ p は $2,000\mu\text{m}$ であるので、ナットのピッチは、 $(2,000 + \alpha)\mu\text{m}$ となる。締結部試験体の概略図とねじ谷底の番号を図 1 に示す。図 1 中の番号-3, -2...7, 8 はボルト各ねじ谷底に対するものである。また、ボルト、ナット間のクリアランスは、平均的な値である片側 $C_y = 125\mu\text{m}$ とする(図 1)。

表 2 ボルト・ナット材料の機械的性質

	Elastic modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
SCM435 (Bolt)	206	0.3	800	1200
S45C (Nut)	206	0.3	530	980

2.2 ピッチ差 α による締め込み過程のプリベリングトルクの発生

ナットのピッチ差がある大きさ以上になると、ナットを回転させて挿入する過程でナット前面に被締結物に到達する前に、ナットに回転抵抗が生じる。この回転抵抗は、プリベ

リングトルク (Prevailing torque) と呼ばれ、ピッチの大きなナット両端部のねじ山が、相対するボルトねじ山を軸方向に押し広げようとして生じる。図 3 にプリベリングトルクが生じる接触状態を示す⁽⁴⁾。表 3 に実験で求めた被締結部に至る過程でナットに生じるプリベリングトルクを示す。 $\alpha = 30\mu\text{m}$ の供試ボルト締結体は、プリベリングトルクが発生している条件で疲労試験を行っている。

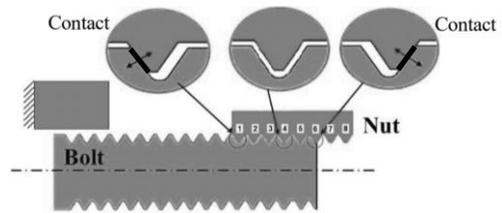


図 3 プリベリングトルクが生じる接触状態

表 3 プリベリングトルクの実験結果

	Prevailing torque T_p (N·m)
0	0
$\alpha = 15\mu\text{m}$	0
$\alpha = 33\mu\text{m}$	30

2.3 試験条件

図 4 には疲労試験機に装着される供試ボルト締結体の組立て状態を示す。本試験では、加えられる外力 F がボルト試験片に軸力としてそのまま伝わるようにした。負荷条件は、平均応力 (平均荷重) 一定にした片振り引張疲労で、6 水準の負荷条件は表 4 に示すとおりである。繰返し速度は 8Hz とし、繰返し回数 2×10^6 回をもって疲労限として、S-N 曲線を求める。著者等のこれまでの研究⁽⁴⁾におい

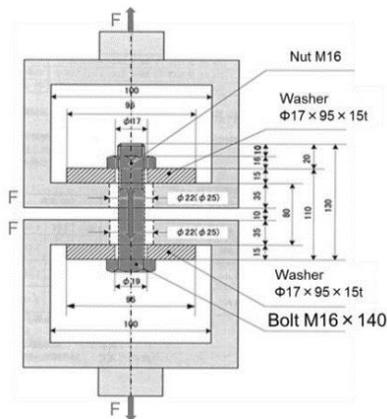
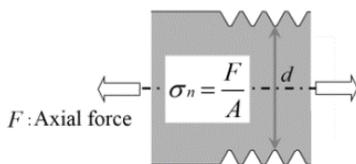


図4 疲労試験方法

表4 応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m

Load (kN)		Stress (MPa)*		Stress ratio R
Mean load	Load amplitude	Mean stress σ_m	Stress amplitude σ_a	
30	22.6	213	160	0.14
30	18.3	213	130	0.24
30	14.1	213	100	0.36
30	11.3	213	80	0.45
30	9.9	213	70	0.50
30	8.5	213	60	0.56

* $A = \frac{\pi d^2}{4}$: Area at minimum cross section of bolt ($=141\text{mm}^2$)



ては1 負荷水準の疲労試験に基づくものであるのに対して、本稿ではより系統的な試験と、き裂観察を行い、ピッチ差の疲労強度に及ぼす影響とそのメカニズムについて考察する。

3. 疲労試験結果と試験後の試験片の観察

3.1 疲労試験結果

図5に疲労試験によって得られたS-N 曲線を示す。有限寿命域においては、ピッチ差を設けることによって寿命の向上が認められ、最も寿命が延びた $\alpha=15\mu\text{m}$ では $\alpha=0$ に対しておよそ1.5 倍であった。 2×10^6 疲労限は、ピッチ差によらず60MPa と整理される。本研究では疲労限を含む6 水準の応力レベルの疲労試験結果に基づいて、ピッチ差の影響を系統的に明らかにする。そして、ピッチ差が疲労破壊に影響するメカニズムを実験と解析の双方から考察する。

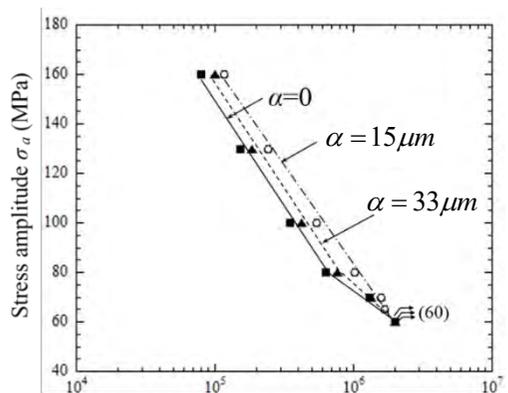


図5 ピッチ差付きボルト・ナットの S-N 曲線

3.2 試験片軸断面におけるき裂観察

図6(a), (b), (c)に $\sigma_a=100\text{MPa}$ におけるそれぞれのボルト外周表面から観察したき裂の分布状況を展開図の形式で表す。併せてボルトを軸方向断面で見たき裂の進展状況を示す。同様に図7(a), (b), (c)に $\sigma_a=60\text{MPa}$ における

$\alpha=0$, $\alpha=15\mu\text{m}$, $\alpha=30\mu\text{m}$ の観察結果を示す。

図 6(a)より, $\alpha=0$ でき裂は No.1~No.2 のみで観察される。一方, 図 6(b)では, $\alpha=15\mu\text{m}$ で No.5 に大きなき裂が見られ, そこから No.2 にかけてき裂が観察され破断している。ねじ谷からのき裂の発角度が明瞭に観察できる図 7(b), (c)によれば, 最初のき裂はいずれも No.6 で生じ, 谷底からおよそ角度 10° と読みとれ, 谷底でないことが分かる。図 6(c)の $\alpha=30\mu\text{m}$ では No.6 に大きなき裂が見られ, ついで No.1 にかけて全てのねじ底に深いき裂が生じ No.1 で最終破断していることが分かる。図 6, 7 の展開図より, き裂発生がある角度に偏っているようにみえる。ねじ溝加工開始点と, これらのき裂集中との関係は認められなかった。なお, き裂が周方向位置に偏るのは, 図 8 を用いて説明したとおり, 一旦き裂が生じると, その軸線上に荷重分担力の再配分が生じて, 同一軸線上でき裂の発生を加速していくためである。

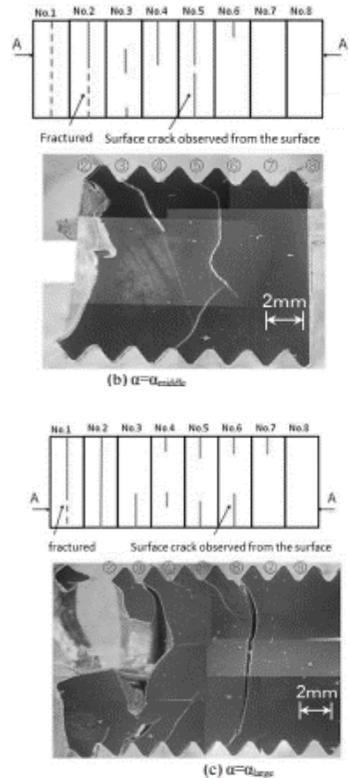
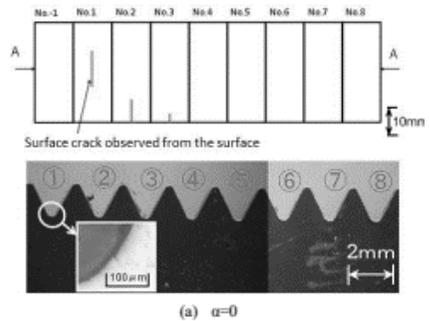
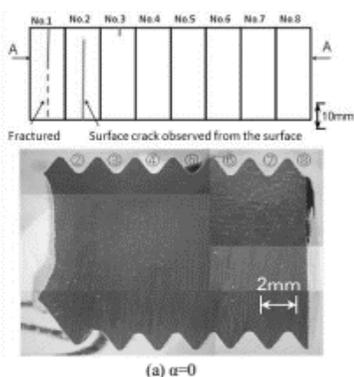


図 6 ボルト外周表面のき裂の分布状況の展開図 ($\sigma_{\text{amp}}=100\text{MPa}$)



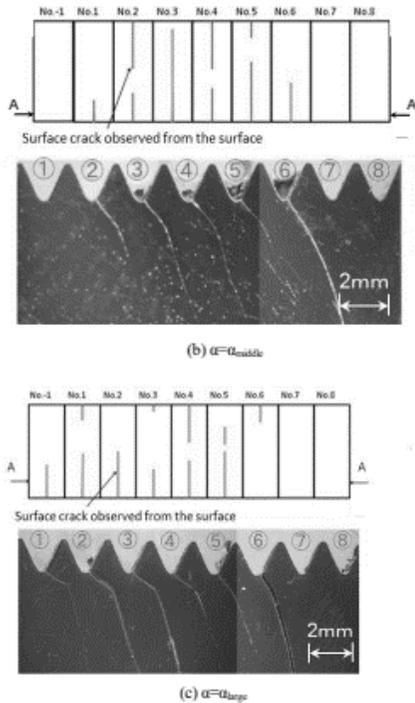


図7 ボルト外周表面のき裂の分布状況の展開図 ($\sigma_{amp}=60\text{MPa}$)

以上のことより $\alpha=0$ では No.2 から No.1 にかけてき裂が発生し、そのまま破断に至っているのに対して、 $\alpha=15\mu\text{m}$, $\alpha=30\mu\text{m}$ の場合、最初のき裂がそのまま、ボルト谷に沿って、らせん状に連結的に進展しない。この理由について、図8を用いて説明する。応力の高い No.6 ねじに初期き裂が生じ(図8(a))、それが深くなるにつれてき裂面を含む断面の剛性が低下するので、No.6 および No.7 の荷重分担能力 (F_6 , F_7) が減少し(図8(b))、一方、No.5 および それより頭側のねじは減少分を補うために分担力が増大する。そのため、No.5 ねじに二次的なき裂が生じる一方、No.6 のき裂は進展が遅くなるか、停止する(図8(c))。このようなき裂の挙動が No.6 から No.1 まで順次

繰り返しながら生じる結果、疲労寿命の向上がもたらされたものと考えられる。このように、き裂発生及び進展状態を明らかにすることで、ピッチ差を設けることによる疲労寿命向上の原因とそのメカニズムを解明することができた。

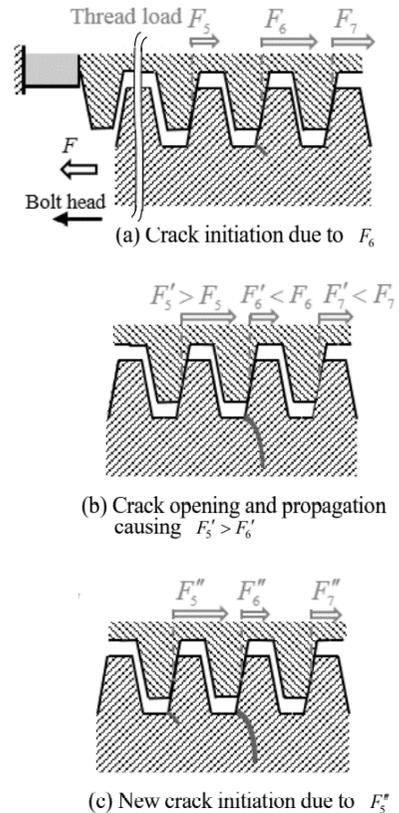


図8 No.5, 6, 7 ボルト谷底でのき裂進展状況の説明図

4 おわりに

本稿では、ピッチ差付きボルト・ナット締結体のピッチ差を変えた時の疲労試験を行い、ピッチ差の疲労強度への影響を調べた。その結果、適切なピッチ差を与えることで疲労寿命が向上することを示した。すなわち、ピッチ差を設けることにより、き裂は No.6 で発生

し、ボルト頭側のねじ谷すなわち、No.5, No.4 へと移行していき、最終破断が No.1 で生じる。このように、き裂発生点が順次移行していくためにき裂伝播寿命が長くなり、No.1~2 を起点に一気に破断する $\alpha=0$ よりも疲労破壊寿命が長くなることを明らかにした。

参考文献

- (1) 西田新一：ねじの破損と防止対策(9)，金属，88 No. 5(2018)，p. 64.
- (2) 西田新一：特許証，特許第 684628 号(2021)。
- (3) ハードロック工業株式会社，緩み止めナット，特開 2002-195236(2002)。
- (4) 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・ナットの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.
- (5) 野田尚昭，佐野義一，陳鑫，丸山光，王寰，藤澤良太，高瀬康，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.

(6) 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.4, No.44(2013)，pp.1111-1117.

(7) 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.

(8) Chen, X., Noda, N.-A., Akaishi, Y., Sano, Y. and Takase, Y., Effect of pitch difference on anti-loosing performance and fatigue strength for high strength bolts and nuts, 13th International Conference on Fracture (2013), 10988-43072.

(9) Chen, X., Noda, N.-A., Magd, A.-W., Akaishi, Y., Sano, Y., Takase, Y. and Gusztav, F., Fatigue failure analysis for bolt-nut connections having slight pitch differences using experimental and finite element methods, *Acta Polytechnica Hungaria*, Vol.12, No.8 (2015), pp.61-79