

## 機械各部締結用切削ねじの疲労に関する研究\* (繰返し負荷方法の影響)

五十君 清司\*<sup>1</sup>, 栗田 肇\*<sup>1</sup>

### Fatigue Strength of Machined Screw Thread (Effects of Loading Modes in Fatigue Test)

Kiyoshi ISOGIMI and Hajime KURITA

The effects of various kinds of factors on the fatigue strength of machined screw thread connection generally used as the fastener of machine components are examined. Effects of materials (i. e. heat-treatment), fastening force, yielding pre-tension or pre-compression before the oscillating loading test and lubrication between the connecting surfaces are chosen as the factors. Fatigue tests are performed for both types of screw thread, and bolt-nut connections made of normalized or tempered S 45 C, and obtained results are investigated in detail. Consequently, the effects on the fatigue strength are clarified. Furthermore, the strain hardening caused at each step of the machining and loading process is discussed.

**Key Words:** Fatigue Strength, Screw Thread, Bolt-nut Connection, Yielding Preload, Lubrication, Strain Hardening

#### 1. 緒 言

締結要素の中でねじ結合は、組立や分解が簡単で微調整も可能であるため、機械各部の結合に広範に用いられている。この場合ねじ結合には静的な締付け負荷のほかに、構成要素各部の間に作用する外力、摩擦や回転に起因する熱応力、各部の回転による振動応力などの変動荷重が作用するが、これらの繰返しによりねじ結合に疲労破壊が発生すると、じんだな被害を招く可能性がある。

ねじの疲労に関しては多くの研究が行われてきている<sup>(1)</sup>が、それらは主として高強度ボルトなどを対象としており、機械各部の締結にしばしば用いられる普通鋼ボルトについてはまだ研究の余地があるようである。

著者らは切削により製作したねじ締結体の疲労特性を明らかにするため、すでにねじに軸方向繰返し荷重が作用する場合について、素材の性質や寸法差に対する基礎的な考察を加えてきた<sup>(2)(3)</sup>。その結果、従来諸説がありはっきりと確立されていなかった<sup>(4)</sup>切削ねじの

疲労限度に対する平均応力の影響が、平滑材の場合と同様に存在することが明らかとなった。

本研究では各種繰返し荷重条件の差が、平滑材、ねじ単体、締結体それぞれの疲労限度にいかなる影響を及ぼすかをさらに詳細に調べ、同時に試験の各段階におけるねじ谷底での硬さを測定して、疲労現象との関連性についても検討を加えた。

#### 2. 実験方法

試験片素材には機械構造用炭素鋼 S 54 C を用い、所定の性質を与えるために 830°C 空冷による焼ならし、または水冷却焼入れ後 600°C 空冷による焼戻し処理を施した。各素材の主な機械的性質を表 1 に、使用試験片の形状および呼び寸法を図 1(a), (b) および表 2 に示す。

図 1(a) はねじ単体、図 1(b) は締結形試験片である。これら各素材の諸性質はいずれも強度区分 6.8 ボ

表 1 素材の機械的性質

	S45C material	
	Normalized	Tempered
Tensile strength	720.4 MPa	810.2 MPa
Vicker's hardness	208	252
Yielding point	393.4 MPa	535.6 MPa
Elongation	26.8 %	20.5 %
Young's modulus	203.3 GPa	195.0 GPa

\* 昭和 62 年 10 月 2 日 北陸信越支部信越地方新潟講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 12 月 15 日。

\*<sup>1</sup> 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

ルトの規格を満足している。ねじの切削時には加工の影響が入らないように加工条件に十分注意して、JIS B 0209-1982メートル1級おねじを製作した。試験片ねじ部は全長を約20ピッチに、また両端に約1ピッチの不完全ねじ部をとり、端の影響がねじ部中央に及ばないようにした。なお締結形試験片に組合せて使用するナットとしてはJIS 2級めねじを切削加工したものを用いた。

ねじの疲労試験は素材の性質、寸法、形状、加工法、精度などの違いにより結果に大きな差が生じる。このため試験法の標準化のための努力がされてきたが、いまだ十分に定着していないようである。

本研究では試験機に引張圧縮形油圧式疲労試験機(島津製作所、サーポパルサEHF-10)を用いて、以下のような各形式で疲労試験を行った。まずねじ単体の場合には、図1(a)の試験片両端段付部を基準面として試験機のフランジに固定保持し、つぎのような軸方向繰返し荷重を加えた。著者らが行った研究<sup>(2)(3)</sup>において、ねじの疲労限度には加える平均応力値のみでなく、繰返し応力中に含まれる圧縮応力の大きさがかなり大きい影響を与えることが明らかになったので、圧縮応力の影響をさらに検討する一つの方法として、ねじに降伏予荷重を加えてみることにした。すなわち静的引張試験で得た材料の降伏応力値 $\sigma_y$ の約10%増の引張りおよび圧縮の降伏予荷重を与えて、わずかに塑性変形させることにより、圧縮および引張りの残留応力を生じさせた後、適正締付力に相当した平均応力一定のもとで繰返し荷重を加えた。

また締結形の場合には、試験機取付用ジグを兼ねた2個の被締付物を、後述の適正締付力で締め付けた後両振繰返し荷重を加えた。図2に試験機に取付けた状態の概略を示す。このときナットとの結合部に何の表面処理も施さない場合と、潤滑剤として広く用いられているMoS<sub>2</sub>ペースト(平均粒径0.7 $\mu$ m)を塗布した

場合の両者について実験した。つぎに適正締付力の算出方法を述べる。

ねじ単体時の疲労試験における平均応力値としては、M16並目ねじに対する適正締付力 $\sigma_{fmean}$ を次式<sup>(5)</sup>で求めて採用した。

$$\sigma_{fmean} = (\sigma_{fmax} + \sigma_{fmin}) / 2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\sigma_{fmax}$  : 締付応力の最大値 =  $0.7\sigma_y$

$\sigma_{fmin}$  : 締付応力の最小値 =  $\sigma_{fmax} / Q$

$\sigma_y$  : 試験片素材の降伏応力で、焼ならし材では $\sigma_y = 393.4$  MPa、焼入れ焼戻し材では $\sigma_y = 535.6$  MPaである。

式(1)を書き直すと、

$$\sigma_{fmean} = 0.35(1 + 1/Q)\sigma_y \dots\dots\dots (2)$$

締付係数 $Q$ <sup>(6)</sup>を無処理、無潤滑時の値 $Q = 1.8$ に選んだので、 $\sigma_{fmean} = 214.2$  MPa(焼ならし時)、291.6 MPa(焼入れ焼戻し時)と得られた。

一方締結時に加える適正締付けトルク $T_t$ は、

$$T_f = F_f \left\{ d_p(1.15\mu_s + \tan\beta) + d_w\mu_w \right\} / 2 \dots\dots (3)^{(5)}$$

で与えられる。ただし、

$F_f$  : ボルトに発生した締付力

$d_p$  : おねじ有効径 ( $\cong 0.91d$ )

$\beta$  : ねじリード角 ( $\cong 2^\circ 50'$ )

$\mu_s = \mu_w \cong 0.15$  : 各部の摩擦係数

式(3)中の値 $F_f$ は有効断面積 $A_s$ を用いて次式で求められる。

$$F_f = \sigma_{fmean} \cdot A_s \dots\dots\dots (4)$$

結局、適正締付けトルクは次のように得られる。

$$T_f = 0.07(1 + 1/Q)\sigma_y A_s d \dots\dots\dots (5)$$

$$= 53.44 \text{ N}\cdot\text{m}$$

ただし締付係数としては、ボルトナットとも表面無処理で、MoS<sub>2</sub>ペースト潤滑を施した場合の値 $Q = 1.4$ をとった。

なお、加える繰返し荷重は正弦波で、繰返し速度は25 Hzである。通常ねじの疲労試験では繰返し回数 $5 \times 10^6$ で疲れ破壊を起こさないねじを永久非破壊のね

表2 試験片各部の呼び寸法

Specimen	Nominal dimensions
Type-1	L=217, A=95, B=40
Type-2	A=80, B=70, C=40 (M16X2.0)
	A=80, B=70, C=35 (M12X1.75)

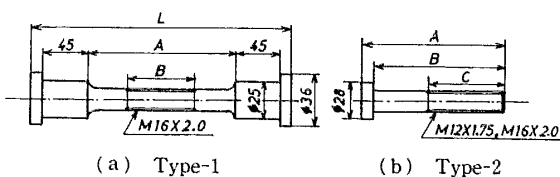


図1 試験片形状

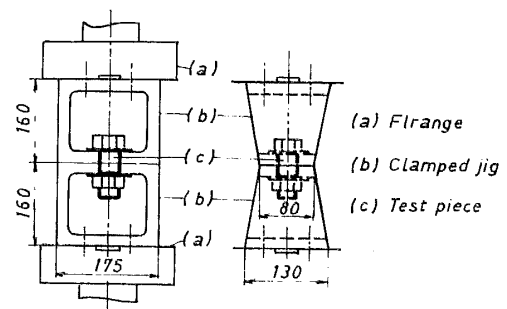


図2 締結形試験片の取付方法

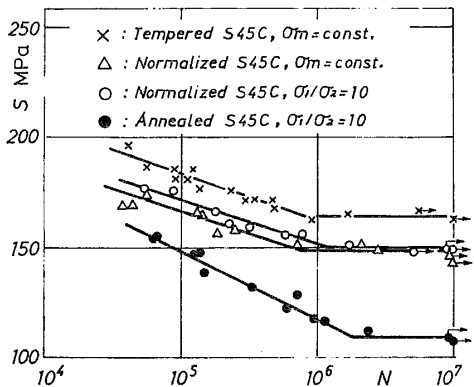
じとみなすことが多いので、本研究でも同様に取扱った。

3. 実験結果および考察

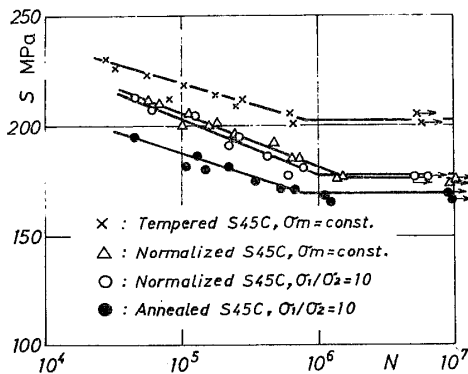
図3(a), (b)は、ねじ単体および平滑材に対し、素材に施す熱処理および繰返し負荷方法の差の影響を示したS-N曲線である。図3中には、著者らが繰返し応力比(最大応力 $\sigma_1$ /最小応力 $\sigma_2$ )=10のもので行って得た実験結果<sup>(3)</sup>(●, ○印)を同時に示した。ねじ単体、平滑材いずれの場合も、同一の熱処理素材を用いたときには、応力比一定の形式でも、平均応力一定の形式の試験であっても疲労限度 $\sigma_w$ にはほとんど差が見られないこと、焼なまし材、焼ならし材、焼入れ焼戻し材の順に $\sigma_w$ が上昇し、素材の硬さの上昇と同様の傾向を示していることがわかる。なお、焼なまし材の硬さはすでに文献(3)で $HV=181.0$ と得られている。また焼なまし時に比較して焼入れ焼戻し時の疲労限度値は、ねじ単体で約50%、平滑材で約20%上昇しており、とくにねじの場合に熱処理方法が大きな影響を与えるといえる。

図4(a), (b)には、繰返し負荷前に試験片に引張

りおよび圧縮の降状予荷重を加え、圧縮および引張りの残留応力を発生させた場合の結果を示した。疲労限度は平滑材ではいくぶん上昇するが、ねじ試験片では予荷重により常にいちじるしく低下し、その割合は約40%にも達している。通常平滑材では、降伏点以上の予荷重を加えても、巨視的な意味での残留応力は発生せず、材料はたんに塑性変形に伴った加工硬化のみを受けるにすぎない。このような理由により予荷重によりやや疲労限度が上昇することとなる。一方ねじのような切欠試験片では、予荷重除去後に切欠底に圧縮あるいは引張りの残留応力が発生する。しかし本実験で扱っているような降伏点直上の予加工程度に対しては、かえって疲労限度が低下する<sup>(4)</sup>といわれており、ねじのように切欠が連続して存在するときには、この影響がより大きく現れて低下の程度がいっそう著しく

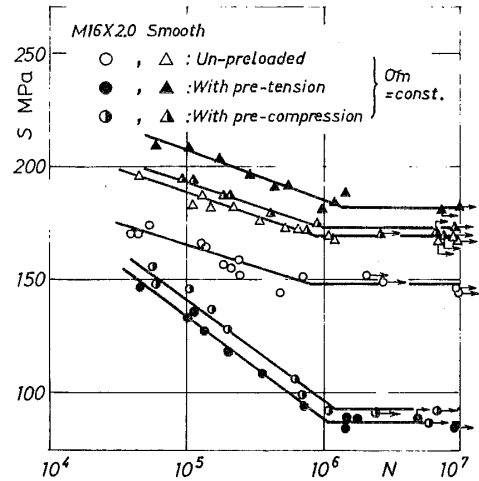


(a) ねじ単体試験片

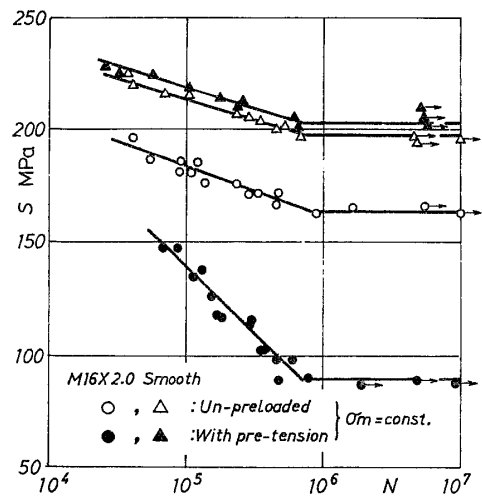


(b) 平滑試験片

図3 熱処理の影響



(a) 焼ならし材



(b) 焼入れ焼戻し材

図4 降伏予荷荷の影響

なるため、このような結果が得られたものであろう。なお、降伏予負荷によって試験片に生じる寸法および形状の変化は最大1%であって、これらに基づく影響はほとんど無視できる。

図5は、ねじ単体とボルトナット締結体の挙動の差および締結時における潤滑の影響を示したものである。ねじ単体に比較して締結体では疲労限度が著しく上昇しており、その割合は75%以上にもなる。またMoS<sub>2</sub>ペーストによる潤滑を施すことにより、さらに30%程度上昇し、大きな効果が見られる。なおM12ねじではM16ねじよりも疲労限度がいくぶん高くなり、すでに検討を加えたねじ単体時<sup>(3)</sup>とまったく同様の傾向を示すことがわかった。

表3には、各種疲労試験で得たねじの疲労限度から切欠係数 $\beta_E$ を求め、すでに得られている結果と比較して示した。 $\beta_E$ の値は使用素材、繰返し負荷方法によりかなり差がある。とくに焼ならし材の場合にはほかに比較して全体的に小さな値となり、この素材を用いて切削したねじが強度上優れているといえる。また予負荷を与えると切欠係数は急上昇し強度の低下が著しい。なお予負荷のない場合を対象として、機械学会で定めている計算式<sup>(6)</sup>より環状V溝に対する切欠係数 $\beta_c$ を求めると、

$$\beta_c = 2.49$$

表3 切欠係数 (M16×2.0)

Material	Loading modes	$\beta_E$	
Annealed S45C	$\sigma_1 / \sigma_2 = 10$	1.62	
Normalized S45C	$\sigma_1 / \sigma_2 = 10$ $\sigma_m = 0$ MPa $\sigma_m = 147.1$ MPa	1.19	
		1.16	
		1.10	
	$\sigma_m = 209.6$ MPa	Non-preload Pre-tension Pre-compression	1.15 2.09 1.84
Tempered S45C	$\sigma_m = 291.3$ MPa	Non-preload Pre-tension	1.20 2.27

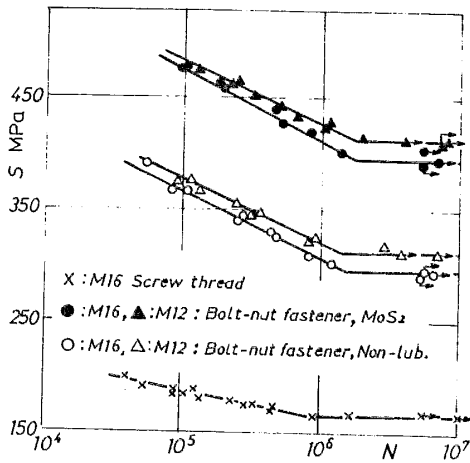


図5 締結体のS-N曲線

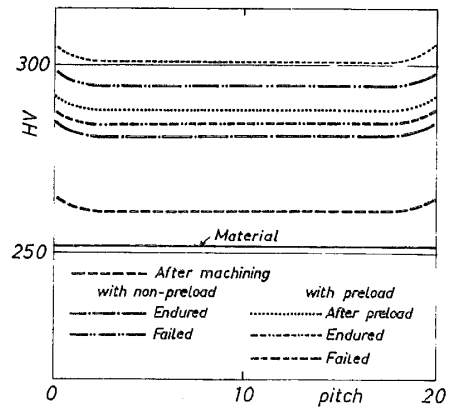
となるが、これに連続切欠時に対する低減率 $\gamma$ による補正を行うと、

$$\beta_c = \beta_c \cdot \gamma = 2.49 \times 0.67 = 1.66 \dots\dots\dots (6)$$

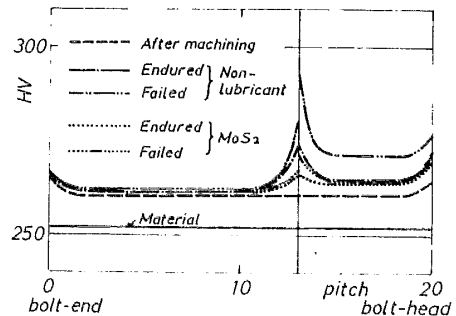
となる。ねじでは疲労破断を生じる端の部分の部分が浅い不完全ねじとなっており、比較的浅い切欠に相当することの影響を考慮すると、ほぼ同程度の値が得られるものと考えられ、本実験結果の妥当性が裏付けられた。

つぎに、材料の機械的性質のうち硬さに着目して、切削加工時や負荷過程にいかなる影響を受けるかを調べた。一例として図6(a)、(b)には、焼入れ焼戻し材のねじ単体および締結体試験片のねじ谷底における硬さHVの軸方向に沿う分布を示した。まず切削加工により硬さは約4%上昇するが、ねじの切り始めと切り終わりでいくぶん硬化の割合が大きくなっている。つぎに疲労試験過程での変化のようすを考察する。

ねじ単体時には、繰返し負荷により硬さは切削加工後に比べ常に上昇するが、そのようすは繰返し応力値に依存して変化する。まず疲労限度以上の負荷により早期に破断した場合には12~15%上昇しているが、疲労限度荷重を受けて破断しなかったものでは、8%前後上昇しているにすぎない。このため降伏予負荷によりすでに約10%の加工硬化を受けたねじでは、繰返し



(a) ねじ単体試験片



(b) ボルトナット締結体

図6 ねじ谷底における硬さ分布

負荷によりかえってわずかの硬さの低下として現れている。

ボルトナット締結時においてもほぼ同様の現象が見られるが、とくに締結時にはナット座面側に近いところで応力集中が起こることと、被締付材側のボルト内部に大きい軸力が発生するため、図6のように座面の両側部分でかなりようすの異なった結果が現れているものと考えられる。

#### 4. 結 言

得られた結果を要約するとつぎのようになる。ねじ単体試験片を対象とした疲労試験の結果、

(1) 素材が同一のときは、繰返し負荷方法の差は疲労限度にあまり影響しないが、素材が異なると著しい差が見られ、素材の硬さの値が大きいものほど疲労限度が高い。

(2) 疲労試験前に降伏予荷重を与えた場合、予荷重の種類によらず、ねじでは疲労限度が約40%低下するが、平滑材では逆にわずかに上昇する。他方最適締付

けをした締結体に対しては、

(3) ねじ単体に比較して疲労限度が著しく上昇し、その割合は表面無処理時で約75%であり、MoS<sub>2</sub>ペースト潤滑時にはさらに約30%上昇する。

ねじ谷底での硬さ変化を調べた結果から、

(4) いずれの試験片でも、早期破断時には硬さがかなり上昇するが、非破壊時にはその割合が減少する。また締結時には、ナット座面側付近においてとくに著しい硬さの変化が見られる。

#### 文 献

- (1) Yakushev, A. I., *Effect of Manufacturing Technology and Basic Thread Parameters on the Strength of Threaded Connexions*, 1964, Pergamon Press.
- (2) 栗田・ほか2名, 機講論, No.813-1 (昭56), 63.
- (3) Isogimi, K., ほか2名, *Res. Rep. Facult. Eng., Mie Univ.*, 8 (1983), 1.
- (4) 石橋, 金属の疲労と破壊の防止 (昭46), 53, 76, 養賢堂.
- (5) Junker, G. and Blume, D., *Draht-welt*, 50-8, 10, 12 (1964), 527-544, 663-682, 791-808.
- (6) 日本機械学会編, 金属材料疲労強度の設計資料, I, (昭57), 116.