

131 塑性締めボルトの疲労強度 —再使用時の疲労強度保証—

(株) 豊田中央研究所 正 ○山田春彦 正 猿木勝司

堀田昇次

トヨタ自動車(株)

加納知広

1. 緒言

ボルトの締付け方法として、従来の弾性域締付けにかわり、塑性域締付け（以下塑性締め）が注目され、一部実用化されている。塑性締めでは、再使用（締付けを繰返したとき）の問題が重要になる。これについて、再使用時の締付け特性を調べた例¹⁾はあるが、疲労強度を調べた例は見あたらない。

そこで、本研究では、塑性締めボルトの再使用時の疲労強度を保証するため、再使用に伴う通常の締付け回数（2～3回）をはるかに超える、過酷な回数（10回）の締付けを行ったボルトの疲労強度を調べるとともに、過酷な回数の締付けを行うことにより、ねじ底にき裂が入った場合の耐久限を、破壊力学的手法を用いて推定することを検討した。

2. 実験方法

2.1 塑性締めを繰返したボルトの疲労試験

供試ボルトの形状・寸法を図1に示す。(a)はねじ部が塑性変形するねじ伸びボルト、(b)は軸部が塑性変形する軸伸びボルトである。いずれも、材料はSCM440で、転造後調質処理され、硬さはHv360である。

ボルト・ナットの締付け状態を図2に示す。塑性締めの条件は、スナグトルク+回転角度90°である。この条件で締付けたあとボルトをゆるめ、これを9回繰返して、最後に締付けたもの（以下10回塑性締め）を用意した。また、比較のため、1回締付けたもの（以下1回塑性締め）も用意した。これらの締付けた状態のものを電気油圧式疲労試験機（容量98kN）に組付け、繰返し速度15Hzで外力を負荷し、疲労試験を行った。ボルトの軸力は、ボルトの軸部に貼ったひずみゲージの出力から求めた。

2.2 疲労き裂進展試験

塑性締めを過酷な回数繰返した場合には、ねじ底にき裂が入ることが懸念される。き裂が入った場合の耐久限を破壊力学的手法を用いて推定するにあたり、まず、ボルト材料の疲労き裂進展試験を行った。試験片の形状・寸法を図3に示す。試験片の材料および硬さは、供試ボルトと同じである。

試験片への荷重方法は、塑性締めボルトの荷重状態を考慮して、以下のようにした。実際のボルトでは、塑性締めの段階でねじ底に降伏点以上の高い平均応力が

が作用し、それに外力による振動応力が重畳している。そこで、試験片への荷重もこれに似た状態で行った。すなわち、はじめに試験片に引張りの予ひずみを与え、そのときの応力を振幅の最大値として、そのあと高い平均応力下で繰返し応力を与えた。き裂が発生したら、最大応力は一定にして最小応力をステップ状に上げ、応力振幅を減少させながらき裂進展下限 ΔK_{th} を測定した。この方法では、応力比 R は徐々に高くなり、 ΔK_{th} を測定した付近での R は0.90～0.95であった。はじめに与える予ひずみの量は、0, 0.5, 2.5, 6.5%の4段階に変化させた。き裂の応力拡大係数範囲 ΔK は、丸棒の半楕円表面き裂に対する白鳥らの解析解²⁾を用いて計算した。試験は、電気油圧式疲労試験機（容量49kN）を用いて、繰返し速度30Hzで行った。

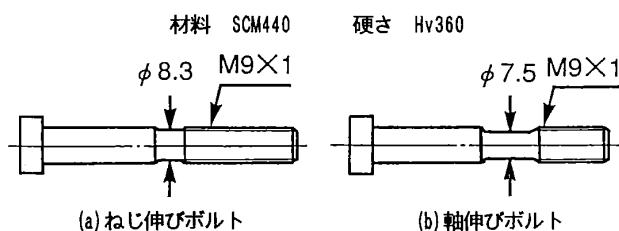


図1 ボルトの形状・寸法

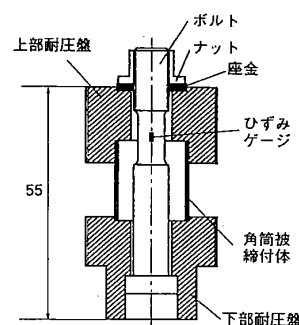


図2 ボルト・ナットの締付け状態

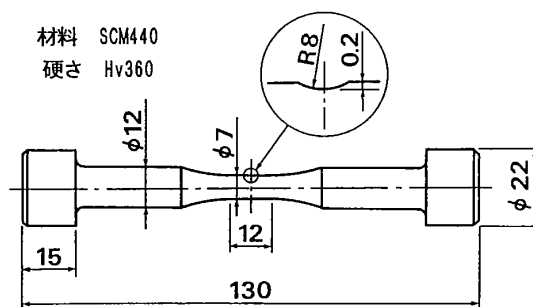


図3 疲労き裂進展試験に用いた試験片の形状・寸法

この試験で求めた ΔK_{th} とねじ底のき裂の応力拡大係数範囲 ΔK の計算とを組み合わせ、ねじ底にき裂が入った場合の耐久限を推定した。 ΔK の計算方法については、3.3節で述べる。

2.3 推定した耐久限の妥当性検証試験

推定した耐久限の妥当性を検証するため、図1(a)のねじ伸びボルトに種々の長さの疲労予き裂を入れて疲労試験を行った。試験の手順は、2.1節の条件で1回塑性締めした状態で、耐久限以上の応力振幅を $10^4 \sim 10^5$ 回かけて疲労予き裂を入れ、そのあと応力振幅を下げ、疲労試験を行い、 10^7 回繰返しても破壊しない場合は応力振幅を上げ、これを破壊するまで繰返した。はじめに入れた予き裂の長さは、疲労試験後に破面上で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 塑性締めを繰返したボルトの疲労強度

10回塑性締めしたボルトの疲労強度を、1回塑性締めた場合と比較して図4に示す。いずれのボルトにおいても、耐久限は10回塑性締めと1回塑性締めとで差はない。したがって、10回という過酷な回数の締付けを繰返しても、耐久限には影響しないことがわかる。破壊位置は、いずれのボルトにおいても、ナットとかみ合うボルトの第一あるいは第二ねじ底であった。

締付けを繰返したときのねじ底の変化を調べるため、ねじ底の断面観察を行った。図5には、10回塑性締めしたねじ伸びボルトの状況を示す。ねじ底には、最大で $7\mu\text{m}$ 程度の微小なき裂が入っていた。このようなき裂は、ボルトの初期状態および1回塑性締めでは見られないことから、10回の繰返し締付けにより発生したものである。ただし、軸伸びボルトでは、10回塑性締めしても、ねじ底にき裂は発生していなかった。これは、軸伸びボルトの場合、塑性締めを繰返しても軸部の変形がふえるだけで、ねじ部の変形は進まないためである。

以上の結果より、10回という過酷な回数の塑性締めを繰返すと、ねじ底には $7\mu\text{m}$ 程度のき裂が発生するが、このき裂は疲労強度に悪影響を及ぼさないことがわかった。しかし、き裂の長さがさらに長くなった場合には、疲労強度の低下が懸念される。そこで、以下では、ねじ底にき裂が入った場合の耐久限を推定した。

3.2 ボルト材料のき裂進展下限界 ΔK_{th}

2.2節の方法で求めたボルト材料の ΔK_{th} を、予ひずみ量との関係で図6に示す。ここでいう ΔK_{th} は、き裂進展速度 da/dN が 10^{-8}mm/cycle となる ΔK で定義した。 ΔK_{th} に及ぼす予ひずみ量の影響は小さく、予ひずみが2.5%以上ではほぼ一定($2.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)となった。

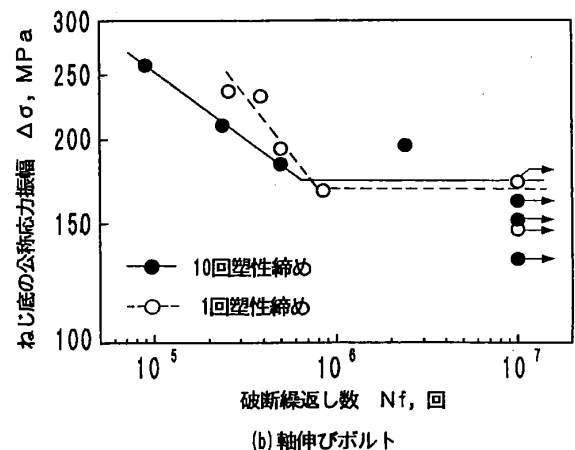
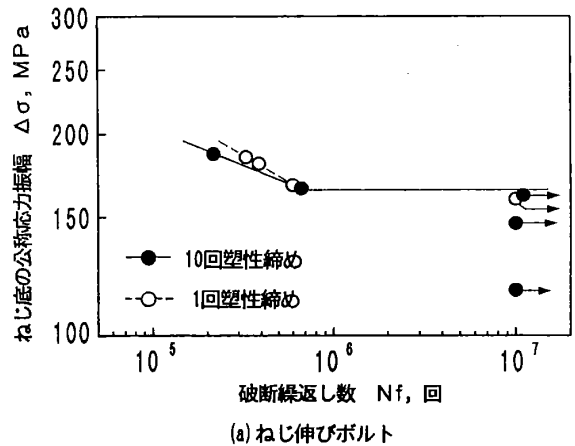


図4 ボルトの疲労強度



図5 10回の繰返し塑性締めにより発生したねじ底のき裂 (ねじ伸びボルト)

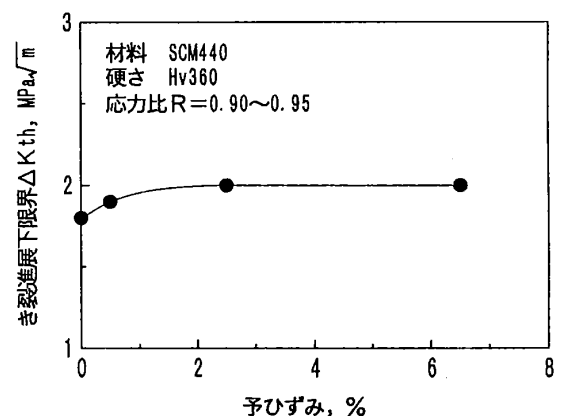


図6 き裂進展下限界 ΔK_{th} と予ひずみ量の関係

この結果より、ボルト材料の ΔK_{th} として $2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用いることにした。

3.3 ねじ底のき裂の ΔK の計算

ここでは、ねじ底のき裂を2次元で近似し、 ΔK の計算式として、ねじ底の応力集中を考慮した式と、応力集中を考慮しない式を用いた。一般には、ねじ底は応力集中を生じるので、それを考慮すべきである。しかし、塑性締めのように、ねじ底断面全体が降伏している場合には、弾性的な応力集中は意味を持たなくなることが考えられる。そこで、応力集中を考慮しない式での評価も試みた。それぞれの計算式を以下に示す。

応力集中を考慮した式

$$\Delta K = 1.122 \alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi a} / \sqrt{1 + 4.5(a/\rho)} \quad (1)$$

応力集中を考慮しない式

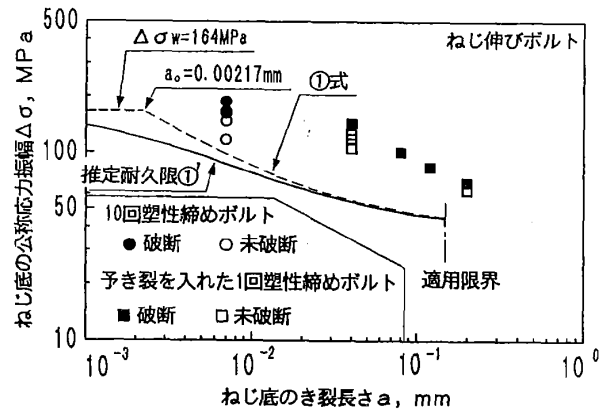
$$\Delta K = 1.122 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

ここで、 α はねじ底の応力集中率、 $\Delta \sigma$ はねじ底の公称応力振幅、 a はき裂長さ、 ρ はねじ底の半径である。 α は大滝³⁾の計算結果を用いて4.3とし、 ρ は実測より 0.15 mm とした。なお、①式は、Lukás-Klesnil⁴⁾が切欠き底のき裂に対して提案したものである。

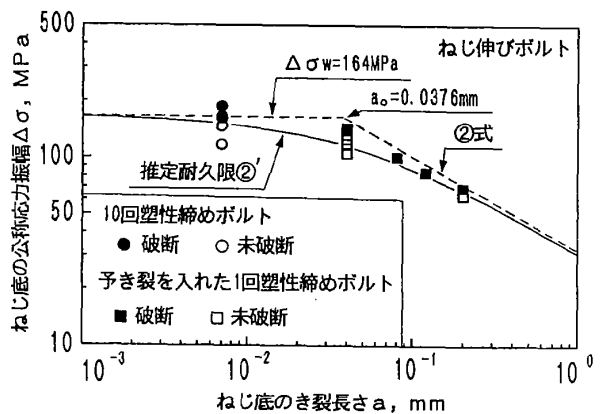
3.4 耐久限の推定と実験的検証

3.2節で求めた ΔK_{th} と3.3節の ΔK の計算式とを組み合わせ、耐久限を推定した。なお、ねじ底のき裂は微小であるため、仮想き裂の概念⁵⁾(①・②式中の a のかわりに $a + a_0$ を用いる、ここで a_0 は潜在き裂長さを表す)を導入した。図7には、このようにして求めた推定耐久限(①'・②')とボルトの疲労試験結果を比較して示す。(a)は応力集中を考慮した式を用いた場合、(b)は応力集中を考慮しない式を用いた場合である。また、ボルトの疲労試験結果としては、10回塑性締めのものと、疲労予き裂を入れた1回塑性締めのものとが示してある。応力集中を考慮した式を用いた場合には、推定値と疲労試験結果とが全く合わない。一方、応力集中を考慮しない式を用いた場合には、推定値と疲労試験結果とが比較的よく一致している。応力集中を考慮しない式を用いた方がよいのは、塑性締めの場合ねじ底の断面全体が降伏しており、弾性的な応力集中が意味を持たなくなるためと考える。

以上の結果より、ボルト材料の ΔK_{th} とねじ底のき裂の ΔK の計算式(2次元の応力集中を考慮しない式)とを組み合わせ、ねじ底にき裂が入った場合の耐久限を推定できることがわかった。この推定によれば、10回の繰返し締付けで発生する $7 \mu\text{m}$ 程度のき裂は、ボルトの耐久限に大きな影響を及ぼさないが、さらにき裂が長くなり、たとえば $30 \mu\text{m}$ の長さになると、耐久限は約3/4に低下することが予測される。



(a) 応力集中を考慮した式を用いた推定



(b) 応力集中を考慮しない式を用いた推定

図7 推定耐久限とボルトの疲労試験結果との比較

4. まとめ

- (1) 再使用に伴う通常の締付け回数(2~3回)をはるかに超える、過酷な回数(10回)の塑性締めを行っても、ボルトの耐久限は低下しないことがわかった。ただし、ねじ伸びボルトでは、塑性締めを10回繰返すことにより、ねじ底には最大で $7 \mu\text{m}$ 程度の微小なき裂が発生した。
- (2) ボルト材料の ΔK_{th} とねじ底のき裂の ΔK の計算式(2次元の応力集中を考慮しない式)とを組み合わせ、それに仮想き裂の概念を導入することにより、ねじ底にき裂が入った場合の耐久限を推定することができた。
- (3) ボルト材料の ΔK_{th} は、予ひずみ量が0%から2.5%にふえると約1割上昇したが、2.5%以上では一定($2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)となった。

参考文献

- 1) 大橋宣俊ほか, 精密機械, 50, 10, 1607(1984)
- 2) 白鳥正樹ほか, 機論(A編), 53, 488, 779(1987)
- 3) 大滝英征, 機論, 38, 311, 1885(1972)
- 4) Lukás, P. et al., Mat. Sci. Eng., 34, 1, 61(1978)
- 5) 西谷弘信, 疲労強度学, オーム社, 195(1985)