

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560130

研究課題名(和文) ねじ谷底の残留応力分布に基づくボルトの疲労強度の定量化

研究課題名(英文) Quantification of the Fatigue Strength of a Bolt based on Residual Stress at the Thread Root

研究代表者

萩原 正弥 (HAGIWARA MASAYA)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90134840

研究成果の概要(和文)：

ねじの疲労強度を正確に推定し、事故を未然に防止するためには、ねじの製造過程で発生するねじ谷底の残留応力の値を調べる必要がある。本研究では、ねじ谷底を模したモデルに対するX線応力測定と数値シミュレーションを併用することで、転造過程で生じる残留応力分布の推定を行える計算モデルの提案を行い、さらに疲労試験結果から、従来の仮説を用い、コンピュータ解析によってねじ谷底の局所的な応力変動を求めることによって、ねじの疲労強度が推定できることを示している。

研究成果の概要(英文)：

To predict the fatigue strength of a bolt, and to prevent the failure, it is necessary to know the residual stress induced by thread rolling process precisely. In this study, the X-ray measurement and computer simulation were performed for large-scale thread root model made by rolling. By comparing the results, the model has been proposed to calculate the residual stress distribution. The results from fatigue test show that the fatigue strength of a bolt can be predicted from the local stress distribution obtained by computer analysis using the hypothesis presented.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素、ねじ、ボルト、疲労強度、残留応力分布、X線応力測定、シミュレーション、FEM応力解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 市販のねじ部品の疲労強度が大きくばらつく原因の一つは、ねじ谷底の圧縮残留応力の影響だと言われているが、現在の技術では、ねじ谷底のきわめて狭い領域に集中する残留応力分布を正確に測定又は推定するこ

とは困難であり、それが強度設計上の大きな問題となっていた。

(2) ねじ谷底の局所的応力からボルトの疲労強度を推定しようとする試みは、かなり古くから行われており、疲労強度に関する仮説

もいくつか提案されているが、それらを検証するためには、上述の残留応力分布を含む応力解析の精度向上及び試験片の製造条件を厳密に管理した上での疲労試験の実施が必要であった。

2. 研究の目的

(1) ねじ転造によってねじ谷底に発生する残留応力分布を明らかにするため、ねじ谷底の形状を模した環状丸溝拡大モデルを製作し、それに対して、X線残留応力測定及び塑性加工用ソフトを用いたシミュレーションを行うことによって、残留応力が極めて狭い領域に分布すると予想されるねじへの適用の可能性に対する検討を行う。

(2) ねじ谷底の残留応力が疲労強度に及ぼす影響を明らかにするため、市販のボルトと同一のねじ山形状をもつリードなしボルト試験片を製作し、その谷底部に、予荷重によって模擬的な残留応力を付与し、解析によって得られる残留応力値に基づく疲労強度の推定及び結果の比較を行い、仮説の部分的な検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 通常の締結ボルトは、谷底の丸みが極めて小さく、またねじリードによってその形状が非常に複雑であるため、M10、強度区分12.9のボルトのブランク（素材）上に、ねじ谷底部を模した比較的丸み半径の大きい複数の環状丸溝（図1）を転造加工し、X線応力測定法を適用して軸方向圧縮残留応力分布の測定を行い、実際のボルトねじ谷底に適用する際、コリメータの直径や試験片（ブランク）の直径などが測定結果に及ぼす影響について検討し、所期の精度で測定を行うための必要条件を明らかにする。

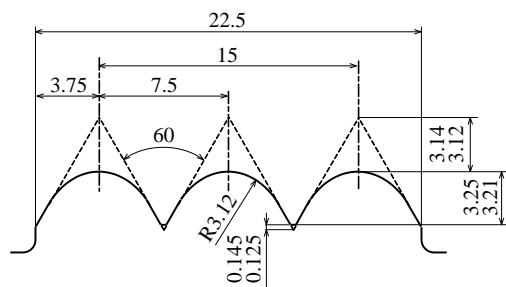


図1 環状丸溝試験片の形状

(2) 塑性加工用ソフト(DEFORM)により、二次元平面ひずみ問題として、上記試験片における転造過程のシミュレーションを行い、得られた残留応力分布の違いから、軸対称モデルによる解析を併用しながら、モデルの拘束条件並びに負荷及び除荷の最適条件の設

定を試みる。

(3) 断面がボルトのねじ山と同一形状となる軸対称リードなしボルト試験片を製作し、予荷重を作用させたときにねじ谷底に発生する残留応力をFEMによって推定するとともに、実際に疲労試験を行い、予荷重の有無が疲労強度に及ぼす影響について調べる。

(4) (3)で得られたそれぞれの疲労限度の荷重条件において、ボルトねじ谷底に作用する局所的応力変動を求め、ボルトブランクから作成した平滑試験片の疲労強度と比較することによって、ボルトの疲労強度に関する仮説の検証を試みる。

4. 研究成果

(1) 環状丸溝試験片では、熱処理後の転造によって谷底表面で約700MPaの圧縮残留応力が発生しており、深さ0.5mm内部の位置で、最大1200MPa程度に達することがわかった[図2(a)]。また、試験片の軸断面において硬さを測定したところ、熱処理後転造した試験片では、残留応力が検出されない転造後熱処理した試験片と比較して、0.5mm内部のピーク位置で、約60ポイントでの硬さの増加が見られ、硬さ分布は、測定された残留応力分布とよく対応することがわかった(図3)。

さらに試験片の軸方向位置を変えて行った測定結果から、実際のボルトねじ谷底に対するX線応力測定法適用については、残留応力が一定とみなせる範囲は、谷底丸みを含む $\pm 25\mu\text{m}$ 以内の領域であり、そのためには直径30 μm という極めて小さいコリメータを用いる必要があることから、実際の測定には、精密な位置決めや結晶粒の平均化のための特別の取り付け装置の開発が必要であり、さらに、ねじ山によるX線角度の制約から、転造後のねじ山の除去などを含む特別な配慮が必要であることを明らかとした。

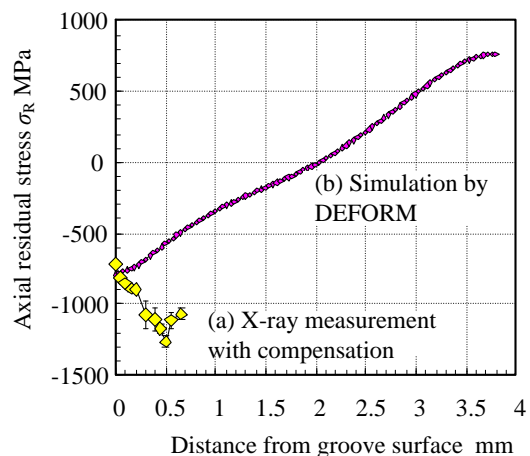


図2 環状丸溝試験片の残留応力分布

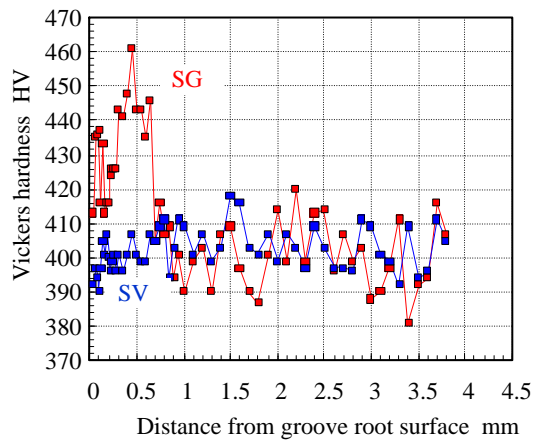


図3 環状丸溝試験片における硬さ分布

(2) 二次元平面ひずみモデルによるシミュレーションでは、加工（工具の押しつけ）によって発生する表面での残留応力値は測定結果とほぼ同程度であったが、測定結果のような内部でのピークは現れず[図 2(b)]、このことから、転造加工と平板の圧縮塑性加工では、接触面での摩擦や転造加工における材料の円周方向への流動が大きく影響することを確認した。

これらの現象は、負荷及び除荷における二次元モデルの拘束条件を適切に調整することによってある程度まで可能となることがわかった。モデルの設定方法と実際の物理現象の関係に関しては、まだ不明確な部分があり、今後の課題となるが、通常弾塑性有限要素法ソフト（Ansys）において、転造過程を再現するための離散的なリモデル（図 4 参照）を行い、弾塑性解析結果を重ね合わせることで、実際とほぼ同程度の転造加工力の変化を求めることができ、このことから、転造

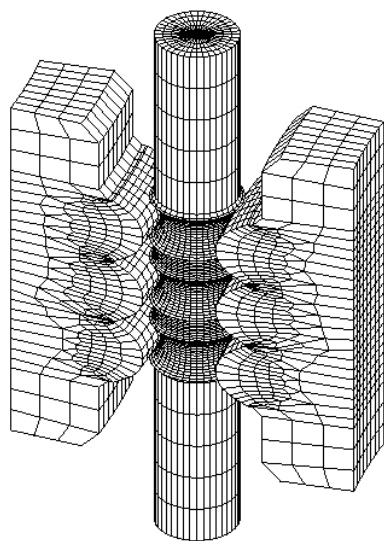


図4 Ansysによる転造過程のシミュレーションモデルの一例

過程をシミュレートできる可能性があることが明らかとなった。

(3) リードを持たない算盤玉状のボルトモデル（リードなしボルト）を用いた残留応力の付与とその疲労強度への影響については、図 5 に示すモデルにおいて、巨視的な降伏が起こらない限界の予荷重 ($F_p=35\text{kN}$) を求め、その負荷によって、第 1 ねじ谷底表面には 800MPa 程度の残留応力が発生することを明らかとした（図 6）。実際に、転造後熱処理したリードなしボルトに予荷重を与え、疲労試験を実施したところ、予荷重によってボルトの疲労強度が 20%程度増加し、このことは仮説と合致するものであった（図 7）。

しかし、疲労限度の荷重条件を基に、 $\epsilon_0=30\mu\text{m}$ を仮定して有限要素解析で求めたねじ谷底の局部的応力変動を平滑材の疲労限度と比較したところ、圧縮残留応力によって平均応力が下がり、それによって推定されるボルトの疲労強度が増加するという結果は得られたものの、推定された疲労強度は、共に、平滑材の 1/2 程度であった（図 8 の◆印のプロット）。

このように疲労強度が低下する原因としては、リードなしボルトを保持するための二割アダプタの“割り”の部分による応力集中や剛性の低下などが考えられるが、試験のセット状態において、ボルト円筒部にひずみゲージを貼り、負荷の状況を調べたところ、試験片に曲げモーメントが作用していることがわかった。軸対称モデルでは、曲げモーメント負荷に対する解析はできないが、 ϵ_0 層における応力集中の程度が変化しないと仮

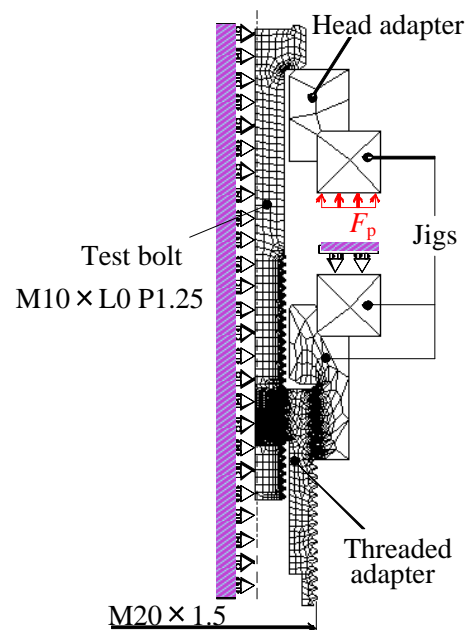


図5 予荷重 F_p による残留応力の付加モデル

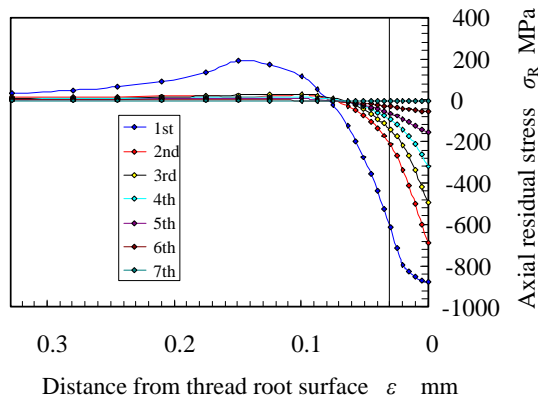


図6 予荷重 F_p によるねじ谷底の残留応力分布

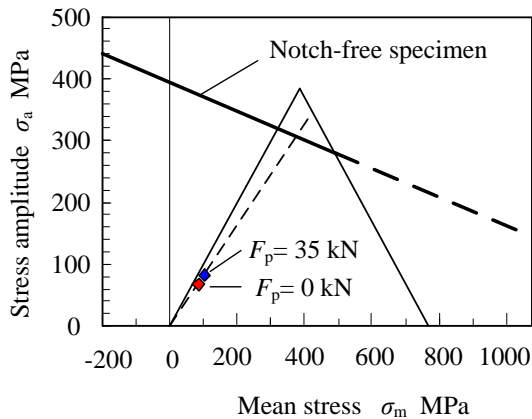


図7 疲労試験結果の一例

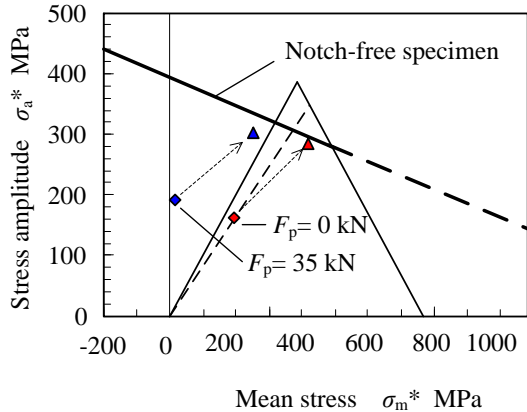


図8 局所的応力による疲労強度の比較

定し、局所的応力変動を再計算したところ、その結果は図8の▲印のプロットのようになり、平滑材の疲労強度とほぼ一致する結果が得られた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 古川朗洋, 萩原正弥, 転造加工による残留応力の発生とそのシミュレーションモ

デル, 日本ねじ研究協会誌, 査読有, Vol.40, No.12, 2009, pp.343-348

- ② 古川朗洋, 萩原正弥, ねじ谷底の残留応力分布とボルトの疲労強度の関係 (第1報, 転造丸溝試験片の残留応力分布について), 日本機械学会論文集C編, 査読有, Vol.72, No.752, 2009, pp.2605-2610

[学会発表] (計7件)

- ① Akihiro Furukawa, Kazunari Kamiya, Masaya Hagiwara, Effect of Residual Stress on the Fatigue Strength of a Bolt in Bolt/Nut Assembly - Fatigue Characteristics of the Axisymmetrical Bolt Model (Leadless Bolt) with Residual Stress Generated by Pre-loading, The 4th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2011年4月26日, 愛知県蒲郡市
- ② 古川朗洋, 萩原正弥, 残留応力がボルトの疲労強度に及ぼす影響 - 予荷重により残留応力を付与したリードなしボルトの疲労特性, 日本機械学会 2010年度年次大会, 2010年9月6日, 名古屋工業大学
- ③ 古川朗洋, 萩原正弥, 転造によるねじ谷底の残留応力分布の推定 - 環状丸溝試験片に対するX線応力測定法の適用, 日本機械学会第10回機素潤滑設計部門講演会, 2010年4月19日, 新潟県月岡温泉
- ④ 古川朗洋, 萩原正弥, ねじ谷底の残留応力と疲労強度の関係 - 第3報, 二次元弾塑性FEM解析による残留応力分布の推定, 日本機械学会 2009年度年次大会, 2010年9月15日, 岩手大学
- ⑤ Akihiro Furukawa, Masaya Hagiwara, Yohei Kamiya, Verification of the Hypothesis on the Fatigue Strength of a Bolt/Nut Assemblies (Effect of the Residual Stress at the Bolt Thread Root), 2010年6月25日, 大韓民国済州島
- ⑥ 古川朗洋, 萩原正弥, ねじ谷底の残留応力と疲労強度の関係 - 第2報, FEM解析による残留応力分布の推定, 日本機械学会 2008年度年次大会, 2008年8月6日, 横浜国立大学
- ⑦ 神谷洋平, 立見尚規, 萩原正弥, 古川朗洋, 予荷重がボルトの疲労強度に及ぼす影響, 日本機械学会 2008年度年次大会, 2008年8月6日, 横浜国立大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

萩原 正弥 (HAGIWARA MASAYA)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90134840