

氏名	にしむら よしろう 西村 貴郎		
学位の種類	博士（工学）		
報告番号	甲第 1699 号		
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 15 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当（課程博士）		
学位論文題目	微小線状傷を有する高強度ばね鋼のねじり疲労強度に関する研究		
論文審査委員	（主 査） 福岡大学	教授	遠藤 正浩
	（副 査） 福岡大学	教授	柳瀬 圭児
	九州大学	教授	松永 久生

内 容 の 要 旨

1. 研究の背景と目的

近年、排気ガス規制対応の観点からディーゼルコモンレールシステムにおける燃料の高圧化が求められている。コモンレールシステムでは高圧で燃料を燃えやすい霧状に噴射して完全燃焼させ電子制御で燃焼のタイミングを最適化し排出ガスを低減しながら燃費や出力の向上を図る。燃料を高圧化するためのサプライポンプには弁ばねが内蔵されており、超高サイクル疲労寿命域までの極めて高い疲労寿命が弁ばねには要求される。

このような市場ニーズに応えるため、一般的な弁ばね鋼である SWOSC-V（弁ばね用シリコンクロム鋼オイルテンパー線）やさらに高強度化された同材料系のばね鋼が開発されており、その疲労強度特性の把握が喫緊の課題となっている。また、その製造過程で生じる深さ数十マイクロン程度の微小線状傷が疲労特性に大きな影響を及ぼすことが危惧されている。微小線状傷などの欠陥を探傷する方法が発達する一方で、欠陥が発見されれば直ちに使用できないということになれば製品の生産コストは膨大なものとなる。また欠陥の探傷レベルを数十マイクロン向上させるだけでも数億円の設備投資が必要となる試算もある。微小欠陥のねじり疲労強度に及ぼす研究はこれまでにいくつかの報告があるが、その形状の再現の難しさなどもあり微小線状傷の影響を系統的に検証したものはこれまでに国内外で報告されていない。しかしながら、今後ますます高強度化されることが予想されるばね鋼について、硬さ、線状傷深さが異なる場合の平均せん断応力下でのねじり疲労強度を超高サイクル域まで高精度に予測できる合理的手法は必要不可欠である。そこで本研究では、

圧縮コイルばねの疲労強度設計・工程設計・品質保証に必要となる高精度なねじり疲労強度予測法の確立を目指し実験的・解析的研究に取り組んだ。

2. 研究の概要

1) ねじり疲労に関する文献調査

本研究の背景となる現在の圧縮コイルばねの疲労強度設計・工程設計・品質保証の課題を調査し、高強度ばね鋼の超高サイクル域までのねじり疲労強度の高精度な予測手法の必要性についてまとめた。また、これまでのねじり疲労強度に関する研究で明らかになっている点をまとめ、本研究内容である微小線状傷がねじり疲労強度に及ぼす影響に関する評価の重要性を示した。

2) 超音波疲労試験機の開発

平均ねじりモーメントが負荷可能な超音波ねじり疲労試験機の開発を行った。超高サイクル域まで使用される圧縮コイルばねの実際の使用状況を模擬した疲労強度評価を行うためには、超高サイクル域までの平均せん断応力下におけるねじり疲労強度評価が必要であり、超音波ねじり疲労試験機が不可欠である。試験片にせん断応力振幅を与えるために、試験片を含めた試験機加振部全体が超音波のねじり振動で共振するよう波動方程式や FEM 解析を用いて設計を行った。また、共振系全体に平均ねじりモーメントを負荷する静的トルク負荷機構を製作し、所定の平均せん断応力が試験片に負荷されることを実測により確認した。なお本試験機はエアシリンダーを用いた省スペースな試験機であり、その開発費用も静的トルク負荷機構を有さない従来機の市販価格と比べても十分安価であった。

3) 応力比 $R = -1$ におけるねじり疲労強度特性

高強度ばね鋼 SWOSC-V のねじり疲労強度に及ぼす微小線状傷の影響について評価を行った。共振型疲労試験機と超音波疲労試験機を用いて、応力比 $R = -1$ において高サイクル域から超高サイクル域までのねじり疲労試験を行い、回転曲げ疲労試験による単軸疲労の結果との比較も行った。平滑試験片および浅くて長い微小欠陥を表面に導入した試験片を用い、負荷モードおよび線状傷の深さ・方向の影響に注目して疲労挙動を調査することにより、 \sqrt{area} パラメータモデルの有効性を検証した。線状傷方向と主応力のずれ角を表す ϕ^* は、ねじりと曲げの負荷形態の違い以上に疲労限度の決定因子であった。なおねじり疲労限度の下限値は \sqrt{area} パラメータモデルに基づいて予測できることが示された。

4) 応力比 $R \neq -1$ におけるねじり疲労強度特性

高強度ばね鋼 SWOSC-V を対象として、平均ねじりモーメントが負荷可能な超音波疲労試験機を用いてねじり疲労試験を実施した。平均せん断応力下において微小線

状傷がねじり疲労強度に及ぼす影響を明らかにするために、平滑試験片に加えて浅くて長い微小欠陥を表面に導入した試験片を用いた。線状傷の深さは $t=40\mu\text{m}$ と $140\mu\text{m}$ の2種類とした。線状傷の方向は 0° と 45° の2種類である。ねじり疲労限度の応力比への依存性は認められるものの、その影響は比較的小さいことが確かめられた。また、応力比 $R=-1$ の場合と同様に応力比 $R\neq-1$ の場合も、線状傷の方向に垂直に主応力が作用することを想定することにより、ねじり疲労限度の下限値は \sqrt{area} パラメータモデルに基づいて予測できることが示された。

3. 結論

高強度ばね鋼の超高サイクル域までのねじり疲労強度の高精度な予測手法の確立を目的として、平均ねじりモーメントが負荷可能な超音波ねじり疲労試験機を開発することで、超高サイクル域までの平均せん断応力下におけるねじり疲労強度評価を可能とした。さらに、回転曲げ疲労試験機、共振型ねじり疲労試験機、そして超音波ねじり疲労試験機を併用して実験を行うことにより、高サイクル域から超高サイクル域までの疲労強度評価を系統的に行った。この系統的な実験により、応力比 $R=-1\sim 0.5$ の平均せん断応力下で平滑試験片および微小線状傷を表面に導入した試験片のねじり疲労強度と負荷モードおよび線状傷の深さ・方向との関係を明らかにした。

審査の結果の要旨

審査経過

1. 博士論文事前審査委員会

平成 29 年 11 月 15 日に開催された博士論文事前審査委員会で、申請者は申請資格に定める「申請者が第一著者である査読付学術論文 1 編(冊)以上の研究業績を有する者」であると確認されたので、審査の結果、申請資格の条件に適合する者であると判定された。

2. 学位論文類似度判定実施

平成 29 年 11 月 13 日に学位論文類似度判定ソフトを用いて類似度判定を行った。論文の常套句や科学用語の定義などの 20 文字以下の短い文章の一致を除くと類似度は約 6% となり、その全てが引用文献であった。これにより類似度は極めて低く、オリジナリティーに関わる不適切な類似はないと判定された。(実施者：主査予定者の遠藤正浩)

3. 博士課程後期通常委員会

平成 29 年 11 月 29 日に開催された博士課程後期通常委員会で、主査予定者の遠藤正浩から申請者の経歴、研究業績、論文名、論文の内容と副査予定者の説明を行い、審議の結果、申請論文の受理と審査委員が提案どおり承認された。

主査 遠藤 正浩 教授

副査 柳瀬 圭児 教授、九州大学 松永 久生 教授

4. 審査会

(1) 第 1 回

日 時：平成 29 年 12 月 15 日 (金) 16:00～18:00

場 所：14 号館 5 階 機械工学専攻 大学院講義室

申請者本人から申請論文の内容説明を受け、審査委員から質疑並びに指示があった。学位論文の内容と審査会の質疑応答から、申請者は当該研究領域に関する十分な知識と研究遂行能力を有することを確認した。また指摘事項に基づく学位論文の修正については、適宜修正を完了させた後、公聴会当日に修正論文を各審査委員に提出することになった。以上を踏まえ、第 2 回の審査会は行わないこと、公聴会を開催することを全会一致で了承した。

5. 公聴会

日 時：平成 30 年 1 月 16 日 (火) 14:00～15:30

場 所：14 号館 4 階 1441 室

公聴会では申請者による約 45 分の発表の後、出席者から 12 件の質疑があり、申請者は全ての質疑に対する確かな回答を行った。公聴会后、15:40~16:00 に 11 号館 4 階 遠藤教授室において最終審査会を開催した。学位論文の内容、審査会および公聴会での質疑応答の内容を踏まえ、全会一致で当該学位論文を合格と判定した。

審査委員の結論

本研究は、圧縮コイルばねの疲労強度設計・工程設計・品質保証に必要となる高精度なねじり疲労強度予測法の確立に関するものである。圧縮コイルばねに用いられるばね鋼素線表面には製造過程において不可避免的に発生する線状傷が存在することがあり、問題となってきた。しかし、微小な人工欠陥に着目したばね鋼のねじり疲労強度に関する研究は多くはない。またその再現性の難しさから、線状傷を模擬した微小欠陥を有するばね鋼試験片を用いてねじり疲労強度に及ぼす微小欠陥の形状・寸法・方向や平均せん断力の影響を系統的に研究した報告はない。しかしながら、今後ますます高強度化されることが予想されるばね鋼について、硬さ、線状傷深さが異なる場合の平均せん断応力下でのねじりせん断疲労強度を超高サイクル域まで高精度に予測できる合理的手法は必要不可欠である。

本研究では、圧縮コイルばねの実際の使用状況を模擬した疲労強度評価を行うために、まず微小線傷の導入のための特殊工具の開発に取り組んだ。また平均ねじりモーメントが負荷可能な超音波ねじり疲労試験機を開発した。波動方程式や FEM 解析および実測での調整と応力測定により疲労試験機を設計・開発し、超高サイクル域までの平均せん断応力下におけるねじり疲労強度評価が可能となった。なお、平均ねじりモーメントが負荷可能な超音波ねじり疲労試験機は、幅広く普及可能な試験機としては実用化されておらず、本研究の情報公開は当該研究を発展させるために重要である。さらに本研究では、回転曲げ疲労試験機、共振型ねじり疲労試験機、そして超音波ねじり疲労試験機を併用して実験を行うことにより、高サイクル域から超高サイクル域までの疲労強度評価を系統的に行った。この系統的な実験により、応力比 $R = -1 \cdot 0.5$ の平均せん断応力下で平滑試験片および微小線状傷を表面に導入した試験片のねじり疲労強度と負荷モードおよび線状傷の深さ・方向との関係を明らかにし、平均せん断応力を考慮した $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルの有効性を検証した。微小線状傷の系統的な評価は学術的かつ実用的価値が高く、新規性も高いと判断される。また申請者は審査会および公聴会において、数多くの質疑や指摘事項にも的確に対応した。これらのことから本研究は学位論文に値するものと判断する。