

京都大学	博士 (工 学)	氏名	堀澤英太郎
論文題目	土木構造用ステンレス鋼の疲労特性の解明および材料構成則の高精度化に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>ステンレス鋼は、一般構造用鋼材よりも優れた耐食性を有する合金鋼であり、これまで自動車、鉄道車両、貯水タンク、高層建築の外装材、原子力発電の圧力容器など、幅広い分野で使用されてきた。ステンレス鋼を 100 年の供用期間が求められる土木構造物に採用することで、塗装の塗替えなどの維持管理作業を省力化でき、構造物のライフサイクルコストを削減し、環境への負荷も低減できると期待されている。そのため、2000 年代からは橋梁分野でも高欄などの非構造部材やステンレス鉄筋のほか、鋼橋の主要部材の材料としてもステンレス鋼が採用され始め、日本では既に 4 つの歩道橋の構造材料として使用された。本論文では、土木構造物におけるステンレス鋼の普及に向けた設計基準類の策定に貢献するため、繰返し負荷に対するステンレス鋼の挙動および耐久性を解明するとともに、多軸繰返し材料構成則を構築することを目的とし、ステンレス鋼母材および突合せ溶接継手を対象に疲労試験を実施し、鋼構造物の現行の疲労設計曲線との比較検討、ステンレス鋼独自の疲労設計曲線を提案、ステンレス鋼の繰返し荷重下におけるひずみ残留挙動、ステンレス鋼の多軸繰返し材料構成則について検討したものである。本論文は全 7 章で構成されており、以下に各章の実施内容および主な成果を示す。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の背景、関連する先行研究ならびに研究目的、本論文の構成を述べている。特に、ステンレス鋼の開発の歴史やライフサイクルにおける環境負荷に焦点を当て、その循環型社会における重要性を示すと共に、本研究で解決すべき具体的な課題を挙げている。</p> <p>第 2 章では、橋梁に活用が期待されるリーン二相系ステンレス鋼 SUS323L および SUS821L1 と、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 平滑母材を対象に疲労試験を実施し、リーン二相系ステンレス鋼平滑母材の 200 万回疲労強度は、SUS304 に比べて大きくなること、ステンレス鋼においても応力比の増加が疲労強度の減少をもたらすこと、ステンレス鋼の回帰直線は、炭素鋼を対象とした疲労設計曲線と比べて S-N 線図上の勾配が小さくなることを明らかにしている。また、対象としたステンレス鋼の引張試験および疲労き裂進展試験も行い、材料試験データを蓄積するとともに、リーン二相系ステンレス鋼の機械的性質は圧延方向に関する異方性があること、疲労き裂進展速度は応力拡大係数範囲が大きい領域で炭素鋼の疲労き裂進展速度表示式より大きくなることを明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、ステンレス鋼の疲労試験で確認されたひずみ残留挙動を詳細に検証するため、追認試験を実施し、残留ひずみの主要因は、二次的な塑性ひずみの蓄積挙動であるラチェット変形であること、残留ひずみの発生量は疲労試験の最大応力に比例することを明らかにしている。繰返し荷重を受ける試験片の発熱やひずみゲージの性能など、計測されるひずみに影響を与える原因について考察を行い、載荷応力と残留ひずみの関係を明らかにし、本研究の試験条件下では、最大応力が 0.2%耐力以下の繰返し応力であれば、ラチェット変形による残留ひずみは無視できることを示している。</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	堀澤英太郎
<p>第 4 章では、ステンレス鋼 SUS323L、SUS821L1、SUS304 を用いた突合せ溶接継手の止端形状の計測および高サイクル疲労試験を実施している。試験片の止端形状の計測からは、ステンレス鋼突合せ溶接継手における溶接止端形状が供用中の鋼構造物と同等な形状であることを示すとともに、疲労試験では、応力比 0 および 0.3 を対象として、応力比や余盛の有無が疲労強度に及ぼす影響を検討している。加えて、溶接による角変形が疲労試験結果に及ぼす影響を考察した結果、リーニ二相系ステンレス鋼突合せ溶接継手の疲労試験結果はいずれの試験条件においても同様な傾向を示し、SUS304 より高い疲労強度を示すことを明らかにしている。さらに、リーニ二相系ステンレス鋼突合せ溶接継手の疲労試験結果は、溶接止端非仕上げと余盛削除試験片でそれぞれ炭素鋼に対する疲労設計曲線を満足し、試験結果の回帰分析に基づき、ステンレス鋼突合せ溶接継手に対する疲労設計曲線を継手形式ごとに提案している。</p> <p>第 5 章では、ステンレス鋼の多軸繰返し構成則を構築するための基礎的な検討として、初期降伏曲面および関連流れ則の適用性を検証するため、軸力-ねじり複合試験機および薄肉円筒試験片を用いて、軸応力とせん断応力の二軸応力を負荷し、軸力-せん断応力平面上において原点から放射状に比例負荷を行うことで、各載荷経路における降伏応力および塑性ひずみ経路を詳細に検証している。その結果、SUS304 の初期降伏曲面は等方性を示し、Mises の降伏条件によって評価できるが、SUS821L1 の初期降伏曲面はせん断降伏応力が軸方向の降伏応力より大きく異方性を示し、降伏曲面は、Hill の異方性降伏関数によって精度よく表せることを示している。また、塑性ひずみ経路の観察により、ステンレス鋼の塑性ひずみ増分方向は、SUS304 では Mises の降伏条件、SUS821L1 では Hill の異方性降伏関数を塑性ポテンシャルとする関連流れ則で表されることも明らかにしている。</p> <p>第 6 章では、ステンレス鋼の多軸繰返し構成則を構築することを目的に、軸力とねじりの単軸繰返し載荷試験ならびに多軸繰返し載荷試験を実施している。構造用ステンレス鋼の材料挙動として、弾性域の大きさおよび弾性係数が塑性ひずみの蓄積に伴い小さくなることを示すとともに、単軸繰返し載荷試験の結果から、構成則に必要な材料パラメータを同定し、降伏曲面の縮小、弾性係数の変化に加えて、境界曲面の拡大、形状パラメータの塑性ひずみ依存性を考慮した二曲面モデルを構築し、構築された繰返し構成則を用いた単軸繰返し載荷試験結果の予測を行い、軸力またはねじりの単軸繰返し載荷試験結果が精度良く予測されることを示している。特に、最大・最小応力は実験値と予測値が比較的良好一致することが確認され、繰返し構成則の二軸応力への拡張を検証するため、一定軸力下の繰返しねじり試験の結果を予測し、構成則はひずみ振幅 1.0%以下の試験結果を精度良く予測できることを明らかにしている。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文の成果を総括し、今後の課題とともに取りまとめている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、一般構造用鋼材よりも優れた耐食性を有する合金鋼であり、これまで自動車・鉄道車両・貯水タンク・高層建築の外装材・原子力発電の圧力容器など、幅広い分野で使用されてきたステンレス鋼を、塗装の塗替えなどの維持管理作業を省力化でき、構造物のライフサイクルコストを削減し、環境負荷も低減できるといった観点で、土木構造物への適用期待に応えるため、その繰り返し荷重に対する耐久性として疲労強度特性ならびに地震時安全性として材料非線形特性に関して取りまとめたものである。本論文において得られた主な研究成果は以下の通りである。

- ① 橋梁への活用が期待されるリーン二相系ステンレス鋼 SUS323L および SUS821L1 ならびにオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 平滑母材を対象に疲労試験を実施し、リーン二相系ステンレス鋼平滑母材の 200 万回疲労強度は、SUS304 に比べて大きくなること、ステンレス鋼においても応力比の増加が疲労強度の減少をもたらすこと、ステンレス鋼の S-N 回帰直線は、炭素鋼を対象とした疲労設計曲線と比べて応力低減の勾配が小さくなることを示している。
- ② ステンレス鋼 SUS323L、SUS821L1、SUS304 を用いた突合せ溶接継手の止端形状の計測および高サイクル疲労試験を実施し、現存の鋼構造物の溶接止端形状と同等な継手において、応力比や余盛の有無が疲労強度に及ぼす影響を明らかにするとともに、リーン二相系ステンレス鋼突合せ溶接継手の疲労強度は、SUS304 のそれより高いことを示している。また、試験結果の回帰分析に基づき、ステンレス鋼突合せ溶接継手に対する疲労設計曲線を継手形式ごとに提案している。
- ③ ステンレス鋼の繰り返し非弾性挙動を明らかにし、多軸繰り返し構成則を構築するため、軸応力とせん断応力の二軸応力下での初期降伏曲面および関連流れ則の適用性、ならびに繰り返し荷重下でのその硬化・軟化特性を検証している。SUS304 の降伏曲面・塑性流れは、Mises 条件に従うが、SUS821L1 の降伏曲面はせん断降伏応力が軸方向の降伏応力より大きい異方性を示し、Hill の異方性降伏関数によって精度よく表され、その塑性流れは、Hill の異方性降伏関数を塑性ポテンシャルとする関連流れ則で表せることを明らかにしている。

以上より本論文は、ステンレス鋼の土木構造物への適用を視野に、繰り返し荷重に対する耐久性として疲労強度特性ならびに地震時安全性として材料非線形特性に関して重要な知見を得ており、学術上、実務上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 2 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、令和 11 年 3 月 31 日までの間当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。