

称号及び氏名 博士（工学） 有働 竜二郎

学位授与の日付 2017年3月31日

論文名 「スーパー二相ステンレス鋼の疲労強度に関する研究」

論文審査委員 主査 沼倉 宏

副査 東 健司

副査 金野 泰幸

論文要旨

オーステナイトとフェライトの二つの相から成る二相ステンレス鋼 (**Duplex Stainless Steel, DSS**) は塩化物を含む溶液に対する耐食性や耐応力腐食割れ性に優れる上に強度が高いことから、海水をはじめとした腐食環境で使用される機器類の構造材料に広く適用されている。近年では、合金成分の含有量を増加させて強度と耐食性を向上させたスーパー二相ステンレス鋼 (スーパー**DSS**) の適用が進んでいる。しかしスーパー**DSS**はオーステナイト系ステンレス鋼などと比べて歴史が浅いため、利用できる材料特性データが現状では十分ではない。疲労破壊は世界における破壊事故の原因の7~8割を占めると言われており、疲労に関するデータの蓄積が望まれている。

本論文第1章では、研究の目的と全体の概要を述べた。まず**DSS**の具体的な使用例を述べ、疲労破壊に対する信頼性を確保することが本研究の目的であることを述べた。また、本研究の範囲について、特にスーパー**DSS**のうち広く使用されている圧延板材の疲労強度データベースを蓄積し、それを一般化するための疲労強度の予測を試みたこと、さらにスーパー**DSS**の溶接部に関して信頼性の観点から溶接後熱処理の適正化を試みたことを述べた。

第2章では、破壊現象としての疲労ならびに**DSS**の材料特性と過去の研究について述べた。疲労破壊の基礎的事項と疲労強度の評価法を概説した後、本研究で疲労強度の整理に用いた修正グッドマン則、**Smith-Watson-Topper (SWT)** 法、欠陥を有する材料の疲労限度に関する $\sqrt{\text{area}}$ モデルそれぞれについて、その特徴や適用に際しての課題を解説した。また、**DSS**の歴史とステンレス鋼全体の中での位置付け、機械的・化学的性質の特徴について述べ、適用される溶接法を説明した。さらに、**DSS**の信頼性に関する従来の研究を要約した。

第3章では、疲労強度データにおいてしばしば見られる荷重様式すなわち軸荷重と曲げ荷重の違いによる差異を検討した。その原因が荷重様式に依存した試験片内部における応力の分布にあると推測し、実験で検証した。軸荷重試験では荷重を直接制御して全断面に対して均一な応力を負荷するので、実際の負荷応力（実応力）は意図した応力（公称応力）と等しい。これに対し曲げ荷重疲労試験では負荷するモーメントによって応力を間接的に制御し、試験片の荷重方向に垂直な断面に応力の不均一が生じるため、試験片の表面付近で降伏（塑性変形）がおこると実応力が公称応力と異なってくる。まずエメリ紙研磨により表面を平滑にしたスーパーDSSの疲労試験片を用い、いくつかの応力比にて軸荷重、平面曲げ、および回転曲げの合計6通りの疲労試験を実施した。その結果、疲労強度は応力比と荷重様式によって異なることが明らかとなった。そこで、繰り返し変形における応力とひずみの弾塑性関係（Ramberg-Osgoodの関係）を再構成して曲げ疲労試験片内部における応力分布を計算により求め、試験片表面の実応力にもとづく疲労強度を推定して軸荷重疲労試験の疲労強度と比較した。その結果、応力比が等しい疲労試験については荷重様式によらず疲労強度はほぼ一致し、この方法で曲げ荷重疲労試験の結果を補正できることを示した。一方応力比が異なる場合は最大応力が異なるため上記の補正は適用できないので、上記の補正をおこなった上で、疲労限度に対しては修正グッドマン則、時間強度に対してはSWT法を用いて補正を試みた。その結果、平均応力が異なる条件での疲労限度も部分降伏の影響を補正すれば修正グッドマン則に従い、時間強度もSWT法で平均応力の影響を考慮すれば最大応力が特に大きい場合を除いて概ね統一的に整理できることを示した。

第4章では、疲労強度に及ぼす表面状態の影響を調べた実験について述べた。旋盤、形削り盤、ショットブラスト、バフ研磨、研削、またはドリルにより未貫通孔を穿孔したスーパーDSSの試験片を作製し、表面近傍の残留応力、ビッカース硬さ、粗さを測定して表面状態を定量的に把握した上で、軸荷重、平面曲げ、および回転曲げの3種の荷重様式およびいくつかの異なる応力比で合計18通りの疲労試験をおこなった。第3章で述べた平滑材の試験結果も加え、すべての実験結果に部分降伏の補正を実施して比較すると、全体の傾向として応力比が大きくなるほど、また表面粗さが増大するほど疲労強度は低下する傾向が見出された。しかし結果の一部では疲労限度を表面粗さだけで整理することはできないことも明らかになったため、表面状態の諸因子の影響を検討した。表面の残留応力は平均応力の実効値に影響を及ぼす。すなわち、引張りの残留応力は平均応力を引張り側に変化させ、圧縮の残留応力はその逆に変化させると考えられる。しかしその場合の平均応力は材料の降伏を考慮すると外力による平均応力と残留応力の単純な和になるとは限らない。そこで、第3章に述べた弾塑性計算を用いて疲労試験中の試験片表面の応力変化に残留応力を算入し、計算された平均応力を用いて修正グッドマン則との対応を調べた。その結果、表面が平滑と見なせる試験片の疲労限度は修正グッドマン則に概ね従い、表面の残留応力の影響はいずれの残留応力を考慮した修正グッドマン則でも評価できた。次に、村上らによる

$\sqrt{\text{area}}$ モデルにもとづく予測式を用いて定量的検討を試みた。このモデルでは、表面欠陥の荷重方向投影面積の平方根である $\sqrt{\text{area}}$ と、表面近傍のビッカース硬さと、応力比から疲労限度を計算する。このモデルに対して、本研究の試験片の表面形状で計算した $\sqrt{\text{area}}$ 、ビッカース硬さ、残留応力を考慮した応力比を代入して、それぞれの試験片の疲労限度を計算した。残留応力の値としてフェライト相の値を用いて計算した疲労限度は実測値に対して $\pm 20\%$ 以内で一致した。以上のように、スーパーDSSの疲労限度は表面状態を適切に評価しその影響を考慮することによって修正グッドマン則と $\sqrt{\text{area}}$ モデルによる推定に従うことを明らかにした。

第5章では、スーパーDSSの溶接部の信頼性に及ぼす溶接後熱処理の影響について述べた。ステンレス鋼の溶接では溶接後の組織の調整や残留応力の軽減を目的として1323 K以上に加熱した後急冷する固溶化処理を行う場合が多い。このような溶接後熱処理は材料の信頼性を支配する重要な因子の一つである。本研究では、熱処理条件によって第三相として析出し靱性や耐腐食性の低下をもたらす恐れがある σ 相に着目し、スーパーDSSの組織と疲労寿命に及ぼす固溶化処理の冷却速度の影響を調査した。フラックスコールドアーク溶接により開先溶接した継手から試験片を採取し、1323 Kに加熱したのち種々の冷却速度で373 K以下まで冷却した。母材と溶接部それぞれにおけるフェライト、オーステナイト、 σ 各相の存在比率を電子線後方散乱回折法により評価した。母材と溶接部を含む溶接継手に同様の温度履歴を与えた試験片および溶接後熱処理なしの同形試験片について冷却速度と硬さの関係を求め、さらに曲げ疲労試験をおこなった。母材・溶接部いずれにおいても冷却速度が大きいほど σ 相の析出量は少なく、冷却速度が10 K/s以上では溶接部の σ 相の比率は1%以下であった。母材と溶接部を比較すると、同じ冷却速度では溶接部のほうが σ 相の析出量が多かった。溶接継手の疲労試験においては、冷却速度が大きいほど疲労寿命は長い、今回の実験のうち最大の速さ50 K/sで冷却した試料よりも溶接後熱処理を施さない試料のほうが寿命が長かった。50 K/sで冷却した試験片においても溶接部に σ 相とみられる第三相がわずかながら認められた。疲労強度の低下の原因はこの第三相の析出であると考えられる。溶接後熱処理をおこなうと急冷しても溶接部には σ 相が析出しやすく、それがクラックの起点となって疲労寿命を短くする可能性が示唆された。

第6章では、第4章に述べた修正グッドマン則および $\sqrt{\text{area}}$ モデルを用いて、最大応力の大きさを設定して疲労信頼性を設計する新たな方法を提案した。ある材料の疲労限度がこれらの経験則に従うことが知られていれば、それぞれの疲労限度の表式を用いて疲労限度を見積もることができるが、修正グッドマン則と $\sqrt{\text{area}}$ モデルいずれの式においても負荷条件として平均応力あるいはそれと同等な応力比の値を与える形になっている。しかし実際の構造部材が使用される状況としては平均応力の大きさを想定できることは稀で、疲労強度の設計には最大応力の値を想定する。ここではまず修正グッドマン則と $\sqrt{\text{area}}$ モデルの疲労限度の式を最大応力の関数として定式化しなおし、さらに繰り返し変形の中で塑性変形が生じて応力が頭打ちになることも考慮して、設

定した最大応力に対する疲労限度を計算する方法を述べた。

第7章では本研究を総括し、得られた結論をまとめた。スーパーDSSの疲労限度が応力比や表面状態に敏感に影響されること、さらに溶接後の熱処理によっても疲労強度が低下する可能性があることを述べた。また、今後に残された課題として、実用を考慮した構造体における溶接部の疲労挙動や、実用に供する状況を考慮した腐食環境における疲労挙動があることを述べた。

審査結果の要旨

本論文は、強度と耐食性に優れたスーパー二相ステンレス鋼（SDSS）について、構造部材としての信頼性の基礎を確立することを目的として行われた疲労特性に関する研究をまとめたものである。その主な内容は以下の通りである。

- (1) 疲労試験データにおいて問題となる荷重様式による差違を検討し、曲げ荷重における試験片内部の応力の分布が不均一がその原因であることを実証した。まず繰り返し変形における応力とひずみの弾塑性関係を再構成して曲げ試験における応力分布を計算し、試験片の表面において降伏がおこる可能性を考慮して表面の実応力に対する疲労強度を推定して、これを軸荷重試験による疲労強度と比較した。その結果は荷重様式によらずほぼ一致し、この方法で曲げ荷重による疲労試験のデータを補正できることを示した。応力比が異なる場合は、この補正によって部分降伏の影響を考慮すれば、疲労限度は修正グッドマン則で、時間強度はSmith-Watson-Topperの方法で統一的に整理できることを明らかにした。
- (2) 疲労強度に及ぼす材料の表面状態の影響を詳細な実験により調べ、SDSSの構造部材を設計するための基礎データを蓄積すると同時に、表面粗さを定量的に評価して統一的にデータが整理できることを示した。ここで、上述の応力の不均一分布の場合と同様に表面における残留応力の影響を材料の弾塑性挙動にもとづいて適切に補正することが必要であることを示した。
- (3) 溶接部の信頼性に及ぼす溶接後熱処理の影響を実験により調べ、熱処理後に急速に冷却して脆化の原因となる σ 相の析出を通常のマクロ組織観察では認められない程度に抑えても溶接継手の疲労強度は著しく低下することを見出した。その原因は結晶粒界に析出した極く微量の σ 相である可能性を指摘し、SDSSの溶接継手の信頼性を確保するためには溶接後熱処理は施すべきでないことを示した。

これらの研究成果は、スーパー二相ステンレス鋼の信頼性設計の基礎となる一次データを整えたと

いう実用的な意義があると同時に、荷重様式や応力比などがさまざまに異なる疲労試験のデータを整理する統一的な方法を築いたもので、金属材料の疲労特性に関する重要な知見を与えている。さらに、社会インフラを支える金属系構造材料の信頼性評価への学術的な貢献も大きい。また、申請者が自立して研究を行うに必要な能力と学識を備えていることを証したものである。