

環状切欠きを有するオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304の疲労寿命特性に関する研究

永石, 尚昭

<https://doi.org/10.15017/4060166>

出版情報 : Kyushu University, 2019, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 永石 尚昭

論 文 名 : 環状切欠きを有するオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の
疲労寿命特性に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

高圧水素ガス中で使用される金属材料の水素適合性に関する国際基準について、国連等で検討が行われている。具体的には、水素環境中での強度特性を評価するための試験として、平滑材の疲労試験に加えて切欠き材の疲労試験を用いることが提案されている。しかし、切欠き材の疲労寿命特性の決定機構は十分に解明されておらず、平滑材と切欠き材の疲労試験結果の相関についても不明な点が多い。合理的な基準を策定するためには、切欠き材の疲労寿命特性の決定機構を解明することが必要である。本論文では、環状切欠きを有するオーステナイト系ステンレス鋼の疲労強度特性に対する影響因子を明らかにすることを目的として、実験、数値解析、微視組織の詳細観察の結果を系統的に示し、それにもとづく考察をまとめた。

第1章では、本研究の背景となる応力集中部における疲労現象の概要と従来からの疲労強度の評価法、オーステナイト系ステンレス鋼の疲労強度特性、水素適合性試験の国際統一化に関わる事項についてまとめ、オーステナイト系ステンレス鋼切欠き材の疲労強度特性の決定機構や影響因子を解明することの重要性について述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、実験、数値解析、微視組織の詳細観察の方法について述べた。荷重制御疲労試験、ひずみ制御疲労試験、疲労き裂進展試験の方法を示した。また、数値解析については、疲労き裂進展解析の概要、有限要素解析の概要をまとめた。さらに微視組織の詳細観察の概要を示した。

第3章では、実験、数値解析の結果について述べた。SUS304 環状切欠き試験片を用いて荷重制御疲労試験を実施した結果、応力比 R が -1 において応力集中係数が大きいほど疲労限度は低下した。一方、 $R = 0.1$ においては、疲労限度は応力集中係数によらずほぼ一定となった。また、応力集中係数 K_t が 6.6 の環状切欠き試験片を用いて 0.7MPa 水素ガス中で荷重制御疲労試験を実施した結果、有限寿命域では大気中に比べ疲労寿命は著しく低下した。一方、疲労限度は大気中と同等であった。大気中および水素ガス中にて CT 試験片を用いて疲労き裂進展試験を実施した結果、SUS304 の水素ガス中における疲労き裂進展は、大気中に比べ約 10 倍加速した。従って、有限寿命域における疲労寿命の低下は、き裂進展速度の上昇が原因と結論された。平滑試験片を用いてひずみ制御疲労試験を行い、SUS304 の低サイクル疲労特性を取得した。制御ひずみ範囲が 1% および 1.5% においては、あるサイクル数に到達してから破断に至るまで著しい硬化が生じた。硬化の要因はマルテンサイト変態であると考えられ、これが SUS304 の疲労強度特性に大きく影響することが示唆された。応力集中係数が最も高い試験片 ($K_t = 6.6$) について疲労き裂進展解析を行った結果、実際の疲労試験の結果と一致しないことを示した。SUS304 環状切欠き試験片の疲労限度における切欠き底での力学的挙動を得るために有限要素解析を行った結果、疲労限度であっても切欠き底では微小な繰返し塑性変形が生じていることが明らかとなった。また、試験条件が $R = 0.1$ であっても、切欠き底の局所的な応力比は $-0.95 \sim -0.84$ となり、シェイクダウンが起きることを明らかにした。

第4章では、SUS304の切欠き部の疲労強度特性の影響因子と決定機構について考察した。 $K_t=6.6$ の環状切欠き試験片の有限寿命域において、疲労き裂進展特性($da/dN-\Delta K$ 関係)から予測した疲労き裂進展寿命が実際の疲労寿命が一致しないのは、公称応力振幅が160MPa以上の比較的高い応力レベルでは疲労き裂が小規模降伏条件を満足せずに進展するためであることを示した。また、疲労限度に近い低応力レベルでは、き裂の発生に多くの繰返し数が費やされるため、予測結果が実際の疲労試験の結果よりも短寿命側になることを明らかにした。疲労限度での各種環状切欠き試験片において、切欠き底から一結晶粒径の範囲における全ひずみ範囲の平均値 $\Delta\epsilon_{t, notch, ave.}$ を、平滑試験片で取得された $\Delta\epsilon_f-N_f$ 関係上にプロットした結果、平滑試験片で取得されたひずみ基準の疲労限度 $\Delta\epsilon_{th}$ と概ね一致するかもしくはそれ以下に分布した。疲労限度における各試験片および応力比での $\Delta\epsilon_{t, notch, ave.}$ は互いに一致せず、 $\Delta\epsilon_{t, notch, ave.}$ のみをパラメータとして疲労限度を評価することは困難であった。以上の結果は、疲労限度が切欠き底近傍の力学的パラメータのみで決定されるわけではなく、他の材料学的な因子が影響していることを示唆した。一連の実験と観察の結果から、SUS304の環状切欠き試験片の疲労限度は、切欠き底の硬化を伴って決定される場合と、硬化を伴わずに決定される場合が存在することを明らかにした。硬化の要因は、 10^5 cycles 程度の繰返し塑性変形を負荷された結果生じたマルテンサイト相であり、これが生じるか否かは応力集中係数および応力比の組み合わせにより決まることが明らかとなった。また、疲労き裂発生強度の向上という形で硬化の影響を有効にするには、硬度上昇が疲労き裂発生前に生じることが重要であることを明らかにした。以上のことから、SUS304の環状切欠き試験片の疲労限度は力学的にも材料学的にも複雑な条件が整った末に決定されることが明らかとなった。

第5章では、本論文の総括を行い、今後の展望について述べた。