大気中におけるフェライト系ステンレス鋼 SUS444 溶接継手の疲労挙動

Fatigue Behaviour of SUS444 Welded Joint in Laboratory Air

○学 高井洋輔 (岐阜大院) 正 中島正貴 (豊田高専)
正 戸梶恵郎 (岐阜大工) 正 秋田正之 (岐阜大工)

Yosuke TAKAI, Graduate Student, Gifu University, Yanagido, Gifu 501-1193
Masaki NAKAJIMA, Toyota College of Technology
Keiro TOKAJI, Gifu University
Masayuki AKITA, Gifu University

Key Words: Fatigue, Ferritic stainless steel, Welded joint, Crack initiation, Crack propagation

1. 緒 言

フェライト系ステンレス鋼は低い応力腐食割れ感受性を示すが、じん性および溶接性に劣ることから使用が限られてきた。しかし近年、C, N を大幅に減少した高純度フェライト系ステンレス鋼が開発・実用化され、諸特性の改善に伴って貯水槽や自動車の排気系部材などに使用されるようになった。さらに広範な応用のためには疲労特性の評価が不可欠であるが、フェライト系ステンレス鋼に関する研究はもとより、実際の機械構造物において多用されている溶接継手に関する研究は見当たらない。実際、フェライト系ステンレス鋼製の貯水槽において溶接部のき裂発生が問題となっている。こうした実用的背景からも、フェライト系ステンレス鋼溶接継手の疲労特性を明らかにすることはきわめて重要であると考えられる。

本研究では、高純度フェライト系ステンレス鋼 SUS444 の溶接継手試験片を用いて軸荷重疲労試験を行い、疲労強度およびき裂進展特性を評価した。得られた結果について、残留応力や溶接部の応力集中などの観点から検討を加えた。

2. 供試材および試験方法

供試材は高純度フェライト系ステンレス鋼 SUS444 (18Cr-2Mo 鋼) であり、その化学成分 (mass.%) は C: 0.004, Si: 0.06, Mn: 0.1, P: 0.024, S: 0.006, Ni: 0.11, Nb: 0.17, Cr: 18.72, Mo: 1.81, V: 0.06, N: 0.068, Fe: bal.である。熱処理は行わず、納入されたままの状態で使用した。母材の機械的性質を表 1 に示す。

Table 1 Mechanical properties of the material.

0.2% proof stress	Tensile strength	Breaking strength on final area	Elongation	Reduction of area
$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	σ_T (MPa)	ϕ (%)	ϕ (%)
293	445	1480	34	83

Fig.1 Specimen configuration.

溶接には TIG (イナートガスタングステンアーク法) を用い、ルート間隔 1.6mm, 電圧 20V, 裏表 3 パスずつの条件で溶接を施した。なお、溶接材はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS309L であり、継手は X 型突合せ継手である。

疲労試験片の形状寸法を図 1 に示す。平行部長さ 30mm, 板厚 8mm の板状試験片であり、溶接した板から、図に示すように平行部中央に試験片軸に対して直角に溶接線が位置するように試験片を採取した。

疲労試験に用いた試験機は容量 98kN の電気油圧式サーボ疲労試験機である。室温大気中において、繰返し速度 $f=10\text{Hz}$, 応力比 $R=-1$ の条件で実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 溶接部周辺の組織と硬さ

溶接部周辺の組織を図 2 に示す。前述したように、溶接試験片は表裏 3 パスずつ溶接が施されているから、図に示すように最初に溶接を施した面を上面 (Top), その裏面を下面 (Bottom) と呼ぶ。

母材部の組織はフェライト結晶粒から成り、平均結晶粒径 d は約 $56\mu\text{m}$ であるのに対して、熱影響部 (HAZ) では熱影響により結晶粒の粗大化が生じ、 d は約 $123\mu\text{m}$ である。また、溶接部 (Weld zone) は針状の組織を呈している。

ビッカース硬さは母材では $HV162$, HAZ では $HV172$ であり、HAZ で若干硬化していた。また溶接部の硬さは $HV194$ であり、母材や HAZ に比べて高かった。

3.2 疲労強度

母材試験片 (Base specimen), 溶接試験片 (Welded specimen), 焼鈍 (600°C , 1 時間保持) によって残留応力を除去した溶接試験片 (Annealed specimen), および余盛

Fig.2 Microstructures of the welded joint.

Fig.3 S-N diagram.

部を除去した溶接試験片 (Smooth welded specimen) の S-N 曲線を図 3 に示す。図から明らかなように、溶接試験片の疲労強度は母材に比べて大きく低下する。10⁷ 回の繰返しに対する疲労強度は母材では 220MPa であるのに対して、溶接試験片では 100MPa であり、50%以上疲労強度が低下する。

溶接継手の場合、残留応力は疲労強度に影響を及ぼす重要な因子であるが、焼鈍した溶接試験片の疲労強度が溶接試験片よりわずかに上昇する程度である (10⁷ 回の疲労強度は 130MPa) ことから、残留応力の影響は小さいことが示唆される。一方、余盛部を除去した溶接試験片の疲労強度は、高応力・短寿命領域では母材より上昇し、10⁷ 回の疲労強度 (200MPa) は母材とほぼ同程度である。すなわち、余盛部を除去することによって、溶接試験片の疲労強度は母材の強度まで回復する。なおこの場合、疲労き裂は溶接部 (溶接材料) で発生していた。このことは溶接試験片における接合部や HAZ は健全であることを示している。以上の結果から、溶接試験片の疲労強度低下の主たる原因は、溶接止端部の形状に起因する応力集中に基づくものであることが推測される。

3.3 溶接止端部の応力集中

溶接試験片の余盛部形状から生ずる応力集中を 2 次元弾性有限要素法 (FEM) によって解析した。実際の余盛部形状を模擬した FEM 解析例を図 4 に示す。試験片ごとに余盛部の形状にばらつきが見られたので、幾つかの場合について解析したところ、図に見られるように溶接止端部で応力集中が生じ、その応力集中係数 K_t は約 1.6 から 2.9 の範囲であった (平均: $K_t=2.25$)。このように FEM 解析によって溶接止端部の応力集中が高いことがわかった。実際、疲労破壊起点となつたき裂発生箇所は、例外なく溶接止端部であった。 $K_t=2.25$ を考慮すると、溶接試験片の 10⁷ 回の疲労強度は約 98MPa と推定され、疲労試験の結果 (100MPa) とほぼ一致する。このことから溶接余盛止端部の形状に起因

Fig.4 Examples of FEM analysis showing stress concentration at the toe of weld.

Fig.5 Relationship between crack growth rate and stress intensity factor.

する応力集中によって溶接試験片の疲労強度が著しく低下したと考えられる。

3.4 微小き裂成長挙動

前述したように、溶接試験片では疲労き裂は溶接止端部で発生したが、その形状のためき裂成長の観察はできなかった。そこで、母材試験片と余盛部を除去した溶接試験片を用いて微小き裂成長挙動を調べた。き裂成長速度 da/dN と最大応力拡大係数 K_{max} の関係を図 5 に示す。なお図には比較のために、大きき裂の結果 ($da/dN-\Delta K$ および $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係) も併記した。大きき裂の進展試験に用いた CT 試験片は、切欠きが HAZ に平行に付与された試験片を H 試験片、切欠きが溶接線上に位置するよう採取された試験片を W 試験片と表記されている。図から H 試験片と W 試験片の $da/dN-\Delta K$ 関係およびき裂開口を考慮した $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係はほぼ同様であり、き裂が HAZ または溶接部を進展しても、き裂進展抵抗は変わらないことがわかる。

図から明らかなように、母材の微小き裂は大きき裂の下限界有効応力拡大係数幅 $\Delta K_{eff,th}$ 以下でも成長し、その $da/dN-K_{max}$ 関係はき裂寸法の増加に伴って大きき裂の $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係に漸近し、一致する挙動を示す。一方、余盛部を除去した溶接試験片の $da/dN-K_{max}$ 関係は、母材よりも低速度側に位置している。前述したように、この試験片のき裂発生とそれに続く成長は溶接部であることから、溶接部は母材よりも高い微小き裂成長抵抗を示す。このことが、余盛部を除去した溶接試験片の疲労強度が高応力・短寿命領域において母材より上昇した原因であると考えられる。

4. 結 言

本研究では、高純度フェライト系ステンレス鋼 SUS444 の溶接試験片を用いて軸荷重疲労試験を行い、疲労挙動を評価した。その結果、溶接試験片の疲労強度は母材と比べて大きく低下し、その主たる原因が焼鈍した試験片や余盛部を除去した試験片の疲労試験結果と FEM 解析結果などに基づいて、溶接止端部の応力集中に起因していることを明らかにした。

(参考文献省略)