

岐阜大工 ○秋田正之  
岐阜大工 戸梶恵郎

豊田高専 中島正貴  
豊田高専 清水利弘

# 1 緒 言

フェライト系ステンレス鋼は耐応力腐食割れ (SCC) 特性に優れるが、じん性および溶接性に劣るため使用が限られてきた。近年、C、N を大幅に低減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<sup>1)</sup>、じん性などの諸特性の改善に伴って利用が拡大している。

ところで、機械および構造物において用いられる各種接合法の中で溶接の占める割合は非常に大きい。溶接継手の強度特性の評価は、それらの安全性や信頼性の保証のために不可欠であり、特に疲労特性に関する知見は実用的にも重要である。しかし、フェライト系ステンレス鋼溶接継手の疲労特性に関する報告は見あたらない。

本研究では、フェライト系ステンレス鋼 SUS444 の溶接継手 CT 試験片を用いて大気中および 3%NaCl 水溶液中において疲労き裂進展 (FCP) 試験を行い、得られた FCP 挙動について残留応力やき裂開口挙動の測定結果および破面解析結果などに基づいて検討した。

## 2 供試材および実験方法

供試材は高純度フェライト系ステンレス鋼 (18Cr-2Mo) 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の後述する溶接を施した。母材の機械的性質を Table 1 に示す。表には FCP 方向との関連で、圧延方向 (L 方向) とそれと直角方向 (T 方向) の機械的性質を示した。表から明らかなように、T 方向の強度が L 方向よりも若干高く、逆に延性は低い。

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、表裏 3 パスずつの条件で溶接を施した。なお、溶接金属はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS309L であり、継手は X 型突合わせ継手である。FCP 特性に及ぼす溶接部の影響を検討するために、溶接された板から採取された 3 種類の溶接継手 CT 試験片を準備した。溶接線が切欠きに垂直に位置する試験片 (以後、N 試験片)、切欠きが溶接線に平行に HAZ および溶接部に導入された試験片 (それぞれ H 試験片および W 試験片) である。

Table 1. Mechanical properties of the base metal.

Direction	0.2%proof stress	Tensile strength	Breaking strength on final area	Elongation	Reduction of area
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	$\sigma_T$ (MPa)	$\phi$ (%)	$\psi$ (%)
L	293	445	1480	34	83
T	310	460	1352	31	81

なお、溶接は T 方向に施されていることから、き裂は N 試験片では L 方向、H 試験片および W 試験片では T 方向に進展する。

FCP 試験に先立って溶接部周辺の組織や硬さを調査した。その結果、平均結晶粒径は母材部で 56 $\mu$ m、HAZ 部では 123 $\mu$ m、またビッカース硬さ HV は母材部では 162、HAZ 部では 172、溶接部では 194 であった。

用いた試験機は容量 19.6kN の電気油圧式疲労試験機である。室温大気中および 3%NaCl 水溶液中において、繰返し速度  $f=1$ Hz、応力比  $R=0.05$  の条件で FCP 試験を行った。

## 3 実験結果および考察

3・1 残留応力 X 線回析法を用いて溶接試験片の残留応力を測定した。N 試験片について FCP 方向に垂直な残留応力の分布を Fig.1 に示す。溶接は表裏 3 パスずつ行われているから、以後、最初に溶接が施された面を上面 (Top surface)、その裏面を下 (Bottom surface) と呼ぶ。

図から明らかなように、上面では約 -110~-480MPa、下面では約 -100~-580MPa の圧縮残留応力が測定されている。圧縮残留応力は切欠き部から溶接部に近づくに従って減少し、遠ざかるに従って増加する。この分布から溶接部では大きな引張残留応力が生じていると推定される。なお HAZ 部において、溶接線に垂直な方向の残留応力を測定したところ、上面では約 -300MPa の圧縮残留応力、下面では約 100MPa の引張残留応力が測定された。

3・2 溶接継手の FCP 挙動 大気中および塩水中における N 試験片、H 試験片および W 試験片の FCP 挙動を Fig.2 に示す、比較のため、両環境中における母材の結果も併記した。

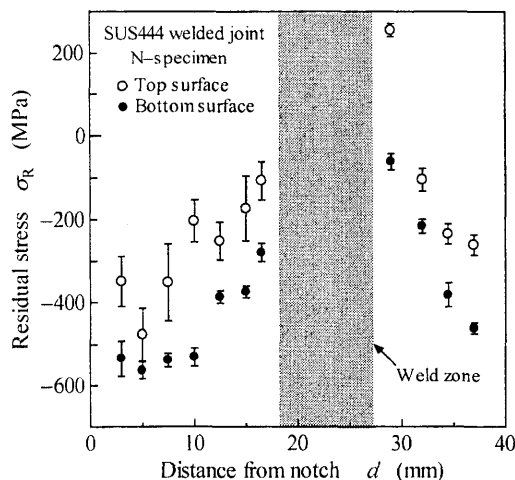


Fig.1. Distribution of residual stress normal to FCP direction in N-specimen.

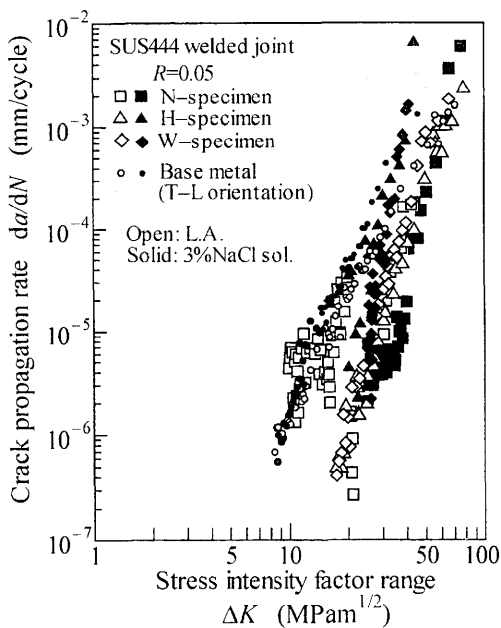


Fig.2. Relationship between FCP rate and stress intensity factor range in welded specimens.

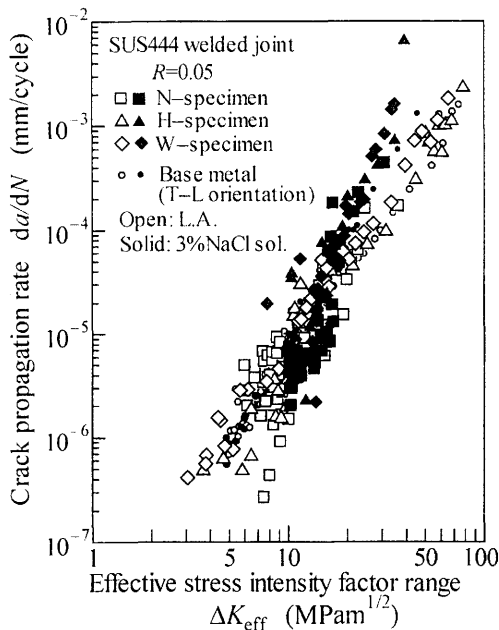


Fig.3. FCP behaviour characterized in terms of effective stress intensity factor range in welded specimens.

N 試験片の大気中の場合 (□印), 低 $\Delta K$  領域 (溶接部から離れた母材部) では FCP 速度は母材の結果と一致するが, き裂寸法の増加に伴い変動を繰返した後,  $\Delta K=20\text{MPam}^{1/2}$  付近 (母材部と HAZ の境界) で大きく低下した後, 母材の FCP 速度に漸近する. この複雑な FCP 挙動は, 溶接によって生じた残留応力や材質変化に起因すると考えられる. 一方塩水中の場合 (■印),  $da/dN-\Delta K$  関係は母材の  $da/dN-\Delta K$  関係より大きく低速度側に位置する. また, 大気中のような FCP 速度の複雑な変動は観察されない. これは実験を行った  $\Delta K$  が高かったためと考えられる.

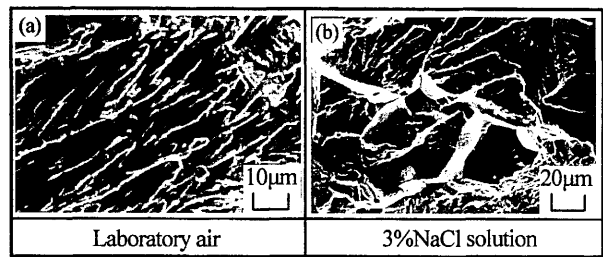


Fig.4. SEM micrographs of fracture surface in H-specimen ( $\Delta K=30\text{MPam}^{1/2}$ ).

H 試験片および W 試験片の大気中における FCP 速度 (それぞれ△印, ◇印) は全 $\Delta K$  領域において母材の結果よりも遅く,  $\Delta K$  の増加に伴って徐々に漸進し, 一致する. このように, HAZ や溶接部の FCP 抵抗は母材よりも高い. 一方, 塩水中の FCP 速度 (それぞれ▲印, ◆印) は低 $\Delta K$  領域では大気中の結果とほぼ一致するが,  $\Delta K$  の増加に伴って速くなる. このように, 高 $\Delta K$  領域では塩水による環境効果が認められる. また塩水中における母材の結果と比較すると, 低 $\Delta K$  領域では FCP 速度は遅く,  $\Delta K$  の増加に伴って漸進し一致する.

**3・3 き裂開閉口を考慮した FCP 挙動** Fig.2 の溶接試験片の FCP 速度を, き裂開閉口挙動を考慮した有効応力拡大係数幅 $\Delta K_{\text{eff}}$ を用いて評価した結果を Fig.3 に示す. 図から明らかに, 大気中では全ての溶接試験片の  $da/dN-\Delta K_{\text{eff}}$  関係は, N 試験片における一部のデータを除いてほぼ一致し, また母材の結果とも一致する. したがって, 溶接試験片間, またはそれらと母材の間の  $da/dN-\Delta K$  関係における相違はき裂開閉口挙動に起因しており, それは残留応力や破面粗さから生じたと考えられる. 一方塩水中においても, すべての溶接試験片の  $da/dN-\Delta K_{\text{eff}}$  関係はほぼ一致するが, 大気中の結果と比べると高 $\Delta K_{\text{eff}}$  領域 ( $\Delta K_{\text{eff}} > 15\text{MPam}^{1/2}$ ) において FCP 速度は明らかに加速している.

**3・4 SEM 破面解析** 塩水中において FCP 速度の加速が認められた高 $\Delta K$  領域の破面様相の一例を H 試験片について Fig.4 に示す. 大気中では延性的であるのに対して, 塩水中ではかなりの割合の粒界破壊を含んでいる. なお, 塩水中において加速の見られなかった低 $\Delta K$  領域では大気中と同様の延性的な破面であった. N 試験片および W 試験片においても, 塩水中における加速領域では破面は粒界割れを含むぜい性的な様相であった. これらのことから, 塩水中では明らかに大気中とは異なる微視的破壊機構が作用している. フェライト相の水素ぜい化が考えられる<sup>2),3)</sup>.

#### 4 結 言

本研究ではフェライト系ステンレス鋼溶接継手の疲労き裂進展 (FCP) 挙動について検討した. 大気中および塩水中のそれぞれの環境において, き裂が溶接線に垂直に進展する場合, HAZ および溶接部を進展する場合のいずれの FCP 速度も, き裂開閉口挙動を考慮すると一致した. しかし, 塩水中の FCP 速度は高 $\Delta K_{\text{eff}}$  領域において依然として加速し, その領域では粒界割れを含むぜい性的な破面様相が認められた.

(参考文献省略)