

構造用ステンレス鋼の耐久性評価に関する研究

Durability estimation of welded stainless steel

見村博明、飯田ちひろ、中村侑香
東京電機大学大学院 理工学研究科 建設環境工学専攻

Hiroaki MIMURA, Chihiro IIDA, Yuka AKAMURA
Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Denki University

ABSTRACT : This paper showed the fatigue strength of load-carrying type and non load-carrying type fillet welded joints used SUS304A austenitic stainless steel, especially fatigue strength of corroded welded joint by salty environment. The main results of fatigue tests were as follows ; (1) The 2×10^6 fatigue strength of load-carrying type fillet welded joints were 64MPa for non-corroded specimens and 61MPa for corroded ones respectively, however under 1×10^6 stress cycles, fatigue strength of the latter were lower than those of the former. (2) The 2×10^6 fatigue strength of non load-carrying type fillet welded joints were 101MPa for non-corroded specimens and 52MPa for corroded ones respectively. (3) The deterioration of fatigue strength of corrode specimens were caused by stress corrosion cracks which occurred in the heat-affected-zone by salty environment and residual stress of welding.

1. はじめに

ステンレス鋼は、金属材料の中でも特に耐食性、耐久性、美観性に優れていることから、モニュメント的な構造物を¹⁾始め、建物の内・外装材、屋根材、給排水管等に広く利用されてきた。しかしながら、建築構造材としては建築基準法で認められていなかったことからその利用は極めて限られたものであった²⁾。2000年6月の建築基準法・同施工令の改正により、ステンレス鋼が一般の鋼材と同様に建築構造材としての使用が可能となった。これと同時に2001年に「ステンレス建築構造設計基準・同解説(第2版)」³⁾が、ステンレス構造建築協会から発行された。また、同協会より建築構造用ステンレス鋼に対応する鋼材、溶接形鋼、高力ボルト、溶接材料規格^{3)~7)}等が整備された。本基準はステンレス鋼の構造部材、接合部、骨組等について各種荷重・外力に対する許容耐力や保有水平耐力の計算法を与えている。従って、本基準によればステンレス鋼を用いた通常の構造物の設計は可能である。一方、疲労設計に対しては、同基準の付録において「繰返し

する部材は疲労設計を行う」と記述しているが、疲労設計に必要な疲労基準値は与えられていない。ステンレス鋼は耐用年数も通常の炭素鋼の構造物よりも長くなるので構造物の使用によっては疲労設計が不可欠となる場合がある。特にステンレス鋼は錆び難いことや美観性から無塗装で使用されることが多く、このような構造物では大気環境(酸性雨や海岸近郊では塩分の飛来)や風等による疲労、及び両者が連動した劣化現象が問題になる。現実にステンレス鋼の環境劣化を伴う疲労損傷が数多く報告されている^{8)~10)}。

鋼構造物の疲労設計は日本建築学会の「鋼構造設計基準—許容応力度設計法—」¹¹⁾、及び日本鋼構造協会編の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」¹²⁾によることができるが、これらの規準は炭素鋼を対象にしたものでステンレス鋼に関しては実験データが少ないことから適用範囲から除外されている。一方、機械や原子力の分野では、応力腐食割れや腐食環境下における疲労をテーマにした研究は古くから行われている^{13)~22)}が、これらの研究は原子力発電機器の配管を想定した高温高圧の環境下の研究が多く、建築構造物に対応する環

境や荷重状況が異なるため、建設系のステンレス鋼構造物の疲労設計や耐久性評価に対しては直接的な資料となり難い。

本研究は建設系構造物に多用されているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304A を用い、環境負荷を考慮に入れた疲労設計法を確立するための基礎的データを構築することを目的としたものである。オーステナイト系ステンレス鋼は塩化物環境下で、特に溶接部において応力腐食割れが起こることが知られている²¹⁾。そこで本研究では荷重伝達型及び荷重非伝達型すみ肉溶接継手について通常の大気環境における疲労強度、及び海岸近郊の海塩の飛来によって被る環境を想定した人口環境促進装置による腐食環境負荷後の疲労強度を実験的に求め両者の比較・検討を行ったものである。又、破面観察により腐食状況や応力腐食割れについての考察を行った。

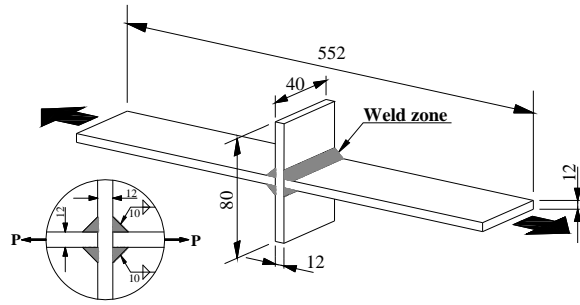


図 1-(a) 荷重伝達型すみ肉溶接継手試験片

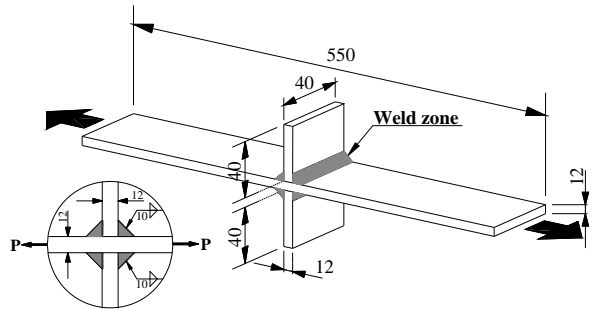


図 1-(b) 荷重非伝達型すみ肉溶接継手試験片

図 1 試験片形状及び寸法

2. 実験概要

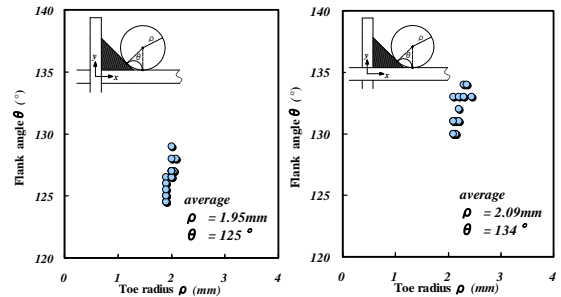
2.1. 試験片形状・寸法

図 1 に試験片形状及び寸法、表 1 に溶接条件を示す。図 1-(a) の荷重伝達型は 550×270×12 の板材を 2 枚と、550×80×12 の板材を十字に継ぎ合わせ、溶接後試験片板幅 40mm となるように裁断したものである。同様に図 1-(b) の荷重非伝達型は 570×40×12 の板材 2 枚と、550×550×12 の板材を十字に継ぎ合わせ、溶接後 40mm に裁断したものである。両者の相違点は、荷重方向に対して未溶着部の有無である。

溶接方法は CO₂ アーク溶接であり、溶接金属はステンレス鋼の溶接で一般的に使用されている 308 系フラックス入りワイヤ (DW-308、φ1.2mm) を用いて接合を行った。すみ肉溶接部は、四箇所とも 2 パス溶接とし、目標脚長は 10mm である。図 2 に歯科用印象材を用いて拡大投影機による止端形状の測定結果を示す。荷重伝達型は止端半径 $\rho = 1.95\text{mm}$ 、止端半径 $\theta = 125^\circ$ 、荷重非伝達型は $\rho = 2.09\text{mm}$ 、止端半径 $\theta = 134^\circ$ となった。

表 1 溶接条件

Welding	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Shielding GAS
Gas shielded arc welding	200	29	10~60	100%CO ₂



(a) 荷重伝達型

(b) 荷重非伝達型

図 2 止端角形状測定結果

2.2. 各供試鋼材の機械的性質と化学成分

表 2 に機械的性質、表 3 に化学成分、図 2 に溶接金属試験片、図 3 に母材及び溶接金属の応力-ひずみ関係を示す。機械的性質では、JIS1 号試験片並びに溶接金属試験片を用いた単張引張試験により得られた値である。表中における σ_p は比例限度、 σ_{y1} σ_{y2} はそれぞれ 0.1%、0.2% オフセット耐力を示している。ここで、引張り応力 σ_B は母材 746MPa に対し、溶接金属 444MPa と低い値を示し、本実験に用いるすみ肉溶接試験片はアンダーマッチングであることがわかった。尚、試験片作成時にアンダーマッチングを想定して行ったものではない。

表 2 機械的性質

Mechanical property						
	σ_p (MPa)	σ_{y1} (MPa)	σ_{y2} (MPa)	σ_B (MPa)	E (MPa)	Elong (%)
BM	101	253	273	746	194500	67
DM(腐食なし)	98	244	285	444	171200	60
DM(腐食あり)	99	226	257	423	170100	58

σ_p : Proportional Limit, σ_{y1}, σ_{y2} : 0.1%, 0.2% off-set

表 3 化学成分

Chemical composition (Wt.%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
BM	0.05	0.54	0.9	0.031	0.001	8.05	18.16	-	-
DM(DW-308)	0.04	0.67	1.64	0.016	0.004	9.46	19.67	0.02	0.03

BM: Base Metal, DM: Deposited Metal

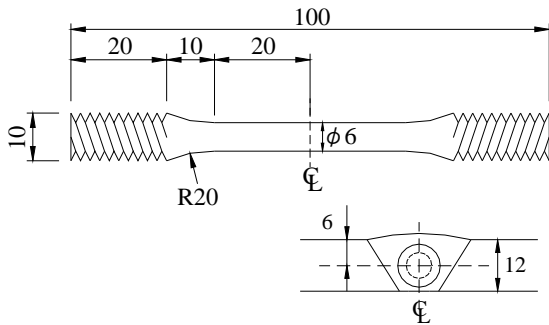


図 3 溶接金属試験片

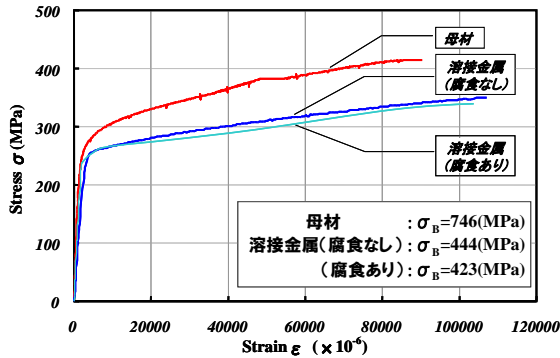


図 4 母材及び溶接金属の応力-ひずみ関係

2.3. 腐食サイクル試験 (環境負荷条件)

表 4 に腐食サイクル試験条件を示す。静的載荷試験及び高サイクル疲労試験により、腐食環境を受けた場合の耐力を検討する為、人口環境装置を用いて腐食サイクル試験を行った。従って、本実験では既に腐食した材料の疲労強度を調べたもので、一般に腐食疲労と呼ばれる腐食作用と繰返し応力を同時に受ける場合での疲労強度ではない。

腐食サイクル試験は、JIS H 8502 に規定されている中性塩水噴霧サイクル試験に準拠したものであり、塩水噴霧 (5%NaCl、2 時間)、乾燥 (4 時間)、湿潤 (2 時

間) を 1 サイクル (8 時間) とし、計 500 サイクル (4000 時間) とした。JIS 規格では、腐食サイクル数が実構造物で何年分に相当するのかわかる明確な基準は今のところ定められていない。そこで本研究の基準として、著しく錆の発生が確認できる (500 サイクル数) まで腐食試験を続けた。促進試験を行う上で、実構造物との比較は極めて重要な課題であるが、本研究では一定条件下 (表 4 参照) における耐食性を評価するという観点に立って試験を実施し、耐力の検討を行った。

表 4 腐食サイクル試験条件

step	条件	時間(h)	温度(°C)	湿度(%RH)
1	塩水噴霧 (5%NaCl)	2	35±1	-
2	乾燥	4	60±1	20~30
3	湿潤	2	50±1	95~100

2.4. 載荷方法と計測項目

実験には動的最大荷重 ±400kN のハイドロパルス疲労試験機を用い、静的載荷試験及び高サイクル疲労試験を実施した。載荷方法及び計測項目は以下の通りである。

(1) 静的載荷試験

制御方式は変位制御、載荷速度は試験状況に応じて 0.01~0.05cm/sec とした。測定項目は、試験機内臓ロードセルによる荷重 P と母材部 (溶接止端部から 10.1mm 離れた所に貼付) に一軸方向ゲージを用いたひずみ値 ϵ の 2 点である。

(2) 高サイクル疲労試験

制御方式は荷重制御、荷重波形は正弦波、繰返し載荷速度は試験状況に応じて 1~5Hz、応力比 $R=0$ とした。試験条件は各単調引張試験から得られた降伏応力 σ_{y1} を基に応力範囲 $\Delta\sigma$ を算出し、それぞれの倍率で載荷を行った。測定項目は、試験機内臓ロードセルによる荷重 P と破断時繰返し回数 N_f の 2 点である。

3. 静的載荷試験結果と考察

3.1. 荷重伝達型の検討結果

(1) 腐食の有無による強度の相違

図 5 に腐食環境負荷なし及び腐食環境負荷ありの応力-ひずみ関係を示す。最大応力は、腐食なし 463MPa に対して腐食あり 323MPa と約 1.43 倍低い値を示した。

又腐食なしがルート部（四箇所）から初期き裂が発生したが、腐食ありではルート部に加え溶接止端部からもき裂が発生した。

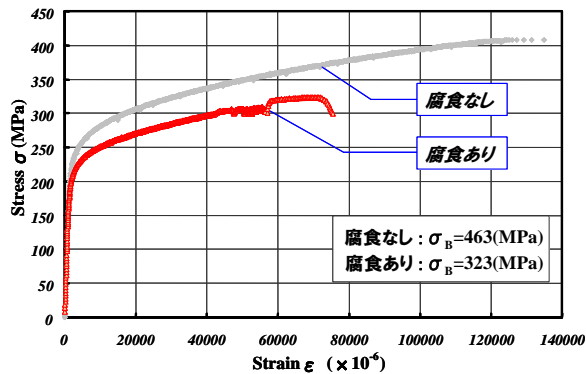


図5 腐食なし及び腐食ありの応力—ひずみ関係

(2) すみ肉溶接の強度（既往の研究による予測）

すみ肉溶接継手の静的引張強度について、既往の研究で提唱されている理論式から得られた理論値と、静的載荷試験より得られた破断荷重（実験値）との比較を行った。

静的載荷試験により得られた静的引張強度は以下の値である。

$$P_{max} = 262kN \text{-----} (1)$$

文献による荷重伝達型すみ肉溶接継手の静的引張強度式を以下に示す。図6にすみ肉溶接の寸法を示す。

I : Charles H. Jennings の式

$$S = \frac{P_f}{2h_t \cdot l} \text{-----} (2)$$

$$S = 0.9\sigma_w \text{-----} (3)$$

(2)、(3)式より

$$P_f = S \cdot 2h_t \cdot l = 0.9\sigma_w \cdot 2h_t \cdot l \text{-----} (4)$$

II : Charles H. Jennings の式

$$P_f = 2 \cdot 0.88 \cdot \frac{hl}{1.414} \sigma_w \text{-----} (5)$$

III : 鋼構造接合部設計指針より

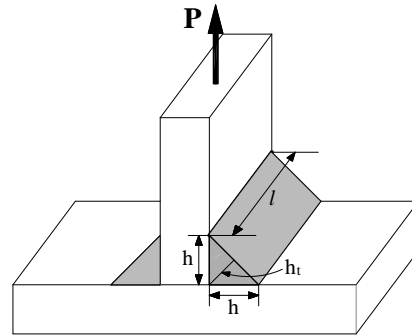
$$P_f = 2(1 + 0.4 \cos \theta) h_t \cdot l \cdot \frac{F_y}{\sqrt{3}} \text{-----} (6)$$

表5に各式から得られた計算結果と実験値を示す。各式から得られた理論値は、実験値よりもはるかに低

い値を示す結果となった。

表5 各式より得られた計算結果及び実験値

	(4)式	(5)式	(6)式	実験値
静的引張強度(kN)	224	221	201	262



S : 最大のど断面応力

Pf : 最大引張荷重

h : 実際のど厚(h=10mm)

ht : 理論のど厚(ht=h×0.7=7mm)

l : 溶接長さ(l=40mm)

σw : 溶接金属の溶接強さ(σw=444MPa)

Fy : 母材の溶接強さ(ここではσw)

θ : 作用応力方向に対するすみ肉溶接継目の角度

θ=0° : 前面すみ肉 / θ=90° : 側面すみ肉

図6 すみ肉溶接の寸法値

3.2. 荷重非伝達型の検討結果

図7に腐食環境負荷なしの応力—ひずみ関係を示す。荷重非伝達型では、溶接止端部から初期き裂が発生したものの、き裂は一向に進展せず、母材部のみが伸び、チャック部が熱により変形した為、未破断のまま終了させた。

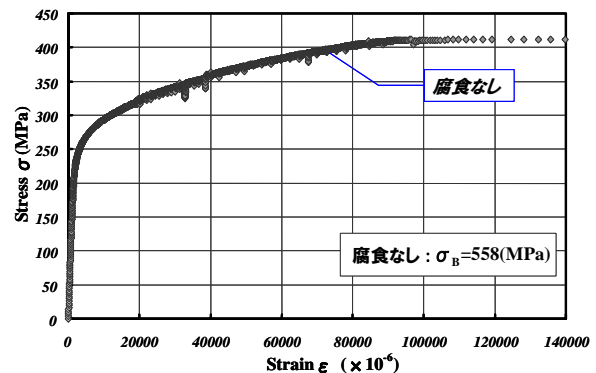


図7 腐食なしの応力—ひずみ関係

4. 高サイクル疲労試験結果と考察

表 6 に疲労試験結果一覧を示す。表中の試験片記号は以下の要領で付されている。

表 6- (a) 荷重伝達型すみ肉溶接継手試験片
A (腐食環境負荷なし) / B (腐食環境負荷あり)

表 6- (b) 荷重非伝達型すみ肉溶接継手試験片
C (腐食環境負荷なし) / D (腐食環境負荷あり)

ハイフンに続く数値は、繰返し応力のうち最大応力度の σ_{y1} に対する比である。 $\Delta\sigma$ は応力範囲、 σ_{max} 、 σ_{min} はそれぞれ繰返し応力における最大応力度、最小応力度、A は各々の断面積を示す。応力度は全て公称応力度であり、荷重伝達型はのど断面積 (A=566mm²)、荷重非伝達型は 12×40mm の断面積 (A=480mm²) で除した値である。表中の N_f は完全に破断した時の繰返し回数を意味する。200 万回以上の繰返しで破断に至らなかったものは、値に > を表記している。

備考欄は、疲労き裂の発生箇所及び破壊形態を示しており、以下の要領で付されている。

(a) 荷重伝達型について

TYPE1=ルート部からすみ肉内に横切るき裂進展

TYPE2=溶接止端部の端部から母材にき裂進展

TYPE3=すみ肉が剥離した後母材にき裂進展

(b) 荷重非伝達型について

TYPE4、4' =溶接止端部の端部から母材にき裂進展

TYPE5=すみ肉が剥離した後母材にき裂進展

TYPE6=ルート部から母材内を横切るき裂進展

TYPE7=試験片表面 (ルート部付近) のき裂

ハイフンに続く破壊形態の記号は、R:ルート破壊、T:止端破壊を意味する。ここで、試験片 D-0.2 に関しては、き裂が複数発生したものの、300 万回以上の繰返し疲労で破断に至らなかった為、未破断と考慮した。

表 6 疲労試験結果一覧 / (a) 荷重伝達型すみ肉溶接継手試験片

試験片名称	$\Delta\sigma$ (MPa)	A (mm ²)	測定値			N_f (cycles)	備考欄	模式図	
			応力比 R	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)				
腐食環境負荷なし	A -1.0	253	566	0.008	254	1.00	2.35×10^4	TYPE1-R	
	A -0.8	202		0.010	203	0.60	5.47×10^4	TYPE1-R	
	A -0.7	177		0.011	178	0.90	8.12×10^4	TYPE1-R	
	A -0.6	152		0.013	153	1.20	1.33×10^5	TYPE1-R	
	A -0.4	101		0.018	102	0.80	5.94×10^5	TYPE1-R	
	A -0.3	76		0.030	77	1.10	1.51×10^6	TYPE1-R	
	A -0.2	51		0.001	52	1.40	$> 3.17 \times 10^6$	-	
腐食環境負荷あり	B -0.8	202	566	0.010	203	0.60	3.12×10^3	TYPE1,2,3-R	
	B -0.7	177		0.011	178	0.90	1.42×10^4	TYPE1,2,3-R	
	B -0.65	164		0.012	165	0.55	1.46×10^4	TYPE1,2,3-R	
	B -0.6	152		0.013	153	1.20	2.73×10^4	TYPE1,2,3-R	
	B -0.5	127		0.018	128	1.50	1.82×10^5	TYPE1,3-R	
	B -0.4	101		0.018	102	0.80	9.31×10^4	TYPE1,3-R	
	B -0.3	76		0.025	77	1.10	5.94×10^5	TYPE1,3-R	
	B -0.2	51		0.035	52	1.40	$> 4.16 \times 10^6$	-	

表 6 疲労試験結果一覧 / (b) 荷重非伝達型すみ肉溶接継手試験片

試験片名称	$\Delta\sigma$ (MPa)	A (mm ²)	測定値			N_f (cycles)	備考欄	模式図	
			応力比 R	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)				
腐食環境負荷なし	C -1.2	304	480	0.007	305	1.40	1.75×10^4	TYPE4,4'-T	
	C -1.0	253		0.007	254	1.00	3.85×10^4	TYPE4,4'-T	
	C -0.8	202		0.009	203	0.60	9.83×10^4	TYPE4-T	
	C -0.7	177		0.013	178	0.90	1.34×10^5	TYPE4-T	
	C -0.6	152		0.013	153	1.20	4.74×10^5	TYPE4-T	
	C -0.5	127		0.018	128	1.50	5.12×10^5	TYPE4-T	
	C -0.45	114		0.018	115	1.15	6.90×10^5	TYPE4-T	
	C -0.4	101		0.021	102	0.80	$> 2.65 \times 10^6$	-	
腐食環境負荷あり	D -1.2	304	480	0.007	305	1.40	2.51×10^3	TYPE4,4',5,6-T	
	D -0.8	202		0.010	203	0.60	1.32×10^4	TYPE4,5,6,7-T,R	
	D -0.6	152		0.013	153	1.20	4.20×10^4	TYPE4,4',5-T	
	D -0.5	127		0.019	128	1.50	1.01×10^5	TYPE4',5-T	
	D -0.4	101		0.019	102	0.80	4.06×10^5	TYPE4',5-T	
	D -0.3	76		0.026	77	1.10	5.72×10^5	TYPE4',7-T,R	
	D -0.2	51		0.040	52	1.40	$> 3.06 \times 10^6$	TYPE4,4'	

4.1. 疲労特性評価方法

疲労特性評価方法として、任意の応力範囲 $\Delta\sigma$ における破断時繰返し回数 N_f の結果をBasquinの式を用いて評価を行った。Basquinの式を以下に示す。

$$\Delta\sigma \cdot N^m = C \text{-----} (7)$$

図7、8に荷重伝達型及び荷重非伝達型試験片の疲労実験結果を示す。図中の実線は本実験値（破断したデータ）を基に直線回帰して得られたS-N線図である。今回破断した試験片本数の少ない回帰結果となったが、疲労強度の傾向を把握する上であえて回帰結果を示した。又ここで、鋼種は異なるがJSSC基準値に対比させる意味で200万回以降を疲労限として水平線を引いた。表7にBasquinの式で得られた材料定数を示す。

4.2. 荷重伝達型すみ肉溶接継手の疲労強度

図8に荷重伝達型試験片の疲労実験結果を示す。200万回疲労強度は、腐食なし約64MPa、腐食あり約61MPaと同等の値が得られた。S-N線図の勾配は、腐食なしの $m=3.46$ に比べ、腐食ありでは $m=5.5$ と、約1.58倍高い値を示した。同図にJSSC指針値（許容疲労強度線図）を併記した。本実験で用いた荷重伝達型試験片は、JSSC指針値（H等級）に相当する。「腐食なし」では、 m 値及び疲労強度値から、F等級 [$\Delta\sigma_f=65/\Delta\sigma_{ce}=46(5.6 \times 10^6)$]に相当する結果が得られた。「腐食あり」の実験値は、応力の繰返し数が約10万回以下の範囲で現行のJSSC値（H等級）を下回り、短寿命側を示しているが、応力範囲が低い繰返し疲労であれば、過酷な腐食環境下の場合でも、腐食を受けない環境下と同等の耐力が得られると推測できる。

4.3. 荷重非伝達型すみ肉溶接継手の疲労強度

図9に荷重非伝達型試験片の疲労実験結果を示す。200万回疲労強度は、腐食なし約101MPaに対し、腐食あり約65MPaと1.9倍低い値を示した。S-N線図の勾配は、腐食なしは $m=3.99$ 、腐食ありは $m=4.22$ となり、おおよそ $m=4$ を示す結果となった。同図にJSSC指針値を併記した。本実験で用いた荷重非伝達型試験片は、JSSC指針値（E等級）に相当する。「腐食なし」の疲労強度値は、D等級 [$\Delta\sigma_f=100/\Delta\sigma_{ce}=84(3.4 \times 10^6)$]に相

当するものの、本実験値によるS-N線図の勾配は、JSSC指針値($m=3$)より約1.33倍高い値を示した為、本実験値はD等級のS-N線図より短寿命側を示した。「腐食あり」は、現行のJSSC指針値(E等級)よりはるかに下回り、疲労強度値はF等級 [$\Delta\sigma_f=65/\Delta\sigma_{ce}=46(5.6 \times 10^6)$]に相当する事がわかった。しかし「腐食なし」と同様、 m 値が約1.41倍高い為、F等級のS-N線図より短寿命側にある。

表7 材料定数

試験片名称	データ数 n	材料定数		相関係数 r	2×10^6 回基本許容 応力範囲 $\Delta\sigma_f$ (MPa)	応力範囲の打ち切り限度 一定繰返し応力 $\Delta\sigma_{ce}$ (MPa) / N (cycles)
		m	$\log C$			
A	6	3.46	3.63	0.68	64	-
B	7	5.50	2.93	0.64	61	-
C	7	3.99	3.58	0.77	101	-
D	6	4.22	3.31	0.57	52	-
JSSC (H等級)	-	3	11.1	-	40	$23 / 1.0 \times 10^7$
JSSC (E等級)	-	3	12.1	-	80	$62 / 4.4 \times 10^6$

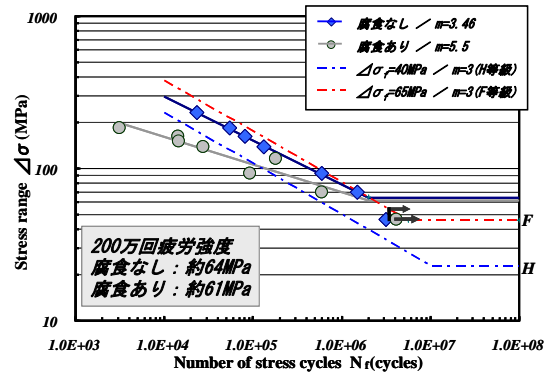


図8 荷重伝達型試験片の疲労実験結果

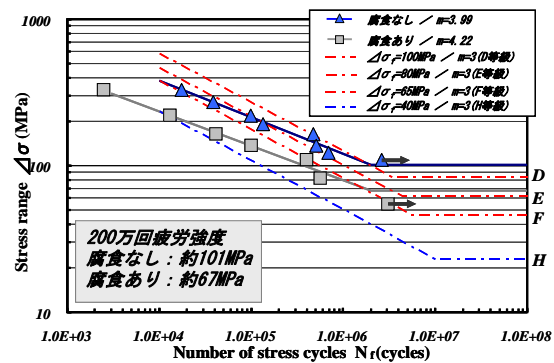


図9 荷重非伝達型試験片の疲労実験結果

このように、4.2及び4.3の結果を併せて考えると、ステンレス鋼（SUS304A）の疲労強さは、継手の種類や環境によってS-N線図の勾配が異なり、炭素鋼とは異なった疲労強さ示す為、JSSC指針の適用は難しい。随時ステンレス鋼の疲労設計データを蓄積していく必要がある。又、ある一定条件下で腐食をさせた耐力を調べたところ、荷重伝達型及び荷重非伝達型すみ肉溶接

継手試験片の「腐食あり」は、「腐食なし」に比べ、疲労強度が共に減少する事が明らかとなった。共通の原因として、溶接ビード部と母材との境界で起きた腐食部から、き裂が発生した事が挙げられる。そこで、破断後の試験片を用いて、腐食部の損傷形態について調査する事とする。

5. ステンレス鋼の溶接部における腐食調査

供試材として以下の3種類の試料を用いた。全て人工環境装置による腐食サイクル試験済みのものである。

試料Ⅰ：荷重伝達型（未疲労試験）

試料Ⅱ：荷重伝達型（B-0.65：疲労試験済み）

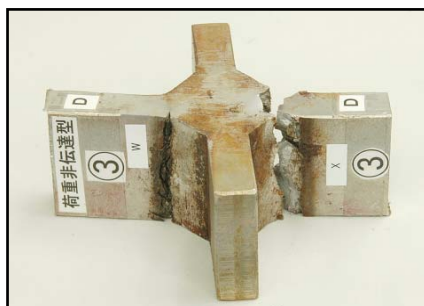
試料Ⅲ：荷重非伝達型（D-1.2：疲労試験済み）



<試料Ⅰ>



<試料Ⅱ>



<試料Ⅲ>

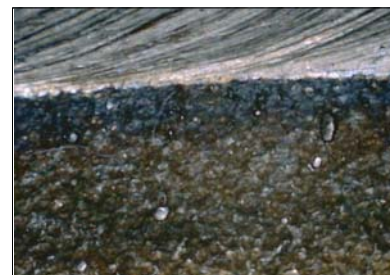
5.1. 腐食による錆の生成状況

写真1、2に腐食前と腐食後の溶接部拡大写真（50倍）を示す。試験片表面の腐食状況の評価をする上で、視覚的な資料として「写真」で記録を行ってきた。

試料Ⅰの0サイクル（腐食前）では、溶接止端部に沿って黒ずんだ状態（weld decay）がわかる。これは、溶接時の温度により粒界内にCr炭化物が析出している様子で、粒界近傍のCr濃度が低下している時に現れる。500サイクル（腐食後）では、溶接金属及びweld decay部を中心に腐食生成物が発生している。



写真1 腐食前(0cycle)と腐食後(500cycle)の比較



腐食前



腐食後

写真2 腐食前と腐食後の比較（50倍）

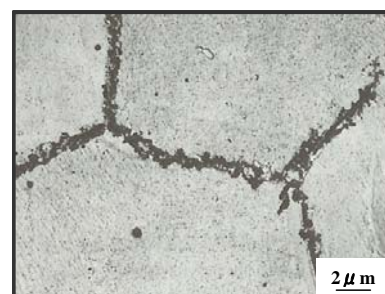


写真3 weld decay部

5.2. 浸透探傷試験

試料Ⅰを用いた浸透探傷試験結果を示す。浸透探傷試験とは、赤色や蛍光色の浸透性のよい検査液を用いて、表面の割れやピットなどを検出する非破壊検査方

法である。検査を行う前に、試験片試料を 10%クエン酸二アンモニウム溶液に浸し、腐食性生物を取り除いている。観察を行ったところ、写真 4-1 のように、溶接止端部付近の指示模様（朱色部）から、表面に開口している微細なクラック（写真 4-2）を確認する事ができた。

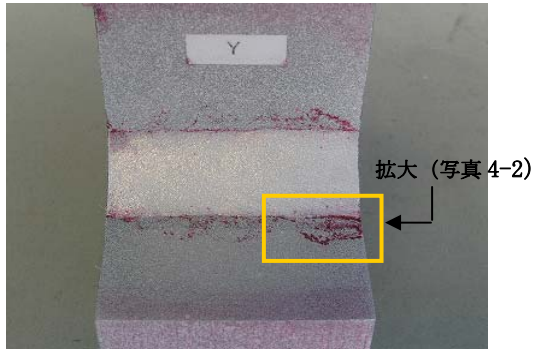


写真 4-1 浸透探傷試験結果 (Y 面)



写真 4-2 溶接止端部拡大写真

5.3. 破面観察

(1) 金属顕微鏡 (断面マイクロ・マクロ組織観察)

写真 5-1~5-4 に金属顕微鏡による断面組織観察結果を示す。浸透探傷試験結果 (写真 4-1、4-2 参照) で、微細なクラックが著しく生じている箇所について、断面マイクロ・マクロ組織観察を行った。

断面マクロ組織観察 (写真 5-1 参照) によると、すみ肉溶接止端部近傍に「割れ」が生じ、特に溶接金属より 4mm 程度離れた熱影響部で発生している事が確認できた。

断面マイクロ組織観察 (写真 5-2~5-4 参照) によると、溶接止端部及びその近傍 (熱影響部) の割れは、いずれも複雑に枝分かれし、写真 5-4 では粒内、粒界に関係なく進展している事が確認できる。

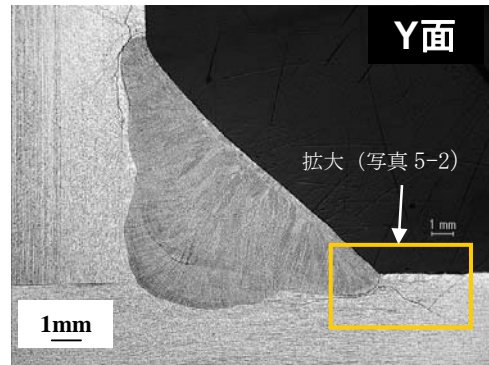


写真 5-1 断面マクロ組織観察

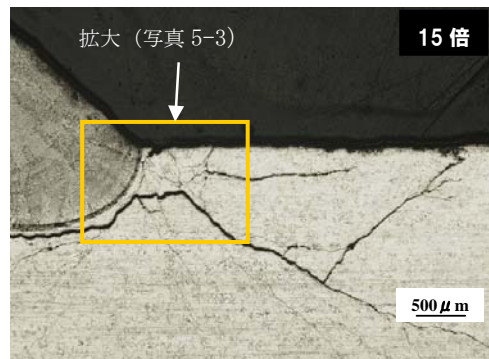


写真 5-2 断面マイクロ組織観察 (15 倍)

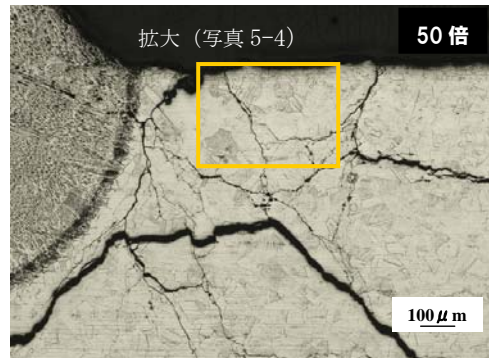


写真 5-3 断面マイクロ組織観察 (50 倍)

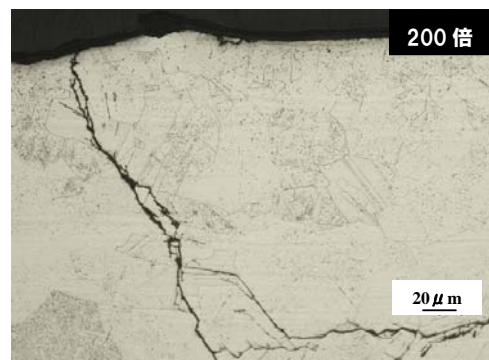


写真 5-4 断面マイクロ組織観察 (200 倍)

(2) SEM 観察

写真 7-1、7-2 に SEM による破面観察結果を示す。試

料Ⅱ、試料Ⅲの破断後（荷重伝達型及び荷重非伝達型）の試験片共に、溶接止端部近傍（外観観察で変色していた部位）の破面を観察したところ、写真 7-1 では破面全体に凹凸が見られ、多数の副き裂（破壊の主原因になる 1mm 以下のき裂）が存在した。更に 500 倍拡大した写真 7-2 では、擬へき開状破面が見られた。これはオーステナイト系ステンレス鋼の場合、応力腐食割れや腐食疲労で観察される破面形態である。



写真 6 破断後の試験片（試料Ⅲ：荷重非伝達型）

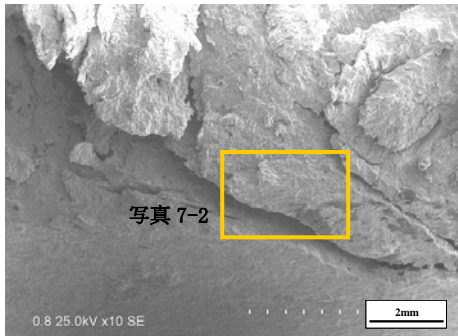


写真 7-1 凹凸している破面

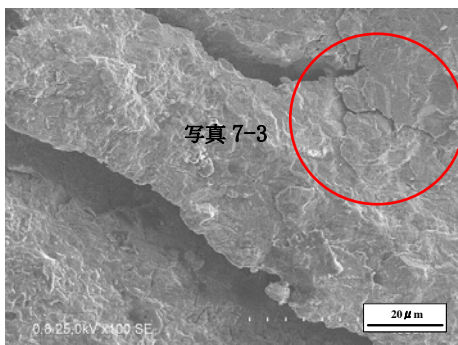


写真 7-2 副き裂

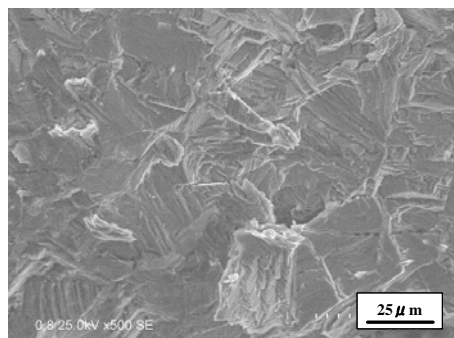


写真 7-3 擬へき開状破面

以上の結果を踏まえ、未試験の試料で観察した断面組織観察結果と併せて考えると、腐食環境負荷を受けた試験片は、疲労試験前に応力腐食割れ（並びに局部腐食）により副き裂が存在し、更に繰返し疲労と連動した事で、き裂進展を早め疲労強度が低下したと推測できる。又ステンレス鋼は炭素鋼と同様、溶接熱影響部は最も耐力が低下する部位であり、且つ環境中の塩素イオンにより weld decay 部近傍の不働態皮膜が働かなくなる事が明らかとなった。

6. 結論

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304A を用いたすみ肉溶接継手の大気中における疲労強度並びに海岸近傍の構造物を想定した塩水腐食環境負荷後の疲労強度を調べ、且つ溶接部における腐食損傷形態を調査した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 荷重伝達型の 200 万回疲労強度：「腐食なし」の疲労強度は約 64MPa、「腐食あり」では約 61MPa と同等の値が得られた。「腐食あり」は、現行の JSSC 指針/H 等級では繰返し数が約 10 万回以下の範囲では短寿命側を示した。しかし、応力範囲が低い繰返し疲労であれば、過酷な腐食環境下でも、腐食にさらされていない場合と同等の耐力が得られる事が推測できる。

(2) 荷重非伝達型の 200 万回疲労強度：「腐食なし」の疲労強度は約 101MPa に対し、「腐食あり」では約 52MPa と 1.9 倍低い値を示した。その為、「腐食なし」の疲労強度値は現行の JSSC 指針/D 等級、「腐食あり」の疲労強度値は現行の JSSC 指針/G 等級に相当する耐力である事がわかった。しかし、S-N 線図の勾配が $m=4$ を示した事から、各々の等級の勾配に関しては、両者とも短寿命側を示す事が明らかとなった。

(3) (1) 及び (2) の結果から、「腐食あり」の疲労強度の低下の原因として、溶接熱影響部近傍に応力腐食割れが発生し、疲労試験前に、副き裂が存在していた事に起因する。

(4) ステンレス鋼は炭素鋼と同様、溶接熱影響部は最も耐力が低下する部位であり、且つ環境中の塩素イオンにより、溶接時に Cr が減少した weld decay 部近傍では、不働態皮膜が働かなくなる事が明らかとなった。

【参考文献】

- 1) 二階堂芳秋；街を彩るモニュメントとステンレス鋼—デザイン性で大きな役割—ステンレス建築, No. 35, 2008
- 2) 佐野良幸；ステンレス構造材の基礎知識（第3回構造材としての歩みと利用状況）、ステンレス建築、No. 35, 2008
- 3) ステンレス建築構造協会編；ステンレス建築構造設計基準・同解説，2001
- 4) JIS G 4321；建築構造用ステンレス鋼材、2000
- 5) SSBS-201（ステンレス建築構造協会規格）；建築構造用ステンレス鋼材、2001
- 6) SSBS-101；建築構造用ステンレス鋼溶接形鋼、2001
- 7) SSBS-301；構造用ステンレス鋼高力六角ボルト、ナット、平座金、2001
- 8) SSBS-301；建築構造用ステンレス鋼溶接材料、2001
- 9) 駒井謙治郎；構造材料の環境強度設計，養賢堂，1993
- 10) 高谷泰之；ステンレス鋼の溶接部における腐食・防食、溶接学会誌、第77巻、第7号、2008
- 11) 日本鋼構造協会編；鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1995
- 12) 日本建築学会編；鋼構造設計規準—許容応力度設計法—，2005
- 13) M. O. Speidel；Corrosion Fatigue in Fe-Ni-Cr Alloys, Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys, NACE-5, 1977
- 14) 遠藤吉郎他；ステンレス鋼の腐食疲労き裂進展に及ぼす塩素イオン濃度の影響，機械学会論文集 A，1982
- 15) 駒井謙治郎他；人工海水中における耐海水 2 相ステンレス鋼の腐食疲労き裂進展挙動，材料，36，1987
- 16) 鹿島光一，高橋由紀夫；SCC 未貫通き裂を有する原子炉配管の破断前漏洩評価，電力中央研究所研究報告，No. 283015, 1983
- 17) 伊藤義康他；SUS304 オースチナイトステンレス鋼溶接金属の低サイクル疲労特性，機会学会論文集 A，54 巻 502 号，1988
- 18) H. Sassoulas and P. Balladon；Creep Crack Growth in an Austenitic Stainless Steel Welded Joint, 7th International Conference on Fracture Houston, Texas, USA, 1989
- 19) 清水哲也；海水暴露試験における SUS630 製高力ボルトの損傷およびその原因に関する調査研究，ステンレス建築，No. 22, pp23-26, 2003
- 20) 武藤泉，清水哲也，増田博史；屋内温水プールの腐食環境とステンレス鋼ボルトの耐力腐食割れ性，ステンレス建築，No. 21, pp20-24, 2002
- 21) 小林英男編著；破壊事故—失敗知識の活用—，共立出版，2007
- 22) 物質・材料研究機構；熱間圧延ステンレス鋼 SUS304-HP (18Cr-8Ni) 突合せ溶接継手の疲れ特性データシート（応力比の効果），No. 53，1986
- 23) 長井 和，見村博明；ステンレス鋼の疲労強度に関する実験，日本建築学会大会梗概集 C1，p513-514, 2005，
- 24) 本間誠士，見村博明；ステンレス鋼の疲労強度に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, p961-962, 2006
- 25) 本間誠士，見村博明；ステンレス鋼の疲労強度に関する実験的研究（その2. 腐食環境負荷後の疲労強度），日本建築学会大会学術講演梗概集 C1, pp. 683-684, 2007
- 26) 中村侑香，見村博明；ステンレス鋼の疲労強度に関する研究（その3. 腐食環境負荷後の疲労強度2），日本建築学会大会学術講演梗概集 C1，pp635-636, 2008
- 27) 飯田ちひろ，見村博明；ステンレス鋼 SUS304 の低サイクルの疲労特性に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第15巻, pp. 625-632, 2007
- 28) 飯田ちひろ，見村博明；ステンレス鋼を用いた十字すみ肉溶接継手の疲労強度に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 C1, pp635-636, 2008
- 29) 中村侑香，飯田ちひろ，見村博明；オースチイト系ステンレス鋼の疲労強度に関する研究（応力比および腐食環境の影響）鋼構造論文集、Vol. 16, No. 61, 2009 掲載予定

なお、本研究は東京電機大学総合研究所研究 Q07M-06 として行ったものである。