

リブ十字隅肉溶接継手の塩水中での疲れ試験と寿命解析

FATIGUE TEST OF STIFFENER SPECIMENS IN SALT WATER
AND LIFE ESTIMATION

山田健太郎*・左高茂樹**

By Kentaro YAMADA and Shigeki SADAKA

Fatigue crack growth rates of SM 50 A, SM 58, and HT 80 steels in air and in 3% salt water were measured. Crack growth rates in salt water were 1 to 1.5 times faster than that in air, when subjected to loading speed of 1 Hz. Bending fatigue tests were also carried out for non-load carrying fillet welded specimens. Fatigue cracks were initiated at weld toes and propagated in semi-elliptical shape. Fatigue life in salt water seemed to be about one quarter of that in air, despite of a few failed data in air. Fatigue crack propagation life of stiffener detail was estimated using fracture mechanics technique and the analytical results were in good agreement with the test data.

Keywords : fatigue, crack growth rates, salt water, welded specimen, fracture mechanics

1. はじめに

海洋構造物ではもちろんのこと、海岸構造物でもそれが繰り返し荷重を受ける場合には、腐食環境下での疲れ挙動が問題となる。一般に、腐食環境下での溶接継手の疲れでは、部材表面に腐食ピットが発生する。溶接継手本来の応力集中に加えてこの腐食ピットも応力集中源となり、そこから疲れ亀裂が進展するため、疲れ寿命の大部分を疲れ亀裂進展寿命が占める。したがって、この種の継手の腐食環境中での疲れ挙動を知るうえで、疲れ亀裂進展挙動を把握することは重要な課題の1つである²⁾。

そこで、本研究では、海水腐食環境を模した塩水中と空気中において、3種類の構造用鋼、SM 50 A, SM 58, HT 80の疲れ亀裂進展速度の測定、および SMA 50 Aを使用したりブ十字形隅肉溶接継手の疲れ試験を行った。また、破壊力学の手法により寿命解析を行い、実験値と比較した。

2. 空気中と塩水中での疲れ亀裂進展速度の測定

(1) 疲れ亀裂進展速度の測定試験

構造用鋼の基本的な疲れ特性を求めるため、SM 50 A, SM 58, HT 80の3鋼種について、 $10 \leq \Delta K \leq 45$ MPa \sqrt{m} における塩水中での疲れ亀裂進展速度 da/dN の測定を行い、空気中のデータと比較した。

供試用鋼材の化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。試験片は、Fig. 1 に示す CT 試験片を用いた。荷重範囲 ΔP は、4.41 kN, 7.94 kN として、試験結果が $da/dN \sim \Delta K$ 線図上でオーバーラップするようにした。応力比は $R=0.1$ とした。疲れ試験には、9.8 kN 水平型油圧サーボ疲れ試験機を使用し、Fig. 2 に示すように、4体の試験片を同時に載荷した。塩水は、ポンプを用いてタンクとアクリル樹脂製腐食槽の間を循環させた。塩水は 3% NaCl 溶液を用い、その温度は 25°C とした。各腐食槽内の流量は循環経路内に設けたバルブにより約 1.0 l/min に調整し、試験片から発生する腐食生成物を汙過するために、循環経路内にフィルターを設けた。溶存酸素量はエアーポンプで常時空気を吹き込み、飽和状態とした。また、荷重波形は正弦波で繰返し速度は 1 Hz とした。疲れ亀裂進展速度の測定は、ASTM : E

* 正会員 Ph. D. 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
(〒464 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工修 間組東京支店

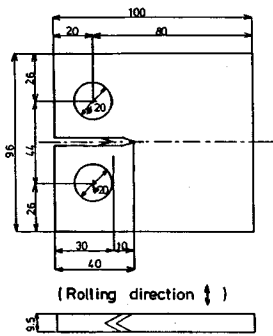


Fig. 1 Dimension of compact type (CT) specimen.

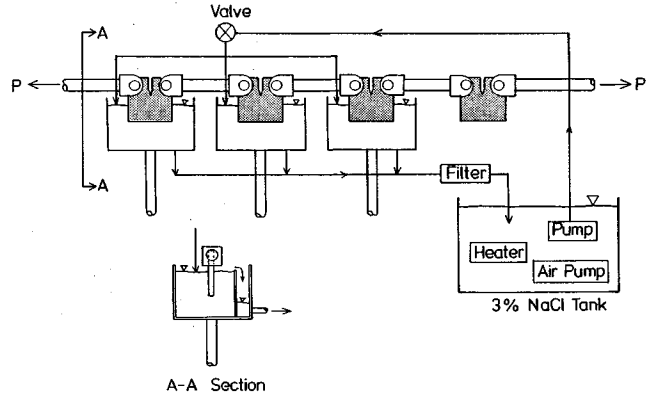


Fig. 2 Test set-up for measurement of fatigue crack growth rates in air and in 3% NaCl solution.

647-82に従った¹⁾.

(2) 疲れ亀裂進展速度の測定結果と考察

疲れ亀裂進展速度の測定結果を Fig. 3 に示す。SM 50 A の、空気中と塩水中の結果は、多少のばらつきはあるが測定区間でほぼ直線になり、Paris 則の適用が可能である。また、塩水中の結果は、空気中と比較して亀裂進展速度が 1.5~1.7 倍速く、腐食によって亀裂進展速度が加速されていることがわかる。また、SM 58, HT

80は、 $10 \leq \Delta K \leq 18.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ では、SM 50 A の空気中に比べて 1.5 倍程度亀裂進展速度は加速されているが、 $\Delta K = 18.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 付近で遷移的に変化して、亀裂進展速度は空気中と同程度かそれよりも遅くなる。これらの測定結果を用いて最小二乗近似して求めた Paris 則の材料定数 C , m の平均値、および ΔK の適用範囲を Table 2 に示す。SM 58, HT 80 については、 $\Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 付近で疲れ亀裂進展速度が異なるため、測定結果を二分して、Paris 則の係数を求めた。

過去の実測値を調べ各鋼種の $\Delta K = 18.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ における腐食環境下の亀裂進展速度を、空気中 10 Hz の場合³⁾と比較して Fig. 4 に示す^{2), 16)}。縦軸は、塩水中あるいは人工海水中の亀裂進展速度を、空気中 10 Hz の亀裂進展速度で無次元化し、横軸は荷重の繰返し速度を表わしている。この図からわかるように、腐食環境中の疲れ亀裂進展速度は、繰返し速度に大きく影響される。腐食環境中の構造物の疲れ亀裂進展挙動を評価する場合、構造物に作用する応力の繰返し速度を考慮しなければならないことがわかる。

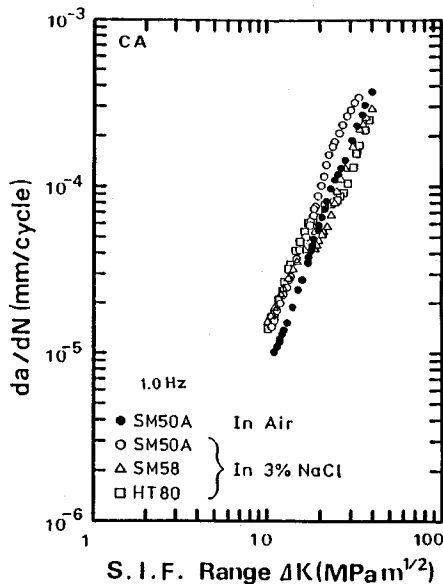


Fig. 3 Summary of fatigue crack growth rate measurements.

Table 2 Coefficients of fatigue crack growth rate equations.

Environment	Specimen	Material Constants		Range of ΔK ($\text{MPa}\sqrt{m}$)
		C	m	
In Air	SM 50 A	6.66E-09	2.98	11.6~40.3
In 3% NaCl	SM 50 A	8.90E-09	3.05	11.3~33.9
	SM 58	1.62E-07	1.96	10.6~19.7
	HT 80	6.02E-09	2.95	19.9~40.3
		2.77E-08	2.66	10.6~20.1
		1.28E-08	2.69	24.2~38.9

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of steels.

Specimen Type	Steel	C	Si	Mn	P	Chemical Composition (%)								Mechanical Properties		Elongation l=200mm (%)
						S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)		
CT Specimen	SM50A	0.18	0.22	1.30	0.015	0.011	-	-	-	-	-	-	372	549	23	
	SM58	0.13	0.23	1.38	0.007	0.004	-	-	-	-	-	578	837	31		
	HT80	0.11	0.26	1.01	0.002	0.17	0.82	0.48	0.32	0.003	0.01	794	843	36		
Bending Specimen	SM50	0.17	0.25	1.04	0.02	0.001	0.28	-	0.44	-	0.004	-	421	578	18	

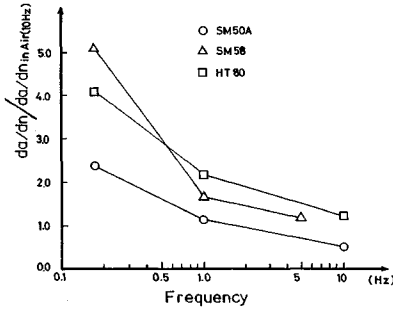


Fig. 4 Effect of loading speed on fatigue crack growth rates.

3. リブ十字形隅肉溶接継手の曲げ疲れ試験

(1) 疲れ試験

本研究では、リブ十字形隅肉溶接継手を用いて、塩水中と空気中で片振り曲げ疲れ試験を行い、腐食環境が疲れ強さへ及ぼす影響、および曲げ荷重下での亀裂進展挙動について検討した。

試験体は、Fig. 5 に示す荷重非伝達形リブ十字形隅肉溶接継手とした¹²⁾。試験体は手溶接によって製作され、溶接止端部の仕上げは行っていない。試験体に使用した鋼材は、SMA 50 A でその化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。荷重載荷は、Fig. 6 に示すように試験体下側を高力ボルトで固定し、試験体上端に繰返し載荷を行うことにより、片振り曲げ荷重を載荷した。塩水中

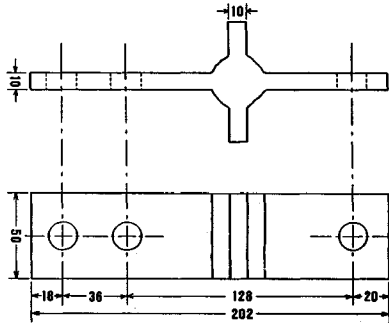


Fig. 5 Stiffener specimens used in bending test.

と空气中それぞれ2体ずつ計4体、あるいは塩水中4体を同時に試験した。また、塩水の循環システムおよび試験環境は、前述の疲れ亀裂進展速度の測定と同一条件とした。

(2) 疲れ試験結果と考察

試験体の疲れ亀裂は、引張側隅肉溶接止端部から発生し、板厚方向へ半楕円形亀裂として進展し、亀裂による断面欠損のため全断面降伏に至って破断した。疲れ亀裂発生に影響を及ぼすと思われる腐食ピットについては、試験片を As-welded の状態で試験したため、よくわからなかった。塩水中で試験を行った試験体の破断面には、腐食によるさびが発生していた。また、塩水中で行った試験体のうちの3体は、試験体を固定している治具と試験体の接触部付近の母材から半楕円形亀裂が発生して破断した。それ以後の試験はこの部分を防食して行った。なお、これらの試験体では、溶接止端部にも半楕円形の疲れ亀裂が発生していた。

塩水中および空气中の疲れ試験結果を、Table 3 に示す。表には、応力範囲 $\Delta\sigma$ 、応力比 R 、破断寿命 N_f 、および試験体が破断したときの亀裂深さ a_f を板厚 t で無次元化したものを示している。また、疲れ試験結果の S-N 線図を Fig. 7 に示す。矢印をつけたものは、その繰返し数まで載荷しても破断しなかった試験体を示す。空气中では、Table 3 に示すように $\Delta\sigma=294$ MPa で試験した1体が破断したが、この寿命と比べると、塩水中

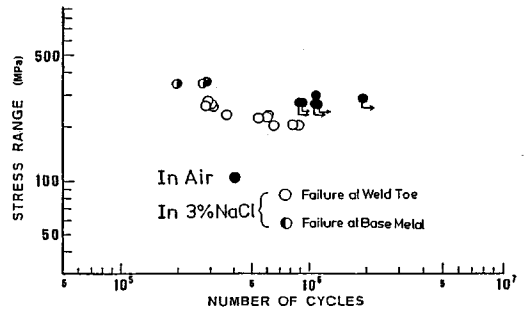


Fig. 7 Summary of fatigue test results of stiffener specimens.

Table 3 Fatigue test results of stiffener detail in bending.

Environment	Specimen No.	Stress Range (MPa)	Stress Ratio $R = (\sigma_{min} / \sigma_{max})$	$N_f \times 10^3$ cycle	a_f / t
In 3% NaCl	11	255	0.156	300	0.63
	12	275	0.156	292	0.64
	13	259	0.156	278	0.63
	14	282	0.156	285	0.63
	15	352	0.156	279	-
	16	344	0.156	287	-
	17	345	0.158	204	-
	21	233	0.179	354	0.68
	22	230	0.179	584	0.68
	23	228	0.179	584	0.65
	24	223	0.179	520	0.66
	25	202	0.200	857	0.69
	26	203	0.200	613	0.68
	27	207	0.200	789	0.68
	In Air	A 11	294	0.094	1056

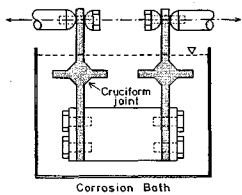


Fig. 6 Bending fatigue test set-up.

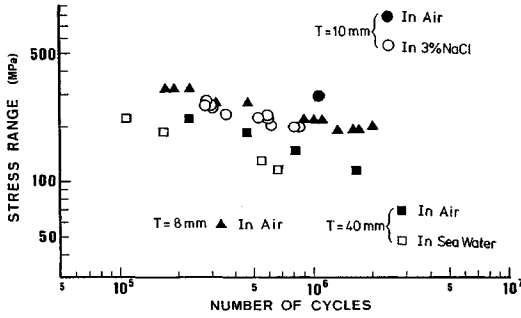


Fig. 8 Comparison with previous test results of stiffener details.

の疲れ寿命が $\Delta\sigma=300$ MPa 付近で約 1/4 に短くなった。

Leeuwen らは、空気中と人工海水中で、板厚 40 mm のリブ十字形隅肉溶接試験体の曲げ疲れ試験を行った⁴⁾。この試験結果は Fig. 8 に示すが、空気中、塩水中とも、板厚 10 mm の試験結果よりも、疲れ強さは小さくなっている。これは、試験体の板厚が厚くなるほど、板厚方向の応力勾配が緩くなる板厚効果や、溶接長さが増えるにつれて (板幅 218 mm)、疲れ強さに影響を及ぼす欠陥が存在する可能性が大きくなることなどに起因していると思われる。また、Haeyer らは、板厚 8 mm の試験体を用いて、空気中で曲げ疲れ試験を行っている⁵⁾。この試験結果に比べても、本研究の塩水中の試験結果は、疲れ寿命が、 $\Delta\sigma=270$ MPa 付近で約 10~35 %、 $\Delta\sigma=230$ MPa 付近で約 35~55 % 程度短くなっている。

腐食環境中では、空気中に比べて、グラインダー仕上げなどによる溶接止端部の改善効果が少ないことが報告されている⁷⁾。溶接継手では、部材表面に発生した腐食ピットと応力集中に起因する亀裂が進展するため、空気中に比べて疲れ亀裂発生寿命 N_e も短くなる。したがって、本研究の疲れ試験においても、塩水中の疲れ寿命 N_f は、空気中に比べて、疲れ亀裂進展寿命 N_p の減少以上に短くなったと考えられる。

(3) 亀裂形状

疲れ破壊を生じた破面には、亀裂進展に伴う痕跡がみられ半楕円形の亀裂が確認された。亀裂は溶接止端部に沿って複数個発生し、亀裂の進展とともに隣り合う亀裂が合体して、やがて単一の亀裂となって進展したことが確認された。亀裂の形状と寸法を観察した結果を、縦軸に半楕円形亀裂の亀裂深さ a と亀裂幅の 1/2 である c の比 a/c をとり、横軸は亀裂深さ a を試験体の板厚 t で無次元化したものを用いて Fig. 9 に示す。亀裂は板厚方向に進展するに従って扁平な形状になっているのがわかる。図中の直線は、測定結果を最小二乗近似して求めたもので、次式で表わされる。

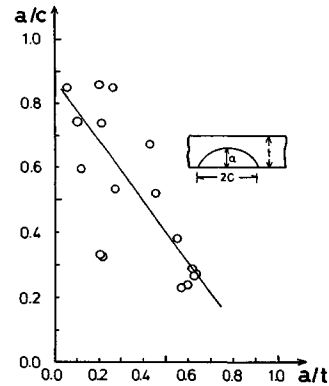


Fig. 9 Summary of observed fatigue crack shapes and crack shape model used in the analysis.

$$a/c = 0.87 - 0.93 a/t \dots\dots\dots (1)$$

4. 曲げを受けるリブ十字形隅肉溶接継手の応力分布の解析

(1) 有限要素法による応力分布の解析

本研究で対象としているリブ十字形隅肉溶接継手の応力分布は、Fig. 10 に示すようなモデルを二次元平面ひずみ状態として有限要素法で計算できる。溶接止端部の応力分布に影響を及ぼす止端角 θ 、止端半径 ρ については、板厚 10 mm の継手に対して、止端角 $\theta=45^\circ$ 、止端半径 $\rho=0.0, 1.2, 2.0$ の 3 ケースを考えた。板厚 22 mm と 40 mm の両継手に対しては、 $\theta=45^\circ$ 、 $\rho=0.0$ のそれぞれ 1 ケースについて解析した。腐食ピットに対しては定量的な評価が難しくここでは考慮しなかった。また、板厚 10 mm の継手に対しては、脚長 6 mm とし、板厚 22 mm の継手は、13.2 mm、板厚 40 mm では 24 mm とした。

(2) 解析結果と考察

解析結果は、最大主応力が発生した要素の主応力を、その位置のはり理論による曲げ応力で無次元化した応力集中係数で表わした。Table 6 に、全解析ケースの最大主応力値より求めた応力集中係数、継手表面から最大主応力発生要素の中心までの距離を示す。また、比較のため西田らの推定式より求まる応力集中係数、および一様引張荷重が作用する場合の応力集中係数を示す⁶⁾。

板厚 10 mm、 $\rho=0.0, 1.2, 2.0$ の板厚方向の応力分布状態を Fig. 11 に示す。継手表面から 0.05 mm の点の応力集中係数は、 $\rho=0.0$ に対して $\rho=1.2$ では約 23 %、 $\rho=2.0$ では約 32 % 小さくなっている。しかし、表面より板厚方向へ 0.5 mm 以上入った位置では ρ による差は小さく、 ρ の影響は表面近傍に限られている。

Fig. 12 は、 $\rho=0.0$ mm で板厚 10 mm、22 mm、40 mm の解析結果を示す。図中の破線は同じ解析モデルを

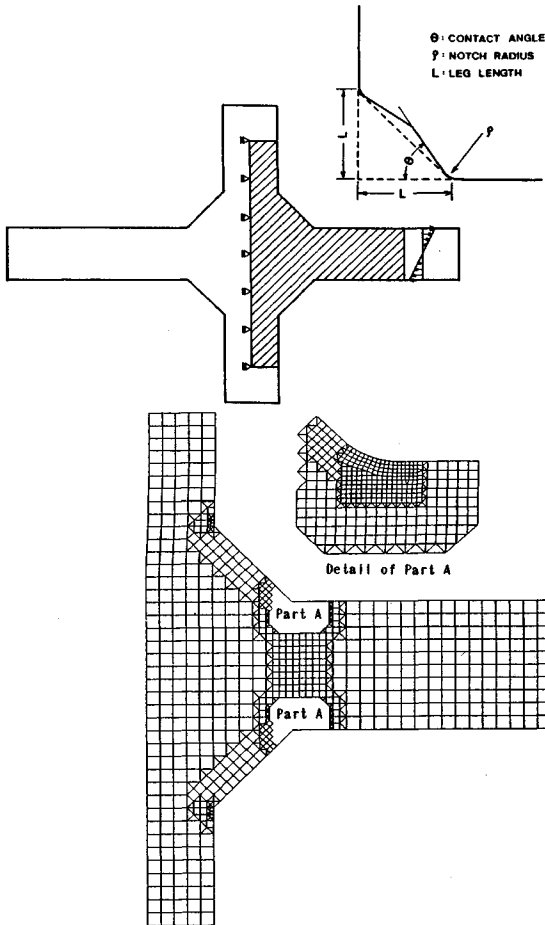


Fig. 10 Analytical model of stiffener specimen in tension and in bending and finite element mesh.

用いて一様引張荷重が作用した場合の解析結果を表わしている。この図より、一様引張荷重が作用する場合と比較して、曲げ荷重が作用する場合、応力集中係数が約23%小さくなるのがわかる。また、応力分布は相似形で、

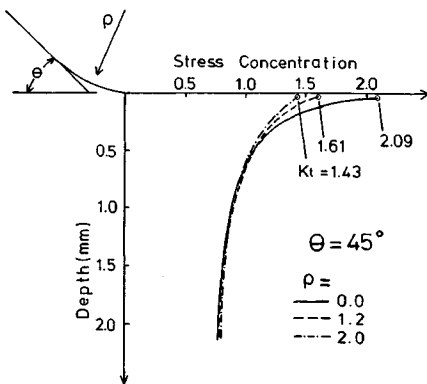


Fig. 11 Effect of toe radius on stress concentration factor of stiffener specimens in bending.

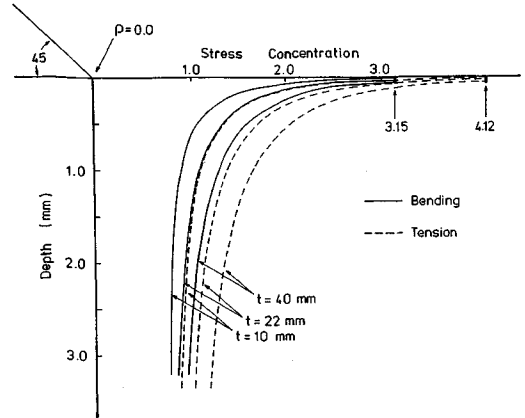


Fig. 12 Effect of plate thickness on stress concentration factor of stiffener specimen in tension and in bending.

板厚が厚くなるほど板表面近傍での応力勾配は緩くなっている。初期亀裂長さが、板厚に関係なく一定とすると、薄板の初期亀裂は、厚板の初期亀裂に比べて小さい応力を受けることになり、初期の亀裂進展速度が遅くなる。また一般に、溶接継手の場合、亀裂長さが小さい段階での疲れ亀裂進展寿命が疲れ寿命に占める割合が大きく、これは、板厚の違いによる最終亀裂長さの違いよりも支配的である。このことから、板厚効果が理解できる。

5. 破壊力学による疲れ亀裂進展寿命の解析

(1) 疲れ亀裂進展寿命の解析の方法

一般に、溶接継手は、疲れ寿命に占める疲れ亀裂進展寿命の割合が大きく、破壊力学の手法によって解析が可能であることが知られている¹¹⁾。ここでは、塩水中と空気中の疲れ亀裂進展速度を用いて、曲げを受けるリブ十字形隅肉溶接継手の疲れ亀裂進展寿命を解析して実験値と比較する。ここで対象としている SMA 50 A の疲れ亀裂進展速度は、前述の塩水中と空気中の SM 50 A の疲れ亀裂進展速度の測定結果より、次式のように表わされるものと仮定した。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \dots \dots \dots (2)$$

Table 4 Summary of stress concentration factors computed by finite element method.

t (mm)		10	22	40		
rho (mm)		0.0	1.2	2.0	0.0	0.0
Distance from Plate Surface (mm)		0.016	0.050	0.050	0.034	0.063
Bending	FEM Analysis	3.15	1.61	1.43	3.15	3.15
	Nisida's Equation		1.57	1.39		
Tension	FEM Analysis	4.12	2.06	1.82	4.12	4.12
	Nisida's Equation		2.35	1.97		

ここで、材料定数 C , m は、

空气中(1 Hz) : $C=6.66 E-09$, $m=2.98$

塩水中(1 Hz) : $C=8.90 E-09$, $m=3.05$

海水中(0.2 Hz) : $C=6.03 E-09$, $m=3.50$

とする。なお、海水中(0.2 Hz) の C , m は DnV に規定されている値の平均値を用いた¹⁵⁾。

曲げを受けるリブ十字形隅肉溶接継手では、疲れ亀裂は隅肉溶接止端部より発生して、板厚方向に半楕円形亀裂として進展する。このような継手形状と亀裂形状をもつ部材に対しては、重ね合わせの原理を用いて応力拡大係数を定義するのが便利である¹⁴⁾。すなわち、深さ a 、半幅 c の半楕円形表面亀裂を有する、板厚 t 、板幅 $2W$ の平板が曲げを受ける場合、亀裂最前縁 A 点の応力拡大係数の補正係数として、Raju & Newman は次式に示す近似式を提案している¹³⁾。

$$K = M_B^A \sigma \sqrt{\pi a} / E(K) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$M_B^A = H \cdot F \dots\dots\dots (4)$$

$$H = 1 + \left. \begin{aligned} &(-1.22 - 0.12(a/c))(a/t) \\ &+ (0.55 - 0.05(a/c)^{0.75} + 0.47(a/c)^{1.5})(a/t)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$F = (M_1 + M_2(a/t)^2 + M_3(a/t)^4) \cdot f_R \dots\dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= 1.13 - 0.09(a/t) \\ M_2 &= -0.54 + 0.89/(0.2 + a/c) \\ M_3 &= 0.5 - 1.0/(0.65 + a/c) + 14(1.0 - a/c)^{24} \end{aligned} \right\}$$

$$f_R = \left(\sec \left(\frac{\pi C}{2W} \sqrt{a/t} \right) \right)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

$$E(K) = \int_0^{\pi/2} (1 - K^2 \sin^2 \phi) d\phi \dots\dots\dots (8)$$

$K^2 = 1 - (a/c)^2$: 第二種完全楕円積分

リブ十字形隅肉溶接継手の溶接止端部のように、応力集中部に発生する亀裂に対しては、形状補正係数 F_c を考慮する必要がある^{12), 14)}。本研究では、4. で求めた溶接止端部 ($\theta = 45^\circ$, $\rho = 0.0$) の応力分布を用い、曲げ荷重下での F_c を求めた。

Fig. 13 に、疲れ試験より得られた亀裂形状を表わす式を用いた場合の補正係数、 $F(a)$, M_B , F_c を示す。

破壊力学による疲れ寿命解析では、初期亀裂長さ a_0 が重要になる。明確に定義できる場合は、その値を用いるが、一般に明確に定義することは難しい。ここでは、これまでの研究を参考に、 $a_0 = 0.2 \text{ mm}$ とした^{11), 12)}。最終亀裂長さ a_f は、 $a_f = 0.65 t$ とした。

(2) 解析結果

試験体の板厚効果について検討するため、板厚 10 mm, 22 mm, 40 mm の曲げを受けるリブ十字形隅肉溶接継手の空気中での解析結果を Fig. 14 に示す¹¹⁾。この図は、試験体の板厚効果について示したものである。板

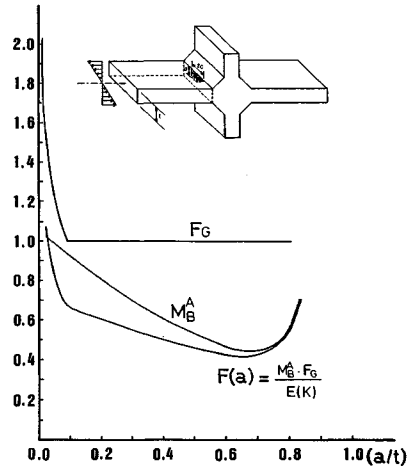


Fig. 13 Correction factors for semi-elliptical surface crack emanating from weld toe of stiffener specimen.

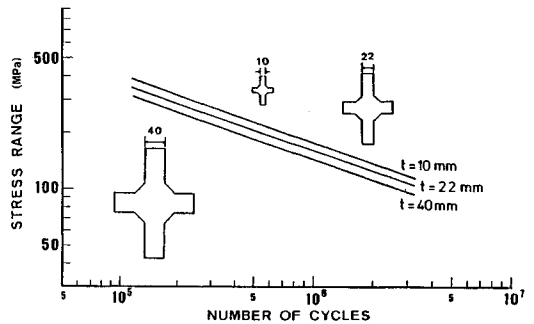


Fig. 14 Effect of plate thickness of stiffener specimens in bending tested in air.

厚 10 mm に対して 22 mm では進展寿命が約 24 % 減少しており、40 mm では進展寿命が約 44 % 減少している。また、UKDOE では、鋼管継手以外の基礎継手では、板厚 22 mm を基準として板厚効果を考慮するように規定されている。リブ十字形隅肉溶接継手に対しては、板厚が 40 mm の場合、22 mm に比べて疲れ寿命 N_f を約 36 % 短くするように規定されているが、本解析結果では、進展寿命 N_p は約 26 % 短くなった。

また、板厚 10 mm と 40 mm の空気中および腐食環境下での試験体に対する解析結果を Fig. 15 に示す。また、解析値と比較するため、疲れ試験結果も示した。本研究で行った塩水中の試験結果に対して、解析値はやや安全側の評価をしているものの、試験結果とよく一致している。しかし、空気中の試験結果に対しては、解析値はかなり安全側となっており、試験結果に比べて約 1/4 の寿命を与えている。これは、本解析が疲れ寿命 N_f のうち N_p のみを対象としており、初期亀裂長さまでの N_c を考慮していないことや、材料定数 C と亀裂形状 a/c に

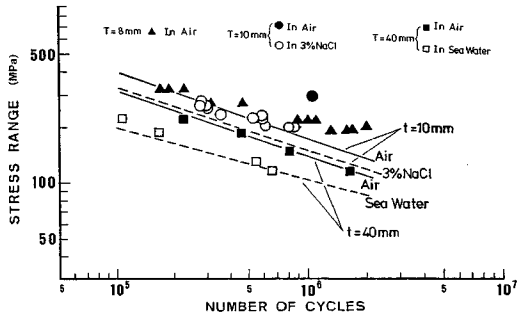


Fig. 15 Comparison between test results and computed fatigue crack propagation life of stiffener specimens in bending.

対して試験結果の平均値を与えていること、などが影響していると考えられる。板厚 8 mm の試験結果に対して、板厚 10 mm の解析結果は、低応力レベルにおいてやや安全側の評価を与えているが、試験結果とよく一致している。板厚 40 mm の場合、空気中、塩水中とも解析値と試験結果は、比較的良好一致している。

6. 結 論

本研究では、塩水中と空気中において、SM 50 A, SM 58, HT 80 の 3 種類の構造用鋼の亀裂進展速度の測定、SMA 50 A リブ十字形隅肉溶接継手の片振り曲げ疲れ試験を行い、疲れ寿命に及ばず腐食効果について検討した。さらに、曲げを受けるリブ十字形隅肉溶接継手の疲れ寿命を、破壊力学的手法により解析し実験結果と比較した。その結果をまとめると、次のようになる。

(1) SM 50 A の塩水中の亀裂進展速度は、1 Hz の繰返し速度で SM 50 A の空気中と比べて約 1.5~1.7 倍速かった。また、SM 58, HT 80 の塩水中の亀裂進展速度は、 $\Delta K \leq 18.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ では空気中に比べて約 1.5 倍速いが、それ以上では空気中と同程度か若干遅くなった。

(2) 曲げを受けるリブ十字形隅肉溶接継手の塩水中の疲れ寿命は、 $\Delta\sigma = 300 \text{ MPa}$ 付近で空気中の疲れ寿命の約 1/4 となった。この原因として、腐食ピットの形成による疲れ亀裂発生促進、(1) で示した疲れ亀裂進展速度の増加が考えられる。

(3) FEM 解析により、曲げを受けるリブ十字形隅肉溶接継手の溶接止端部の継手表面から 0.05 mm の点での応力集中係数は、 $\rho = 0.0$ で 2.09、 $\rho = 1.2 \text{ mm}$ で 1.61、 $\rho = 2.0 \text{ mm}$ で 1.43 となり、 ρ が大きくなるほど応力集中係数は小さくなった。板表面から 0.5 mm 以上入った位置では ρ による差は小さい。

(4) また、 $\theta = 45^\circ$ 、 $\rho = 0.0$ で $t = 10 \text{ mm}$, 22 mm, 40 mm の 3 ケースについて溶接止端部近傍の応力分布

を求め、疲れ寿命に及ばず試験体の板厚効果を解析的に評価した。

(5) またこの結果を用いて、破壊力学的手法により、曲げを受けるリブ十字形隅肉溶接継手の疲れ亀裂進展寿命解析を行った。空気中の試験結果に対して、解析値は約 1/4 の寿命を与え、安全側の評価を与えた。塩水中の試験結果は、解析値とよく一致した。

謝 辞：本研究の一部は、文部省科学研究助成金(一般 C) の補助金を受けて行った。本論文をまとめるにあたり、名古屋大学大学院生 三ツ木幸子、石黒幸文の両氏には大変お世話になった。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) ASTM: Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above 10^{-8} m/cycle, ASTM E 647-82, 1982.
- 2) 鉄鋼の海洋環境共通試験とその解析, 第 2 回シンポジウム前刷集, pp.87~110, 1985.
- 3) Yamada, K.: Fatigue Crack Growth Rates of Structural Steels under Constant and Variable Amplitude Block Loading, JSCE Structural Eng. Vol. 2, October, 1985.
- 4) Van Leeuwen, J.L., De Back, J. and Vaessen, G.H.G.: Constant Amplitude Fatigue Tests on Welded Steel Joints Performed in Air and in Sea Water, SMS No. 2.1, 1981.
- 5) Haeyer, R.D. and Bragard, A.: Some Experiments on the Possible Improvement of Fatigue Life of Welded Joints by TIG-Dressing, SMS No. 9.3, 1981.
- 6) 西田: 応力集中, 森北出版, 1973.
- 7) 牧野: 付加物溶接継手に発生する疲労き裂の破壊力学的考察, 名古屋大学土木工学科修士論文, 1976.
- 8) JSSC 疲労小委員会: 溶接継手の止端研削による疲れ強さ向上法: JSSC, Vol. 12, No. 126, 1976.
- 9) Booth, G.S.: The Influence of Simulated North Sea Environment Conditions on the Constant Amplitude Fatigue Strength of Welded Joint, OTC-3420, 1979.
- 10) Peterson, R.E.: Stress Concentration Design Factor, John Wiley & Sons, Inc., 1953.
- 11) 山田・Hirt, M.A.: 破壊力学を応用したパラメトリックな疲労寿命解析, 土木学会論文報告集, 第 319 号, 1982.3.
- 12) 山田・牧野・菊池: 横リブ十字隅肉溶接止端部に発生する疲労き裂の解析, 土木学会論文報告集, 第 292 号.
- 13) Raju, J.S. and Newman, J. C., Jr.: Engng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 817~829, 1979.
- 14) Albrecht, P. and Yamada, K.: Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Journal of the Structural Division, Proc. of ASCE, Feb. 1977.
- 15) DnV: Rules for the Design, Construction and Installation of Offshore Structures, 1977.
- 16) 左高: 溶接継手の塩水中での疲れ試験と寿命解析, 名古

屋大学工学部土木工学科修士論文, 1986.

Structures, Tapir, 1985.

17) Almar-Naess, ed. : Fatigue Handbook, Offshore Steel

(1987. 8. 21・受付)
