腐食環境下での疲労き裂成長速度に及ぼす応力上昇時間、 保持時間、下降時間効果の定量的評価†

横堀 寿光* 千葉 登** 山田 哲也***
小 澄 智一**** 横堀 武夫*****

Quantitative Estimation of the Effect of Stress Rising, Holding and Descending Time on Fatigue Crack Growth Rate under Corrosion Environment

by

Toshimitsu YOKOBORI Jr.*, Noboru CHIBA**, Tetsuya YAMADA***

Tomokazu KOSUMI**** and Takeo YOKOBORI*****

The corrosion fatigue tests were carried out for Cr-Mo steel (SCM440) by varying the stress rising time (t_R), holding time (t_H) and descending time (t_D). In the present paper, for the case of symmetrical stress wave ($t_R = t_H$), the constitutive equation of corrosion fatigue crack growth rate, $da/dN|_{CF}$, was derived explicitly in terms of t_R and t_H as follows:

$$\frac{da}{dN} \Big|_{CF} = D \frac{da}{dN} \Big|_{air}, \quad D = \frac{1}{1 - d t_R^e t_H^f} \Delta K^b \exp[a(\ln \Delta K)^2 + c] \quad (1)$$

where $da/dN|_{air}$ is the fatigue crack growth rate in air, ΔK is the range of stress intensity factor, a , b , c , e , and f are constants. The acceleration coefficient with holding time $D(=[D]_{t_H})$ is this equation was derived by the following method; First, the acceleration coefficient under the condition without holding time, $[D]_{t_H=0}$ was obtained as:

$$[D]_{t_H=0} = a(\ln \Delta K)^2 + b \ln \Delta K + c \quad (2)$$

Next, under the condition with holding time, the holding time effect was estimated by the following equation,

$$\frac{[D]_{t_H} - [D]_{t_H=0}}{[D]_{t_H}} = d t_R^e t_H^f \quad (3)$$

The experimental results of corrosion fatigue crack growth rate under various stress rising and holding time conditions were found to be well expressed by eq.(1). On the other hand, this equation does not satisfy the critical condition that da/dN should be proportional to $1/t_H$ for $t_H \rightarrow \infty$, which is characteristics of stress corrosion cracking. Thus a more satisfied constitutive equation was derived as the equation of the following type: $da/dN = F_0(\Delta K, t_R, 2t_R + t_H)$. From this equation, it can be found that the corrosion fatigue crack growth rate is affected by $f = 1/(2t_R + t_H)$ which concerns the time dependent effect and t_R which concerns the fatigue effect under the symmetrical stress wave condition.

Furthermore, it was deduced that the mechanism of the t_R process is controlled by the fatigue effect coupled with the time dependent effect controlling the t_H process, while the t_D process is controlled mainly by the time dependent effect although it includes some fatigue effect.

Key words: Constitutive equation, Corrosion fatigue crack growth rate, Stress rising time, Stress descending time, Stress hold time

1 緒 言

一般構造用鋼，クロム・モリブデン鋼（SCM440種）において，著者等は，負荷応力上昇時間 t_R ，下降時間 t_D が等しい対称負荷応力条件の下での腐食疲

勞き裂成長速度， da/dN によぼす t_R ， t_H 効果（ t_H は負荷応力保持時間）について，系統的な実験を行い，その特性の相違点と機構の相違について明らかにしてきた^{1)~3)}．さらに著者等は，腐食疲労き裂成長速度 da

† 原稿受理 昭和62年11月9日 Received Nov. 9, 1987

* 正会員 東北大学工学部 仙台市荒巻字青葉, Department of Mechanical Engineering II, Tohoku University, Aoba, Aramaki-aza, Sendai

** 日立製作所(株) 日立市幸町, Hitachi Ltd., Saiwai-cho, Hitachi

*** 三菱重工業(株) 長崎市飽ノ浦町, Mitsubishi Heavy Industrial Ltd., Awanoura-cho, Nagasaki

**** 日本電装(株) 刈谷市昭和町, Nihon Denso Ltd., Showa-cho, Kariya

***** 正会員 東海大学 仙台市青山, Tokai University, Aoyama, Sendai

$/dN$ に及ぼす t_R , t_H 効果についての定式化を da/dN が応力拡大係数に対して一定の値となるプラトー領域について行った。^{(2),(3)} しかし疲労寿命を評価するには, t_R , t_H のみならず, ΔK を含んだ定式化が必要である。そこで, 本論文では, 著者等の実験結果をもとにして, 腐食疲労き裂成長速度 $da/dN|_{CF}$ を t_R , t_H , ΔK の関数として定式化した。また, t_D 効果については, 著者らは, さきに, t_H を種々に変化させた時, $da/dN|_{CF}$ におよぼす t_D 効果が, どのように変化するかを実験にて調べた。本論文では, 応力下降時間 t_D 効果についても, さらに詳細な実験を行い, 腐食疲労き裂成長速度 $da/dN|_{CF}$ におよぼす t_R , t_H , t_D 効果について, それぞれ独立変数として評価できる形にまとめた。

2 供試材・試験片・実験装置・方法

供試材, 試験片形状, 実験装置, 方法は, 著者等の前の報告^{(2),(3)}と同様である。供試材の化学成分を Table I に示す。静的機械的性質を Table II に示す。A 材は, 著者等の前の報告^{(2),(3)}にて使用した材料であり, 熱処理条件は, ソルトバスにて 850°C, 10 分保持後, 油焼入れし, その後 520°C, 60 分保持後水中焼もどしを行ったものである。本材料を用いた実験結果をもとにして, t_R , t_H , ΔK の関数として腐食疲労き裂成長速度の式を導いた。B 材は, 真空電気炉にて 830°C, 60 分保持後油焼入れし, その後 560°C, 90 分保持後水中焼もどしを行ったものであり, 熱処理条件が若干異

Table I. Chemical composition (wt %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.38	0.34	0.84	0.018	0.004	1.07	0.07

Table II. Tensile properties.

	MPa		%	
	Yield stress	U. T. S.	Elongation	Reduction in area
A	1138	1186	11.36	36.99
B	1037	1099	19.25	35.25

Table III. Experimental condition (B material).

Moment (Nm)	Stress Ratio R	Rising Time t_R (s)	Descend- ing Time t_D (s)	Hold Time t_H (s)	Frequency f (Hz)	Load	t_R/t_D
1	0.16	3	3	0	1.66×10^{-1}		1
2		4.5	4.5		1.11×10^{-1}		
3		7.5	7.5		6.67×10^{-2}		
4		9.75	9.75		5.13×10^{-2}		
5		15	15		3.33×10^{-2}		
6	0.16	4.5	3	0	1.33×10^{-1}		1.5
7		3	4.5		1.11×10^{-1}		0.66
8		4.5	10.5		6.67×10^{-2}		0.43
9		10.5	4.5		5.13×10^{-2}		2.76
10		15	4.5		5.13×10^{-2}		3.33
11		3	3	11	5.88×10^{-2}		1

なることに起因して, A 材に比べて降伏応力が低く, 伸びが大きくなっている。本材料を用いて, Table III に示す腐食疲労実験を行い, 疲労き裂成長速度の t_R , t_H , t_D 特性を比較し, その効果を調べた。実験は切欠き (長さ 2 mm, 先端半径 0.3 mm) を等価き裂とした時の初期応力拡大係数 K_{max} が 38.6 MPam^{1/2} であり, 応力腐食割れき裂成長の下限界値 K_{ISCC} = 36.4 MPam^{1/2} より大きい, $K_{max} > K_{ISCC}$ の条件にて行った。ここに $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ であり, K 値の計算は著者等の前の報告と同様の方法で行った。実験環境は 3.5 % NaCl 水溶液 (常温) である。

3 実験結果と考察

3・1 対称応力波形 ($t_R = t_D$) における腐食疲労き裂成長速度の t_R , t_H , ΔK による定式化 (A 材)

腐食疲労き裂成長速度 $da/dN|_{CF}$ を空気中の疲労き裂成長速度 $da/dN|_{air}$ に加速係数 D をかけた(1)式で表すことにする。

$$da/dN|_{CF} = D da/dN|_{air} \quad (1)$$

D は材料と環境の組合せ, t_R , t_H , ΔK によって変化する。 $da/dN|_{air}$ は, Fig. 1 に示すように, 同じく実線で示した正弦応力波形の腐食疲労き裂成長速度の繰返し速度 (f) 特性と定性的には, ほぼ類似した特性を示し, 空気中でも, 若干腐食反応効果が存在することが示唆される。 $da/dN|_{air}$ の f 特性は高繰返し速度域で式(2)で表わされる。

Fig. 1. The relation between corrosion fatigue crack growth rate and frequency.

$$da/dN|_{air} \approx 1/f^{0.234} \quad (2)$$

対称応力波形 ($t_R = t_D = 0.8s, 4.5s, 15.0s$) において, 保持時間 t_H をそれぞれ変化させた著者等の腐食疲労き裂成長速度の実験結果と本実験で行った, 正弦応力波形の空気中での実験結果から D をもとめ, ΔK に対してグラフに示したものを Fig. 2~Fig. 4 に示す。本結果から, 環境効果によるき裂成長速度の加速率 D は, t_R が長いほど大きく, 各 t_R 値においては,

Fig. 2. The relations between the acceleration factor and ΔK as affected by environment with parameter of $t_H (t_R = t_D = 0.8 \text{ s})$.

Fig. 4. The relations between the acceleration factor and ΔK as affected by environment with parameter of $t_H (t_R = t_D = 15 \text{ s})$.

Fig. 3. The relations between the acceleration factor and ΔK as affected by environment with parameter of $t_H (t_R = t_D = 4.5 \text{ s})$.

t_H が長いほど大きくなり、 ΔK の増加とともに減少することがわかる。保持時間 t_H を有する場合の加速率 D を $[D]_{t_H}$ 、 t_H を有さない場合（正弦応力波形）のそれを $[D]_{t_H=0}$ とする。Fig. 2～Fig. 4 に示す $[D]_{t_H=0}$ の実験結果を最小自乗法を用いて式(3)で近似すると係数 a , b , c は式(4)～式(6)となる。

$$\ln[D]_{t_H=0} = a(\ln \Delta K)^2 + b(\ln \Delta K) + c \quad (3a)$$

$$[D]_{t_H=0} = \Delta K^b \exp\{a(\ln \Delta K)^2 + c\} \quad (3b)$$

$$a = -3.054 - 0.143 t_R \quad (4)$$

$$b = 22.245 + 1.093 t_R \quad (5)$$

$$c = -39.882 - 2.043 t_R \quad (6)$$

図中の $t_H = 0 \text{ s}$ の実線は本近似式によるものである。つぎに保持時間を有する場合の加速率 $[D]_{t_H}$ をもとめる。 $[D]_{t_H}$ から式(3)～式(6)によってもとめた $t_H = 0 \text{ s}$ の

D 値である $[D]_{t_H=0}$ を差し引いた、 t_H のみの効果をあらわす成分と考えられるパラメータ $([D]_{t_H} - [D]_{t_H=0}) / [D]_{t_H}$ を Fig. 2～Fig. 4 の実験結果から求め、 t_H に対してグラフに示したものを Fig. 5 に示す。本結果から最小自乗法によって近似式をもとめると式(7)となる。Fig. 5 の実線は式(7)によるものである。

$$\frac{[D]_{t_H} - [D]_{t_H=0}}{[D]_{t_H}} = d t_R^e t_H^f \quad (7)$$

ただし、 $d = 7.796 \times 10^{-2}$, $e = -0.189$, $f = 0.460$ である。式(3)～式(7)より $[D]_{t_H}$ は式(8)にて表される。

$$[D]_{t_H} = \frac{1}{1 - d t_R^e t_H^f} \Delta K^b \exp\{a(\ln \Delta K)^2 + c\} \quad (8)$$

したがって、腐食疲労き裂成長速度は式(8)を用いて式(1)で表される。Fig. 2～Fig. 4 の実験結果から直接もとめた $[D]_{t_H}$ を D_{ex} 、式(8)よりもとめた $[D]_{t_H}$ を $[D]_a$ としてグラフに示すと Fig. 6 のようになる。本結果から式(8)は、実験結果を精度よく評価していることがわかる。ところで、 $t_H \rightarrow \infty$ においては、応力腐食割れの特性である da/dN が f^{-1} ($f = 1/(2t_R + t_H)$) に比例す

Fig. 5. The estimation of the effect of hold time with parameter of $t_R (t_H = t_D)$.

Fig. 6. The comparison of D_a by equation (8) with D_{ex} by experimental data.

る形となる必要があるが、式(8)はそのような形になっていない。すなわち、本実験式には、 t_H 特性において $t_H \rightarrow \infty$ に近づく t_H の大きな領域において、適用範囲が存在する。そこで、 $t_H=0$ の腐食疲労き裂成長速度の t_R 特性はもとより、 t_R 一定のもとの t_H 特性を $t_H \rightarrow \infty$ まで含めて満足する構成方程式として式(9)を導いた。³⁾

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_{CF} = A \left(\frac{2t_R + t_H}{t_0} \right)^{\log_{10}[c - \alpha(2t_R + t_H)]} \quad (9)$$

ただし、 $c > \alpha > 1$ の定数である。また A は応力拡大係数幅値の関数である。実験結果と適合するように c , α の値を定めることは容易ではない。その意味において式(8)による方法の方は、適用範囲を定めるかぎりにおいて、容易にして精度よい評価と考えられる。しかしながら式(9)より、少なくとも腐食疲労き裂成長速度 $da/dN|_{CF}$ の t_R , t_H 依存性は、一般的な形として式(10)の形で表されることになる。³⁾

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_{CF} = A F_0 (\Delta K, t_R, 2t_R + t_H) \quad (10)$$

ただし、 F_0 は ΔK , t_R , $2t_R + t_H = 1/f$ の関数である。式(10)は、 $f = 1/(2t_R + t_H)$ とした応力上昇、保持、下降の全過程に共通してあらわれる効果と t_R で表される応力変化過程に現れる効果の二つの効果によって腐食疲労き裂成長速度が律速されることを示している。前者を時間依存機構、後者を繰返し依存機構（疲労効果）と考えることによって、腐食疲労き裂成長速度に及ぼす応力波形効果が物理的に明確に意味づけられ、著者の一部等の実験結果と確率過程論による考察から導いた理論³⁾と一致する。

3・2 腐食疲労き裂成長速度 da/dN に及ぼす応力上昇時間 t_R 、保持時間 t_H 、下降時間 t_D 特性の比較とその効果

Table III に示した実験条件に従って B 材について腐食疲労き裂成長速度 da/dN の t_R , t_H , t_D 特性を調べた結果を Fig. 7 に示す。本結果より、 $da/dN|_{CF}$

Fig. 7. The relations between da/dN and frequency with parameter of t_R , t_H , t_D (B Material).

は、 t_D を一定にして t_R を増加させると、疲労の效果に時間依存効果が相乗されて加速されるが、 t_H , t_D 特性は、本実験の t_H , t_D の範囲では、 da/dN にあまり影響を与えず、かつ両者とも類似の特性を示す。また対称応力波形条件下での $da/dN|_{CF}$ は、ほぼ t_D 特性と一致し、かなり t_D 効果に律速される。ところが、Fig. 8 に示す降伏応力の高い A 材の実験結果においては、 $da/dN|_{CF}$ の t_R , t_H , t_D 特性は B 材とはほぼ同じであるが、対称応力波形条件は、ほぼ t_R 特性と一致して逆に t_R に律速されている。この点が B 材 (Fig. 7) の場合と対照的である。以上の結果から、 t_R 過程と t_D 過程は、物理的機構が若干異なっており、 t_D 過程は、時間依存機構に従う t_H 過程に類似していることから、応力変動に伴う疲労の効果が存在するものの主として時間依存機構に律速されと考えられる。また B 材は降伏応力が低いことから塑性変形による腐食反応活性点が増加して、時間依存機構（応力腐食割れ機構）の影響を受けやすい。一方腐食反応によって生じる水素原子は、転位の運動を拘束する効果を有していることから、塑性変形機構（ストライエーション機構）による不活性環境下での疲労き裂成長速度を抑制すると考えられる。これが対称応力波形の腐食疲労き裂成長速度が、降伏応力の低い B 材において、疲労の効果をうける t_R 効果ではなく、腐食反応による時間依存効果をうける t_D 効果に影響された原因と思われる。したがって不活性環境下での疲労き裂成長

Fig. 8. The relation between da/dN and frequency with parameter of t_R , t_D (A Material).

速度がマイクロラック核生成機構等⁷⁾、ストライエーション機構とは別の機構に従う時は、 t_R 効果が対称応力波形の繰返し速度特性に対して大きいと考えられる。Fig. 8 に示した A 材の結果は、この機構によるものと考えられる。

3・3 腐食疲労き裂成長速度の単一破壊力学パラメータ評価

河合等は腐食疲労き裂成長速度 $da/dN|_{CF}$ におよぼす負荷応力波形効果、すなわち D を式(11)、式(12)によって評価している。^{8),9)}

$$P_1 = \frac{\Delta K^m}{T_1} \quad (11)$$

$$P_2 = \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\gamma} \frac{\Delta K^m}{T_1} \quad (12)$$

ただし、 T_1 : 応力上昇時間、 T : 繰返し応力の周期、 γ , m : 材料定数である。式(11)は、 $da/dN|_{CF}$ が応力上昇時間 t_R のみに律速されると考えたパラメータであり、式(12)は、応力保持時間 t_H 、下降時間 t_D が $da/dN|_{CF}$ に減速効果を生じるとしたパラメータである。本実験で得た $t_H=0$ s で、 t_R , t_D の異なる腐食疲労き裂成長速度 $da/dN|_{CF}$ の加速係数 D を P_1 で評価したものを Fig. 9 に示す。本結果から、 P_1 が小さい時、(ΔK が小さいとき) $da/dN|_{CF}$ の対称応力波形の特性がほぼ t_D 特性に一致して t_D に律速されることに起因して、実験結果のばらつきが大きくなるが全体としてほぼ一つのパンドにおさまる。しかし、 t_D に $da/dN|_{CF}$ の減速効果があるとした P_2 により評価すると、本実験の t_D 特性に顕著な減速効果がないことから、Fig. 10 に示すように、実験結果のばらつきは、 P_1 による評価に比べて大きくなる。また t_H 効果は、A 材の実験結果からわかるように、 t_H が大きくなるにつれて、き裂成長速度が加速されるため、Fig. 11, 12 に示すように加速係数は P_1 , P_2 のいずれによっても実験結果をよく評価できない。したがって正確な腐食疲

Fig. 9. The relations between the acceleration factor D and $P_1 (= \frac{\Delta K^{3.04}}{T_1})$ as affected by t_R , t_D (B material).

Fig. 10. The relations between the acceleration factor D and $P_2 (= (\frac{T}{T_1})^{\gamma} \frac{\Delta K^{3.04}}{T_1})$ as affected by t_R , t_D (B material).

Fig. 11. The relations between the acceleration factor D and P_1 as affected by t_H (A material).

Fig. 12. The relations between the acceleration factor D and P_2 as affected by t_H (A material).

労き裂成長速度の構成方程式を得るには、式(8)、式(9)を導いたアプローチが必要であろう。また試験片にストレインゲージを貼ることにより荷重変位曲線を求めた結果、この曲線に明確なコンプライアンスの変化はみられず、本実験は、くさび効果等によるき裂の開口は生じていないことがわかった。

本論文では一般構造用鋼、クロムモリブデン鋼 (SCM440) の腐食疲労き裂成長速度 $da/dN|_{CF}$ の t_R , t_H 依存性について系統的にしらべ、構成方程式を導

いた。従来の研究では, t_R , t_H , t_D 等により, da/dN が加速されるか, 減速されるかという議論が多く, 系統的にその依存性をしらべて構成方程式としてもとめた試みは少ない。したがって本論文での方法と, そこで得られた結果から, 材料あるいは腐食環境によって, 定数は異なってくるものの, t_R , t_H , t_D 効果を夫々独立に評価できる一つの構成方程式を導きうるものと思われる。

4 結 論

一般構造用鋼, クロムモリブデン鋼 (SCM440 種) を用いて腐食疲労実験を行い次の結論を得た。

(1) 応力上昇時間 t_R と下降時間 t_D が等しい対称応力波形における腐食疲労き裂成長速度 $da/dN|_{CF}$ の t_R , t_H 依存性は次式で与えられる。

$$\frac{da}{dN} \Big|_{CF} = \frac{1}{1 - dt_R^a t_H^b} \Delta K^b \exp[a(\ln \Delta K)^2 + c]$$

$$\text{ただし, } a = -3.054 - 0.143 t_R, \quad b = 22.245 + 1.093 t_R \\ c = -39.882 - 2.043 t_R$$

(2) 応力保持時間 $t_H = 0s$ から $t_H \rightarrow \infty$ にわたる t_R , t_H 特性を表す da/dN の構成方程式は次式に示す関数で与えられる。

$$\frac{da}{dN} \Big|_{CF} = A F_0(\Delta K, t_R, 2t_R + t_H)$$

ただし, A は ΔK の関数である。

本式は腐食疲労き裂成長速度が, $f = 1/(2t_R + t_H)$ なる応力上昇, 保持, 下降過程に共通して, 現れる時間依存性機構と, t_R で表される応力変化過程に, 現れる繰返し依存機構 (疲労効果) の二つの効果によって律速されることを示している。

(3) t_R 過程と t_D 過程は機構的に異なっており, t_D 過程は, 応力変化効果 (疲労効果) は存在するものの, 時間依存機構の影響を強くうけ, t_H 特性と類似した特性を示す。それに対して, t_R 過程は, 応力変化効果 (疲労効果) と時間依存効果が混合した過程と考えられる。

(4) $p_1 = \Delta K^m / T_1$, $p_2 = (T / T_1)^n (\Delta K^m / T_1)$ のパラメータだけでは, 必ずしも腐食疲労き裂成長速度を正確に評価できない。

(昭和62年6月23日 第4回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 横堀武夫, 桑野博喜, 滝沢英樹, 日本機械学会論文集, A-47, 689 (1981).
- 2) 横堀寿光, 横堀武夫, 高須展夫, 日本機械学会論文集, A-52, 1232 (1986).
- 3) 横堀寿光, 横堀武夫, 小澄智一, 高須展夫, 日本機械学会論文集, A-53, 1541 (1987).
- 4) 横堀寿光, 小澄智一, 千葉 登, 山田哲也, 横堀武夫, 日本機械学会論文集, 54, 513 (1985).
- 5) 大谷南海男, 第23回材料強度と破壊国内総合シンポジウム論文集, 17 (1987).
- 6) 横堀武夫, 横堀寿光, 日本金属学会誌, 42, 1, 88 (1978).
- 7) T. Yokobori, Physics of strength and Plasticity, A. S. Argon E. d MIT Press, 327 (1969).
- 8) 河合末男, 鯉渕興二, 日本機械学会論文集, 44, 382 (1978).
- 9) 河合末男, 鯉渕興二, 材料, 27, 967 (1978).