腐食疲労き裂成長速度と腐食疲労破壊靱性値に及ぼす 応力上昇時間, 保持時間, 下降時間効果*

横堀 寿光*¹ 小 澄 智 一*², 千 葉 登*³
山 田 哲 也*⁴, 横 堀 武 夫*⁵

Effects of Stress Rising Time, Descending Time and Hold Time on Corrosion Fatigue Crack Growth Rate and Corrosion Fatigue Fracture Toughness

Toshimitsu YOKOBORI, Tomokazu KOSUMI, Noboru CHIBA
Tetsuya YAMADA, and Takeo YOKOBORI

The effect of stress wave form, that is, fast-slow ($t_R < t_D$), slow-fast ($t_R > t_D$), symmetrical ($t_R = t_D$) wave form on corrosion fatigue crack growth rate was studied, where t_R is rising time and t_D is descending time. When t_R is smaller than $t_D + t_H$, t_D is not so effective on crack growth rate and t_R is much more of a controlling factor. Where t_H is stress holding time, corrosion fatigue fracture toughness is constant independent of t_R , t_H and t_D , and takes the same value of that in air, while corrosion fatigue crack growth rate is remarkably effected by t_R and t_H . So, the effect of stress wave form motivates local corrosion dissolution at the crack tip and accelates crack growth rate, but does not affect material damage so much.

Key Words: Corrosion Fatigue, Rising Time, Descending Time, Hold Time, Fatigue Fracture Toughness

1. 緒 言

3.5% NaCl 水溶液のクロムモリブデン鋼における, 腐食疲労き裂成長速度に及ぼす応力上昇時間 t_R , 応力保持時間 t_H 効果について, 著者らは t_R , t_H を系統的に変化させる実験を行い, その特性を明らかにした^{(1)~(4)}. ところで応力下降時間 t_D については, その影響が少ない場合や減速効果をもたらす場合などが指摘されているが^{(5)~(9)}, 種々の t_R , t_H における t_D 効果を系統的な特性としては論じられていない. 本論文では腐食疲労き裂成長速度に及ぼす t_D 効果を調べ, さらに腐食疲労破壊靱性値に及ぼす t_R , t_H , t_D 効果について検討した.

2. 供試材および実験方法

供試材, 実験方法は前報^{(1)~(4)(11)}と同様である. すなわち供試材は一般構造用鋼のクロムモリブデン鋼

(SCM 4 種) であり, その化学成分, 機械的性質を表 1, 表 2 に示す. 試験片は機械加工後, 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 分後保持後水焼もどしを行った. 実験に用いた試験片の形状を図 1 に示す. ノッチは熱処理後, 先端半径 0.3 mm, 長さ 2 mm に導入した. き裂長さの測定は, 環境容器越しに実体顕微鏡にて連続的に行った.

応力拡大係数は次式により求めた⁽¹⁰⁾.

$$K = \frac{6M\sqrt{a}Y}{BW^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$Y = \left\{ 1.99 - 2.47 \left(\frac{a}{W} \right) + 12.97 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 2317 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 24.8 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right\}$$

ただし, $a/W \leq 0.6$, M : 曲げモーメント, B : 試験片厚さ, W : 試験片幅, a : き裂長さである.

実験環境としては 3.5% NaCl 水溶液を用い, ポンプにより環境容器内に循環させた.

実験装置は図 2 に示すように応力上昇時間 t_R , 応力保持時間 t_H に加えて, さらに応力下降時間 t_D をも任意に制御できるように試作した片持はり式曲げ形の腐食疲労試験機を用いた. 負荷応力波形は, 繰返し速度 f を等しくした $t_R = 9.75$ s, $t_D = 9.75$ s の対称応力波形,

* 昭和 62 年 11 月 19 日 第 949 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 62 年 4 月 24 日.

*¹ 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉).

*² 正員, 日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町 1-1).

*³ 准員, (株) 日立製作所 (〒317 日立市幸町 3-1-1).

*⁴ 准員, 三菱重工業(株) 長崎研究所 (〒850-91 長崎市飽の浦町 1-1).

*⁵ 正員, 東海大学工学部 (〒982 仙台市青山 1-31-15).

$t_R=4.5$ s, $t_D=15$ s の fast-slow 応力波形, および $t_R=15$ s, $t_D=4.5$ s の flow-fast 応力波形に, 各々 t_H を 0 s から 186 s まで 5 段階にわたって変化させた. 実験条件を表 3 に示す.

3. 実験結果および考察

3・1 腐食疲労き裂成長曲線 図 3, 図 4, 図 5 は $t_R=t_D=9.75$ s の対称応力波形, $t_R=4.5$ s, $t_D=15$ s の fast-slow 応力波形, $t_R=15$ s, $t_D=4.5$ s の slow-fast 応力波形において, それぞれ応力保持時間 t_H を付加したときの腐食疲労き裂成長曲線である. 本結果より, き裂発生寿命に比べて破断寿命のほうが応力波形効果を受けることがわかる.

3・2 腐食疲労き裂成長速度に及ぼす t_R , t_H , t_D 効果

表 1 化学成分 (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.38	0.34	0.84	0.018	0.004	1.07	0.17

表 2 機械的性質

MPa		%	
Yield stress	U.T.S	Elongation	Reduction in area
1160	1280	10.52	34.27

図 1 試験片形状

$$R = \frac{M_{min.}}{M_{max.}}$$

t_R : Rising time

t_H : Hold time

t_D : Descending time

f : Frequency

$$f = \frac{1}{(t_R + t_H + t_D)}$$

図 2 負荷応力波形

表 3 実験条件

Moment (N·m)	Stress Ratio	Rising Time t_R (s)	Descend ing Time t_D (s)	Hold Time t_H (s)	Frequency (Hz)
Mmax.= 372.60	0.16	9.75	9.75	0	5.13×10^{-2}
				11.0	3.28×10^{-2}
				40.0	1.68×10^{-2}
				77.4	1.03×10^{-2}
				186.0	4.87×10^{-3}
Mmin.= 59.84		4.5	15	0	5.13×10^{-2}
				11.0	3.28×10^{-2}
				40.0	1.68×10^{-2}
				77.4	1.03×10^{-2}
				186.0	4.87×10^{-3}
	15	4.5	0	5.13×10^{-2}	
			11.0	3.28×10^{-2}	
			40.0	1.68×10^{-2}	
			77.4	1.03×10^{-2}	
				186.0	4.87×10^{-3}

図 3 腐食疲労き裂成長曲線

図 4 腐食疲労き裂成長曲線

図 5 腐食疲労き裂成長曲線

同じ繰返し速度で $t_R = t_D = 9.75$ s の対称応力波形, $t_R = 4.5$ s, $t_D = 15$ s の fast-slow 応力波形, $t_R = 15$ s, $t_D = 4.5$ s の slow-fast 応力波形にそれぞれ応力保持時間 t_H を 0 s から 186 s まで付加したときの腐食疲労き裂成長速度 da/dt と最大応力拡大係数 K_{max} との関係を図 6 に示す。本結果より, da/dt は応力波形の影響を受けることがわかる。著者らの一部は, t_R, t_H の効果について, $t_R = t_D$ の条件のもとで系統的な実験を行い, その効果を明らかにした⁽²⁾⁽³⁾。本論文では, t_D の効果について明らかにしていく。

図 7 は図 6 の結果の中から, $t_H = 0$ s で同じ繰返し速度の腐食疲労き裂成長速度 da/dN に及ぼす応力波形効果を示したものである。本結果より da/dN は slow-fast 応力波形条件が最も加速され, 対称応力波形条件, fast-slow 応力波形条件の順に減速される。図 8 は $t_H = 11$ s において, $t_R = 4.5$ s, $t_D = 15$ s の fast-slow 応力波形 (破線) と $t_R = 15$ s, $t_D = 4.5$ s の slow-fast 速度応力 (一点鎖線) の da/dN と ΔK の実験結果を示したものである。また図中には著者らの一部が, すで行った, $t_H = 11$ s における $t_R = t_D = 4.5$ s, $t_R = t_D = 15$ s の対称応力試験の実験結果を実線で示した。本結果から, t_R 値が等しければ, t_D 値が異なっても, その影響は小さく, ほぼ同じ da/dN の値となっている。ただし, $t_R = 15$ s, $t_D = 4.5$ s の slow-fast 応力波形

は, $t_R = t_D = 15$ s の対称応力波形に比べて, 若干加速されている。これについては, 後で検討する。図 9 は $t_H = 40$ s における同様の効果である。本結果からも, da/dN が ΔK に依存しないプラトー領域では, da/dN は t_D の影響を受けず, t_R によってほぼ律速されることがわかる。

da/dN が ΔK に依存せず, ほぼ一定となるプラトー領域 ($\Delta K = 46$ MPa $\sqrt{cm}$ 付近) において, $t_R = 4.5$ s, $t_D = 15$ s の fast-slow 応力波形, $t_R = 15$ s, $t_D = 4.5$ s の slow-fast 応力波形に, t_H を 0 s, 11 s, 40 s, 77.4 s, 186

図 6 t_R, t_H, t_D 変化に対する da/dt と K_{max} との関係

図 7 da/dN と ΔK との関係 ($t_H = 0$ s)

図 8 da/dN と ΔK との関係 ($t_H = 11$ s)

sと付加したときの da/dN の特性(t_H 特性)を図10に示す。著者らの一部によって行った⁽³⁾ $t_R=t_D$ の対称応力波形の結果を $t_H=0$ sの場合について、○印と実線で示し、各 t_R 値から t_H を付加したときの特性(t_H 特性)を点線で示した。本結果より、 $t_R=4.5$ s, $t_D=15$ sのfast-slow応力波形の t_H 特性は、同じ t_R 値の対称応力波形($t_R=t_D=4.5$ s)の t_H 特性と一致していることがわかる。また $t_R=15$ s, $t_D=4.5$ sのslow-fast応力波形の t_H 特性も、 $t_H \geq 40$ sの領域では同じ t_R 値の対称応力波形($t_R=t_D=15$ s)の t_H 特性と一致している。

図9 da/dN と ΔK との関係($t_H=40$ s)

しかし $t_H < 40$ sの領域では、対称応力波形($t_R=t_D=15$ s)の t_H 特性よりも加速している。これは図8に述べた結果と対応しており、この領域ではむしろ $(t_R+t_D)/2=9.75$ sの対称応力波形の t_H 特性と一致している。すなわち本実験の結果から $t_R < t_H+t_D$ を満足する、 t_R の占める割合が小さい応力波形条件のとき、同じ t_R 値を有する対称応力波形の t_H 特性と一致する。 $t_R \geq t_H+t_D$ を満足する、 t_R の占める割合が大きい応力波形条件のとき、 t_R と t_D の平均値、 $(t_R+t_D)/2$ の応力上昇時間を有する対称応力波形の t_H 特性に一致する、と考えられる。しかしこのような実験特性のメカニズムを明らかにするにはさらに系統的な実験が必要と思われる。

3.3 腐食疲労破壊靱性値 同じ繰返し速度 f における対称応力波形, fast-slow応力波形, slow-fast応力波形において、 t_H を0sから186sまで変化させたときの腐食疲労破壊靱性値の特性を図11に示す。また図中には空中における疲労破壊靱性値も示してある。これらの結果から、腐食疲労き裂成長速度が負荷応力波形の影響を受けるのに対し、腐食疲労破壊靱性値は負荷応力波形にほとんどよらずほぼ一定となり、また空中の疲労破壊靱性値とも一致することがわかる。このことより、負荷応力波形の相違による腐食疲労き裂成長速度の加速効果は、き裂先端近傍の局所的溶解作用に起因するもので、材料全体の損傷挙動にまで影響を及ぼすものではない、と考えられる。

3.4 応力上昇時間 t_R 効果, 応力保持時間 t_H 効果, 応力下降時間 t_D 効果 応力上昇時間 t_R の効果は前報⁽¹⁾で示したように、応力変動による疲労の効果と荷

図10 da/dN に及ぼす t_R, t_H, t_D の影響

図 11 腐食疲労破壊 I 性値に及ぼす t_r , t_H , t_D の影響

重負荷面積と関連した時間依存形効果 (SCC 効果) の相乗作用を受けるのに対し、応力保持時間、 t_H 効果は時間依存形効果のみである⁽¹¹⁾。また応力下降時間、 t_D 効果も応力変動による疲労の効果と時間依存効果の二つの効果が含まれると考えられる⁽¹¹⁾。しかしながら、図 10 に示す本実験結果からわかるように、 $t_r = t_D = 4.5$ s の対称応力波形条件から t_D のみを 15 s にした特性は、 t_H 特性 とほぼ等しくなる。したがって t_D 効果は、 t_r 効果に比べて、時間依存効果がより顕著であるといえる。

4. 結 論

3.5 % NaCl 水溶液中での構造用鋼のクロムモリブデン鋼の腐食疲労実験において、負荷応力波形効果 (対称応力波形, fast-slow 応力波形, slow-fast 応力波

形) を、応力保持時間 t_H を 0 s から 186 s, 繰返し速度 f を 5.13×10^{-2} Hz から 4.87×10^{-3} Hz まで変化させて調べ、次の結論を得た。

(1) 腐食疲労き裂成長速度に及ぼす応力下降時間の影響は小さく、非対称応力波形の応力保持時間特性は、同じ応力上昇時間を有する対称応力波形の応力保持時間特性にほぼ一致する。

(2) 腐食疲労破壊 I 性値は負荷応力波形の影響を受けず、ほぼ一定値をとり、空中の疲労破壊 I 性値とも一致する。したがって負荷応力波形の相違による腐食疲労き裂成長速度の加速効果は、き裂先端近傍の局所的溶解作用に律速されると考えられ、材料全体の損傷挙動にまで影響を及ぼすものではないことがわかる。

本研究において種々ご助言いただいた東北大学工学部・大原秀晴教授に謝意を表する。

文 献

- (1) Yokobori, T., Yokobori, A. T., Jr. and Takasu, N., *Proc. of the Fourth International Conf. of Mechanical Behaviour of Materials*, Stockholm, Sweden, 2 (1983), 967, Pergamon Press.
- (2) 横堀(寿)・横堀(武)・小澄・千葉・高須, 機論, 51-465, (昭 60), 1457.
- (3) 横堀(寿)・横堀(武)・高須, 機論, 52-477, A (昭 61), 1232.
- (4) Yokobori, A. T., Jr., Yokobori, T., Kosumi, T., and Takasu, N., *Int. Conf. on corrosion cracking*, salt lake city, U. S. A, proc. published by ASM, 1 (1985).
- (5) 河合・鯉淵, 材料, 27-301 (昭 53), 967.
- (6) 河合・鯉淵, 機論, 44-352 (昭 53), 1789.
- (7) Barsom, J. M., *Proc. Int. Conf. on Corrosion Fatigue*, NACE-2 (1972), 424.
- (8) Atkinson, J. D. and Lindley, T. C., *J Mech E*, (1977), 65.
- (9) Seilines, R. J. and Pellonx, R. M. *Metall. Trans*, 3 (1972), 2525.
- (10) Brown, W. F. and Srawly, J. F. *ASTM STP*, 410 (1969), 13.
- (11) 横堀(寿)・横堀(武)・小澄・高須, 機論, 53-492, A (昭 62), 1541.