腐食環境下の高強度鋼疲労き裂進展挙動に 及ぼす負荷履歴の影響†

中 島 正 貴* 加 藤 容 三** 飯 田 裕 一***

Effect of Loading History on Fatigue Crack Propagation Behavior of High Strength Steel in Corrosive Environment

by

Masaki NAKAJIMA

(Toyota Technical College, Toyota)

Yōzō KATŌ

(Faculty of Engineering, Gifu University, Gifu)

and Yūichi IIDA

(Mitsubishi Electric, Ltd., Nagoya)

The effects of loading history and corrosive environment on the retardation in crack growth were investigated in rotating bending. The material used was 200°C tempered SNCM439. Tests were made at two-step varying loading, $K_1 \rightarrow K_2$, in room air and in 1%NaCl solution. The stress intensity was estimated by $K = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} / 2$ for convenience sake, where $\sigma_{\max}$ is the stress amplitude and a is the crack length measured circumferentially on the surface.

The results obtained are as follows:

- (1) The number of retardation cycles was influenced by the environment, K_2 , and the intermediate treatment (ex. hydrogen charge) during the change in K from K_1 to K_2 .
- (2) The retardation crack length was determined by K_1 , irrespective of environment.
- (3) The relationship between the number of retardation cycles and a parameter of varying load, $(K_1 - K_2)/K_2$, was derived for each environment. The number of retardation cycles increased linearly with $(K_1 - K_2)/K_2$.
- (4) The crack propagation rate in retardation period decreased with an increase in K_1 and increased with an increase in K_2 .

(Received June 21, 1983)

キー・ワード：疲労き裂進展，負荷履歴，環境変動

1 緒 言

変動荷重下の疲労き裂進展挙動にみられる遅延現象が、き裂閉開口挙動を考慮することによってうまく説明されることは良く知られている。一方、こうした遅延現象に環境因子がどのような影響を与えるかについては、いまだ不明な点があるようである。筆者らは先に²⁾、腐食環境下において高強度鋼を用いた2段多重変動応力試験を行った。それによれば、2段多重重下では高応力側の繰返ししがき裂進展挙動を支配しており、低応力側ではき裂進展速度の減速を生じ、高応力の少数

回の繰返しは高応力側で加速現象を生じた。また、腐食環境下においても室温空気中におけるき裂進展挙動の傾向が保たれた。そこでの環境の影響は、き裂進展の加速傾向を促進し、減速傾向を弱めるという形で現れた。

こうした点をふまえて、従来、応力を制御することによって行われることの多かった変動荷重試験について、本研究では、応力拡大係数(K)の制御による2段2重疲労試験を、回転曲げによって行い、き裂進展挙動、とりわけ遅延挙動に及ぼす負荷履歴ならびに環境変動の影響について検討した。

2 実験方法

2・1 供試材料および試験機

供試材料は SNCM 439 でその化学組成を Table I

† 原稿受理 昭和58年6月21日

* 正 会 員 豊田工業高等専門学校 豊田市栄生町

** 正 会 員 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸

*** 三菱電機(株)名古屋製作所 名古屋市東区

Table I. Chemical composition (%).

C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	S
0.42	0.28	0.82	0.014	1.87	0.77	0.25	0.004

Table II. Mechanical properties.

0.2% proof stress MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Reduction of area %
1478	1874	10	43

Fig. 1. Dimensions of specimen.

Fig. 2. S-N diagram.

に示す。熱処理としては880℃より油焼入れ後、200℃で焼もどした。このときの機械的性質を Table II に示す。試験片は Fig. 1 に示す形状寸法に機械加工後、上記の熱処理を施した。試験片中央にはき裂発生源として、径 0.3 mm、深さ 0.2 mm の小穴が付してある。実験には繰返し速度 100 cpm の小野式回転曲げ疲労試験機を用いた。Fig. 2 に、この小穴付き試験片の室温空気中における繰返し速度 3 600 cpm での S-N 曲線を示す。疲労限度は約 150 MPa である。実験に先立ち、室温空気中にて予き裂を導入した。予き裂は応力を漸減しつつ導入し、そのアスペクト比が 0.2~0.3 であることから、小穴の影響を考慮して、その長さ (a_0 : 全長) は約 1 mm とした。

2.2 腐食環境および装置

腐食環境としては 1% NaCl 水溶液 (以下、塩水と呼ぶ) を用い、試験片直上より滴下した。水温は 25℃ で、循環して使用することとし、適宜、全液 (20 l)

を交換した。塩水中の試験では実験に先立ち、塩水中で約 72 時間の浸せきを行った。また、水素チャージは 1% NaCl 水溶液にて $i_{\text{cath}} = 3 \text{ mA/cm}^2$ の条件で、電流を約 144 時間印加した。

2.3 応力拡大係数制御下の疲労試験について

本研究では応力拡大係数 (K) を変動させることによる 2 段 2 重疲労試験を行っている。回転曲げ負荷を受ける表面き裂の K 値は不明であるので、便宜的に次式を用いた。

$$K = \sigma_{\text{max}} \sqrt{\pi a} / 2$$

ここで、 σ_{max} は応力振幅、 a は表面き裂長さである。小野式回転曲げ疲労試験機では、試験片にかかる応力 (σ) と荷重 (W) との間に次の関係がある。

$$\sigma = 16 W l / \pi d^3$$

ここで、 l は支点と荷重点の間の距離であり、 d は試験片直径である。この式を、先の K 式に代入し、 W について整理すると

$$W = K d^3 \sqrt{\pi} / 16 l \sqrt{a} / 2$$

となり、 K 値をあらかじめ設定すれば、 a を測定のために代入することによって、そのときのき裂長さに応じた W が求まり、 K 一定下の試験が可能となる。しかしながら、測定区間中のき裂の成長による K の増加は避けられないので、 K の増減幅を考慮して、設定値の -2% より実験を開始し、最終値が設定値の +2% の範囲に入るように、その K 値のき裂進展速度より逆算して測定区間を調節した。

Fig. 3 に K を変動させる場合の負荷プログラムを示す。実験は $K_1 \rightarrow K_2 (K_1 \geq K_2)$ で行い、最初のステップの K_1 による負荷を一次側とし、 K_2 による負荷を二次側とした。

Fig. 3. Loading program.

3 実験結果および考察

3.1 2 段 2 重疲労試験について

Fig. 4 は、塩水中および室温空気中の各 K 値における、 K 一定下の疲労き裂進展曲線である。図より明らかなように、塩水中および室温空気中におけるいずれのき裂進展曲線もほぼ直線的である。このことは、 K 値を一定として制御している以上、き裂長さと繰返し数の間には、ある一定の直線関係、すなわち一定の進展速度となることを意味しており、回転曲げを受ける表

Fig. 4. Crack propagation curves under fixed K .

Fig. 5. Indications of retardation.

面き裂について, 便宜的な式を用いて K 値を求めているにもかかわらず, 本研究の範囲では先の式による制御がほぼ可能であることを示している. また, 同じ K 値についてみると, 塩水中のき裂進展速度は室温空気中のそれと比べてより速いことがわかる. つぎに, 2 段 2 重疲労試験における繰返し数とき裂長さの関係の模式図を Fig. 5 に示す⁴⁾. ここで遅延現象を評価するためのパラメータとして, 遅延繰返し数 N_D と遅延き裂長さ a_D を導入し, これらを以下のように決めた. N_D は, K_2 による遅延終了後のき裂の伸びについて, 最終のデータ点よりデータ点を増しつつ直線回帰を行

Fig. 6. Crack propagation curves under two-step varying loading in 1% NaCl solution. ($K_1=45\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) Fig. 7. Crack propagation curves under two-step varying loading in 1% NaCl solution. ($K_1=15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

Fig. 8. Crack propagation curves under two-step varying loading in room air.

い, 最も相関の高い傾きで直線を引き, K_1 から K_2 への変動時のき裂長さとの交点の繰返し数より変動時の繰返し数を差引くことによって求めた. また, a_D は遅延の遷移領域において上述の傾きの直線とデータ点が分離する点のき裂長さより変動時のき裂長さを差引いたものとした.

Fig. 6 および 7 に 2 段 2 重下の塩水中におけるき裂進展曲線を示す. Fig. 6 では $K_1=45\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, Fig. 7 では $K_1=15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である. いずれの場合も K 変動後に遅延挙動が見られ, 同じ K_1 値に対しては K_2 値が小さくなるにしたがい遅延区間が増大する傾向にある. つづいて Fig. 8 に室温空気中における結果を示す. 塩水中における同じ変動条件のものと比べて遅延挙動がより著しいことがわかる. これらの結果をまとめたものを Table III に示す. 表より, K_1 から K_2 への変動条件が等しい場合, N_D は環境によって影響され塩水中で大きく減少することがわかる. さらに, K_1 が同じであれば, K_2 が小さくなるにつれ N_D が増加していることが知られる. なお, 室温空気中における $45 \rightarrow 9$, $15 \rightarrow 5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の変動条件では K_2 での繰返し数が 10^6 を超えてもき裂進展がなく, き裂は停止したものとみなした. a_D の値については, K_1 値によってほぼ決定されと考えられる. すなわち, $K_1=45$

Table III. Values of N_D and a_D in fixed environment.

$K_1 \rightarrow K_2$ MPa $\sqrt{m}$	In room air		In 1%NaCl solution	
	N_D	$a_D(mm)$	N_D	$a_D(mm)$
45 $\rightarrow$ 15	8.76×10^4	0.674	1.49×10^4	0.865
45 $\rightarrow$ 9	Crack arrest for 10^6		4.13×10^4	0.752
45 $\rightarrow$ 5	No experiment		8.71×10^4	0.602
15 $\rightarrow$ 9	0.37×10^4	0.140	0.17×10^4	0.111
15 $\rightarrow$ 5	Crack arrest for 10^6		0.40×10^4	0.120

MPa $\sqrt{m}$ の場合には $a_D \div 0.6 \sim 0.8$ mm, $K_1 = 15$ MPa $\sqrt{m}$ では $a_D \div 0.11 \sim 0.14$ mm となる。

3.2 環境変動に伴う遅延挙動について

Fig. 9 に $K_1 = K_2 = 15$ MPa $\sqrt{m}$ として、環境のみを変化させた場合の結果を示す。これは、環境が破壊の機構に影響することが知られている以上、力学的因子以外に遅延の原因となり得ることが予想され、本実験の範囲で環境のみによる遅延が起るか否かを確認しようとしたものである。結果は環境を変えた直後から、き裂進展がそれぞれの環境下における定常のそれに移行したことを示している。これより、環境変動に伴うと考えられた遷移現象は、後述する実験範囲の力学条

Fig. 9. Crack propagation curves in varying environment. ($K_1 = K_2 = 15$ MPa $\sqrt{m}$) Fig. 11. Crack propagation curves under two-step varying loading with the change of environment. (First environment: room air, $K_1 = 45$ MPa $\sqrt{m}$, $K_2 = 15$ MPa $\sqrt{m}$) Fig. 12. Crack propagation curves under two-step varying loading with the change of environment. (First environment: 1% NaCl solution, $K_1 = 45$ MPa $\sqrt{m}$, $K_2 = 15$ MPa $\sqrt{m}$)

Fig. 10. Fracture surfaces in varying environment.

件下 ($45 \rightarrow 15$ MPa $\sqrt{m}$ への変動) では問題とならないことが示唆された。続いて Fig. 10 に、この環境変動に伴う破面様相の変化を示す。図中の矢印はき裂の進展方向である。このフラクトグラフより、たとえば Fig. 10 (a) を例にとれば、塩水中から室温空气中へとという環境変動に対して、破面は粒界割れが大部分を占める領域から、ただちにストライエーション状パターンがほとんどを占める破面へと遷移域を経ることなく移行している。同様なことは、室温空气中から塩水中への環境変化の場合についても、Fig. 10 (b) に見られるとおりである。これらの結果は、いずれも Fig. 9 の結果と良く対応している。

以上の結果をふまえて、 $K_1 \rightarrow K_2$ を $45 \rightarrow 15$ MPa $\sqrt{m}$

と固定した場合の環境変動を伴う2段2重疲労試験の結果について述べる。まず一次環境を室温空气中とした場合の4条件に対するき裂進展曲線を Fig. 11 に示す。(a)は K 変動と同時に環境を塩水中とした場合である。図中の破線は、先の Fig. 6 (a)の結果で、塩水中での実験である。(b)は塩水中への変動に先だち、中間処理として1%NaCl 中へ72時間の浸せきを施した場合の結果である。(c)および(d)は中間処理として水素チャージを施し、二次環境をそれぞれ室温空气中、塩水中とした場合である。(a)についてみると、力学的因子が同じで一次環境の異なる破線の結果と比べて遅延区間は短縮済みである。破線の場合に遅延区間が伸びた理由として、一次環境も塩水中であることから、腐食生成物によるくさび効果等を考えることもできるが、原因は不明である。つぎに、二次環境が同じである(a)、(b)および(d)について注目すると、遅延挙動の傾向はほぼ同様であるが、水素チャージを行った場合には遅延区間で段状の進展が観察された。また、後述するように N_D も減少している。(c)の場合については、Fig. 8 (a)と比べて遅延区間が大幅に短縮されており、その後⁵⁾のき裂進展も速いようである。これは筆者らが先に報告した、チャージ後の室温空气中での実験においてき裂進展速度が上昇したという結果とも対応している。Fig. 12 は、一次環境を塩水中とした場合の結果である。(a)および(b)は二次環境を室温空气中としたもので、とくに(b)は中間処理として7日間乾燥空气中に放置している。(c)は中間処理として水素チャージを施し、二次環境を塩水中とした結果である。(b)の放置は、一次側の環境で吸蔵されたと考えられる水素を除去する目的で行われたものであるが、(a)と比較してもわかるように放置の影響は認められなかった。また、(a)図中の破線は一次環境が室温空气中である Fig. 8 (a)の結果である。一次環境が塩水中であることにより、遅延区間がわずかに短縮していることがわかる。(c)については、二次環境が同じである Fig. 11 の結果と比べて、遅延挙動の差はとくに認められなかった。

これまでの結果についてまとめたものを Table IV に示す。先の Table III の結果ともあわせて考えると、 N_D は K 変動の影響のみならず二次側の環境によって大きく支配され、中間処理によっても影響されることが知られる。とくに、本材料が高強度鋼であり、水素吸蔵が重要な環境因子と考えられることから、水素チャージの影響は N_D を短くする点で明らかである。先に述べたように、環境のみによる遅延は本実験の範囲では生じていないと考えられるが、一次側の環境は遅延の原因となる力学的因子との関係で、二次側の環境はほどではないが遅延挙動に影響しているようである。すなわち、一次側が不活性環境で二次側が活性環境な

Table IV. Values of N_D and a_D in varying environment.

Change of environment	N_D	$a_D(\text{mm})$
R. A. $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$ NaCl sol.	1.02×10^4	0.568
R. A. $\rightarrow$ Immersion $\rightarrow$ NaCl sol.	1.13×10^4	0.730
R. A. $\rightarrow$ H ₂ charge $\rightarrow$ R. A.	2.64×10^4	0.596
R. A. $\rightarrow$ H ₂ charge $\rightarrow$ NaCl sol.	0.90×10^4	0.650
NaCl sol. $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$ R. A.	5.98×10^4	0.535
NaCl sol. $\rightarrow$ Rest in D. A. $\rightarrow$ R. A.	5.78×10^4	0.520
NaCl sol. $\rightarrow$ H ₂ charge $\rightarrow$ NaCl sol.	0.94×10^4	0.540

R. A.; In room air D. A.; Dry air
NaCl sol.; In 1%NaCl solution

らば、遅延挙動は二次環境によって大きく影響されるため、一次環境の影響は現れてこないと考えられる。一方、逆の場合には二次環境がより不活性なため、一次環境の影響はわずかに明りょうとなり、Fig. 12 (a)に見られるように遅延区間を短縮するという形で現れるわけである。

a_D の値については先に、一次側の K 値によって決められてしまうとしたが、環境の影響をみるために一次側の環境別にそれぞれ a_D の値の平均をとると、一次環境が室温空气中では $a_D \approx 644 \mu\text{m}$ 、塩水中では $a_D \approx 636 \mu\text{m}$ となり環境による差はないと考えられた。さらに、 a_D と塑性域寸法との関係についてみると、計算上では塑性域寸法は $K=45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ に対して $r_p \approx 26 \mu\text{m}$ 、 $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ に対しては $r_p \approx 2.9 \mu\text{m}$ となる。平野らは⁶⁾、単一過大荷重負荷の場合に遅延き裂長さ a_D と塑性域寸法がほぼ一致したとしている。また、菊川らによれば、 K を減少させたときには K_{Op} が定常値に達するまでに、先の K 値に対応する塑性域寸法の約3倍程度の寸法を要するとしている。しかし、いずれにしてもここでの a_D は塑性域寸法の数十倍となり、非常に大きい値をとっている。便宜式より求めた K 値の問題、 a_D の求め方の問題等が考えられるがその原因は不明である。

4 検 討

前章では、力学的因子によってひき起された遅延現象が環境によってどのように影響されるかについて考察してきた。ここでは、この力学的因子である K 変動が、遅延挙動にどのように影響しているかを検討する。

まず、 K 変動のパラメータとして $(K_1 - K_2)/K_2$ を導入し、遅延繰返し数 N_D との関係を求めた。その結果を Fig. 13 に示す。図中のプロットは実際の K_1 の最終値で行うと同時に、環境変化を伴わない場合に限定している。図より、ばらつきは見られるが塩水中ならびに室温空气中ともに、 N_D と $(K_1 - K_2)/K_2$ は両対数グラフ上で直線関係にあり、いずれの環境下にお

Fig. 13. Relationships between $(K_1-K_2)/K_2$ and N_D .

いても変動割合の増大とともに N_D が増加していることが知られる。なお、室温空気中では $(K_1-K_2)/K_2 \geq 2$ の場合 (図中の破線部) に事実上 K_2 下でのき裂進展は停止した。荷重履歴によって見かけ上、き裂進展の下限界値が上昇した結果と考えられる。一方、塩水中では $(K_1-K_2)/K_2 = 8$ の場合でもき裂進展の停止は認められなかった。

つぎに遅延区間中の平均き裂進展速度を、遅延区間中のき裂進展の加重平均として次式より求めた。

$$da/dN = \sum_{i=0}^{n-1} \{ (a_i + a_{i+1})/2 - a_0 \} (N_{i+1} - N_i) / (N_n - N_0)^2$$

ここで、 K 変動直前のデータ点 (N_0, a_0)、変動直後のデータ点 (N_1, a_1)、遅延終了時のデータ点 (N_n, a_n) である。この平均き裂進展速度と一次側の K 値と

Fig. 14. Relationships between da/dN in retardation period and K_1 in 1% NaCl solution.

の関係を Fig. 14 に示す。結果はすべて塩水中のものである。図中■印の点については、一方は中間処理として水素チャージを施したものであり、他方は室温空気中の結果である。図より、遅延区間中の平均き裂進展速度は K_1 値が高くなるほど遅くなる傾向をもち、同時に K_2 値が高いほど速くなる傾向を示した。このことは、先に述べたように K_1 値によって決まる a_D 値がほぼ一定の値をとることから、平均き裂進展速度が高いほどこの領域をき裂はすみやかに通過することになり、結果的に遅延繰返し数 N_D の減少をもたらすことになると考えられる。また、中間処理として水素チャージを施すことは遅延区間中の平均き裂進展速度を上昇させること、室温空気中のそれは塩水中と比べて約十分の一であることが知られた。

5 結 言

高強度鋼 SNCM 439 を用いて K 制御下で 2 段 2 重回転曲げ疲労試験を行い、き裂進展挙動、とりわけ遅延挙動に及ぼす荷重履歴ならびに環境の影響について検討し、以下の結果をえた。

- (1) 遅延繰返し数 N_D は K 変動とともに環境によっても強く影響され、室温空気中と比べ塩水中では大きく減少した。また、中間処理によっても影響を受けた。
- (2) 遅延き裂長さ a_D は一次側の K 値にのみ影響され、環境にはよらなかった。
- (3) N_D は K 変動のパラメータ $(K_1-K_2)/K_2$ を用いて整理が可能であり、このパラメータの増加にしたがい増加した。
- (4) 遅延区間中の平均き裂進展速度は一次側の K 値が高いほど低下する傾向にあり、二次側の K 値の増加とともに上昇した。

最後に、本研究を行うにあたりご協力いただいた岐阜大学工学部長谷川典彦、同工業短期大学部広瀬素尚両先生にお礼を申し上げるとともに、卒業研究として実験にたずさわった中村和司、渡辺吉弘の両君に謝意を表します。

(昭和58年5月25日 日本材料学会第32期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 城野政弘, 日本機械学会誌, **84**, 146 (1981).
- 2) 中島正貴, 加藤容三, 広瀬素尚, 長谷川典彦, 材料, **31**, 57 (1982).
- 3) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 今城信雄, 日本機械学会論文集, **42**, 2652 (1976).
- 4) S. Matsuoka and K. Tanaka, Engng. Fract. Mech., **8**, 507 (1976).
- 5) 中島正貴, 加藤容三, 広瀬素尚, 長谷川典彦, 材料, **30**, 584 (1981).
- 6) 平野明彦, 小林英男, 中村春夫, 中沢 一, 日本機械学会論文集, A-46, 1040 (1980).
- 7) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 材料, **30**, 276 (1981).
- 8) W. C. Harrigan, Jr., D. L. Dull and L. Raymond, ASTM STP 536, 171 (1973).