

© 1986 ISIJ

3% 食塩水溶液中の低 ΔK 領域における S45C と HT80 鋼の疲労き裂伝ば曲線

論 文

松岡 三郎*・西島 敏*²・下平 益夫*³升田 博之*・竹内 悦男*³

Fatigue Crack Growth Curves in Low ΔK Region in 3% NaCl Water for S45C and HT80 Steels

Saburo MATSUOKA, Satoshi NISHIJIMA, Masuo SHIMODAIRA,
Hiroyuki MASUDA and Etsuo TAKEUCHI

Synopsis :

It is known that da/dN vs ΔK_{eff} curve is independent on stress ratio and predicts the most conservative fatigue life of structures, where da/dN is crack growth rate and ΔK_{eff} effective stress intensity range. In corrosive environment, however, determining ΔK_{eff} is difficult because corrosion product within crack promotes the crack closure.

The purpose of this study is to describe an experimental method free from crack closure. Such a method is realized by decreasing ΔK where maximum load is kept constant and minimum load increases with increasing crack length. The experimental results, obtained for S45C and HT80 steels in 3% NaCl water, showed that crack closure did not occur when the test began at an initial condition of $\Delta K \approx 7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $R \approx 0.6$ and $dK/da = -2.3 \text{ GPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ and that da/dN continuously decreased down to the region of $\Delta K \approx 0.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ and $R=0.96$. The minimum value of ΔK obtained in 3% NaCl water was one-third than the threshold in air at higher stress ratios such as 0.8. The crack growth curves thus obtained were useful for analyzing crack closure under constant amplitude loading with $R=0.1$ in 3% NaCl water.

1. 緒 言

腐食液中の疲労特性を知ることは工学的に重要である。現在までに平滑試験片による腐食疲労寿命データはかなり多く集積されている^{1)~4)}。鉄鋼材料の場合、腐食液中では高繰返し数の長時間試験においては著しく低い応力でも破壊が起こり、その疲労寿命特性は大気中に比べて極端に悪くなる。試験片表面と断面において腐食損傷過程を金属組織学的に調べた結果⁵⁾によると、荷重繰返しのごく初期に腐食ピットを起点としてき裂が容易に発生するため、疲労寿命の大部分はき裂伝ば過程で占められていることが明らかにされている。この点からすると、腐食疲労特性の解明には疲労き裂伝ばデータが不可欠となるが、工学的にも重要な低 ΔK 側のデータはほとんど集積されておらず、またその機構の解明も十分でない。

本研究では、S45C と HT 80 鋼につき 3% 食塩水溶液中で切り欠き底から発生した疲労き裂の伝ば過程を

低 ΔK 側で試験速度約 30Hz のもとで調べる。とくに、き裂閉開口現象を起こさせない目的で最大荷重を一定に保持した ΔK 減少試験を実施し、食塩水中では大気中の ΔK_{th} よりも極端に低い ΔK 領域でもき裂は伝ばでき、実質上 ΔK_{th} が消滅してしまうことを明らかにする。

2. 実験方法

供試材は S45C と HT 80 鋼である。これらの化学成分、機械的性質、熱処理条件を Table 1 と 2 にまとめて示す。両鋼とも焼もどしマルテンサイト組織を有し、強度レベルもほぼ等しい。

試験片は幅 $W=25 \text{ mm}$ 、厚さ $B=5 \text{ mm}$ の小型 CT 試験片で、0.5 mm 幅のスリットが $a/W=0.2$ と 0.35 まで加工してある 2 種類を準備した (a : き裂長さ)。試験片表面の大部分はポリエステルテープでおおい、切り欠き底先端の約 1 mm 角の表面と切り欠き底のみで金属面が露出するようにして、その上に腐食槽を固定し

昭和 60 年 2 月 26 日受付 (Received Feb. 26, 1985)

* 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

*² 金属材料技術研究所 理博 (National Research Institute for Metals)

*³ 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

Table 1. Chemical compositions, percent by weight.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	B	V
S 45 C	0.43	0.22	0.83	0.017	0.016	0.01	0.01	0.12	—	—	—
HT 80	0.12	0.26	0.96	0.010	0.004	0.19	1.05	0.45	0.31	0.02	0.05

Table 2. Mechanical properties.

Steel	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Heat treatment
S 45 C	623	774	22	845°C water quenched, 600°C tempered
HT 80	784	843	12	800°C water quenched, 570°C tempered

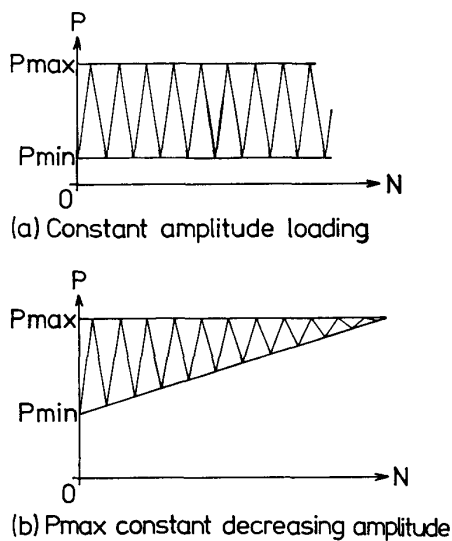


Fig. 1. Schematic illustration of loading sequence.

た。

腐食液は 3%NaCl 水溶液 (以後食塩水と呼ぶ) で、空気を吹き込んで酸素飽和状態にしてある。液の供給法は前報⁴⁾ で用いたマルチ回転曲げ試験の場合となるべく同じになるようにして、流量は 30 ml/min、液温は貯槽内で 25°C とした。なお、空気中での予き裂導入は行わず、腐食液中で直接切り欠き底からき裂を発生させた。

疲労き裂伝ば試験は Fig. 1 に示す 2 種類を行った。

(1) 定荷重試験

$a/W=0.35$ の長い切り欠きを持つ CT 試験片を機械共振式試験機に取り付け、荷重比 $R=P_{min}/P_{max}=0.1$ と 0.8 の定振幅繰返荷重のもとで切り欠き底での初期応力拡大係数 ΔK_i を数レベルに変えて試験した。試験速度は 33 Hz である。

(2) P_{max} 一定 ΔK 減少試験

最大荷重 P_{max} を一定に保ち、最小荷重 P_{min} をき裂進展とともに上昇させることによつて ΔK 減少試験を行った。この方法では、腐食液中において腐食生成物

のために強く起こるき裂閉口挙動を取り除くことができ、その上に (1) の定荷重試験に比べて ΔK が広範囲に変えられ、試験時間も節約できるので、低 ΔK 側の腐食疲労き裂伝ばデータを効率よく求めることができる。試験は $a/W=0.2$ の短い切り欠きを有する CT 試験片を油圧サーボ試験機に取り付け、 $\Delta K_i=6.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、 $R=0.6$ 、 ΔK 減少率 $-2.3 \text{ GPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ 、試験速度 30 Hz のもとで開始した。 R 比は当然き裂進展または ΔK 減少とともに増大する。

上記の両試験においてはき裂長さとき裂開閉口の測定は背面ひずみを利用した弾性コンプライアンス法によつて行つたが、測定器は定荷重試験では XY オシロスコープ、 P_{max} 一定試験ではパーソナルコンピュータシステムを用いた。後者の試験ではパーソナルコンピュータシステムは ΔK 減少試験の制御にも用いた。このシステムの基本構造は高野ら⁶⁾ のそれと同じで、本試験に適するように若干の改良を行つた⁷⁾。

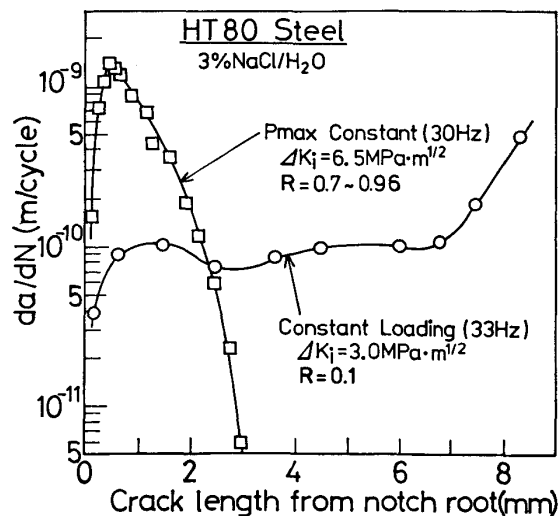


Fig. 2. Examples of crack growth rate against crack length from notch root for HT80 steel in 3%NaCl water.

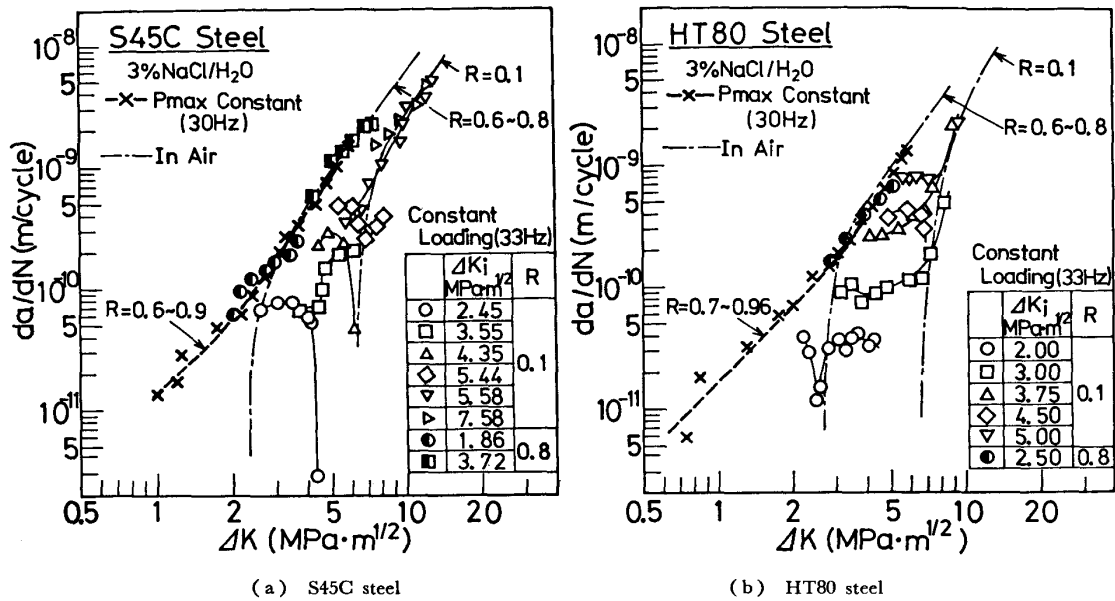


Fig. 3. Crack growth rate against stress intensity range in 3%NaCl water.

3. 実験結果

Fig. 2 に HT 80 鋼で得られたき裂伝ば速度 da/dN と切り欠き底からのき裂長さの関係を示す。

P_{max} 一定 ΔK 減少試験では当然のことながらき裂伝ば速度はき裂長さの増大とともに急激に低下したが、定荷重試験では伝ば速度はゆるやかに上昇した。しかしながら、両試験ともに切り欠き底から 0.5 mm の領域において伝ば速度は急激に上昇した。この領域内ではき裂形状は貫通き裂でなく、切り欠き底に発生した 2~3 個の半楕円き裂が連結している過程と考えられる。そこで、以下ではこの領域のデータは採用しなかつた。

Fig. 3 は da/dN - ΔK 曲線である。丸印や四角印などの記号は定荷重試験、×印を連ねた破線は P_{max} 一定試験で得られた食塩水中の結果、一点鎖線は大気中の結果⁹⁾である。大気中の高 R 比の結果は本実験の P_{max} 一定試験とは逆に P_{min} を一定にして ΔK 減少を行ったため、 R 比が試験開始時で 0.6、 ΔK_{th} のところで 0.8 と変化した、き裂閉口挙動は示さなかつた。

Fig. 3 の結果は次のようにまとめられる。

(1) $R=0.1$ の定荷重試験の場合 (白抜き印)、S45C と HT 80 鋼ともに食塩水中のき裂伝ば挙動は大気中の同 R 比の ΔK_{th} (両材料とも約 $6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) を境として多少異なっている。 $\Delta K \geq 6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ では、食塩水中の結果は大気中の伝ば曲線と一致している。一方、 $\Delta K \leq 6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ では、大気中においてき裂は伝ばできないが、食塩水中においては著しく低 ΔK レベルでもき裂は切り欠き底に発生でき、伝ばしている。この領域

の伝ば速度は試験開始時の ΔK_i が小さくなると初めは単調に増加するが、き裂長さの増加とともに低下する傾向があり、S45C 鋼の $\Delta K_i = 2.45 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の極端な例のようにき裂は停留してしまうこともある。

(2) $R=0.8$ の定荷重試験の場合 (半黒印)、大気中の ΔK_{th} よりも著しく小さい ΔK 範囲で試験した結果がないが、伝ば速度は ΔK 増加とともに単調に増加している。

(3) P_{max} 一定 ΔK 減少試験による食塩水中の結果 (破線) は高 ΔK 側では $R=0.8$ の定荷重試験による食塩水中の結果および大気中の高 R 比の結果と一致している。さらに、この結果は食塩水中においては大気中の ΔK_{th} よりも極端に小さい ΔK レベルまでき裂が伝ばできることを示しており、工学的にはき裂伝ばの下限界が消滅していると思なせる。

Fig. 4 は HT 80 鋼で最小の ΔK レベル ($=0.75 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) のときに得られたき裂閉閉口曲線である。横軸は弾性成分を差し引いたひずみ成分であり、また曲線は荷重上昇側と下降側において示してある。この結果より、 P_{max} を一定にした ΔK 減少試験の場合、食塩水中においてもき裂閉閉口現象は生じていないことがわかる。

Fig. 5 は P_{max} 一定試験でき裂閉閉口が起こらない理由を説明した模型図で、繰返荷重の変化にき裂閉閉口曲線を重ねて示してある。ここで、き裂閉閉口点はき裂長さなどに関係なく一定と仮定している。Fig. 5(a) が P_{max} 一定試験の場合であるが、実際の繰返荷重部分はき裂進展とともに閉閉口点から遠ざかっている。一方、Fig. 5(b)

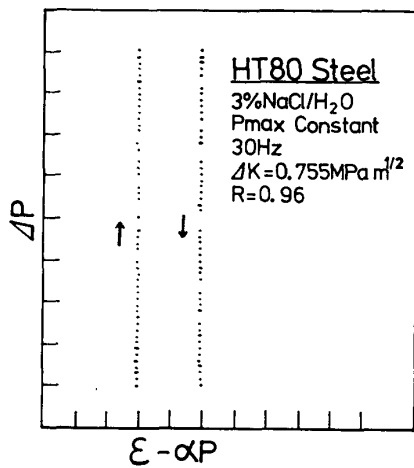


Fig. 4. Crack closure behavior under P_{max} constant ΔK decreasing for HT80 steel in 3%NaCl water.

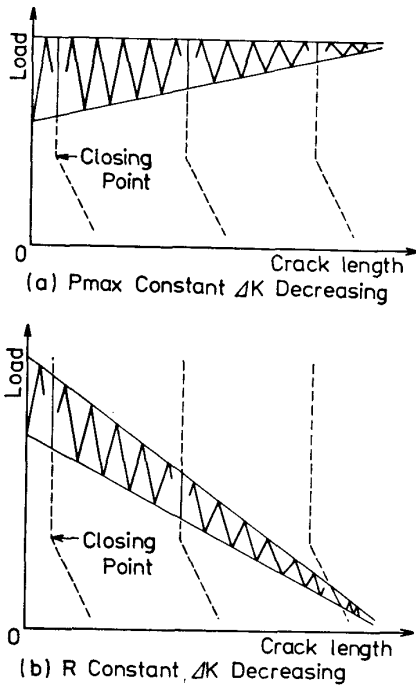


Fig. 5. Difference in crack closure between P_{max} constant and R constant ΔK decreasing tests.

は R 比一定試験の場合で、多くの研究ではこの方法が採用されている。 R 比を高くすると、試験初期ではき裂閉口は起こらないが、き裂進展につれて最小・最大荷重ともに減少するので、最終的にはき裂閉口が起りやすくなる。

ところで、き裂閉口点はかならずしも一定ではない。最近、き裂閉口挙動は中間 ΔK 領域ではほぼ同じ状態に保たれるが、 ΔK_{th} に近づくにつれてき裂は閉じやすくなることが大気中で $R=0.1$ のような低荷重比側で実証され、その原因は主に塑性誘起閉口の結果として生じ

るフレッティング酸化物が閉口レベルを押しあげることによると考えられている²⁾。食塩水中で生じる腐食生成物はフレッティング酸化物と同種のもものと見なされるので、Fig. 5 でき裂閉口点がき裂進展とともに上昇する場合も考えられる。このような状態では、き裂閉口を起こさない試験法として、 P_{max} 一定試験のほうが R 比一定試験法よりもさらに有利である。

以上のように、 P_{max} 一定試験で得られたき裂伝ば曲線はき裂閉口を含まない基準的データと考えられ、腐食環境下における材料評価に使用でき、また設計に際しては最も安全側で信頼性の高い寿命予測を可能にすると言える。

4. 考 察

4.1 食塩水中で低荷重比側で起こるき裂閉口挙動

食塩水中においては、き裂内の腐食生成物のため、一般に著しいき裂閉口が起こる。その結果、 $R=0.1$ で 30 Hz のような低 R 比の高速条件下で ΔK 減少試験により食塩水中の疲労き裂伝ば挙動を求めると、その ΔK_{th} は大気中の結果より大きくなる場合がある²⁾。本実験のように一定荷重下の ΔK 増加条件のもとで切り欠き底に発生した食塩水中のき裂は大気中の ΔK_{th} 以下でも伝ばできる。しかし、これらの $R=0.1$ の結果は高 R 比側の結果よりは高 ΔK 側にあり、き裂閉口の影響を受けていることがわかる。

Fig. 6 に S45C 鋼の $R=0.1$ の定荷重試験における食塩水中のき裂閉口挙動を XY オシロスコープ上で目視により測定した結果を示す。縦軸は $U = \Delta K_{eff} / \Delta K$ 、横軸は切り欠き底からのき裂長さである。また、図中には参考のために全試験時間も示した。 U 値はき裂長さの増加とともに急激に減少し、切り欠き底より 3~5 mm のき裂進展ののち飽和している。飽和後の U 値は ΔK_i

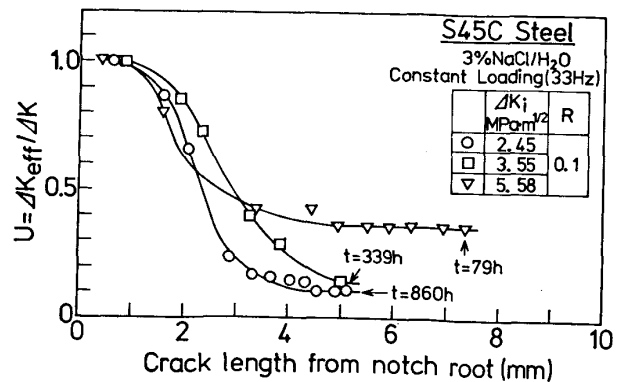


Fig. 6. Crack closure parameter against crack length from notch root under constant amplitude loading with $R=0.1$ for S45C steel in 3%NaCl water.

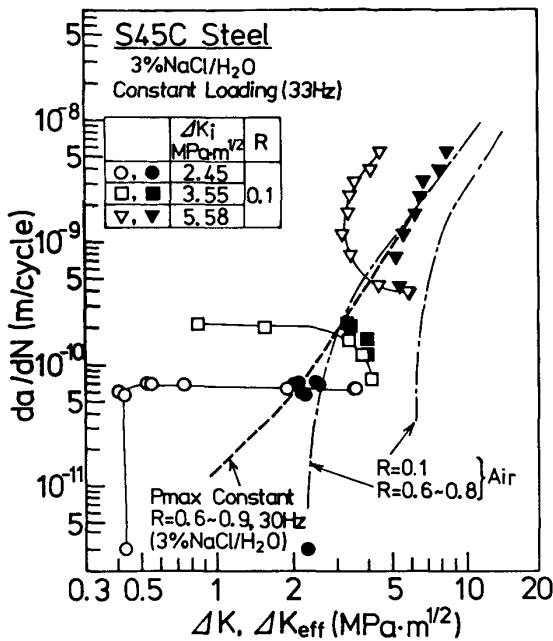


Fig. 7. Crack growth rate against effective stress intensity range for S45C steel in 3% NaCl water.

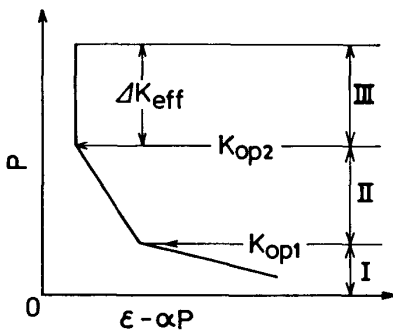


Fig. 8. Schematic illustration of crack closure curve in corrosive environment.

が小さく、試験時間が長いほど小さくなる傾向となつた。

Fig. 7 中の白抜き印は Fig. 6 の結果より求めた $da/dN - \Delta K_{eff}$ 曲線である。これらの結果は著しく低 ΔK 側となり、統一した伝ば曲線が得られないように見える。駒井ら⁹⁾も同様な結果を得ており、その原因としてき裂内の腐食液の粘弾性効果をあげている。

Fig. 8 にき裂開閉口曲線の模型図を示す。駒井ら⁹⁾は食塩水中のき裂開閉口曲線は三つの領域にわかれ、Ⅲ領域ではき裂は完全に閉口しており、Ⅰ領域のコンプライアンスはき裂の無い試験片のそれにほぼ等しく、Ⅱ領域がき裂内の腐食生成物による粘弾性効果のため生じている。Ⅱ領域は低 ΔK 側の長時間試験ほど広がるため、従来と同じ方法でき裂開閉口レベル K_{op2} を採用すると、Fig. 7 中の白抜き印で示されているように

ΔK_{eff} を小さく見積もりすぎる欠点が生じる。著者らも別の試験⁷⁾において腐食生成物の粘弾性効果については確認している。

駒井ら⁹⁾は上記の欠点を解消するために粘弾性効果により生じるⅡ領域内のある部分はき裂伝ばに対して有効に働くと仮定し、次式のような実効応力拡大係数 ΔK_{eff}^* を導入した。

$$\Delta K_{eff}^* = \Delta K_{eff} + \gamma(K_{op2} - K_{op1}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 γ はⅡ領域の寄与率であり、駒井らは HT 55 鋼の大気中と 1% 食塩水溶液中の結果の比較から γ 値は $R=0.1$ のときほぼ 0.5 になると報告している⁹⁾。Fig. 8 のⅡ領域は本試験のような低 ΔK で長時間試験では上下に広がるが、その極限として K_{op1} が K_{min} に一致する場合を仮定すると、式(1)は次式のように書き直すことができる。

$$U^* = \gamma + (1 - \gamma)U \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $U^* = K_{eff}^*/\Delta K$ 、 $U = \Delta K_{eff}/\Delta K$ である。式(2)は Fig. 6 の U 変化が U^* に直接反映することを示している。Fig. 7 中の黒印は式(2)で $\gamma=0.5$ と仮定して求めた $da/dN - \Delta K_{eff}^*$ 曲線である。この曲線はき裂が短い範囲を除けば P_{max} 一定 ΔK 減少試験で得たき裂閉口挙動を含まない破線の結果とよく一致した。

以上のように食塩水中におけるき裂開閉口挙動は一応解釈することができる。しかし、腐食生成物の粘弾性効果などの評価については問題があり、実際の設計や余寿命予測に際しては P_{max} 一定試験によつてき裂閉口挙動を含まない伝ば曲線を多く集積し、それらを用いるほうがはるかに信頼性が高くなると思われる。

4.2 切り欠き底における腐食微小き裂

本実験のように切り欠き底に発生した疲労き裂を取り扱う場合には微小き裂の伝ば挙動が問題となる¹⁰⁾。微小き裂とは長いき裂に適用されている線型破壊力学の手法が無効になる領域と定義されており、実際の場合には Fig. 6 に見られるようなき裂開閉口挙動の過渡領域として現れる。この点からすると、3% 食塩水溶液中で切り欠き底に生じる微小き裂領域は 3~5 mm にも達することになる。微小き裂伝ば挙動の原因としては、切り欠き底での弾性応力集中や塑性変形が微小き裂先端の応力・ひずみ状態に影響を及ぼし、結果としてき裂開閉口レベルを低下させる(すなわち U 値を増大させる)ことによると考えられている。このような大気中で問題となる力学的要因に加え、食塩水のような腐食環境下では微小き裂領域はさらに広がり、電気化学的要因も考慮する必要性が指摘されている¹⁰⁾。

鋭い切り欠き底における最大応力 $\sigma_{N,max}$ は次式で表

される。

$$\sigma_{N,max} = 2K_{max}/(\tau\rho)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ρ は切欠半径、 K_{max} は切り欠きをき裂とみなして計算した最大応力拡大係数で、本実験では $\rho=0.25$ mm、 $K_{max}=\Delta K_i/(1-R)$ となる。

$R=0.1$ の定荷重試験においては $\sigma_{N,max}$ は S45C 鋼の $\Delta K_i=7.58 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ のとき最も大きく、426 MPa となる。この値は S45C 鋼の降伏応力 (=623 MPa) よりも小さく、切り欠き底に塑性変形が生じていないことがわかる。また、切り欠きによる弾性応力集中範囲は切欠き半径 (=0.25 mm) 程度を見込めばよいが、本研究では切り欠き底から約 0.5 mm 内のデータは採用していない。HT 80 鋼においても同じことが言える。これらのことは $R=0.1$ の定荷重試験では力学的要因にもとづく微小き裂の問題は完全に無視できることを示している。

高 R 比の試験では切り欠き底が塑性変形している場合がある。S45C と HT 80 鋼の P_{max} 一定試験および S45C 鋼の $R=0.8$ で $\Delta K_i=3.72 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の定荷重試験では $\sigma_{N,max}$ は降伏応力の約 2 倍になる。しかし、 ΔK_i が小さいので繰り返し塑性変形は切り欠き底で生じていない。一方、 $R=0.8$ の低 ΔK_i 側の定荷重試験では $\sigma_{N,max}$ は両材料とも降伏応力より小さい。Fig. 3 においてこれらの高 R 比側の試験結果は一本の曲線で表されており、微小き裂に対する力学的要因はほとんど存在していないことがわかる。

上記の考察は Fig. 6 のき裂開閉レベルの変化で代表されるような微小き裂の挙動が腐食液の電気化学的作用に起因していることを示唆するが、き裂先端で直接電気化学的測定を行うことが難しいので、この方面からの厳密な考察は不可能である。食塩水中で長いき裂の先端における溶液状態は pH が 3~5 となり、溶存酸素はほとんど存在しなくなると予測されている¹¹⁾が、それは本実験の切り欠き底の沖合環境、pH=6.5、溶存酸素飽和とは著しく異なる。このような溶液状態の相違が腐食物の生成状態に影響を与え、これを通して Fig. 6 に示す切り欠き底のき裂開閉挙動の変化をもたらしたものと思われる。言い換えると、食塩水中で切り欠き底からき裂を進展させた場合、き裂先端の溶液状態が安定となり、電気化学的に長いき裂と見なせるようになるには 3~5 mm のき裂進展が必要であると推定できる。田中¹⁰⁾ は HY 130 鋼の 3.5% 食塩水中においてこのような腐食微小き裂長さはほぼ 1.1 mm 程度であると報告している。

この推定に立つと、 P_{max} 一定試験で得た伝ば曲線は

腐食微小き裂に対するものであり (Fig. 3 参照)、また通常の小型平滑試験片による食塩水中の S-N 曲線においてはその寿命の大部分が微小き裂伝ば過程で占められていることになる。このような腐食微小き裂の伝ば機構に対してはき裂先端に生じる金属新生面の溶解作用が重要な働きをすることが考えられる。Fig. 3 にみられるように、 P_{max} 一定試験による伝ば曲線の傾きが大気中の $\Delta K_{th}(\approx 2.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ 以下でゆるくなる傾向は腐食溶解作用によると推定されるが、この問題については今後のいつそうの研究が必要であろう。

5. 結 論

S45C と HT 80 鋼を用いて 3% 食塩水溶液中で切り欠き底に発生した疲労き裂の伝ば挙動を低 ΔK 領域を中心に調べた。試験は $R=0.1$ と 0.8 で繰返荷重振幅を一定に保つ場合 (33 Hz) と P_{max} を一定にして ΔK 減少を行い、き裂閉口を含まない伝ば曲線を求める場合 (30 Hz) の 2 種類を行つた。得られた結果は次のようにまとめられる。

(1) $R=0.1$ と 0.8 の定荷重試験により、3% 食塩水中では大気中の ΔK_{th} 以下でもき裂は切り欠き底に発生し、伝ばできることを明らかにした。 $R=0.1$ の場合にはき裂開閉口挙動が見られ、従来と同様な定義により定めた $da/dN-\Delta K_{eff}$ 曲線は極端に低 ΔK 側となつた。この原因としてはき裂内の腐食生成物の粘弾性効果がか裂開閉レベルを押し上げたことによると推定できた。

(2) $R\approx 0.6$ 、 $\Delta K_i\approx 6.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の初期条件のもとで実施した P_{max} 一定 ΔK 減少試験においては、き裂閉口を含まない材料特有の腐食液環境中の基準的なき裂伝ば曲線が効率よく求まることが明らかになつた。また、この方法で伝ば曲線を求めると、 $\Delta K=0.75 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 付近でもき裂は伝ばでき、実質上 ΔK_{th} が消滅してしまうことがわかつた。

(3) 3% 食塩水中では切り欠き底から 3~5 mm の範囲は腐食微小き裂の伝ば領域であり、それは主に切り欠き底の沖合環境 (pH ≈ 6.5 、溶存酸素飽和) から長いき裂先端での固有な環境 (pH=3~5、溶存酸素なし) へとき裂先端の溶液状態が過渡していく過程であることが推定できた。

おわりに、本実験で用いたパーソナルコンピュータシステムの開発にあたり御指導いただいた東京大学工学部船用機械工学科岡村弘之教授並びに高野太刀雄助手に深く感謝の意を表します。また、本研究は昭和 59 年度科学技術庁科学技術振興調整費によつたことを付記す

る。

文 献

- 1) 金属材料疲れ強さの設計資料 III-環境効果(1974)
[日本機械学会]
- 2) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎: 金属の腐食疲労と強度設計 (1983) [養賢堂]
- 3) 平川賢爾, 北浦幾嗣: 鉄と鋼, 66 (1980), A73
- 4) 西島 敏, 阿部孝行, 増田千利, 蛭川 寿: 日本機械学会論文集 (A), 51 (1985) 461, p. 156
- 5) 増田千利, 西島 敏, 阿部孝行, 住吉英志: 日本機械学会論文集 (A), 50 (1984) 453, p. 1019
- 6) 高野太刀雄, 荻原 聡: 腐食防食協会第 54 回腐食防食シンポジウム (1984), p. 1
- 7) 下平益夫, 松岡三郎, 升田博之, 西島 敏: 材料学会第 15 回疲労シンポジウム (1984), p. 113
- 8) S. NISHIJIMA, S. MATSUOKA and S. OHTSUBO: J. Testing and Evaluation, 11 (1983) 3, p. 193
- 9) 駒井謙治郎, 敷田卓祐, 遠藤吉郎: 日本機械学会論文集 (A), 50 (1984) 456, p. 1453
- 10) 田中啓介: 材料, 33 (1984) 371, p. 961
- 11) A. TURNBULL: Corros. Sci., 23 (1983), p. 833