微小表面き裂の進展下限界の応力比依存性*

北岡 征一郎^{*1}, 陳 建 橋^{*2}, 清家 政一郎^{*1}Dependence of the Threshold Stress of Micro Crack Propagation
on a Stress Ratio

Seiichiro KITAOKA, Jian-qiao CHEN, and Masaichiro SEIKA

Plane bending and cyclic torsion tests, and a combination of them are first carried out with a stress ratio $R=0$ using annealed cracked specimens made of carbon steel. The threshold stress of micro fatigue crack propagation under a mixed mode can be well determined using the maximum principal stress criterion because of no crack closure in this case. Next, plane bending tests are performed with various stress ratios R . Based on the assumption that crack opening displacement on the threshold level is constant regardless of R , the relation between R and the threshold stress is formulated. The suggested expression is found to be in good agreement with the test results and can be applied to the whole range of the stress ratio.

Key Words: Fatigue, Stress Ratio, Mixed Mode, Crack Propagation Threshold, Crack Opening Displacement, Fatigue Limit

1. 緒 言

前報までにおいて⁽¹⁾⁽²⁾, 著者らは丸棒平滑試験片の表面に発生した微小き裂を対象とし, 応力比 $R=-1$ の条件のもとで, 平面曲げと繰返しねじりを組合せた混合モード下におけるき裂進展の下限界応力を調査し, その進展の下限界条件を検討した. その結果, 試験片表面におけるき裂進展の下限界応力は, 混合モード下でき裂面に作用する摩擦力を考慮して, 最大円周方向応力基準を採用することにより, 曲げ(モード I), ねじり(モード II)におけるき裂進展の下限界応力に基づいて精度よく推定できることを明らかにした.

ところで, 実際の機械・構造物の構成要素では, R は負の範囲に限定されるとは限らず, しかも R はき裂進展の下限界応力に顕著な影響を与えることが知られている⁽³⁾.

従来, モード I におけるき裂進展の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} に及ぼす R の影響に対して提案されている実験式⁽⁴⁾⁽⁵⁾の適用範囲は $R \geq 0$ に限定されてい

る. また $R < 0$ に対しては, 負荷応力が負となる領域においてき裂開口が生じるものとし, 有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を応力拡大係数の最大値 K_{max} とする方法がとられている. しかしながら, モード II やモード I とモード II の混合モードでは, 作用応力が圧縮状態であっても, モード II 成分がき裂進展に寄与することになり, 上述の概念を単純に適用することはできない.

以上の観点から, 本報ではまず, 曲げ, ねじりおよびこれらを組合せた混合モード試験を $R=0$ において実施し, 前報⁽¹⁾の $R=-1$ の結果と比較して, き裂開口が混合モード下における進展の下限界応力に及ぼす影響や応力拡大係数範囲の有効成分について検討した.

ついで, モード I に対するき裂進展の下限界応力を, R を正から負の種々の値に設定して調査した. さらに, き裂開口現象に着目し, K とき裂開口の変位との関連を利用して導いた R の全範囲にわたって適用可能な実験式と従来の方法を用い, き裂進展の下限界応力比依存性を検討した.

2. 実 験 方 法

本研究に使用した試験片素材は前報と同一の SK-5,

* 昭和62年10月31日 山梨地方講演会において講演, 原稿受付 昭和62年1月24日.

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町).

^{*2} 正員, 名古屋大学大学院.

φ19の引抜き棒である。使用した試験機は小野式回転曲げ疲労試験機(3 600 rpm)およびシェンク式疲労試験機(3 600 rpm)である。

回転曲げ試験を行い、0.1~1 mm オーダの引張り表面き裂を有する試験片を作成した。なお、き裂断面形状は、き裂長さによらず一定である⁽¹⁾。これを最大曲げ応力がき裂の位置に使用するように曲げ・ねじり装置⁽¹⁾に装着し、シェンク式疲労試験機により、 $R=0$ において、モード I ($\theta=90^\circ$)のほかに、モード II ($\theta=0^\circ$)および混合モード ($\theta=30^\circ$)の実験を実施し、その下限界応力を求めた。さらに、モード I に対しては、 $R=0.24, -7$ において下限界応力を調査した。ただし、 θ はシェンク式試験機のトルク棒と試験片の軸とのなす角度である。また、き裂進展の有無の判定は、き裂先端部近傍に打たれたピッカース圧痕と試験前後のき裂先端との距離を測定することにより行った。

3. $R=0$ の混合モード下における き裂進展の下限界条件

3.1 き裂の進展状況 応力比 $R=-1$ および $R=0$ における予き裂からのき裂進展状況を図2に示した。両場合における進展状況には、モード II においてのみ顕著な相違が見られる。 $R=-1$ では分岐が生じるのに対し、 $R=0$ ではき裂は一方に折れ曲がって進展する。これは、後者では、き裂面における繰返しせん断応力が一方にしか作用しないことによる。また、混合モードにおいても分岐は見られない。これは、引張り・せん断の半サイクルでき裂先端近傍に生ずる円周方向主応力がき裂の進展を生ずる大きさになっても、圧縮・せん断の半サイクルでは、き裂閉口のため、上述の条件を満足しないことによる。

3.2 き裂進展の下限界応力曲線 図3には $R=0$ において、 $\theta=90^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ に対して得られたき裂進展の下限界応力振幅とき裂長さの関係を示す。ただし、横軸にはき裂長さを、縦軸には公称応力振幅をとった。図から明らかなように、いずれのモードにおいても、 $R=0$ に対する曲線のこう配はほぼ -0.5 となり、下限界応力振幅は、 $R=-1$ のそれ⁽¹⁾より低くなる。また、両者の差は、モード I において最も大きく、モード II では最も小さい。なお、混合モードに対する曲線のこう配は、 R によって明らかに違っている。

3.3 混合モードにおける下限界応力振幅の推定
図3の進展曲線の線形部分を次の実験公式で表す。

$R=0$:

$$\begin{cases} \log \Delta\sigma = -0.51 \log 2a + 1.76 & (\text{モード I}) \\ \log \Delta\tau = -0.56 \log 2a + 1.61 & (\text{モード II}) \\ \log \Delta\sigma^* = -0.56 \log 2a + 1.49 & (\text{混合モード}) \end{cases} \dots\dots (1)$$

ただし、応力振幅とき裂長さ $2a$ の単位はそれぞれ MPa, mm をとった。試験片表面において、き裂の先端に原点を持つ極座標 (r, Ψ) をとれば、き裂先端近傍の Ψ の方向の応力は

$$\sigma_m = (K_I^*/\sqrt{2\pi r})f(\Psi) + (K_{II}^*/\sqrt{2\pi r})g(\Psi) \dots (2)$$

図1 試験片の形状寸法

図2 き裂進展状況(矢印：軸方向, A：予き裂先端)

$$\begin{cases} f(\Psi) = (3/4 \cos \Psi/2 + 1/4 \cos 3\Psi/2) \\ g(\Psi) = -(3/4 \sin \Psi/2 + 3/4 \sin 3\Psi/2) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{cases} K_I^* = F_I \sigma^* \sqrt{\pi} \sqrt{a} \\ K_{II}^* = F_{II} \tau^* \sqrt{\pi} \sqrt{a} \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

- Crack propagation at both ends
- Crack propagation at one end
- No crack propagation

図3 き裂進展の下境界応力曲線

F_I, F_{II} はき裂試験片の形状係数を表す。応力の変動範囲で表示すれば

$$\Delta\sigma_m = (\Delta K_I^* / \sqrt{2\pi r}) f(\Psi) + (\Delta K_{II}^* / \sqrt{2\pi r}) g(\Psi) \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{cases} \Delta K_I^* = F_I (2\Delta\sigma^*) \sqrt{\pi} \sqrt{a} \\ \Delta K_{II}^* = F_{II} (2\Delta\tau^*) \sqrt{\pi} \sqrt{a} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

となる。 $\alpha = \Delta K_I^* / \Delta K_{II}^*$ と定義し、 $\Delta\sigma_m$ の Ψ に対する極値条件を求めれば

$$\alpha \sin \Psi + (3 \cos \Psi - 1) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

を得る。 $\Delta\sigma_{m \max}$ がき裂の進展を支配するパラメータとみなし、進展開始条件は

$$\Delta\sigma_{m \max} = C \text{ (定数)} \dots\dots\dots (8)$$

となる。モード I とモード II では、 $\Delta\sigma_{m \max}$ はそれぞれ $\Delta K_I / \sqrt{2\pi r}, (\Delta K_{II} / \sqrt{2\pi r}) g(\Psi)_{\max}$ となるため、下境界においては、

$$\Delta K_I / \sqrt{2\pi r} = (\Delta K_{II} / \sqrt{2\pi r}) g(\Psi)_{\max} \dots\dots\dots (9)$$

$g(\Psi)_{\max} = 2/\sqrt{3}$ は $g(\Psi)$ の最大値である。したがって

$$F_{II} / F_I = \Delta\sigma / \Delta\tau g(\Psi)_{\max} \dots\dots\dots (10)$$

が求まる。上式を利用し、進展条件式(8)を応力振幅で表せば次の式を導くことができる。

$$\begin{cases} \Delta\sigma^* = \Delta\sigma a / F(a) \\ \Delta\tau^* = \Delta\tau g(\Psi)_{\max} / F(a) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

$$F(a) = \alpha f\{\Psi(a)\} + g\{\Psi(a)\} \dots\dots\dots (12)$$

$\Delta\sigma, \Delta\tau$ と $\Delta\sigma^*$ はそれぞれモード I, II および混合モードにおける下境界応力振幅を表す。式(11)には、独立な式は一つしかない。 α の定義から

$$\begin{aligned} \alpha &= F_I \Delta\sigma^* / F_{II} \Delta\tau^* \\ &= \Delta\tau g(\Psi)_{\max} \cdot 2 \tan \theta / \Delta\sigma \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

$\theta = 30^\circ$ に対する下境界応力振幅は、モード I, II の試験結果を用い、式(7), (13)を利用すれば式(11)より前報⁽¹⁾と同様の手法により求めることができる。計算結果を図4に破線で示したが、これは試験結果とよく一致している。

本実験で取扱った焼なましき裂は、無負荷の状態で完全に開口している⁽⁶⁾から、 $R=0$ ではいずれのモードに対しても公称応力の変動幅が応力拡大係数幅に対応することになる。式(6)はこの点を反映しているから、これに基づく式(11)は、き裂閉口が生じない $R=0$ に対し、本実験で取扱った $\theta=30^\circ$ に限らず、任意の θ に対して精度のよい推定式になるものといえる。

4. モード I 微小き裂の進展下境界に及ぼす応力比の影響

4・1 き裂進展の下境界応力曲線 モード I に対し、 R を -7 および 0.24 に設定して得られたき裂進

展の下境界応力振幅とき裂長さの関係を図5に示した。これらを $R=0, -1$ の結果と併せて示せば図6の実線となる。 $0.24 \geq R \geq -7$ の範囲では R の低下につれて下境界応力曲線はほぼ平行に上昇する。

4・2 進展下境界の応力比依存性 き裂進展の下境界に及ぼす R の影響を考慮した実験式が $R \geq 0$ に対して提案されている⁽⁴⁾

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}(1-R)^{\gamma} \quad (14)$$

ここに γ は材料定数, ΔK_{th0} は $R=0$ における下境界応力拡大係数幅である。また, 理想き裂を想定して小規模降伏条件を仮定し, き裂進展の下境界においてき裂先端開口変位幅 $\Delta \delta_{th}$ が一定となるとすれば, $\delta \sim K^2$ より,

$$\begin{cases} \Delta \delta_{th} = \delta_{max} - \delta_{min} \sim K_{max}^2 - K_{min}^2 \\ \Delta \delta_{th0} \sim K_{max}^2 = (\Delta K_{th0})^2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} K_{max} = \Delta K_{th} / (1-R) \\ K_{min} = \Delta K_{th} \cdot R / (1-R) \end{cases} \quad (16)$$

式(15), (16)より

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}(1-R)^{1/2} / (1+R)^{1/2} \quad (17)$$

式(14), 式(17)⁽⁵⁾は $R > 0$ に対しては, 比較的良好に試験結果と一致するが, $R < 0$ に対しては適用が困難であり, 特に式(17)は $R \leq -1$ で意味をもたない。そこで, 以下では, 実際の疲労き裂のき裂閉口現象に着目して求めた K とき裂開口変位の関係を利用して, R の負の領域を含み適用可能な実験式を導き, その適用性を検討してみた。

有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を次のようにおく。

$$\begin{cases} \Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}^* \\ K_{op}^* = K_{min} \quad (K_{op} < K_{min}) \\ K_{op}^* = K_{op} \quad (K_{op} \geq K_{min}) \end{cases} \quad (18)$$

ここに, K_{op} はき裂開口応力拡大係数である。

K_{op}^*/K_{max} の値は材料と応力比によって異なり, その定量的関係はいまだ確立していない。しかしながら, 一般の疲労き裂に対し $R > 0$ のある範囲内では, R の上昇とともに K_{op}^*/K_{max} も増加する傾向を持つことが予測される⁽⁷⁾。また, $R < 0$ においては, き裂面の繰返し接触による酸化物生成もき裂閉口の要因となり, 酸化物誘起き裂閉口において, K_{op}^*/K_{max} は ΔK の低下に伴って増加することが知られている⁽⁷⁾。 $R < 0$ では, R が 0 に近づくにつれて, ΔK_{th} は低下するから(図6), K_{op}^*/K_{max} の値は増加すると考えても矛盾はない。

そこで, $R \leq 0$ の領域も含め, 一次近似として次の線形関係を仮定してみた。

図4 き裂進展の下境界応力曲線の実験値と計算値

図5 き裂進展の下境界応力曲線

$$K_{op}^*/K_{max} = aR + b \quad \dots\dots\dots (19)$$

式(18)より

$$\begin{aligned} \Delta K_{eff} &= (1-b)K_{max}(1-aR) \propto K_{max}(1-aR) \\ &= \Delta K(1-aR)/(1-R) \quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

ここに、 $a = a/(1-b)$ とおけ、これは材料定数とみなすことができる。また、 $\Delta\delta$ は $\Delta K_{eff}^{(7)}$ に比例するから

$$\Delta\delta \propto K_{max}^2(1-aR)^2 \quad \dots\dots\dots (21)$$

き裂進展の下境界における $\Delta\delta_{th}$ は R に依存せずほぼ一定となる⁽⁸⁾とすれば、上式より

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}(1-R)/(1-aR) \quad \dots\dots\dots (22)$$

R は $-\infty < R < 1$ と考えてよいから、式(22)は、 α が $0 \leq \alpha \leq 1$ であれば、 R の全範囲に適用可能である。

式(22)を応力振幅に変換すれば、

$$\Delta\sigma_{th} = \Delta\sigma_{th0}(1-R)/(1-aR) \quad \dots\dots\dots (23)$$

図6には、式(23)の α を 0.6 とし、 $R=0$ に対するき裂進展の下境界応力曲線に基づいて求めた計算結果を破線で示した。また、式(23)より、

$$f(R) = \Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{th0} = (1-R)/(1-aR) \quad \dots\dots (24)$$

とおき、 $f(R) \sim R$ 関係を図7に整理した。本実験結果を●印、他の研究者のデータ⁽⁹⁾を、 $R=0.1$ の値を基準に選び、○印で同図に記入した。すなわち、式(23)を用いれば、 $R > 0$ ばかりでなく、 $R < 0$ の試験結果をも比較的よい精度で推定できる。

4.3 疲労限およびき裂進展の下境界の応力比依存性に関する実験式の関連 平滑材の疲労限に対する平均応力の影響を表示する式

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_w(1 - \sigma_a/\sigma_k) \quad \dots\dots\dots (25)$$

が実験結果とよく一致する⁽¹⁰⁾ことは知られている。ここに $\Delta\sigma_w$ は $R=-1$ の疲労限に対する応力振幅、 σ_a

は平均応力、 σ_k は真破断応力である。 σ_k には降伏強さあるいは、引張強さなどが採用されることもある。

$R=0$ に対する $\Delta\sigma_0$ を基準にとり、式(25)を変形してみる。

$R=0$ では、 $\sigma_a = \Delta\sigma_0$ であるから、

$$\Delta\sigma_0 = \Delta\sigma_w(1 - \Delta\sigma_0/\sigma_k) \quad \dots\dots\dots (26)$$

ゆえに

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_0/(1 - \Delta\sigma_0/\sigma_k) \quad \dots\dots\dots (27)$$

また、一般に

(a)

(b)

図6 き裂の進展下境界応力の応力比依存性

図7 き裂の進展下境界応力および平滑材の疲労限の応力比による変化

$$\sigma_a = \Delta\sigma(1+R)/(1-R) \quad \cdots\cdots\cdots(28)$$

式(27), (28)を式(25)に代入すれば

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0(1-R)/(1-\alpha R) \quad \cdots\cdots\cdots(29)$$

ここに

$$\alpha = 1 - 2\Delta\sigma_0/\sigma_h \quad \cdots\cdots\cdots(30)$$

とおける。すなわち、平滑材の疲労限の応力比依存性を表示する式(29)は、前節で提案したき裂進展の下限界応力比依存性を表示する実験式と同一の形をとる。

式(27)を変形すれば

$$\Delta\sigma_0 = 1/(1/\sigma_h + 1/\Delta\sigma_w) \quad \cdots\cdots\cdots(31)$$

したがって、式(30), (31)より

$$\alpha = (1 - \Delta\sigma_w/\sigma_h)/(1 + \Delta\sigma_w/\sigma_h) \quad \cdots\cdots\cdots(32)$$

と表示することもできる。

本実験に採用した材料に対し、 σ_h として降伏強さ、引張強さあるいは真破断応力のいずれを採用しても、前報⁽¹⁾の結果から、 $\alpha < 0.43$ となる。そこで $\alpha = 0.43$ に対し、平滑材の疲労限の比 $\Delta\sigma/\Delta\sigma_0 = f(R)$ と R の関係を式(29)によって求めれば、図7の破線となる。すなわち、 α の低下につれて、 $f(R)$ の応力比依存性が顕著になるから、き裂進展の下限界応力は平滑材の疲労限ほど R 依存性をもたないものと考えられる。

5. 結 言

炭素工具鋼製の丸棒平滑試験片表面に発生した長さ0.1~1 mm オーダの焼なましき裂を対象とし、モードI, IIおよび混合モードにおけるき裂進展の下限界応力を応力比 $R=0$ において調査した。さらにモードIに対しては R を正から負の種々の値に設定して試験を実施し、モードI微小き裂の進展下境界に及ぼす応力比の影響を検討した。結果を要約すれば、以下のようになる。

(1) $R=0$ に対するき裂進展の下限界応力振幅は、モードI, IIおよび混合モード($\theta=30^\circ$)のいずれにおいても $R=-1$ の場合より低い。また両者の差はモ

ードIにおいて最も大きく、モードIIで最も小さい。

(2) 混合モードに対しては、応力比によって曲線のこう配が異なり、 $R=0$ ではほぼ-0.5となる。これは、 $R=-1$ では圧縮、せん断状態においてき裂面に作用する摩擦力がき裂長さの減少につれて増加し、モードII変位の有効成分の減少を促進するのに対し、 $R=0$ ではき裂はほぼ完全に開口し、モードI, IIの変位成分がともに有効に作用することによる。

(3) モードIき裂に対し、 K_{Op}/K_{max} と応力比の間に線形関係を仮定し、進展の下限界において繰返しき裂先端開口変位が一定値となる条件により導いた進展下限界応力と応力比の関係式は、 R が正から負の範囲にわたる本実験結果のみならず、従来の結果にも適用できる。

(4) 提案した実験式は、平滑材の疲労限の応力比依存性に対して従来提案されている実験式と同一の形式となり、本材料ではき裂進展の下限界応力は平滑材の疲労限ほど顕著に応力比の影響を受けないものと考えられる。

終わりに、実験に協力された本学学生 沖 恭弘、菊地英樹の両君に謝意を表する。

文 献

- (1) 北岡・ほか2名, 機論, 51-467, A(昭60), 1764.
- (2) 北岡・ほか2名, 機論, 52-480, A(昭61), 1733.
- (3) Ritchie, R. O., *Int Metals Reviews*, Nos. 5 and 6 (1979), 205.
- (4) Yan, M.ほか2名, (Backlund, ほか2名編) *Fatigue Thresholds*, II (1982), 615.
- (5) McFvily, A. J. and Groeger, J., *ICF* 4, 2(1977), 1293.
- (6) 北岡・木村, 機論, 46-403, A(昭55), 258.
- (7) Liaw, P. K., ほか3名, *Acta Met.*, 30(1982), 2071.
- (8) 李・小林, 機論, 52-477, A(昭61), 1209.
- (9) Liaw, P. K., ほか3名, *Metall. Trans.*, A, 13 (1982), 1607.
- (10) 西原・桜井, 機論, 5 (昭14), 25.