混合モードにおける微小疲労き裂の進展下限界に及ぼす
き裂閉口の影響*

北 岡 征一郎**, 陳 建 橋***, 清 家 政一郎**

The Effect of Crack Closure on the Threshold of Micro Fatigue Crack
Propagation under Mixed Mode

by Seiichiro KITAOKA, Jian-Qiao CHEN, and Masaichiro SEIKA

Plane bending and cyclic torsion tests, and a combination of them are carried out using aged cracked specimens made of carbon steel under the condition of a stress ratio $R = -1$. Taking account of the residual compressive stress around the crack in Mode I and the friction stress acting on the crack surface in Mode II, and adopting the criterion that an aged crack begins to propagate when the circumferential principal stress range reaches a critical value peculiar to the material, the threshold condition of micro fatigue crack propagation under a mixed mode can be deduced from the results of plane bending and cyclic torsion tests.

Key Words: Fatigue, Micro Crack, Aging, Mixed Mode, Crack Propagation Threshold

1. 結 言

機械・構造物の高性能化, 軽量化に伴う材料の高強度化によって, フェイルセーフあるいは損傷許容設計の果たす役割が増しつつある。しかるに, 前者においては負荷が作用する間に構成要素にき裂が生じることを前提とし, 後者では構成要素の製造時にき裂が発生していることを前提としている。したがって, これらの設計基準による機械・構造物の寿命を予測し, 安全性を保証するには, き裂の疲労挙動の把握が不可欠の要件となる。ところで, 疲労寿命の大半は微小な表面き裂の成長に費やされ, そのようなき裂はモード I, モード II の混合モードを受けることが少なくない。したがって, 微小疲労き裂の混合モード下における疲労挙動に対する検討は重要な課題となる。

以上の観点から, 前報⁽¹⁾で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, まず理想き裂に近い焼なましき裂を採用して, 平面曲げ(モード I)と繰返しねじり(モード II)を組合せた混合モード下における進展の下限界条件を検討した。その結果, 上述の混

合モード下における進展の下限界応力は最大円周方向応力基準を採用すれば, モード I とモード II における進展下限界応力に基づき, 比較的よい精度で推定できることが明らかとなった。

ところで, 実際の構成要素に発生するき裂の周縁には, 残留圧縮応力が生ずるため, 無負荷の状態でき裂閉口現象が起こり⁽²⁾, き裂進展の下限界条件は焼なましき裂とは異なったものとなる⁽³⁾。本研究では, このような残留応力などによるき裂閉口が混合モード下の進展の下限界条件に及ぼす影響を検討することを目的とした。すなわち, 前報と同様の方法で作成したき裂試験片に時効処理⁽⁴⁾を施し, この試験片を用いてき裂に平面曲げ(モード I)と繰返しねじり(モード II)およびこれらの混合変位様式を加えて各場合におけるき裂進展の下限界応力を調査した。これを前報の結果と比較することにより, き裂べりの残留応力によるき裂閉口現象が混合モード下におけるき裂進展の下限界条件に及ぼす影響を検討した。また, 前報では無視した混合モード下の圧縮・せん断状態においてき裂面に作用する摩擦力を考慮して, 焼なましき裂の進展下限界条件にさらに詳細な検討を加えた。

* 昭和 61 年 4 月 1 日 第 63 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 60 年 8 月 14 日。

** 正員, 名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

*** 学生員, 名古屋大学大学院。

2. 実験方法

本実験に使用した試験片素材は前報と同一のSK-5、 $\phi 19$ mmの引抜き丸棒である。熱処理条件および図1の試験片中央部に対する仕上条件は前報と同一とした。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。

回転曲げにより、試験片の軸と直交する種々の長さの表面き裂を有する試験片(き裂試験片)を作成した。この試験片の表面を数 μ m除去した⁽⁴⁾後、160°C、1 h加熱の時効処理を施し、前報における図2(a)、(c)の曲げねじり試験装置に装着して、平面曲げ、繰返しねじりおよびこれらを組合せて、試験機のトルク棒と試験片の軸がなす角度 θ を $\theta=45^\circ$ に選び、試験を実施した。なお、応力比はいずれの試験においても $R=-1$ であり、き裂進展の下限界応力の調査は繰返し数 $N=1 \times 10^6$ で行った⁽⁴⁾。シェンク式疲労試験機のトルク棒に作用するねじりモーメントを T とする。これによって試験片に作用する曲げモーメントおよびねじりモーメントをそれぞれ M^* 、 T^* とすれば、試験片に生ずる公称応力は

$$\left. \begin{aligned} \sigma^* &= 32M^*/\pi d^3 = 32T \sin \theta / \pi d^3 \\ \tau^* &= 16T^*/\pi d^3 = 16T \cos \theta / \pi d^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

試験片に生ずる応力振幅を $\Delta\sigma^*$ 、 $\Delta\tau^*$ と表示すれば、

$$\Delta\sigma^*/\Delta\tau^* = \sigma^*/\tau^* = 2 \tan \theta \dots\dots\dots (2)$$

なる関係が成立する。

3. 実験結果

3.1 時効処理によるき裂先端近傍の変化 本実験で使用した材料では、疲労過程において顕著なひずみ時効が生ずる場合があり⁽⁵⁾、この現象はその後の試験中断中にも進行する。一般に、ひずみ時効は鉄鋼材の疲労強度に影響を及ぼすから、ひずみ時効の程度が異なれば、試験結果のばらつきを増加させることも考えられる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そこで、この効果を均一化するため、あ

らかじめき裂試験片に前述の条件で時効処理を施した。このような処理を施してもき裂作成時に生じた残留応力は消失せず⁽⁴⁾、時効処理き裂は焼なましき裂とは異なり、無負荷の状態で全長にわたり閉口している。両き裂におけるき裂周縁のこのような状況の相違は、当然き裂進展の下限界に影響を及ぼすものと考えられる。

3.2 き裂進展の下限界応力曲線 時効処理き裂試験片を用いてモードI、IIおよび混合モード($\theta=45^\circ$)下においてき裂進展の下限界応力を調査し、結果を図2の実線で整理した。図2には前報の焼なましき裂における結果を破線で併記したが、いずれのモードにおいても時効処理き裂の進展下限界応力は焼なましき裂のそれに比較して高くなるが、その差はモードIIの場合が最も大きい。また混合モードにおける曲線のこう配は焼なましき裂よりも緩やかとなり⁽⁴⁾、ほぼ0.5となる。

3.3 熱処理による材質変化 図3には、焼なましき裂と時効処理き裂に対し、き裂進展の下限界応力近傍においてき裂先端部に発生する予き裂方向のすべり領域の測定結果を示した。すべり領域がき裂長さに占める割合は、き裂進展に対する抵抗を反映するが⁽⁸⁾、図示のようにその割合は両者において差異がない。表1には、処女試験片、き裂試験片および両熱処理を施したき裂試験片に対するピッカース硬さの測定結果を示す。時効処理き裂は、焼なましき裂に比較して硬さがわずかに(約4.5%)上昇するにすぎない。また、時効処理(160°C)および焼なまし処理(640°C)は本実験で使用した炭素工具鋼に再結晶を生じさせないから、両試験片において結晶粒子の大きさには相違がない。

上述の諸結果を考慮すれば、本実験で使用した時効処理き裂試験片と、前報の焼なましき裂試験片の間の材質は相違はわずかである。また、時効処理はき裂進展抵抗に対する材質的強化につながらない⁽⁴⁾ことを考慮すれば、時効処理によりき裂進展抵抗が増加する場合には、それは主として残留応力の影響によるものと考えられる。

4. き裂進展挙動に及ぼす残留応力の影響

4.1 開口応力の概念 両振り繰返し荷重のもとで発生・進展した疲労き裂の先端部は、き裂面に残される塑性伸びのため、負荷応力が正の段階で初めて開口する⁽⁴⁾。応力比 $R=-1$ の引張り・圧縮(モードI)および繰返しねじり(モードII)試験において、応力振幅をそれぞれ $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\tau$ とすれば、モードI試験では残

図1 試験片の形状寸法

留応力が存在しない焼なましき裂の開口範囲は引張りの半サイクルにおける応力振幅 $\Delta\sigma$ に等しいが、本実験の時効処理き裂の場合には、き裂べりに存在する圧縮残留応力によりその開口範囲が減少してき裂進展に対して有効な応力振幅が小さくなり、 $\Delta\sigma - \sigma_0$ になると考えられる。

モードII試験では、この残留応力の影響としてき裂面に作用する摩擦力によりモードIIの有効変位が減少するものと思われる。すなわち、この摩擦力によってき裂進展に有効な応力振幅は、 $\Delta\tau - \tau_f$ となる。

図2においてモードIおよびモードIIにおける下限界応力振幅 $\Delta\sigma_c$ 、 $\Delta\tau_c$ とき裂長さ $2a$ との関係はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \log \Delta\sigma_c &= -0.50 \log 2a + 1.90 \text{ (焼なましき裂)} \\ \log \Delta\sigma_c &= -0.50 \log 2a + 1.91 \text{ (時効処理き裂)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \log \Delta\tau_c &= -0.52 \log 2a + 1.64 \text{ (焼なましき裂)} \\ \log \Delta\tau_c &= -0.53 \log 2a + 1.70 \text{ (時効処理き裂)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

前述のように、式(3)における両き裂の応力振幅 $\Delta\sigma_c$ の差が残留応力による応力振幅の減少量 σ_0 を与え、式(4)の $\Delta\tau_c$ の差が摩擦力による τ_f に相当する。

表1 各種試験片のビッカース硬さ

Specimen	Vickers hardness
Virgin specimen	159
Cracked specimen	166
Aged cracked specimen	164
Annealed cracked specimen	157

(a) $\theta = 0^\circ$, モードII

$$\sigma_0 = (10^{1.91} - 10^{1.90})(2a)^{-0.50} \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau_f = 10^{1.71}(2a)^{-0.53} - 10^{1.64}(2a)^{-0.52} \dots\dots\dots (6)$$

4.2 焼なましき裂の進展条件に対する要約 き裂の二次元平面問題において、き裂先端に極座標 (r, ϕ) をとれば、モードI, IIの混合モード下においてき裂先端近傍の ϕ 方向応力は前報⁽¹⁾を参照して

$$\sigma_m = \frac{K_I^* f(\phi)}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{K_{II}^* g(\phi)}{\sqrt{2\pi r}} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} f(\phi) &= (3/4 \cos \phi/2 + 1/4 \cos 3\phi/2) \\ g(\phi) &= -(3/4 \sin \phi/2 + 3/4 \sin 3\phi/2) \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

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

(b) $\theta = 45^\circ$

(c) $\theta = 90^\circ$, モードI

図2 き裂進展の下限界応力曲線

$$\left. \begin{aligned} K_I^* &= F_I \sigma^* \sqrt{\pi a} \\ K_{II}^* &= F_{II} \tau^* \sqrt{\pi a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

前報で述べたように、焼なましき裂に対して、モード I およびモード II における応力拡大係数の変動幅 ΔK_I , ΔK_{II} と公称応力振幅 $\Delta \sigma$, $\Delta \tau$ との関係は、応力比 $R = -1$ においては

$$\left. \begin{aligned} \Delta K_I &= F_I \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \\ \Delta K_{II} &= 2 F_{II} \Delta \tau \sqrt{\pi a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

き裂の進展が円周方向の主応力の変動幅に支配されると仮定すれば、モード I とモード II について、き裂の進展開始条件は

$$\frac{\Delta K_I f(\psi)_{\max}}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{\Delta K_{II} g(\psi)_{\max}}{\sqrt{2\pi r}} = c \quad (\text{一定}) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $f(\psi)_{\max} = 1$, $g(\psi)_{\max} = 2/\sqrt{3}$

式(10), (11)より

$$\frac{F_{II}}{F_I} = \frac{\Delta \sigma_c}{2 \Delta \tau_c g(\psi)_{\max}} \dots\dots\dots (12)$$

混合モードにおいて圧縮負荷による摩擦効果を見無視すれば、き裂進展の下限界における ψ 方向応力の変動幅は

$$\Delta \sigma_m = \frac{F_I \Delta \sigma_c^* \sqrt{\pi a} f(\psi)}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{2 F_{II} \Delta \tau_c^* \sqrt{\pi a} g(\psi)}{\sqrt{2\pi r}} \dots\dots\dots (13)$$

き裂の進展下限界条件

$$\Delta \sigma_m \max = c \dots\dots\dots (14)$$

より下限界応力振幅 $\Delta \sigma_c^*$, $\Delta \tau_c^*$ を求めることができる。すなわち、

$$\begin{aligned} \alpha &= \Delta K_I^* / \Delta K_{II}^* \\ &= F_I \Delta \sigma_c^* / 2 F_{II} \Delta \tau_c^* \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

とし、 $\Delta \sigma_m$ が最大値をとる時の ψ を ψ_0 とすれば、式(11)~(14)から

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_c^* &= \frac{\Delta \sigma_c \alpha}{f(\psi_0) \alpha + g(\psi_0)} \\ \Delta \tau_c^* &= \frac{\Delta \tau_c g(\psi)_{\max}}{f(\psi_0) \alpha + g(\psi_0)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

を得る。 ψ_0 は式(13)の極値条件

$$\alpha \sin \psi_0 + (3 \cos \psi_0 - 1) = 0 \dots\dots\dots (17)$$

から求めることができる。

4.3 混合モード下における時効処理き裂の進展条件 モード I およびモード II の結果に基づき、最大円周方向応力基準⁽⁹⁾を用いて、混合モード下における時効処理き裂の進展下限界条件を検討する。

残留応力の影響を考慮すれば、モード I およびモード II においてき裂進展に有効な応力の変動幅は前者では $\Delta \sigma_c - \sigma_0$ であり、後者では負荷の対称性より $2(\Delta \tau_c - \tau_f)$ となる。応力拡大係数の変動幅は

$$\left. \begin{aligned} \Delta K_I &= F_I (\Delta \sigma_c - \sigma_0) \sqrt{\pi a} \\ \Delta K_{II} &= 2 F_{II} (\Delta \tau_c - \tau_f) \sqrt{\pi a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

となる。式(12)に対応して

$$\frac{F_{II}}{F_I} = \frac{(\Delta \sigma_c - \sigma_0)}{2(\Delta \tau_c - \tau_f) g(\psi)_{\max}} \dots\dots\dots (19)$$

が得られる。

混合モード下においては、引張り・せん断の組合せでは摩擦力は作用せず、圧縮・せん断状態においてのみ作用するとすれば、せん断応力の変動幅は $\Delta \tau_c^* + (\Delta \tau_c^* - \tau_f)$ より $2\Delta \tau_c^* - \tau_f$ となる。したがって、

$$\left. \begin{aligned} \Delta K_I^* &= F_I (\Delta \sigma_c^* - \sigma_0) \sqrt{\pi a} \\ \Delta K_{II}^* &= F_{II} (2\Delta \tau_c^* - \tau_f) \sqrt{\pi a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

式(15)~(17)と同様に、次式を得る。

$$\begin{aligned} \alpha &= \Delta K_I^* / \Delta K_{II}^* \\ &= \frac{F_I (\Delta \sigma_c^* - \sigma_0)}{F_{II} (2\Delta \tau_c^* - \tau_f)} \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_c^* &= \sigma_0 + \frac{(\Delta \sigma_c - \sigma_0) \alpha}{f(\psi_0) \alpha + g(\psi_0)} \\ \Delta \tau_c^* &= \frac{\tau_f}{2} + \frac{(\Delta \tau_c - \tau_f) g(\psi)_{\max}}{f(\psi_0) \alpha + g(\psi_0)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

$$\alpha \sin \psi_0 + (3 \cos \psi_0 - 1) = 0 \dots\dots\dots (23)$$

摩擦力はき裂開口の状態と関連するが、時効処理き裂は無負荷の状態ですべてに閉口している。したがって、圧縮・せん断の状態においても、摩擦力は圧縮負荷の大きさにあまり影響されず、モード II において得られた τ_f をそのまま混合モード ($\theta = 45^\circ$) に適用できるものと考えられる。ここにおいても $\Delta \sigma_c^* / \Delta \tau_c^* = 2 \tan \theta$ が成立するが、 θ から $\Delta \sigma_c^*$, $\Delta \tau_c^*$ などを求めようとすると、連立方程式を解くことになり、解を求めることは容易でない。そこで、パラメータ α を利用して計算

図3 き裂長さ先端部に発生するすべり

を進める。すなわち、 α に任意の値を代入し、 $\Delta\sigma_c^*/\Delta\tau_c^*=2 \tan \theta (\theta=45^\circ)$ を満足するき裂長さ $2a$ を決定する。この手順を踏めば、 a から ϕ_0 , $\Delta\sigma_c^*$, $\Delta\tau_c^*$ などを順次求めることができる。図4には式(21), (22)に基づいて得られた $\theta=45^\circ$ におけるき裂進展の下限界応力曲線の計算結果(破線)および同じ変位様式における試験結果を示した。図4から明らかなようにき裂先端に残留応力が存在する場合においても、その効果を考慮すれば、モードI, IIの実験結果に基づいて混合モード下におけるき裂進展の下限界応力を精度よく推定できる。

4・4 摩擦力を考慮した焼なましき裂の進展下限界
前報においては、最大円周方向応力基準を採用してモードI, IIの試験結果に基づき、各種の θ における混合モード下のき裂進展の下限界応力を算定した。その結果、き裂面に作用する摩擦力の影響が無視できる場合には、算定結果は試験結果を予測することが可能となることが明らかとなった。

しかしながら、実際には焼なましき裂においても $R=-1$ の混合モードの条件下では、圧縮・せん断状態でき裂面に摩擦力が作用するため、き裂進展に寄与するせん断応力の変動幅は前報で述べた $2\Delta\tau_c^*$ よりも小さくなる。本節では、この点を考慮して焼なましき裂の種々の混合モード下におけるき裂進展の下限界応力曲線を推定し、併せて3・2節に述べた焼なましき裂と時効処理き裂の混合モード下における進展下限界曲線のこう配の相違をもたらす原因についても考察する。

焼なましき裂は無負荷の状態で全長にわたり開口し、き裂面に垂直な圧縮負荷が増加するにつれて、き

裂べりの閉口部分が増加する⁽⁵⁾。このため、圧縮・せん断状態ではき裂面に摩擦力が働くことになり、摩擦力は圧縮負荷の関数になるものと考えられる。すなわち、圧縮・せん断の状態ではき裂進展に寄与する応力振幅は摩擦力を無視した場合よりも減少し、 $\Delta\tau_c^*-\tau_f$ となる。ここにおいて、 τ_f は上述の理由により圧縮負荷すなわち $\Delta\sigma_c^*$ の関数になる。したがって、

$$\Delta\sigma_m = \frac{F_I \Delta\sigma_c^* \sqrt{\pi a} f(\psi)}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{F_{II} (2\Delta\tau_c^* - \tau_f) \sqrt{\pi a} g(\psi)}{\sqrt{2\pi r}} \quad (24)$$

式(15)~(17)と同様に次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_c^* &= \frac{\Delta\sigma_c \alpha}{f(\psi_0)\alpha + g(\psi_0)} \\ \Delta\tau_c^* &= \frac{\tau_f}{2} + \frac{\Delta\tau_c g(\psi)_{\max}}{f(\psi_0)\alpha + g(\psi_0)} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

ここに、

$$\alpha = F_I \Delta\sigma_c^* / F_{II} (2\Delta\tau_c^* - \tau_f) \quad (26)$$

$$\alpha \sin \psi_0 + (3 \cos \psi_0 - 1) = 0 \quad (27)$$

τ_f を求めるためには、特定の θ における $\Delta\sigma_c^*-2a$ 曲線が既知である必要がある。このとき式(25)から τ_f を $\Delta\sigma_c^*$ の関数として求め、これを他の θ に適用してその θ に対する $\Delta\sigma_c^*-2a$ 曲線を決定することができる。 $\theta=30^\circ$ の下限界応力曲線に基づいて、他の θ における曲線を推定してみた。この手順は以下のようである。

$\theta=30^\circ$ に対しては、前報⁽¹⁾の図5(b)より

$$\log \Delta\sigma_c^* = -0.68 \log 2a + 1.52 \quad (28)$$

α をパラメータとして、式(25)を解けば、 $\Delta\sigma_c^*$ と τ_f との関係すなわち、 τ_f を圧縮応力 σ_c^* の関数として見いだすことができる。図5に結果を示す。図5から明らかなように、 σ_c^* がおよそ50 MPa未満では、摩擦力の寄与がないものと考えられる。これは、焼なましき裂が無負荷の状態で完全に開口し、圧縮応力が有限値になって初めて閉口が始まる⁽⁵⁾ことによるものと考えられる。そこで、 τ_f を圧縮応力 σ_c^* の一次関数で近似し、 $\theta=30, 45, 60^\circ$ の各場合について σ_c^* と有効せん断応力 $\Delta\tau_c^*-\tau_f$ の変化の関係を図示すれば、図6となる。すなわち、応力比 $R=-1$ において応力振幅 $\Delta\sigma^*$ が50 MPa未満では τ_f は作用せず、圧縮応力 σ_c^* と有効せん断応力の間には式(2)の関係が成立する。しかし、 $\Delta\sigma_c^*$ が50 MPa以上になると τ_f が作用するため、圧縮・せん断の組合せ状態における有効せん断応力の最大値は $\theta=30^\circ$ では σ_c^* が $\Delta\sigma_c^*$ に到達した段階で生じ、その値は $\Delta\tau_c^*-\tau_f$ となる。一方、他の θ では τ_f の寄与が大きく、有効せん断応力は $\sigma_c^*=50$ MPaの値

図4 き裂進展の下限界応力曲線の実験値と計算値
(時効処理き裂)

より減少する。すなわち、図6の点A、Bで最大値 $\tau(A)$ 、 $\tau(B)$ をとるため、有効せん断応力の変動幅はそれぞれ $2\Delta\tau_c^* - \tau_f$ 、 $\Delta\tau_c^* + \tau(A)$ 、 $\Delta\tau_c^* + \tau(B)$ となる。この点を考慮してき裂進展の下限界条件を求めれば、式(25)~(27)と同様に次式を得る。

$$\Delta\sigma_c^* = \frac{\Delta\sigma_c \alpha}{f(\psi_0)\alpha + g(\psi_0)} \quad (29)$$

$\theta = 45^\circ$ に対して、

$$\Delta\tau_c^* = -\tau(A) + \frac{2\Delta\tau_{cg}(\psi)_{\max}}{f(\psi_0)\alpha + g(\psi_0)} \quad (30)$$

$$\alpha = F_I \Delta\sigma_c^* / F_{II} \{\Delta\tau_c^* + \tau(A)\} \quad (31)$$

$\theta = 60^\circ$ に対して、

$$\Delta\tau_c^* = -\tau(B) + \frac{2\Delta\tau_{cg}(\psi)_{\max}}{f(\psi_0)\alpha + g(\psi_0)} \quad (32)$$

$$\alpha = F_I \Delta\sigma_c^* / F_{II} \{\Delta\tau_c^* + \tau(B)\} \quad (33)$$

時効処理き裂で実施したのと同じ手順を踏めば、式(29)、(30)、(32)の値を任意のき裂長さについて求めることができる。なお、上述の理由により、 $\Delta\sigma^*$ が50 MPa未満では $\Delta\sigma_c^*$ 、 $\Delta\tau_c^*$ の値は摩擦力を考慮しない前報の値と一致することになる。

図7には $\theta = 30^\circ$ の下限界応力曲線に基づいて求めた $\theta = 45^\circ$ 、 60° における下限界応力曲線を示した。図7には摩擦力を無視した場合⁽¹⁾と本実験値を併記したが、摩擦力を考慮すれば、 θ の相違による下限界曲線のこう配の差異を合理的に説明できる。

焼なましき裂では、き裂は無負荷の状態で全長にわたり開口しているから、摩擦力にはき裂面に作用する圧縮応力の増加によるき裂接触面の増大が寄与する。一方、時効処理き裂では無負荷の状態でき裂は完全に閉口しているから、摩擦力はこの段階でき裂面に作用

している残留応力の影響を受け、この大きさはき裂長さに依存しているものと考えられる。すなわち、焼なましき裂における摩擦力は主として圧縮応力に支配され、時効処理き裂の摩擦力がき裂長さに依存するとみなせば、それぞれの混合モード下におけるき裂進展の下限界応力値を予測することが可能であり、応力曲線のこう配の相違をも説明できる。

5. 結 言

炭素工具鋼製の丸棒平滑試験片を用いて、回転曲げにより作成した長さ0.01~1 mmオーダの表面き裂に時効処理を施した場合を対象とし、シェンク式疲労

図6 圧縮応力 σ^* と有効せん断応力 $\Delta\tau^* - \tau_f$ の関係

図5 圧縮応力 σ^* と τ_f の関係

図7 き裂進展の下限界応力曲線の実験値と計算値(焼なましき裂)

試験機によりモード I, II およびこれら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応力比 $R=-1$ に対して調査した。その結果を焼なましき裂の場合と比較し、残留応力がき裂進展の下限界に及ぼす影響を調査した。得られた結果を要約すれば以下のようになる。

(1) 時効処理き裂の進展の下限界応力はいずれのモードにおいても焼なましき裂に比べて高くなり、その上昇の割合はモード II において最も大きい。

(2) この下限界応力の上昇は、モード I においては主として圧縮残留応力に、モード II ではき裂面に作用する摩擦力による。

(3) 時効処理き裂の混合モード下における進展の下限界応力は上記の圧縮残留応力と摩擦力の寄与を考慮すれば、最大円周方向応力基準を利用して、モード I, II の試験結果に基づきよい精度で推定できる。

(4) 焼なましき裂では、き裂面に作用する摩擦力

が圧縮応力の関数となることを考慮すれば、種々の混合モード下における進展の下限界応力を推定することが可能となるとともに、下限界応力曲線のこう配の相違をも説明できる。

終わりに、実験に協力された栗栖技官ならびに本学学生 大関泰明君に謝意を表する。

文 献

- (1) 北岡・ほか 2 名, 機論, 51-467, A(昭 60), 1764.
- (2) Elber, W., *Eng. Fract. Mech.*, 2-1 (1970), 37.
- (3) Adams, N. J. I., *Eng. Fract. Mech.*, 4-3 (1972), 543.
- (4) 北岡・村田, 機論, 50-458, A(昭 59), 1695.
- (5) 北岡・木村, 機論, 46-403, A(昭 55), 258.
- (6) 北岡・小木曾, 機論, 48-428, A(昭 57), 414.
- (7) 広瀬・ほか 2 名, 機論, 43-375, A(昭 57), 4337.
- (8) e. g., Broek, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, (1974), 92, Noordhoff International Publishing Leyden.
- (9) Erdogan, F. and Sih, G. C., *Trans ASME, Ser. D*, 85 (1963), 519.

討 論

〔質問〕 加 藤 容 三〔岐阜大学工学部〕

(1) いわゆる“小さなき裂あるいは短いき裂”に対しては、線形破壊力学、連続体力学の適用限界が問題となる。著者らの調査されたき裂長さの範囲は 0.01~1 mm であるが、展開された議論の適用できる限界き裂長さを明確にされる必要はないか。図 2 において、下限界応力とき裂長さとの関係を表す曲線のこう配が -0.5 に近いことは、 ΔK_m がほぼ一定となること、すなわち下限界が ΔK 支配であることを意味するが、この曲線は結晶粒オーダの 0.01 mm のき裂長さまで適用可能であろうか。下限界が応力支配であることを表す平滑材疲労限度を通る水平線と交さる可能性はないか(付 1)。

(2) 式(5)によると、き裂開口に起因する ΔK の減少量は $\sigma\sqrt{2a}$ に比例し、き裂長さに無関係にほぼ一定となる。摩擦力の問題はあるにしても、著者らの微小き裂の進展条件は、基本的に ΔK の適用可能な長いき裂に対するものと同じと解釈してよろしいか。

〔回答〕 (1) 本実験で調査の対象としたき裂には、結晶粒オーダのものも含まれているが、対数曲線で整理された下限界応力のデータは、主として 0.1 mm 以上のき裂に対するものである。前報⁽¹⁾の結果と合わせて考えれば、き裂長さが 0.1 mm ないし 0.2 mm 以上では、き裂進展の下限界は ΔK 支配となり、線形破壊力学の適用可能なき裂長さはこれ以上であ

ると考えられる。なお、0.05 mm のき裂進展の下限界応力が平滑試験片の疲労限に近いという前報の結果から、この長さ程度以下のき裂に対しては、進展の下限界はご指摘の応力支配になるものと考えられる。

(2) モード I において、き裂周縁に存在する残留応力に起因するき裂開口によって生ずる ΔK の減少量は、き裂長さに無関係となり、この場合のき裂進展条件は、ご指摘の ΔK の適用が可能ないわゆる長いき裂に対するものと同じであると考えている。

なお、本報で議論した時効処理き裂に対する進展条件は、混合モードにおける下限界をモード I, II のそれと関連づけたものである。したがって、この場合の進展条件の式(22)にはモード I におけるき裂開口と、これに起因するモード II に対する摩擦力による $\Delta\sigma$, $\Delta\tau$ の減少量とともに現れるため、き裂開口の影響を考慮するか否かにより混合モード下の進展条件は異なったものとなる。

〔質問〕 横 堀 寿 光〔東北大学工学部〕

(1) 焼なまし材では、摩擦力が存在しないということはどのような事実からいえるか。負荷時にき裂が開閉していても、繰返し応力が負荷された後は、負荷・除荷過程における除荷時に摩擦力が生じていないことは証明されているのか。また、せん断応力負荷に対する摩擦力は、静的な引張応力が作用することにより軽減されるが、その考え方からすると、焼なまし材

に対してもモードII負荷での摩擦力が含まれていて、式(4)の差だけが摩擦力とは考えられないのではないかなと思うが、どのようにお考えか。

(2) 本論文で、「き裂の進展が、円周方向の主応力の変動幅に支配される」と仮定されているが、その根拠としてどのようなことを考えておられるのか。質問者らの行った結果(付2)(付3)では必ずしもこのクライテリオンには従っていないのだからいかがか。

〔回答〕 (1) 焼なましき裂材では、無負荷の状態ですき裂は全長にわたり開口しており、圧縮応力が有限値になって初めてき裂先端部から閉口が開始することが確認されている⁽¹⁾。したがって、このような状態にある焼なましき裂にモードII変位のみが繰返し作用した場合、き裂進展の下限界においては、予き裂先端に新たなき裂の発生がないため、き裂面には摩擦力は生じないものと考えられる。一方、時効処理き裂では、無負荷の状態ですき裂は完全に閉口しているから、モードII変位に対しては常に摩擦力が作用することになる。したがって、両き裂材の材質的相違がき裂進展の下限界応力に及ぼす影響を無視すれば、モードII変位のみが作用したとき、進展の下限界応力振幅 $\Delta\tau$ の差は主としてき裂面摩擦力の差に起因しているものと考えて、式(4)に基づき摩擦力の効果を議論したもの

である。

ただし、焼なましき裂材においても、混合モード下では、圧縮・せん断状態においてき裂面には圧縮負荷の大きさに関連した摩擦力が作用することは、本報中に記述している。

(2) き裂進展の下限界を支配する応力条件は、材料によって異なるものと考えられ、著者らもき裂進展の下限界条件は、ご指摘のように必ずしもいわゆる最大主応力基準によって整理できるものではないと考えている。本報では、モードIIにおける材料表面の予き裂からのき裂進展角度が $\pm 70.5^\circ$ ⁽¹⁾に近いことから、 K 値が未知の微小表面き裂に対して混合モード下の進展条件を上記の基準を利用して検討したものである。摩擦力の影響を考慮し、この基準を用いることにより、比較的よい精度で進展の下限界応力を推定することが可能であることから、使用した材料に対しては、この基準を用いることは妥当であると考えている。

(付1) Smith, R. A., *ASTM STP*, 811(1983), 264.

(付2) Yokobori, A. T. Jr., Yokobori, T., Sato, K. and Shoji, K., *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 8-4 (1985), 315.

(付3) 横堀(寿)・横堀(武)・石井・佐藤・庄司, 材料, 35-395 (昭61).