

板厚方向に傾斜した切欠きからのモード I, II, III の 混合モード形疲労き裂伝ば*

真壁朝敏*¹, 兼城英夫*², 玉寄博道*³
屋富祖建樹*², 屋良秀夫*²

Fatigue Crack Propagation under Mixed Mode of Modes I, II and III Started from Notch Inclined in Thickness Direction

Chobin MAKABE, Hideo KANESHIRO, Hiromichi TAMAYOSE,
Tateki YAFUSO and Hideo YARA

Fatigue crack propagation behavior under the mixed-mode condition which combined modes I, II and III was investigated in a push-pull fatigue test of the notched specimen. The notch inclined in the thickness direction was cut at the center of the plate specimen. Some fatigue cracks were initiated from the notch root, and the interaction of these cracks was observed in the crack propagation stage. However, in the present study, the crack length including notch length was treated as a single-center crack. The fatigue crack propagation rate da/dN was evaluated with effective stress intensity factor range $\Delta K_{p,eff}$ calculated using projected crack length and normal stress in the axial direction. The crack propagation law for the present notched specimen evaluated with $\Delta K_{p,eff}$ coincides with that of the center cracked plate.

Key Words: Fatigue, Crack Propagation, Mixed Mode, Effective Stress Intensity Factor Range, Projected Crack Length

1. 緒 言

機械・機器に疲労き裂が発生した場合、そのき裂周辺の応力場はせん断応力と垂直応力の組合された複合応力場や多軸応力場であることが多いようである。そのため、種々の混合モードおよび多軸応力下での疲労き裂伝ばに関する研究⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾が行われ、破壊力学を実際の機械に適用するための試みやその基本的な検討がなされてきている。また、これらの研究には二軸応力⁽²⁾⁻⁽⁴⁾やモード I とモード II の組合せ応力⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾に関するものが多い。それに対しモード I, II, III およびモード I とモード III の混合モード形疲労き裂伝ばに関する研究は少ないようである。

モード I, II, III の混合モード形破壊については大塚ら⁽⁸⁾によって精力的な研究がなされている。また、モード I とモード III の混合モード形疲労き裂伝ばに関する研究として、吉岡ら⁽⁹⁾は板厚方向に傾いた切欠きを用い最大主応力学的な考えに基づいた下限界条件 (ΔK_{th}) の評価を行い、その有効性を示している。しか

しながら、これらの研究においては、疲労き裂開口挙動を考慮した疲労き裂の伝ば過程の詳細な検討は行っていない。また、モード I, II, III の混合モード形疲労き裂伝ばの評価に対して有効応力拡大係数範囲を適用した研究も少ないようである。そこで、本研究では吉岡ら⁽⁹⁾の研究と同様に板厚方向に傾いた切欠きから疲労き裂を発生させ、その伝ば挙動を応力拡大係数の最大値および有効応力拡大係数範囲によって評価した。また、本研究においては実際の機械・機器への応用ではなく、基礎研究的観点から、応力比 R が負の場合における疲労き裂伝ば挙動とその法則について検討した。

2. 試験片および実験方法

素材は SM 490 A 鋼である。その化学成分と機械的性質をそれぞれ表 1 と 2 に示す。試験片形状を図 1 に示す。モード I, II, III の混合モード形疲労き裂伝ばを実現するため、試験部中央には図 2 に示す形状の切欠きを放電加工によって作成した。切欠きは、板厚方向に 45° 傾斜しており、また切欠中心を境にして、その両側での切欠方向が互いに直角になるように加工した。また、通常の中央き裂のき裂伝ばと図 2 の切欠きからのき裂伝ばとの比較のため、荷重軸に垂直方向の

* 原稿受付 平成 4 年 9 月 16 日。

¹ 正員、琉球大学短期大学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町千原 1)。

² 正員、琉球大学工学部。

³ 琉球大学大学院。

表 1 化学成分 (wt, %)

C	Si	Mn	P	S
0.16	0.39	1.44	0.15	0.04

表 2 機械的性質

Yield point σ_s (MPa)	Ultimate tensile strength σ_B (MPa)	True fracture stress σ_T (MPa)	Elongation δ (%)
383	540	—	25

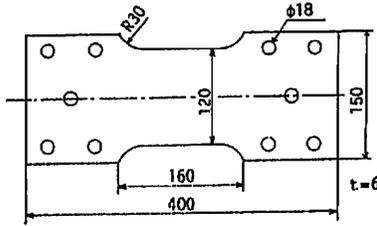


図 1 試験片形状と寸法 (mm)

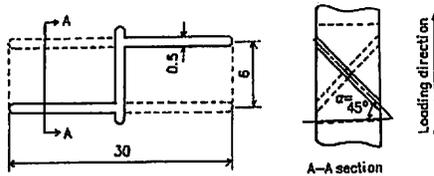


図 2 切欠形状と寸法 (mm)

切欠きを加工した試験片も作成した。

油圧サーボ式疲労試験機を用いて引張・圧縮方式の疲労試験を行った。その際の繰返し周波数は約 10 Hz であり、き裂伝ばに及ぼす圧縮応力の影響を調べるため、最大引張応力を同じ (47.7 MPa) にして応力比 R を -1 と -2 に変化させた。後に示すように、き裂は表面上では荷重軸と傾斜した方向に伝ばし、その傾斜角は変化していく。そして、その傾斜角は、表・裏面において、荷重軸に垂直方向に対し符号が異なりほぼ大きさの等しい角度となった。そのため、き裂長さ $2a$ は簡便的に切欠長さを含めた表面上の荷重軸方向への投影長さで定義し、その測定は金属顕微鏡とダイヤルゲージを組合せて行った。疲労き裂の伝ば挙動と開閉口挙動の関係を調べるため、き裂開口点応力 σ_{op} を測定した。その測定には著者らが開発したひずみ干渉法^{(9)~(11)}を用いた。その際には複数のひずみゲージを切欠先端付近に貼付け、それらから得られる局所ひずみと繰返し応力の関係によってき裂開口点を判断した。

3. 実験結果および考察

3・1 き裂伝ば方向と切欠底付近の破面観察 本研究では、圧縮応力によって生じるせん断応力がき裂伝ばに及ぼす影響を検討するため、繰返す最大の引張応力を固定し、圧縮応力を変化させた (応力比を -1 と -2 にした)。大塚ら⁽¹⁾は種々の材料の混合モード疲労試験を行い、材料や負荷条件によって、せん断モードが疲労き裂の伝ばを主に支配する場合と引裂きモードが疲労き裂伝ばを主に支配する場合があることを明らかにした。このような分類をすると、本実験材料での疲労き裂伝ばは後者に当てはまると思われる。そこで、まず、破面からこれらのことについて検討した。

切欠先端付近の破面の様子を図 3 に示す。図 3 (a) が応力比 R が -1 の場合であり、(b) が R が -2 の場合である。図 3 (a.1), (b.1) は破面上方からの観察結果であり、図 3 (a.2), (b.2) は試験片表面からの観察結果である。これらから、吉岡らの研究⁽⁸⁾と同様に、複数個のき裂が切欠方向と若干向きを変え、切欠底から発生していることがわかる。また、き裂伝ば初期の破面にはき裂の合体による段差がみられる。そして、き裂伝ば方向は、き裂の長さとともに変化していき、強制的にせん断応力が生じる方向に向けられたき裂先端方向が、次第に垂直応力のみが支配的になる方向に変化する。このような観察結果から本実験におけるき裂伝ばは主には垂直応力によって支配されることがわかる。

応力比 R の違いにより破面の状況も若干異なる。破面に観察される段差は $R=-1$ の場合が -2 の場合よりも大きくなっている。また、破面のこすれあいは $R=-2$ の場合が顕著である。この結果から、き裂伝ばは垂直応力に主に支配されるが、き裂の進展に及ぼすせん断の影響も存在し、 $R=-2$ の場合が $R=-1$ の場合よりも顕著であることがうかがえる。

観察結果によると、き裂伝ば初期においては、試験片表・裏面付近でのき裂先端およびき裂伝ば方向は、板厚方向および表面に平行な面において、荷重軸との垂直面から傾いている。そして、試験片表面と裏面でき裂の傾き角は大きさはほぼ同じであるがその符号は異なる。このことから、幾何学的に考えると近似的には、試験片板厚中央部でのき裂の傾きはほぼ板厚方向の傾きのみを考えて良いと思われる。したがって、本実験のき裂伝ばは、モード I, II, IIIの混合モード形であり、近似的に、板厚中央部ではモード I とモード IIIの混合モード形であると思われる。次節ではそのき裂伝ば挙動について検討し、せん断の影響について考

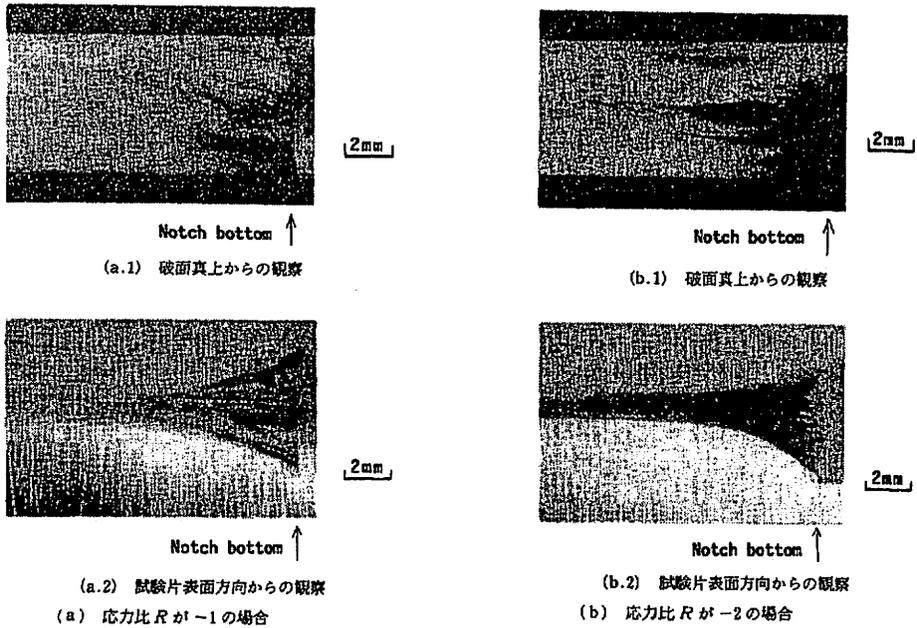


図3 斜め切欠底からのき裂伝ば形態の観察

察する。

3・2 疲労き裂伝ばに及ぼすき裂面傾斜、圧縮応力の影響 3・1節の破面観察の結果からき裂伝ばの初期では切欠底の複数のき裂が干渉しながら伝ばしていることがわかった。しかし、複雑さを避けるため本節ではそれらのき裂を一つのき裂として扱い、き裂伝ば挙動を検討する。その際のき裂長さは先に述べたように切欠長さを含めた荷重方向への表面での投影長さで定義する。そのき裂長さ a と繰返し数 N との関係で示されるき裂伝ば曲線を図4に示す。図中の実線が通常の中央き裂の場合(板厚方向の初期き裂傾き角 α が 0° の場合)で、応力比 $R = -1$ の実験である。破線が板厚方向の初期き裂傾き角 α が 45° の場合である。なお、いずれの場合も繰返し公称応力の最大値は 47.7 MPa に固定した。

$\alpha = 45^\circ$ の場合には、初期ではき裂伝ば速度が速く、次に遅くなり、さらに速くなるという経過をたどっている。したがって、板厚に対して斜め方向にき裂先端が存在する場合、き裂伝ば速度が単純にき裂長さ(切欠長さを含めた荷重方向への投影長さ)とともに増加するものでないことがわかる。また、き裂伝ば曲線の比較から応力比 R によって、き裂伝ば速度が異なり、圧縮の応力がき裂の伝ば挙動になんらかの影響を及ぼしていることがわかる。

き裂伝ばに及ぼすせん断応力成分の影響を考えるた

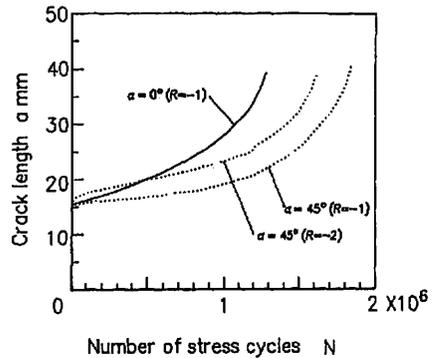


図4 き裂伝ば曲線

め、参考までに、板厚方向におけるき裂先端の傾き角 β の変化について調べた。その際には、き裂前縁を直線近似して図5と式(1)のように試験片表・裏面におけるき裂先端の位置(高さの差: y)と板厚 t から傾き角 β の変化を測定した。

$$\beta = \tan^{-1}(y/t) \dots\dots\dots(1)$$

その結果を図6に示す。このようにき裂先端は垂直応力とせん断応力の生ずる面から垂直応力のみが生じる面に移動していく。そして、角度 β の変化の傾向には応力比 R の影響がほとんどないことがわかる。

き裂開口点応力 σ_{op} の変化には応力比 R の影響が現れる。図7に式(2)で定義したき裂開口比 U の変化

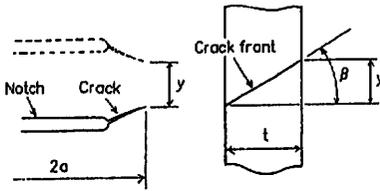


図5 き裂長さ $2a$ に対するき裂前縁傾斜角度の近似的測定方法

を示す。

$$U = (P_{max} - P_{op}) / P_{max} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 P_{max} は繰返し最大荷重、 P_{op} はひずみ干渉法⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾によって求めたき裂開口時の荷重 P である。比較のため示した通常の中央き裂の場合 ($a=0^\circ$) では、き裂長さによらず、き裂開口比 U はほぼ一定である。それに対し、板厚方向に斜めにき裂前縁がある場合には、 U はき裂長さによって変化する。その場合、き裂開口比 U は初期の高い値から減少していき、極小値に達した後、増加していくという経過をたどっている。この傾向は図4に示したき裂伝ば曲線と対応するものである。Elber⁽¹²⁾や城野ら⁽¹³⁾の研究によると、き裂開口比 U はき裂先端近傍の繰返し塑性ひずみ幅の影響を受ける。したがって、斜めき裂先端付近でのせん断変形は応力比 R が -2 の場合が大きいこと、応力比 R が -2 の場合がき裂伝ば初期で U が顕著に大きくなっていること、そして U が極小となるき裂長さは $R=-2$ の場合のほうが長いことから、せん断変形がき裂開口挙動とき裂先端付近の塑性ひずみ幅に影響を及ぼしていることが考えられる。このようなことから、本研究のような、混合モード形の疲労き裂伝ば過程でもき裂伝ば則にき裂開口挙動の影響を考慮したほうが良いことが予想される。

3.3 有効応力拡大係数範囲によるき裂伝ば挙動の評価 切欠底からの複数のき裂の発生のため、き裂伝ば初期では、き裂前縁形状は非常に複雑である。しかしながら、前節同様に、表面き裂長さ $2a$ を代表長さ(切欠長さを含む荷重方向への投影長さ)としてき裂伝ば則を検討した。その際には以下に示す応力拡大係数を用いた。本実験では、板厚方向にき裂先端の傾き角が変化し、応力分布状態が複雑に変化するので、厳密に応力拡大係数を評価するのは非常に困難である。そこで、これまでに研究されている、モードIとモードIIIにおける吉岡ら⁽⁹⁾の評価式や村上ら⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾の簡便法を参考にして検討した。

垂直応力を σ_o 、せん断応力を τ 、板幅を $2W$ とするとモードI、モードIIIに対する中央き裂の応力拡大係

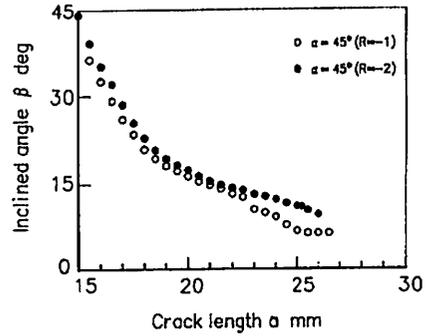


図6 板厚方向へのき裂前縁傾斜角 β の変化

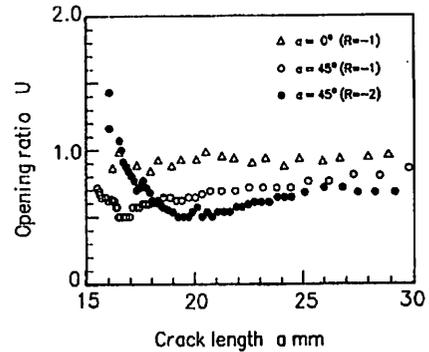


図7 き裂開口比 U とき裂半長 a の関係

数 K_I ⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾、 K_{III} ⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾ はそれぞれ次式のように求められる(本研究では、特にモードIIについては、応力拡大係数の検討を行っていない)。

$$K_I = \sigma_o \sqrt{\pi a} F_I(\xi), \xi = a/W \dots\dots\dots (3)$$

$$F_I = (1 - 0.025\xi^2 + 0.06\xi^4) \sqrt{\sec(\pi\xi/2)}$$

また、

$$K_{III} = \tau \sqrt{\pi a} F_{III}(\xi), \xi = a/W \dots\dots\dots (4)$$

$$F_{III} = \sqrt{(2/\pi\xi) \tan(\pi\xi/2)}$$

村上と柴⁽¹⁰⁾は、一方引張荷重が加わる場合の3次元屈折表面き裂の応力拡大係数の解析を行っている。彼らはき裂(主応力方向へ投影したき裂面が長方形となるき裂)が、種々の形状に屈曲したり、主応力方向に対し傾斜している場合について解析を行っている。そして、き裂縁に生じる応力拡大係数(き裂先端を原点とした極座標における K_θ)の最大値 $K_{\theta max}$ がき裂面を主応力軸方向へ投影した面積 $area_p$ を用いて次式で有効に近似できることを示している。

$$K_{\theta max} \cong 0.650 \sigma_o \sqrt{\pi \sqrt{area_p}} \dots\dots\dots (5)$$

村上と柴⁽¹⁰⁾の解析結果には本研究の傾斜したき裂

に相当する形状のものはない。しかしながら、彼らの解析結果は形状の違いに依存せず式(5)の近似が有効であることが示されているので、本研究にも彼らの結果が応用できるものと考えられる。ただし、本研究では、板厚方向に貫通したき裂について扱っているのもので、その応用として、き裂面積の平方根 $\text{area}^{1/2}$ を投影き裂長さ $2a$ で置き換えて検討した。その結果、村上らの傾いたき裂の $K_{\theta \max}$ に相当する応力拡大係数 K_p は式(3)で示した通常の中央き裂の場合の K_I と一致する。すなわち、き裂のない断面の垂直応力を $\sigma = \sigma_0 = P/(2Wt)$ とすると

$$K_p = K_I \dots \dots \dots (6)$$

吉岡ら⁽⁹⁾は板厚方向に傾斜したき裂の伝ば下限限界値 $\Delta K_{I\theta}$ を傾斜き裂に生じる K_I と K_{III} から算出した最大主応力的観点に基づく応力拡大係数によって評価している。この応力拡大係数を K_p とすると

$$K_p = 0.5 \cdot (1+2\nu) \cdot K_{I\beta} + \sqrt{0.25 \cdot (1-2\nu)^2 \cdot K_{I\beta}^2 + K_{III\beta}^2} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $\nu (=0.3)$ はポアソン比であり、

$$K_{I\beta} = K_I \cos^2 \beta \dots \dots \dots (8)$$

$$K_{III\beta} = K_{III} \cos \beta \sin \beta \dots \dots \dots (9)$$

ただし、式(9)において、 $\sigma_0 = \tau_0$ とする。そして、 β は図6に示したようなき裂長さによって変化するき裂前縁の傾き角である。

本実験の場合、試験片全体的には、モード I, II, IIIの混合モード形のき裂伝ばをする。また、厳密ではなく、近似的に考えると板厚中央部ではモード I とモード III形の混合モード形き裂伝ばをする。したがって、村上らの観点からの K_p は試験片全板厚にわたり、吉岡らの観点に立つ K_p は近似的に試験片中央部のみの検討を行うことになる。以下では、これらの応力拡大係数の繰返し負荷時の最大値と有効応力拡大係数範囲には、それぞれ、下添字 max と eff をつけて区別して考察する。例えば、 K_p に対しては $K_{p, \max}$, $\Delta K_{p, \text{eff}}$ とする。

各応力拡大係数 K の繰返し負荷時の最大値とき裂伝ば速度 da/dN との関係を図8に示す。 K の値は図8(a)~(c)の順にそれぞれ式(6), (7)そして(8)で求めたものである。これらからわかるように、この場合は応力比 R によって異なるき裂伝ば則が得られている。したがって、全体的には K の最大値では合理的な評価はできていないことがわかる。

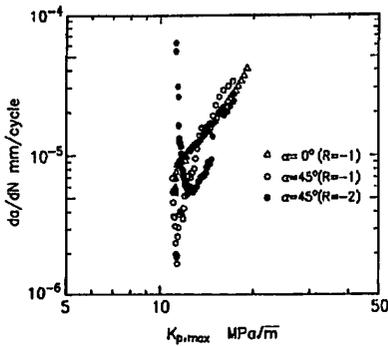
き裂開口点応力 σ_{op} を考慮した有効応力拡大係数範囲によってき裂伝ば則を検討した結果を図9に示す。図9(a)~(c)の有効応力拡大係数範囲は図8(a)

~(c)と同様な K 値にそれぞれ対応する。これらから、わかるように有効応力拡大係数範囲を用いると応力拡大係数の繰返し負荷時の最大値を用いた場合よりもき裂伝ば則が合理的に評価できる。特に、村上ら^{(19)~(20)}の投影面積的な観点に立った $\Delta K_{p, \text{eff}}$ と吉岡ら⁽⁹⁾の観点からの $\Delta K_{p, \text{eff}}$ の結果は全体的に良好な評価を与えている。これら二つの有効応力拡大係数範囲は最大主応力説的な観点に立ったものであるのもので両者はほぼ同じ性質のものであると思われる。そして、このことを考慮すると、本実験では、き裂はほぼ最大主応力的な物理量に支配され伝ばしていることになる。

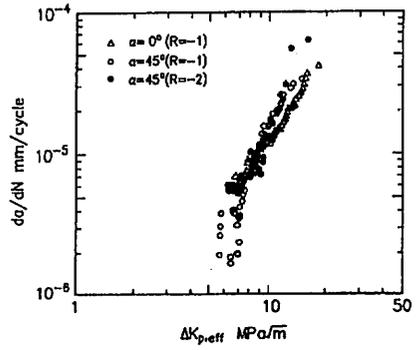
また、村上らの観点からの $\Delta K_{p, \text{eff}}$ は簡便であるので実用的であると思われる。本研究のように、板厚方向でき裂の傾き角が変化しても、複数のき裂がある場合でも、単一のき裂の場合でも、荷重方向に投影したき裂面積から算出されるき裂長さはほぼ同じである。したがって、村上と柴⁽¹⁰⁾の計算による応力拡大係数の最大値 $K_{\theta \max}$ の近似が2次元的なき裂にも適用できれば、本研究結果(投影き裂長さを用いた)が他の材料や他の応力条件下の実験でも参考になるものと思われる。なお、本実験においては、吉岡ら⁽⁹⁾の観点に立つ K_p は試験片板厚中央部の近似的な評価係数となっている。それに対してき裂伝ば速度は表面から測定した。したがって、表面と内部におけるき裂伝ば速度 da/dN が等しくなければ、 K_p によるモード I とモード IIIの混合モード形き裂伝ばの評価の妥当性は十分には検討できたことにはならない(本実験ではそのことについて詳細には検討しなかった)。しかしながら、 $\Delta K_{p, \text{eff}}$ を用いた実験結果は、 $\Delta K_{p, \text{eff}}$ の有効性を検討するための一つの参考資料になっていると思われる。

き裂伝ば則を応力拡大係数の最大値で評価した場合と有効応力拡大係数範囲で評価した場合の結果を比較することによって、本実験におけるき裂伝ば則に及ぼす圧縮応力やせん断応力の影響について考察ができる。式(8)で示す K 値(つまりモード I のみ)の最大値を用いた場合[図8(c)], 応力比 $R = -1$ においては、傾斜き裂の da/dN の極小値以後のき裂伝ば則は通常の中央き裂の場合とよく一致している。このことに基づいて、以下においては、この極小値の付近以後では、き裂伝ばに及ぼすせん断応力の影響は少ないものとして考察を行う。また、 $R = -1$ と $R = -2$ の場合を比較して考えるため、両者の da/dN の極小値のうちでき裂長さの長い位置にある $R = -2$ における極小値に注目して検討する。

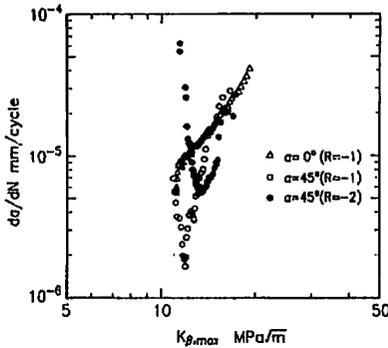
図8(c)を検討すると、せん断応力の影響が少ないと思われる、 $R = -2$ の da/dN の極小値の以後におい



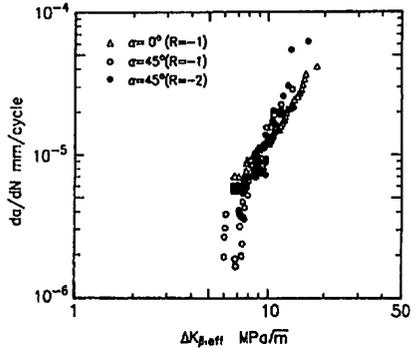
(a) 式(6)に基づく $K_{p,max}$ と da/dN の関係



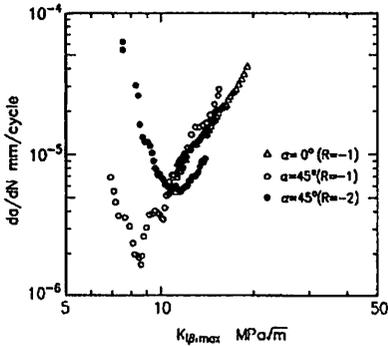
(a) 式(6)に基づく $K_{p,eff}$ と da/dN の関係



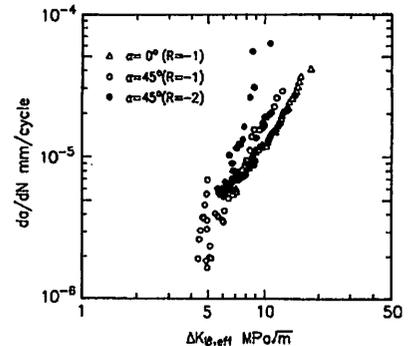
(b) 式(7)に基づく $K_{p,max}$ と da/dN の関係



(b) 式(7)に基づく $K_{p,eff}$ と da/dN の関係



(c) 式(8)に基づく $K_{I,II,III,max}$ と da/dN の関係



(c) 式(8)に基づく $K_{I,II,III,eff}$ と da/dN の関係

図8 種々の応力拡大係数の繰返し負荷時の最大値によるき裂伝ば則の評価

図9 種々の有効応力拡大係数範囲によるき裂伝ば則の評価

ては、 $R=-1$ の場合が $R=-2$ の場合よりも同じ応力拡大係数の最大値に対する da/dN の値が高くなっている。各実験の繰返し最大引張応力が同じであるので、このことから、せん断応力の影響が少なければ、圧縮応力はき裂伝ば速度 da/dN の低下をもたらすことが考えられる。しかしながら、その da/dN の極小値の以前においては、逆に $R=-2$ の場合が $R=-1$ の

場合よりも同じ応力拡大係数の最大値に対する da/dN の値が高くなっている。このことから、せん断応力がき裂伝ばに影響を及ぼす場合には、圧縮応力の値が高い場合のほうがき裂伝ばが加速されることが考えられる。参考までに、図6, 7から $R=-2$ において、き裂開口比 U が極小値となるのはき裂半長 a が 19~20 mm、傾斜角 β が 15~20° である。その時点は

ほぼ $R = -2$ の da/dN の極小値に対応する。

以上の結果はモード I のみを考慮した場合の結果である。しかしながら、これらの結果から圧縮応力やせん断応力がき裂伝ばに影響を及ぼすことがわかる。そこで、次に図 8 (a) に示すように簡便的な手法によって、最大引張荷重時のせん断応力を含めてき裂伝ば則を検討した場合について検討する。図 8 (a) は投影き裂長さを用いて、応力拡大係数の最大値 $K_{p,max}$ でき裂伝ばを評価したものである。この場合、傾斜き裂の $R = -1$ の結果はモード I のみを考慮した図 8 (c) に比べ、 da/dN と応力拡大係数の最大値の関係のばらつきが少なくなっている。しかし、 $R = -2$ の場合では、最大引張荷重時のせん断応力の影響を考慮した図 8 (a) においても、 da/dN と $K_{p,max}$ の関係のばらつきが大きい。また、本実験の場合には、 $K_{p,max}$ によるき裂伝ば則の評価は $R = -1$ と $R = -2$ の間で相関性があまりよくないことがわかる。そして、特に $R = -2$ の場合において、圧縮応力の影響をき裂伝ば則に考慮すべきことが考察される。

本実験では、図 9 (a) に示されるようにき裂伝ば則が有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{p,eff}$ によって合理的に評価できる。この結果と上述の K の最大値による結果とを関連させると、本実験の場合(特に $R = -2$ の場合)、圧縮応力の影響(あるいは圧縮応力によって生じるせん断応力の影響)はき裂開口挙動に現れていると考えられる。つまり、斜めき裂のき裂伝ば初期では、圧縮応力が大きい場合、き裂先端に形成される繰返し塑性変形量が大きくなり、それがき裂開口挙動およびき裂伝ば挙動に影響すると考えられる。

一定応力振幅下において切欠きから発生したき裂がモード I 負荷によって伝ばする場合、き裂長さの増加に従ってき裂伝ば速度がいったん減速し、極小値に達した後に加速していく^{(21)~(24)}。本研究でも図 8 に見られるようにそれと同様なき裂伝ばが生じている。切欠底からモード I でき裂が伝ばする場合、き裂長さが短い間は切欠底付近での応力集中の影響を受けながらき裂が伝ばする^{(21)~(24)}。切欠先端半径を ρ 、切欠半長を c とすると、 ρ や ρ/c が小さいほど、応力集中がき裂伝ばに影響する領域は短くなる⁽²⁵⁾。また、本実験の切欠き(スリット)の場合、 $\rho = 0.25$ mm、 $c = 15$ mm であるので、 $\rho/c = 0.017$ である。このような比較的鋭い切欠きにおいては、応力集中がモード I のき裂伝ばに影響する領域の大きさ(き裂進展方向への大きさ)は、切欠半径 ρ とほぼ同じ大きさである⁽²⁵⁾。また、大塚ら⁽²⁴⁾の研究においても、 $\rho/c < 1$ の切欠きであれば、モード I のき裂伝ば

に応力集中が影響する領域はほぼ切欠半径 ρ の大きさとみなせることが示されている。切欠底の応力集中域をき裂が通過すると、中央切欠きの場合では、き裂は中央き裂として扱え、その長さは切欠長さ⁽²⁶⁾と切欠底から測定したき裂長さの和として評価できる。

仮に、本実験の切欠きの場合の混合モード形き裂伝ばにおいても、応力集中がき裂伝ばに影響する領域が切欠半径 ρ とほぼ同じ大きさであるとすると、その大きさは 0.25 mm 程度となる。それは、本実験で検討したき裂長さの範囲(切欠底からの長さが 0.5~15 mm)に比べて小さいものである。 $\rho/c < 1$ の切欠きにおいて、モード I でき裂が伝ばする際には、応力集中がき裂伝ばに影響する領域の大きさはき裂伝ば速度 da/dN が極小値となる⁽²⁷⁾ときの切欠底からのき裂長さ⁽²⁸⁾とほぼ一致する⁽²⁹⁾。しかしながら、本研究の $R = -2$ の場合においては、 da/dN の値が極小値となるのは、切欠底からき裂が 4~5 mm 程度伝ばした時点であり、 ρ の値(0.25 mm)よりもかなり長い。この原因には、切欠底での応力集中以外に圧縮荷重によるせん断応力がき裂先端の塑性域の発達等に影響を及ぼしていることが考えられる。したがって、解析的に切欠材の混合モードき裂伝ばに影響する応力集中域の大きさを検討する余地はあるが、本実験結果によって、モード I 形と混合モード形での切欠きからのき裂伝ば挙動は異なる場合があることがわかった。今後、種々の切欠形状や応力比において、斜め切欠きからのき裂伝ばやき裂開口挙動を検討することによって、混合モードでの切欠きからのき裂の伝ば則が定量的に明確になっていくものと考えられる。

なお、部分的に有効応力拡大係数範囲によるき裂伝ば則の評価を検討すると、斜めき裂の応力比 $R = -1$ での低 da/dN 域($3 \sim 4 \times 10^{-6}$ mm/cycle 以下)では、通常の中央き裂の伝ば則を延長した場合に比べ、同じ有効応力拡大係数範囲の値に対し da/dN の値が若干低めである。その理由には、き裂伝ば初期では、き裂先端付近のき裂面に複雑な段差が生じているため荷重方向でのき裂面の摩擦が生じ、それがき裂開口挙動に影響している可能性が考えられる。しかしながら、全体的にはき裂面のこすれのあるなしにかかわらず、最大主応力的な観点に立つ有効応力拡大係数範囲で、き裂伝ば則がうまく評価できる結果となっている。

大塚ら⁽¹⁾によれば、材料や実験条件によって引裂きモード形のき裂伝ばが支配的であるものと、せん断モード形のき裂伝ばが支配的であるものがある。また、Al-Li 合金では回転曲げ疲労試験においてせん断形のき裂伝ばが観察されている⁽²⁰⁾。今後、Al 合金等の他の

材料を用いて、混合モード形疲労き裂の伝ばについて検討することで、本実験結果の有効性や他の材料への適応性についても検討できるものと思われる

4. 結 言

板厚方向に45°傾斜した切欠きから発生した混合モード形疲労き裂の伝ば挙動について検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 斜め切欠きの切欠底から発生したき裂では、き裂伝ば初期にはせん断応力と垂直応力の生じる面にき裂先端が存在するが、き裂が伝ばするとともに、き裂先端は垂直応力のみが存在する面へ方向を変えていく。

(2) き裂閉口挙動およびき裂伝ば挙動は圧縮応力の影響を受ける。そして、応力比 R が -2 の場合にはき裂開口比 U が顕著に大きくなる。これらの挙動にはき裂先端の繰返し塑性ひずみ幅の影響が考えられる。

(3) 最大主応力説的な観点に立った有効応力拡大係数範囲を用いると、き裂伝ば則が合理的に整理できた。

(4) 村上らの投影面積率的な観点から求めた最大応力拡大係数は簡便法として有効であり、種々の斜めき裂に応用できる可能性がある。

最後に卒業研究として実験を手伝っていただいた中川峰寛君、渡部論夫君に感謝する。

文 献

- (1) 大塚・東郷・吉田, 機論, 54-505, A (1988), 1735.
- (2) 結城・秋田・岸, 材料, 37-420 (1988), 1084.
- (3) Hoshida, T. and Tanaka, K., *Fatigue Engng. Mat. Struct.*, 4-4 (1981), 355.
- (4) 原田・遠藤・山本, 材料, 36-401 (1987), 147.
- (5) 横堀・横堀・石井・佐藤・庄司, 材料, 35-395 (1986), 930.
- (6) 北岡・陳・清家, 機論, 52-480, A (1986), 1733.
- (7) 鈴木・宇野・大柳・林, 機論, 53-486, A (1987), 230.
- (8) 吉岡・渡辺・北川・井上・熊沢, 機論, 50-454, A (1984), 1267.
- (9) 真壁・兼城・糸数・屋富祖, 機論, 56-526, A (1990), 1360.
- (10) 真壁・西田・兼城, 機論, 57-537, A (1991), 1035.
- (11) 真壁・兼城・西田・屋富祖, 材料, 41-465 (1992), 951.
- (12) Elber, W., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 468 (1971), 230.
- (13) 城野・花井・菊川, 材料, 32-361 (1983), 1137.
- (14) Murakami, Y. (editor-in-chief), *Stress Intensity Factors Handbook*, (1987), 3, Pergamon Press.
- (15) Tada, H., *Engng. Fract. Mech.*, 3-3 (1971), 354.
- (16) 文献(14)の985ページ.
- (17) Irwin, G. R., *Trans ASME, Ser. E*, 24 (1957), 361.
- (18) 村上・宋, 材料, 41-467 (1992), 1214.
- (19) 村上・遠藤, 材料, 35-395 (1986), 911.
- (20) 島山・村上・牧野, 材料, 40-458 (1991), 1497.
- (21) EL Haddad, M. H., Topper, T. H. and Smith, K. N., *Engng. Fract. Mech.*, 11 (1979), 573.
- (22) 中井・田中・川島, 材料, 32-356 (1983), 535.
- (23) 西川・小西・三好・小倉, 材料, 35-395 (1986), 904.
- (24) 大路・中井・蕃・武良, 機論, 51-469, A (1985), 2067.
- (25) 西谷, 疲労強度学, (1985), 41, オーム社.
- (26) 戸嵜・小川・加藤, 材料, 39-439 (1990), 400.