モードIII下での疲労き裂進展の下限界条件 (ΔK_{th})* (応力比, 混合モードの影響)

吉岡純夫**, 渡辺勝彦***, 北川英夫****
井上彰夫**, 熊沢道夫**

Fatigue Crack Growth Threshold (ΔK_{th}) under Mode III (The Effect of Stress Ratio and Mixed Mode)

by Sumio YOSHIOKA, Katsuhiko WATANABE, Hideo KITAGAWA,
Akio INOUE, Michio KUMASAWA

The fatigue crack growth threshold (ΔK_{th}) of steel materials was experimentally studied under mode III or mixed mode I + III, and a necessary criterion for estimating the fatigue strength of cracked components under mixed mode condition including mode III loading was studied.

The value of ΔK_{th} under mode III is known to be constant irrespective of the effect of stress ratio ($R = K_{min}/K_{max}$). At the same time, the value of ΔK_{th} under mixed mode I + III is found to be evaluated by the fracture criterion based on the maximum principal stress criterion. It has been further confirmed that the fatigue strength under mode III of a welded joint possessing an unpenetrated portion may be estimated by using the technique of fracture mechanics.

Key Words : Fatigue, Fatigue Crack Growth Threshold, Mode III, Mixed Mode, Stress Ratio

1. 緒 言

近年の機器の高効率化, 高性能化, 使用条件のか酷化に伴い, 高信頼性が特に要求される回転機では, 疲労破壊, 瞬時破壊などに対する強度評価を高精度で行うことが求められている。ところで, トルクを伝達する回転機の軸におけるき裂(欠陥, 溶接不溶着部)は, 多くの場合, 面外せん断形のモードIIIの負荷を受け, その疲労強度を破壊力学により評価するためには, モードIII下での疲労き裂進展の下限界条件(以下 ΔK_{th} と略す)が必要となってくる。

しかしながら, 従来の ΔK_{th} の実験データは, モードII (面内せん断形) を含む場合も一部あるが, 大部分はモードI (引張り形) に対するものであり, モードIII下の ΔK_{th} の実験データとしては, 真武ら⁽¹⁾, 安藤⁽²⁾, Pook⁽³⁾ の鋼材に関するものがあるにすぎないようである。しかも, これらのデータは, いずれも応力比

$R (= K_{min}/K_{max}) = -1$ でのモードIII下の ΔK_{th} のデータで, 応力比の影響あるいは混合モード (I + III) の影響を検討した例は見あたらないようである。また, 不溶着部を有する溶接継手の疲労強度の破壊力学による評価に関する従来の研究は⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 引張り, 曲げなどの負荷応力が作用するモードI, II下の溶接継手に関するものに限られているようであり, モードIIIの負荷を対象とした溶接継手のねじり疲労強度に関する研究は見あたらないようである。

本研究は, 鋼材の実験結果に基づき, モードIII下およびI + IIIの混合モード下の ΔK_{th} についての検討を行うとともに, 溶接継手のねじり疲労強度について論じたものである。まず, ねじりの負荷を主に受けるき裂材の疲労強度評価に必要な ΔK_{th} のモードIII下での応力比依存性について明らかにし, つぎに混合モード (I + III) における ΔK_{th} について検討を行い, 混合モード下での ΔK_{th} を評価する破壊基準について論じる。さらに不溶着部を有する溶接継手のモードIII下での疲労試験を行い, 先に得られた結果に基づいて, その疲労強度評価方法についての検討を行う。

2. 供試材および実験方法

2-1 供試材 表1, 2に化学成分, 機械的性質を

* 昭和58年11月30日 第923回講演会において講演, 原稿受付 昭和58年5月25日。

** 正員, 三菱電機(株)中央研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

*** 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

**** 正員, 横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

示す溶接用構造鋼 SM41A 材の母材, 溶着金属からなる試験片および溶接継手試験片を実験に用いた。

モードIII下の ΔK_{th} (以下 $\Delta K_{th(III)}$ と略す) の実験には, 図1に示す環状き裂を有する丸棒試験片 (RB; 母材, 溶着金属) を, I + III の混合モード下の ΔK_{th} の実験には, 図2に示す三次元斜めき裂 ($\beta=0, \pi/8, \pi/4$) を有する中央き裂板試験片⁽⁶⁾ (CCP; 母材) を用いた。また, モードI下の ΔK_{th} (以下 $\Delta K_{th(I)}$ と略す) の実験には, 図3に示すCT試験片 (CT; 母材, 溶着金属) および図1, 2に示す試験片形状のものを用いた。

真武ら⁽¹⁾の実験によると $\Delta K_{th(III)}$ に与えるき裂面での摩擦の影響が大きいため, この摩擦の影響をさけるために, 0.2mm幅のスリット ($\rho \leq 0.1$ mm) からなる切欠きをき裂として導入した。スリットの加工は, RB試験片では saw cut (SC) による機械加工, CCP試験片では wire cut (WC) による放電加工, CT試験片では両者を用いた。加工層の影響を除くために, すべての試験片は加工後に応力除去焼なまし処理 (SR: $625^\circ\text{C} \times 2\text{h}$) を行った。

また, 不溶着部を有する溶接継手のねじり疲労試験には, 図4に示す丸棒すみ肉溶接継手試験片 (WJ) を, 溶接 (CO_2 半自動) 後, 応力除去焼なまし処理 (SR) を行い用いた。なお, 溶接脚長 l は 10 mm で溶接後に機械加工により $l=5$ mm とした。

2.2 実験方法 ΔK_{th} の値を求める実験としては, 10^7 回のねじり, 引張りの疲労試験後に疲労き裂の発生の有無を調べる方法を用いた。き裂発生有無の観察は, 低温 (一部は室温) で破断させた試験片の破面を 10~30 倍程度拡大して行った⁽⁵⁾。

RB試験片を用いた $\Delta K_{th(III)}$ の実験は, シェンク式ねじり疲労試験機を用い, 応力比 $R=-1, 0, 0.5$ の条

表 1 供試材の化学成分

SM41A	C	Si	Mn	P	S
Base metal	0.15	0.17	0.64	0.021	0.019
Weld metal	0.10	0.54	1.07	0.015	0.009

表 2 供試材の機械的性質

SM41A	σ_y MPa	σ_B MPa	δ %	ψ %
Base metal*	300	407	41	66
Weld metal*	342	480	41	73

*) SR ($625^\circ\text{C} \times 2\text{hr}$), $1\text{MPa} = 0.102\text{ Kg}/\text{mm}^2$

図 1 丸棒環状き裂試験片 (RB) の形状・寸法 ($\Delta K_{th(III)}$); SM41A 材: 母材, 溶着金属)

図 2 中央き裂板試験片 (CCP) の形状・寸法 (I + III の混合モード下の ΔK_{th} ; SM41A 材: 母材)

図 3 CT試験片 (CT) の形状・寸法 ($\Delta K_{th(I)}$); SM41A 材: 母材, 溶着金属)

図 4 丸棒すみ肉溶接継手試験片 (WJ) の形状・寸法 ($\Delta K_{th(III)}$); SM41A 材: SR材)

件下でねじり疲労試験を行った。また、WJ試験片を用いたねじり疲労試験は、共振形の定トルクの疲労試験機を用い、応力比 $R=0$ の条件下で行った。

CCP試験片を用いた混合モード (I+Ⅲ) 下の ΔK_{th} の実験は、油圧サーボ疲労試験機を用い、応力比 $R=0.05(\cong 0)$ の条件下で引張疲労試験を行った。また、RB、CCP、CT試験片による $\Delta K_{th(I)}$ の実験も同一条件下で同じ試験機を用いて行った。なお、 $\Delta K_{th(I)}$ の実験は、ここで用いたスリット材の疲労き裂発生の有無から ΔK_{th} を求める方法の妥当性を検討するために行ったものである。

2.3 応力拡大係数の算定 RB試験片の K_I, K_{III} 値としては Benthem らの多項式近似式⁽⁷⁾を用いた。

CCP試験片の K_I, K_{III} 値は下式を用いて評価した⁽⁶⁾。

$$K_I = \sigma_0 \cos^2 \beta \sqrt{\pi a} F_{I(a)} \dots \dots \dots (1)$$

$$K_{III} = \sigma_0 \sin \beta \cos \beta \sqrt{\pi a} F_{III(a)} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $\sigma_0 = P/BW$,

$F_{I(a)}, F_{III(a)}$ は $\beta=0$ での引張り、せん断応力下の補正係数⁽⁷⁾

また、WJ試験片の K_{III} 値は有限要素法 (FEM) により求めた結果を用いた (図14参照)。

3. 実験結果および考察

3.1 モードⅢ下の ΔK_{th} に関する検討 RB試験片 (図1) を用いて、母材は応力比 $R=-1, 0, 0.5$ 、溶着金属は $R=-1, 0$ の条件下での $\Delta K_{th(III)}$ を求める実験を行った結果を図5に示す。また、疲労き裂の発

図5 SM41A材 (母材, 溶着金属) の $\Delta K_{th(III)}$ の実験結果 (RB試験片)

生状況の一例を図6に示す。き裂の進展方向はマクロには予き裂面の延長上であるが、ミクロには予き裂面と三次元的に交差する面上を進展している部分が多いようである。

3.1.1 $\Delta K_{th(III)}$ の応力比依存性 図5に示す $\Delta K_{th(III)}$ の実験結果を $\Delta K_{th(III)}$ に及ぼす応力比 R の影響を求める観点から整理した結果を図7に示す。図7に示す SM41A 材の $\Delta K_{th(III)}$ の値は、母材, 溶着金属ともほぼ同じ値であり、しかも応力比 $R=-1 \sim 0.5$ の範囲でほぼ一定である。 $\Delta K_{th(III)}$ の値が応力比の影響を受けないのは、モードⅠ下の ΔK_{th} の値がき裂の開閉挙動と関連して応力比の影響を受けるのに対して、モードⅢ下ではき裂の開閉挙動が応力比により変化しないためと考えられる。

また、図7には真武ら⁽¹⁾、安藤⁽²⁾、Pook⁽³⁾の軟鋼の応力比 $R=-1$ での実験値も示してある。Pook⁽³⁾はV切欠き材を、安藤⁽²⁾は圧着き裂材を用いて 10^7 回の疲労強度 (破断) から $\Delta K_{th(III)}$ を求めている。また、真武ら⁽¹⁾は $\Delta K_{th(III)}$ を疲労予き裂材の疲労き裂進展特性から求めている。ここで得られた結果は、真武らの疲労予き裂材のき裂面での摩擦の影響を除外した結果に近い値を示しており、ここで用いたスリット材による

図6 疲労き裂の発生状況 (RB; $\Delta K_{th(III)}$)

図7 $\Delta K_{th(III)}$ に及ぼす応力比 R の影響 (SM41A 材: 母材, 溶着金属)

実験方法の妥当性がうかがえる。安藤の結果は、き裂長さが短く、しかも破断強度を用いているためかなり高い値となっており、Pookの結果も破断強度を用いているため若干高い値となっている。破断強度から $\Delta K_{th(III)}$ を求めると高い値を得る可能性があることは、ここでの結果 (図5) にも示されている。

3.1.2 $\Delta K_{th(III)}$ と $\Delta K_{th(I)}$ の比較および ΔK_{th} 測定法の検討 $\Delta K_{th(III)}$ の実験結果とともに、RB, CT試験片のスリット材による $\Delta K_{th(I)}$ の実験結果およびCT試験片の疲労予き裂材を用いた decreasing 法による通常の ΔK_{th} を求める方法により別途求めた $\Delta K_{th(I)}$ の値⁽⁸⁾ を図8に示す。図中の破線は、各種鋼材の種々の方法により求められた $\Delta K_{th(I)}$ のデータの上・下限界を示すものである⁽⁹⁾。

CT試験片のスリット材で得た $\Delta K_{th(I)}$ の値が、decreasing 法により求めた値とほぼ等しいこと、ここで得られた $\Delta K_{th(III)}$ の値が、3.1.1項で述べたごとく、真武ら⁽¹¹⁾の結果に近い値を示していることなどから、ここで用いた ΔK_{th} の測定法はほぼ妥当なものであったと考えられる。ただし、図8に示すRB試験片で得た $\Delta K_{th(I)}$ の値が、鋼材の $\Delta K_{th(I)}$ のばらつきの範囲内ではあるが、CT試験片の結果より若干低い値を示していることに対する検討 (き裂先端の拘束条件の差も一因と考えられるが)、および停留き裂の発生条件⁽¹⁰⁾との関連での検討などは今後に残された研究課題であると考えられる。

図8に示す結果より、SM41A材の $\Delta K_{th(III)}$ の値は、 $R \approx 0$ の $\Delta K_{th(I)}$ の値 (CT試験片の結果) より若干高

図8 $\Delta K_{th(III)}$ と $\Delta K_{th(I)}$ との比較 (SM41A 材: 母材, 溶着金属)

いがほぼ近い値を示しており、鋼材の $R \approx 0$ での $\Delta K_{th(I)}$ の平均値とほぼ等しいと見なせる。鋼材の $\Delta K_{th(I)}$ の値は、ほぼ図8に示すバンドに入り、強度水準の影響をあまり受けない⁽⁹⁾。今後のデータの集積が必要であるが、鋼材の $\Delta K_{th(III)}$ の値についても同様な傾向がある可能性が期待される。

3.2 I + III の混合モード下の ΔK_{th} に関する検討

3.2.1 実験結果 CCP試験片 (図2) を用いて、母材の I + III の混合モード下の ΔK_{th} (ΔK_I^* , ΔK_{III}^*) を応力比 $R = 0.05 (\approx 0)$ の条件下で求めた実験結果を図9に示す。 $K_{III}/K_I = 0.95$ の $\beta = \pi/4$ の実験結果は、 $\Delta K_{III}^*/\Delta K_{th(III)} = 0.51$ となっており、混合モードの影響が顕著に認められる。

図10に $\beta = \pi/4$ の場合の疲労き裂の発生状況を示すが、き裂はのこぎり歯のように発生しており、予き裂面と三次元的に交差する面上 (荷重軸に垂直な面) を進展しているが、き裂の発生部に限ると予き裂面の延長上を進展している部分も見うけられる。

図9 SM41A 材 (母材) の I + III の混合モード下の ΔK_{th} (ΔK_I^* , ΔK_{III}^*) の実験結果 (CCP 試験片)

図10 疲労き裂の発生状況 (CCP, $\beta = \pi/4$, I + III の混合モード下の ΔK_{th})

3.2.2 混合モード下の破壊基準との対比 ここ
で得られた I + III の混合モード下およびモードIII下
の ΔK_{th} の値を $\Delta K_{th(I)}$ の値を基準として無次元化し
て各種の破壊基準と比較検討した結果を図 11 に示す。
 $\Delta K_{th(I)}$ の値は、試験片形状、実験方法により若干異
なる値を示しているが、ここでは通常用いられている
decreasing 法によって得られた SM41A 材 (母材) の
値⁽⁸⁾ ($5.55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ [$17.9 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$]) を基準値として

図 11 I + III の混合モード下の ΔK_{th} (ΔK_I^* , ΔK_{III}^*) の実験結果と破壊基準との比較

図 12 $\sigma_{\phi \max}$ 説の説明図

図 13 丸棒すみ肉溶接継手の (WJ) の疲労試験結果

用いて整理してある。

図 11 に示す破壊基準としては, Smin 説⁽¹¹⁾, g 一定説 ($g_{\sigma \max}$ 説⁽¹²⁾, $\epsilon_{\sigma \max}$ 説⁽¹³⁾ も同じ値となる), $\sigma_{\sigma \max}$ 説⁽¹⁴⁾ とともに, $\sigma_{\sigma \max}$ 説と同じ最大主応力説的な考え方で図 12 に示す σ_{ϕ} が最大となる方向にき裂が進展すると考えた場合の式 (3) で示される $\sigma_{\phi \max}$ 説も示してある。

$$\frac{1}{2}(1+2\nu)K_I + \left\{ \frac{1}{4}(1-2\nu)^2 K_I^2 + K_{III}^2 \right\}^{1/2} = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし, ν はポアソン比

なお, $\sigma_{\phi \max}$ 説では, 予き裂面の延長上に連続的にき裂が進展せず, 三次元的に分岐するき裂を想定したものであるが, この種のき裂の進展についてはぜい性破壊に関する検討例⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾があることを付記しておく。

図 11 に示すここでの実験結果のみから, I + III の混合モード下の ΔK_{th} に関する破壊基準として適しているものを決定できない面もあるが, $\sigma_{\phi \max}$ 説的な (最大主応力説的な) 考え方が, I + III の混合モード下の ΔK_{th} に与える混合モードの影響を評価するのに適しているように思われる。また, この説の立場にたてば, $\Delta K_{th(III)}$ と $\Delta K_{th(I)}$ の値はほぼ等しいとして取扱えるものと考えられる。なお, 図 6, 10 に示したモードIII下, I + III の混合モード下の疲労き裂発生状況も, $\sigma_{\phi \max}$ 説で想定している三次元的に分岐するき裂 (図 12) の進展状況と比較的状況が似ている部分が多いようである。

3.3 不溶着部を有する溶接継手のモードIII下の疲

図 14 丸棒すみ肉溶接継手の K_{III} 値

図15 溶接継手, 母材, 溶着金属の ΔK_{th}

疲労強度の評価法の検討

3.3.1 実験結果 SM41A 材からなる WJ 試験片 (図4) のねじり疲労試験 ($R=0$) を行った結果を図13に示す。不溶着部からの疲労き裂発生の有無から求めた $\Delta K_{th(III)}$ の値は $8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($25.8\text{kgf}\cdot\text{mm}^{-3/2}$) である。

3.3.2 K_{III} の値の評価方法 丸棒すみ肉溶接継手の K_{III} 値 (無次元化した補正係数 F_{III}) の FEM 解とともに, 図14(c) には近似的な評価方法により求めた結果も示してある。同図(a) に示す円板状き裂を有する丸棒の K_{III} 値の表示式⁽⁷⁾を用いて, K_{III} 値を近似的に評価するための同図(b) に示す3種類のモデル化のなかでは, No.2 ののど厚での応力を一致させる方法が FEM 解と良く一致している。

3.3.3 不溶着部を有する溶接継手モードIII下の疲労強度の評価方法 図13に示す実験結果から得られた溶接継手の $\Delta K_{th(III)}$ の値を SM41A 材の母材, 溶着金属の $\Delta K_{th(I)}$, $\Delta K_{th(III)}$ あるいは溶接継手の $\Delta K_{th(\theta_{max})}$ ⁽⁵⁾ ($\sigma_{\theta_{max}}$ 説による $K_{\theta_{max}}$ の値で整理した I + II の混合モード下の ΔK_{th}) と対比した結果を図15に示す (図中の破線は鋼材の $\Delta K_{th(I)}$ の上・下限界を示すものである⁽⁹⁾)。

図15に示す溶接継手の $\Delta K_{th(III)}$ の値 (図中■印) は, 母材, 溶着金属の $\Delta K_{th(III)}$ の値より若干高い値を示しているが, 不溶着部先端が凹凸しているための K 値評価上の誤差, き裂発生確認精度の若干の悪化などを

考慮すると比較的良く一致していると見なせる。したがって, 不溶着部を有する溶接継手のモードIII下の疲労強度は, 不溶着部をき裂と見なして破壊力学の手法を用いて評価できることが確認されたといえる。また, 3.1.2, 3.2.2 項での検討結果および図15より, モードIII下の鋼材の溶接継手の疲労強度は, 鋼材の $R \approx 0$ での $\Delta K_{th(I)}$ の値を用いて評価しても実用上は特に問題がないと思われる。

4. 結 言

モードIIIを含むき裂材の疲労強度を評価する場合に必要な疲労き裂進展の下限界条件 ΔK_{th} を求める実験を SM41A 材を用いて行い次の結論を得た。

(1) モードIII下の ΔK_{th} の値は, 応力比の影響を受けずほぼ一定であり, 応力比 $R \approx 0$ での鋼材のモードI下の ΔK_{th} とほぼ等しいと見なせる。

(2) I + III の混合モード下の ΔK_{th} 値は, 混合モードの影響を顕著に受け, その値は最大主応力説的な考え方に基づく $\sigma_{\theta_{max}}$ 説で評価が可能と考えられる。

(3) 不溶着部を有する溶接継手のねじり疲労強度は, モードIII下の ΔK_{th} の値を用いて破壊力学の手法で評価できることが確認された。なお, この場合に実用的な観点からはモードI下の $R \approx 0$ の ΔK_{th} の値を用いても評価が可能であると思われる。

本文, 式(3)中に表示ミスがあり, 長崎大学真武教授のご指摘により訂正させて頂いた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 真武・ほか2名, 機論, 48-433, A (昭57), 1142.
- (2) Ando, S., *Proc. 1th ICM*, 1 (1971), 331.
- (3) Pook, L.P., *Int. J. Fract.*, 15-6 (1979), R223.
- (4) 宇佐見・志田, 圧力技術, 20-2 (昭57), 42.
- (5) 土方・ほか2名, 材料強度学会誌, 15-1 (昭55), 1.
- (6) 吉岡・ほか4名, 機講論, No. 830-2 (昭58-3), 175.
- (7) Tada, H., ほか2名, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, (1973), DEL Research Corp.
- (8) 井上, 未発表.
- (9) 土方・ほか2名, 材料強度学会講演論文集, (昭51-5), 17.
- (10) 中沢・ほか2名, 機講論, No. 720-1 (昭47-4), 9.
- (11) Sih, G.C., *Int. J. Fract.*, 10-3 (1974), 305.
- (12) 影山・岡村, 機講論, No. 810-10 (昭56-10), 286.
- (13) 渡辺・塩見, 機講論, No. 810-7 (昭56-7), 47.
- (14) Erdogan, F. and Sih, G.C., *Trans. ASME, Ser. D*, 85-4 (1963), 519.
- (15) 上田・ほか4名, 造船学会論文集, 144 (昭53), 412.
- (16) 吉岡・ほか4名, 機講論, No. 834-3 (昭58-3), 97.

討 論

〔質問〕 真 武 友 一 (長崎大学工学部)

モードIII下での疲労き裂の進展を、多角的に、また実際に適用した貴重な研究に質問する。

(1) 図11から式(3)が混合モードをよく表すならば、この式で $\text{const.} = K_{th(I)} = K_{th(III)}$ となるが、図9の $K_{th(I)}$ 、 $K_{th(III)}$ の実験結果も、このていどで一致していると考えてよいか。

(2) ミクロには予き裂面と交差して進展するが、マクロには予き裂面上を進展とするという現象は、これらの結果から説明できるか。

〔回答〕 (1) 図9は ΔK_{th} の値が混合モードの影響を受けることを示したもので、 $\Delta K_{th(I)}$ と $\Delta K_{th(III)}$ の値を直接比較したものではない。図9に示す結果のみでは、 $\Delta K_{th(I)}$ と $\Delta K_{th(III)}$ の値は異なるようにも思われるが、3・1・2項の図8の説明で述べているように、 $\Delta K_{th(I)}$ の値はばらつきをもつものであり、図8に示す範囲ではほぼ一致すると見なせると考えられる。(付図1は、図8、9に示した $\Delta K_{th(I)}$ と $\Delta K_{th(III)}$ の実験データの比較結果を参考までに示すものである。) 少なくとも、 $\Delta K_{th(III)} < \Delta K_{th(I)}$ となる従来の破壊基準より σ_{max} 説の方が妥当であることは、図11に示す結果より言えると思われる。

(2) ここでは、き裂の進展そのものは取扱って

付図1 SM41A 材 (母材, 溶着金属) の $\Delta K_{th(I)}$ と $\Delta K_{th(III)}$ の実験結果の比較

付図2 $\Delta K_{th(III)}$ の実験に用いた RB 試験片の破面

ないので詳細は不明だが、ミクロとマクロで進展する面が異なるように見える理由の一つとして次のことが考えられる。上下の破面の相対変位量の少ないき裂先端近傍以外は、三次元的に交差した破面が摩擦のために平坦化され、全体的に見れば常に環状き裂が存在する状態でき裂が進展しているためにマクロにはき裂が直進しているように観察されることが多いと思われる。なお、今回の実験でき裂の進展量の大きい試験片

のマクロ写真を付図2(a), (b)に示すが、(a)のごとく予き裂面上を進展しているものが比較的多いが、(b)のごとくマクロにも予き裂面と交差する面上を進展しているものも存在する。また、摩擦による破面の損傷の少ないぜい性破壊の場合のき裂の進展は、別途報告しているごとく予き裂面と交差した面上である⁽¹⁶⁾。