

き裂干渉問題におけるき裂進展挙動の基礎的研究

ON THE EXTENSION BEHAVIOR OF THE FRACTURE CRACK FOR CRACK- CRACK INTERACTION PROBLEMS

橋本堅一*・阿部孝弘**・矢富盟祥***

Ken-ichi HASHIMOTO, Takahiro ABE and Chikayoshi YATOMI

*正会員 博(工) 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科(〒745 徳山市久米高城 3538)

**正会員 福井工業高等専門学校助教授 環境都市工学科(〒916 鯖江市下町)

***正会員 Ph.D. 金沢大学教授 工学部土木建設工学科(〒920 金沢市小立野 2 丁目 40-20)

We investigate experimentally and numerically the extension behavior of the fracture crack for the crack-crack interaction problems. We first perform an experiment using acryl resin specimens with an interacting crack which exists in the three different positions. We then examine the crack extension behaviors based on the maximum energy release rate criterion by the numerical analysis using the finite element method. The energy release rate is calculated by using the E-integral, which is path independent even for a crack interacting with inclusions, voids and other cracks.

The numerical results explain well the crack extension behavior in the experimental result. As a result, we find the amplified and/or shielding effects depending on the positions of an interacting crack for the fracture crack extension.

Key Words : crack-crack interaction, maximum energy release rate criterion, E-integral, fracture crack, crack kinking

1. 緒言

コンクリートや岩石などの非均質岩質材料内の破壊き裂の進展は複雑な経路を保っており、進展き裂自体が連結していない場合もある。これらの経路は鉱物粒子、骨材、潜在き裂、材料欠陥などの複雑な干渉を受けて形成されており、それらの干渉が材料の破壊挙動に影響を及ぼす。特にき裂との干渉については、岩質材料では破壊き裂先端に形成されるフラクチャープロセスゾーンに関連して、荷重の増加とともに破壊き裂先端近傍に新たなき裂が発生する可能性もあり、それらと結びついたり、ときには新たな他の破壊き裂が生じることもあり、非常に複雑である。また、き裂の干渉問題は破壊き裂の進展を助長する場合だけでなく、抑制する場合もあるので理論的にも興味深い問題である。

き裂の干渉問題の研究は当初、破壊力学の発展とともにその基礎的研究として位置づけられていた¹⁾。その後、き裂性の巨大な材料と考えられる岩盤などの非均質材料への応用として扱われるようになった²⁾。最近では異方弾性体でのき裂干渉問題の報告³⁾がみられ、複合材料の分野などでも重要視されている。しかしながらそれらのほとんどの研究は理論解析のみの報告や実験結果を定性的に説明した報告が多く、実験結果と理論解析の詳しい比較は多くみられないのが現状である。

本研究では、以上のようなことを背景に、き裂干渉問題の基本的なモデルを考慮して実験的および数値解

析的にその破壊挙動を検討した。実験には均質性が高く、線形挙動に近い変形特性を有するアクリル樹脂板を用い、数値解析は有限要素法を用いて経路独立積分である E 積分⁴⁾ を評価してエネルギー解放率を求めた。したがって、数値解析的なき裂進展の条件としては最大エネルギー解放率クライテリアにより議論を行っている。本研究での数値解析法によると、周知の J 積分と異なり積分経路内に複数のき裂先端を含んでいても、き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率が経路独立に求めることができ、き裂近傍に変位の不連続性も持つような場合に有効である。また、実験では精度の向上のために、き裂の加工、荷重偏心の除去に特に留意した。なお、本論文では、片側主き裂のみが存在し、その主き裂と平行な干渉効果を与える他のき裂が一本存在する場合を考え、干渉効果を与えるき裂がない場合を比較の基準として、干渉き裂の存在が破壊き裂のき裂進展発生応力やき裂進展方向に与える影響について考察した。

2. 実験方法と数値解析法

扱ったモデルは Fig.1 に示すような一方向に引張応力 σ_0 を受ける片側主き裂を有する帯板モデルで、その先端近傍に主き裂に平行なき裂(以下干渉き裂と呼ぶ)を配置した。幾何学諸量は主き裂長さ l と板幅 W の比 l/W が 0.4、干渉き裂の長さ $2a$ と主き裂長さ l と

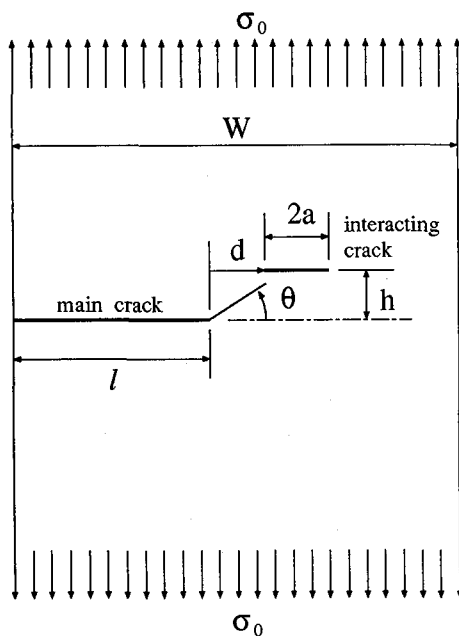


Fig.1 A main crack with an interacting crack.

Table 1 Material property

fracture toughness (K_{max})	2.26 MPa $\sqrt{m}$
tensile strength	74.5 MPa
bending strength	117.7 MPa
compressive strength	123.6 MPa
shear strength	61.8 MPa
Young's modulus	2.94 GPa

$2a/l$ が 0.5, 主き裂と干渉き裂間距離 h と主き裂長さ l との比 h/l が 0.162 とした. 干渉き裂の位置は主き裂先端から干渉き裂先端までの距離 d (Fig.1 参照) と主き裂長さ l の比 d/l を 0, -0.25, -0.5 とし 3 ケースのモデルを扱った. 実験には厚さ 2mm, 幅 20cm, 長さ 55cm の三菱レイヨン社製アクリル樹脂板 (商品名: アクリライト) を用い, 他の諸量は幅を基準とした前述の比により決定した. 供試体材料の力学的性質を Table 1 に示す. ここで破壊靱性値 K_{max} は干渉き裂のない供試体の破壊荷重 (最大荷重) より求めたものであり, 他は ASTM の試験法に準じて測定されたものである. この材料は非常に線形性が高く, 脆性的でもある. たとえば, 電動ドリルや電動糸のこで加工する場合は注意しないと著しい破壊を容易に招く. 実験はそれぞれのケースに対して 3 供試体を準備し計 12 供試体について行った. 载荷には島津製作所社製の油圧サーボ試験機 (EHF-FG1-4LA 型) を用い, 本実験のために特別に設計した治具に供試体を取り付けて, 载荷速度 0.1mm/min の変位制御で载荷した. 実験に先

だて, 板幅方向に 7 枚のひずみゲージを貼り付けた平板の予備実験を行い, 均一な载荷が行われていることを確認した. き裂の加工は主き裂を幅 0.7mm, 干渉き裂を幅 0.4mm の金属切断用糸のこを用いて行ったが, アクリル樹脂板の破壊がき裂先端の形状に敏感なため, き裂先端は直径約 1mm の穴をピンバイスを用いて加工し, さらにそのき裂先端部にカッターナイフを用いてき裂を入れた. このことにより実験精度の向上がみられた.

数値解析には定ひずみ有限要素法による E 積分法を用いた⁵⁾. E 積分による方法は経路独立積分であるため, 解析精度が得られにくいき裂近傍の応力やひずみを用いる必要がないことが特長のひとつとなっているが, 異方弾性体の混合モード状態のようにき裂近傍の応力分布が複雑になると定ひずみ要素では対応できない場合も出てくる⁶⁾. またき裂面に摩擦力が存在するような場合は, き裂先端に特異要素を用いないと十分な精度が得られない場合もある. しかし, 相互干渉するき裂が少ない場合には定ひずみ要素でも対応可能であることを確認している⁷⁾ ため, ここでは扱いの容易な定ひずみ要素とした. ただし, 相互干渉するき裂が多くなれば高次要素, 特異要素の使用も考える必要が生じることが十分に考えられる.

ひずみエネルギーを持つ弾性体 (超弾性体) においては, き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率を与える E 積分は, 不均質物体内を準静的に進展するき裂に対して, 物体を線形弾性体と仮定すると次式で与えられる.

$$E(\ell) = \int_{\Gamma} \left(\frac{1}{2} s \cdot \frac{\partial u}{\partial \ell} - \frac{1}{2} \frac{\partial s}{\partial \ell} \cdot u \right) ds \quad (2.1)$$

ここで ℓ による偏微分は右微分係数 ($\ell \rightarrow +0$) を表し, ℓ は進展き裂の全長, Γ はき裂先端を含む領域の境界, u , s は Γ 上での変位ベクトルおよび表面応力ベクトルを示している. この経路積分を計算するにあたっては, 積分経路を要素辺上に設定し, 式中の微分項を 2 点差分近似することにより, 次式を用いた.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\{ s_i(\ell) \cdot \frac{u_i(\ell + \Delta \ell) - u_i(\ell)}{\Delta \ell} - \frac{s_i(\ell + \Delta \ell) - s_i(\ell)}{\Delta \ell} \cdot u_i(\ell) \right\} \cdot \Delta s \quad (2.2)$$

ここで n は経路における節点の数, s_i は各節点において算出された表面応力ベクトル, Δs は各要素辺の長さ, u_i は各節点における変位ベクトル, そして $\Delta \ell$ は基本モデルとき裂進展モデルのき裂長さの差である. また (ℓ) および $(\ell + \Delta \ell)$ は, それぞれ基本モデルとき裂進展モデルを表している.

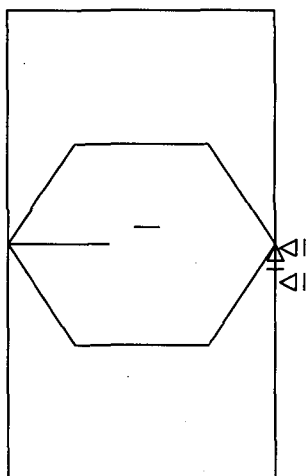


Fig.2 An integral path and the constraint conditions .

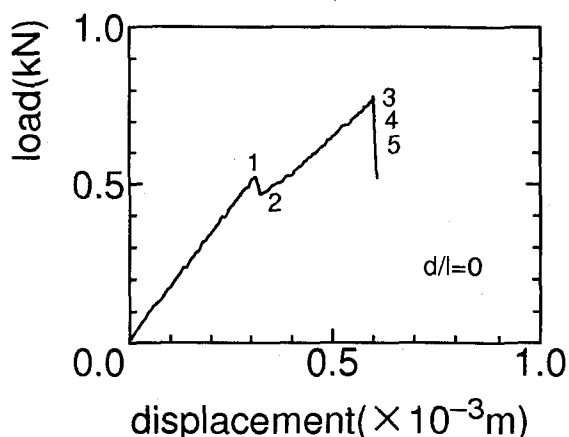


Fig.4 Load-displacement curve for the model of $d/l = 0$.

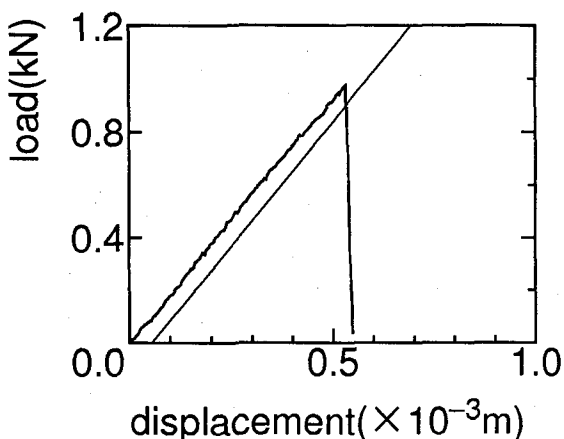


Fig.3 Load-displacement curve for the model without interacting cracks.

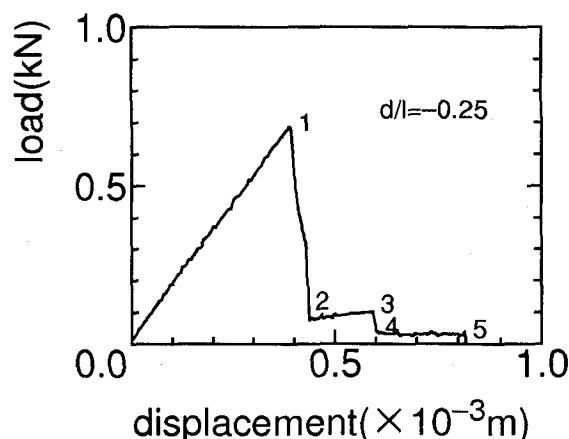


Fig.5 Load-displacement curve for the model of $d/l = -0.25$.

有限要素近似モデルは幅 W に対して無限方向の長さを $1.732W$ として、要素分割は三角形定ひずみ要素を基本として板幅方向 80 分割、無限方向 160 分割とした。き裂先端付近は正三角形を二分した要素で構成し 13 方向の折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率の解析を行った。

E 積分を求めるための積分経路は、き裂先端近傍の応力の数値解析上の誤差を避けるように、Fig.2 に示す最も外側の正六角形の経路とした。また数値的な剛体回転による誤差を防ぐため Fig.2 に示すように 3 自由度を拘束した。

3. 実験結果と考察

Fig.3 に干渉き裂のない場合の荷重-変位図を示す。図中、比較のため挿入した荷重-変位曲線に添った直線

に比べると、ほぼ平行な関係を保っており前述のように線形性は非常に高いことがわかる。Fig.4~Fig.6 はそれぞれの干渉き裂の位置関係における代表的な荷重-変位図を示しており、Fig.7 にはそれに対応するき裂の進展経路を示している。ここで Fig.7 のき裂進展の傾向はどの場合も他の 2 供試体でも同じであった。また Fig.7 中の数字はき裂進展の順序を示しており、それと対応するところを Fig.4~Fig.6 にも数字で示した。ここで $d/l = 0$ ではまず主き裂から干渉き裂に向けて破壊き裂が発生する (1 から 2) が、最終的な破断にはさらに大きい荷重が必要で、最大荷重を示すところで主き裂は干渉き裂に連結し (2 から 3)、その瞬間主き裂が長くなったことにより、エネルギー解放率が急増化し一気に破断する (3 から 5)。 $d/l = -0.25$ ではき裂の進展は Fig.7 に示すように干渉き裂右端から発生し (1 の部分)、2 の部分まで視覚的に捉えられる程度の速度

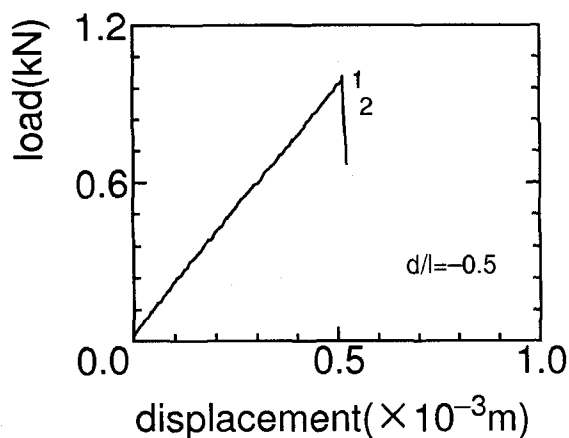


Fig.6 Load-displacement curve for the model of $d/l = -0.5$.

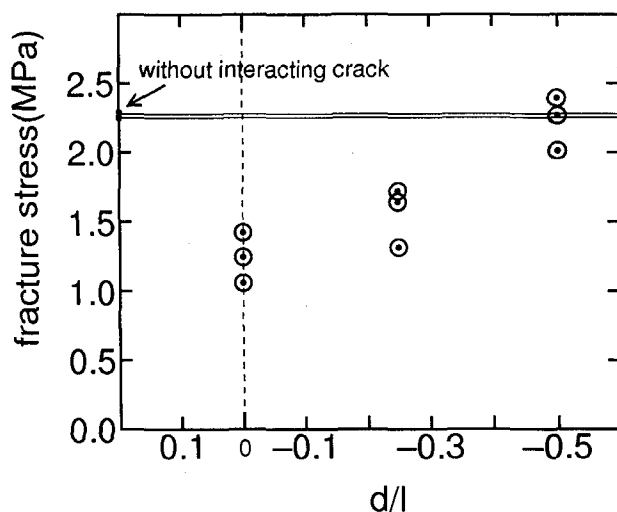


Fig.8 Fracture stress obtained by the experiments.

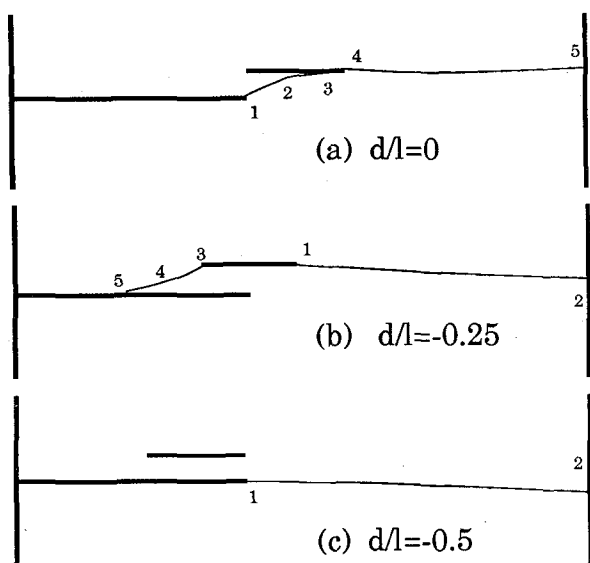


Fig.7 Crack paths obtained by the experiments.

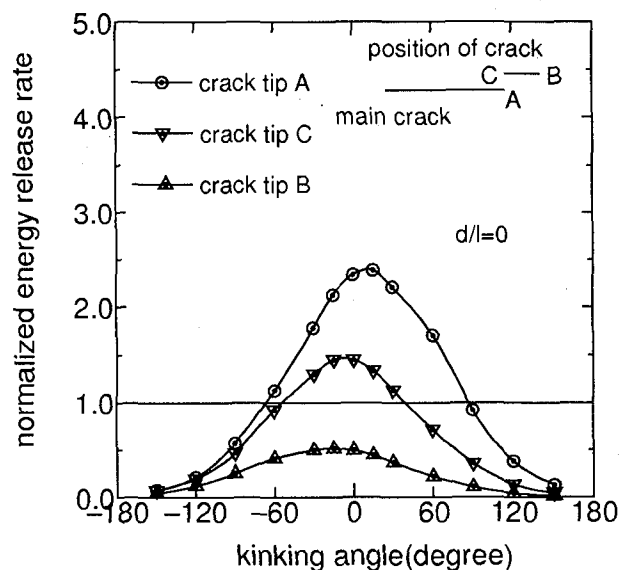


Fig.9 The variation of energy release rate with an interacting crack ($d/l = 0$).

でゆっくり進む。さらに実験を継続すると干渉き裂左端部分から新たなき裂が発生し、主き裂に連結される(3から5)。 $d/l = -0.5$ では主き裂と干渉き裂の連結はなく、主き裂からのき裂の発生と同時に破断する。

破壊き裂発生開始時の σ_0 (以下き裂発生応力と呼ぶ) とき裂位置との関係を示すと Fig.8 のような結果となる。Fig.8 中の細線は干渉き裂がない場合の3回の実験結果を示している。ここで2つのデータはほぼ一致しており、その細線は重なっている。また干渉き裂が主き裂近傍に存在するとそれぞれの干渉によりき裂発生応力はばらつく。この図よりき裂の発生は干渉き裂の位置により異なり、 $d/l = 0$ のとき、すなわち干渉き裂が主き裂の前方にある時、容易に進展することがわかる。そして干渉き裂が主き裂側に移動す

るに伴い、き裂の発生に大きな荷重を必要とする。また $d/l = 0$ と $d/l = -0.25$ の位置関係では干渉き裂のない場合よりき裂発生に必要な荷重が小さく、き裂発生の助長効果が認められる。しかし $d/l = -0.5$ では干渉き裂のない場合と同じ程度のき裂発生応力を必要とする。

以上のように干渉き裂の微妙な相対的位置関係により、いくつかの異なったき裂進展挙動が起こることが実験的に明らかになった。

4. 数値解析結果と考察

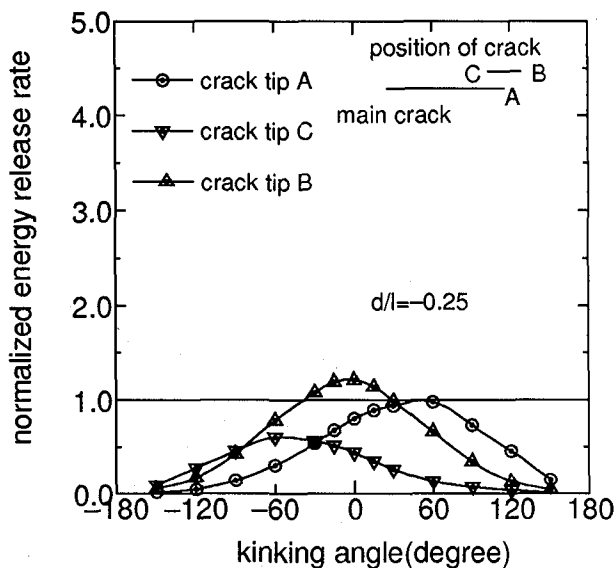


Fig.10 The variation of energy release rate with an interacting crack ($d/l = -0.25$).

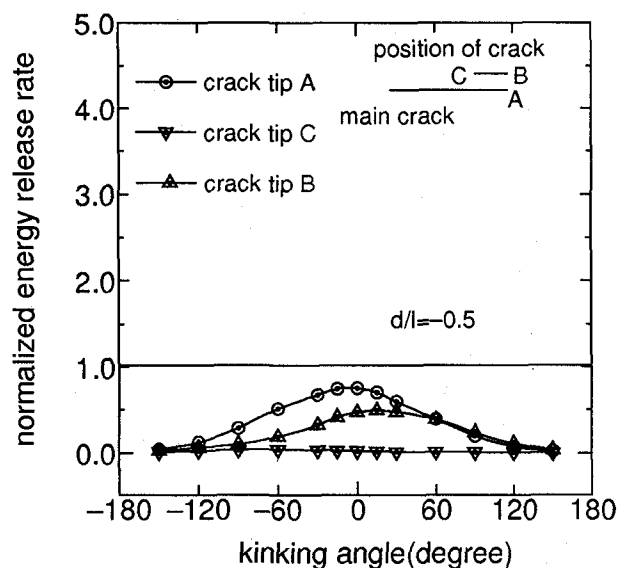


Fig.11 The variation of energy release rate with an interacting crack ($d/l = -0.5$).

本研究で用いた数値解析法はき裂の干渉問題においても良い精度でエネルギー解放率が得られることはすでに確認されている⁷⁾ので、ここでは対象となる解析結果のみを議論する。Fig.9～Fig.11に数値解析結果を示す。縦軸は得られたエネルギー解放率を干渉き裂の無い既報の級数近似解⁸⁾で除して無次元化したものであり、横軸は折れ曲がり角度 (Fig.1における θ) を示している。これらの図において最大エネルギー解放率クライテリアに従えば最大エネルギー解放率を示す角度でき裂は折れ曲がり進展することになり、エネルギー解放率

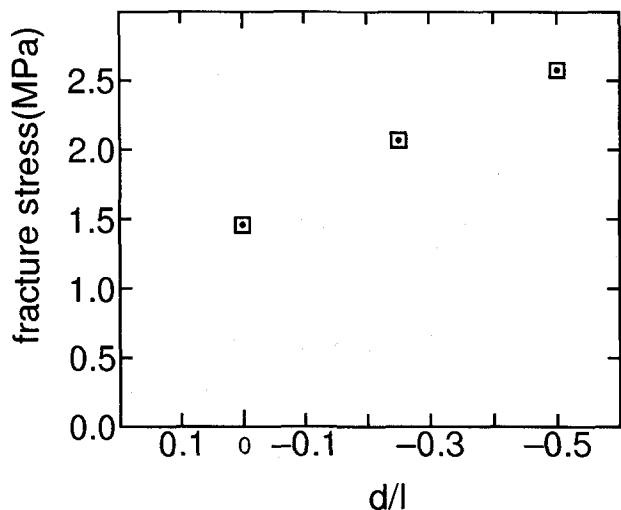


Fig.12 Fracture stress estimated by the numerical results.

が1より大きい場合は干渉き裂がない供試体より小さ

Table 2 Kinking angles (degree)

d/l	Analysis	Experiment		
0	12.2	17.3	16.4	15.5
-0.25	-4.5	-6.9	-5.6	-6.5
-0.5	-5.1	-3.2	-3.7	-3.2

なき裂発生応力が得られることが予想され、1より小さい場合はより大きなき裂発生応力を必要とすると解釈できる。 $d/l = 0$ ではFig.9の解析結果より主き裂先端が干渉き裂の方向に折れ曲がり進展することが説明でき、最大エネルギー解放率は他のどのケースよりも大きいため、他のどの場合よりも破壊しやすいと解釈できる。これに対してFig.8の実験結果でも最も小さなき裂発生荷重が得られており、Fig.7においてもき裂は干渉き裂の方向に折れ曲がりっており同様な傾向が認められる。 $d/l = -0.25$ では、Fig.10の数値解析からは干渉き裂のBの先端がエネルギー解放率最大を示しているため、いわゆる飛び移り現象が起こることが推測される。またエネルギー解放率が1より大きいため、干渉き裂のない供試体より壊れやすいと判断できる。これに対して実験でもFig.7に示すように飛び移り現象が示されており、き裂発生応力についても $d/l = 0$ の場合よりは大きくなるが、干渉き裂のない場合より小さくなり、実験結果をうまく説明している。 $d/l = -0.5$ では数値解析では最大エネルギー解放率が1より若干小さいため、干渉き裂のない供試体より大きなき裂発生応力が得られると判断されるが、実験では干渉き裂のない場合より大きくなっているケースもあるがほぼ同じ

程度の破壊応力が示された。解析により得られた空隙のある場合のエネルギー解放率とない場合のエネルギー解放率により、空隙のない場合の実験結果を利用して、き裂発生応力を見積もった図が Fig.12 である。この図は Fig.8 に対応しているが、数値解析により予測されるき裂発生応力は実験よりやや高い値を示している。しかし、傾向そのものはよく一致していた。Table 2 には数値解析から予測される折れ曲がり角と実験により得られた折れ曲がり角を比較している。き裂発生時の折れ曲がり角は実験を終えた供試体からは読み取ることは極めて困難であり、比較的破壊き裂が進展した時点での値しか得ることはできないがその傾向はかなり一致していた。

以上のことにより本研究では実験結果をエネルギー解放率の数値解析結果により概ね説明できることがわかり、干渉き裂の位置関係によるき裂の進展に対する助長効果はうまく表現できた。

5. 結言

本研究では破壊き裂の進展挙動を他の 1 本の平行き裂との干渉を考慮して数値解析のおよび実験的に考察した。その結果、最大エネルギー解放率クライテリアを用いた数値解析結果は実験結果をうまく説明しており、干渉き裂の効果を定性的かつ定量的に捉えることができた。本研究で得られた事項を列挙すると主に以下のようなことが挙げられる。

1. 主き裂に平行な干渉き裂が前方に位置する場合は、き裂進展を助長する効果があり、干渉き裂に誘導されるようにき裂が進展する。
2. 主き裂と干渉き裂の位置関係によっては、主き裂から破壊き裂が発生しないで干渉き裂から発生するような飛び移り現象が起こる。これらは岩石など非均質材料内の破壊き裂を光学顕微鏡などを用いて観察したとき、しばしば見られる現象で興味深い現象である。

3. 非対称な 1 本の干渉き裂により、破壊力学的には混合モードとなり、き裂は種々の折れ曲がり現象を示す。

本研究では以上のように単純なモデルに対してき裂の干渉効果を議論した。さらに複雑な複数の干渉き裂の効果についても数値解析的に検討されており⁹⁾、き裂進展を妨げる効果が生じる場合も含め、本研究の拡張として様々な変形の複雑なき裂性材料の破壊挙動への基礎的資料を得ることも必要であろう。

参考文献

- 1) たとえば 石田 誠：任意直線き裂群を持つ板における応力拡大係数の解析，日本機械学会論文集（第一部），Vol.35, No.277, pp.1815~1822, 1969.
- 2) たとえば Horii, H. and Nemat-Nasser, S.: Elastic fields of interacting inhomogeneities, Int. J. Solids Structure, Vol.21, No.7, pp.731~745, 1985.
- 3) Binienda, W. K. and Arnold, S. M.: Driving force analysis an infinite anisotropic plate with multiple crack interactions, Int. J. Fracture, Vol.71, pp.213~245, 1995.
- 4) 矢富盟祥：エネルギー解放率の新公式とその応用，材料，Vol.35, No.394, pp.767~771, 1986.
- 5) 矢富盟祥，橋本堅一，石田 啓：E 積分による斜向荷重下でのき裂折れ曲がり瞬間時におけるエネルギー解放率の有限要素解析，日本機械学会論文集（A 編），Vol.61, No.592, pp.2521~2528, 1995.
- 6) 橋本堅一，鱈 洋一，矢富盟祥：混合モード荷重下にある異方弾性体内のき裂のエネルギー解放率の数値解析，材料，Vol.46, No.8, pp.976~980, 1997.
- 7) 阿部孝弘，橋本堅一，矢富盟祥，小森友明：複数のき裂が相互に干渉する場合のエネルギー解放率の数値解析，岩盤力学に関するシンポジウム論文集，Vol.26, pp.66~70, 1995.
- 8) たとえば，W. F. Brown, Jr. and J. E. Srawley: Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials, ASTM STP 410, pp.12~19, 1966.
- 9) 阿部孝弘，矢富盟祥，橋本堅一：エネルギー解放率による破壊基準用いたき裂干渉問題に関する一考察，破壊力学シンポジウム論文集，Vol.8, pp.97~101, 1995.

(1997 年 9 月 26 日 受付)