

主き裂の進展が抑制される位置関係における平行干渉き裂の進展挙動について

Crack Extension Behavior at the Position
that the Extension of a Main Crack is Interrupted

阿部孝弘*・矢富盟祥**・橋本堅一***

Takahiro ABE・Chikayoshi YATOMI and Ken-ichi HASHIMOTO

*正会員 福井工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒916-0064 福井県鯖江市下司)

**正会員 Ph.D 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-0942 石川県金沢市小立野 2-40-20)

***正会員 工博 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒745-0801 山口県徳山市久米高城 3538)

In this paper, we investigate crack extension behavior for a linear elastic body with a parallel interacting crack which interrupts the extension of a main crack. We discuss the crack extension behaviors based on maximum energy release rate criterion. We compute the energy release rate at the onset of crack kinking, of all the crack tips, using the E-integral which is path independent even for a path containing stationary crack tips. As a result, assuming the isotropy of fracture toughness of the body, we find the optimum position of interacting crack that interrupts the extension of a main crack, and find the energy release rate that tensile fracture strength of the body becomes the largest.

Key Words : fracture engineering, energy release rate, crack interaction, E-integral

1. まえがき

コンクリートや岩石などのように、力学的性質の異なる物質が結合して構成されている非均質な材料内では、その内部は潜在き裂の存在や構成物質相互の界面の影響などにより、多数のき裂が干渉し合う非常に複雑な状況となっている。このようなき裂の挙動を破壊力学的立場から論ずることは、コンクリートや岩石などのように引張強度が小さく、脆性破壊を起こすような材料では重要である。

特にき裂相互の干渉については、脆性材料では進展き裂先端に形成されるフラクチュアプロセスゾーンに関連して、荷重の増加とともに進展き裂先端近傍に新たなき裂が発生する可能性があり、進展き裂がそれらと結びついたり、あるいは、このようなき裂の発生によって進展き裂が抑制され安定破壊する場合もある。また、主き裂の進展を抑制する干渉き裂を人工的に作るにより、より見かけの破壊靱性値の大きな材料を作ることが出来る。その場合、干渉き裂が主き裂の進展を抑制しても、干渉き裂への飛び移り進展が生じ、逆に靱性値が小さくなる場合もある。

本研究では、このような背景のもとに、物質内に複数のき裂が存在する時の、それらの相互

干渉の影響を把握するための基礎的研究を行う。特に、き裂干渉問題の基本的なモデルとして、一様引張を受ける均質な線形等方弾性体帯板中央にある片側き裂（以後主き裂と呼ぶ）先端近傍に、主き裂と平行で主き裂より長さの短い、他のき裂（以後干渉き裂と呼ぶ）がある場合を想定し、干渉き裂の存在によって主き裂の進展が抑制される場合におけるき裂進展挙動を考察する。なお、き裂の進展は最大エネルギー解放率による破壊規準に従うものとし、材料の破壊靱性の等方性を仮定する。現実のコンクリートや岩石中のき裂を忠実に考察するのであれば、非均質物質をモデル化した解析を考えなければならないが、本研究の主目的は、き裂相互の位置関係がき裂の進展挙動に及ぼす影響を検討することであるため、均質な等方線形弾性体を仮定した。

エネルギー解放率は、E積分¹⁾を用いて、有限要素解析によって求めた。E積分は経路独立積分であり、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求めることができる。E積分による数値解析法では、周知のJ積分²⁾³⁾とは異なり、進展き裂近傍に変位の不連続性を持つような場合でも精度良くエネルギー解放率を求めることができ、き裂干渉問題には非常に有効である⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

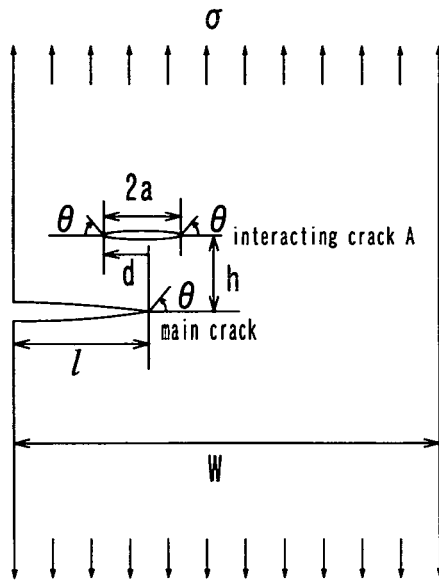


図-1 解析モデル

2. 解析モデルと解析方法

2.1 解析モデル

解析モデルは図-1に示すように、一様引張を受ける横幅Wの無限長帯板中央に、長さlの主き裂があり、その近傍に主き裂と平行な長さ2aの干渉き裂Aがある場合を想定した。ここで説明の都合上、図-1において、き裂面方向を水平方向、それと直角の方向を鉛直方向と呼ぶことにする。そして、主き裂先端と干渉き裂左端との間の水平方向の距離dを水平き裂間距離と呼ぶことにし、右向きを正とする。すなわち、干渉き裂左端が主き裂先端よりも右にあるように干渉き裂が存在するときを正とする。本研究では、干渉き裂の存在によって、主き裂の進展が抑制される場合に注目するため、干渉き裂の位置は図-1に示されるような位置となる。したがって、この場合dは負となる。また、主き裂と干渉き裂Aの鉛直方向の間隔hを鉛直き裂間隔と呼ぶことにする。 θ はき裂の折れ曲がり角度であり、すべてのき裂先端で上向きを正とする。

解析モデルの有限要素近似モデルは、横幅W=10cm、縦方向の長さ17.32cmの有限長帯板とし、要素分割は正三角形を基本とした定ひずみ三角形要素を用い、水平方向80等分割、鉛直方向160等分割とした。なお、き裂先端では、図-2に示すように、正三角形を二分した要素で構成し、折れ曲がり角度 θ が、 0° 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 120^\circ$ 、 $\pm 150^\circ$ の計11方向で計算できるようにした。また、き裂進展モデルの節点座標値を変えることにより、 $\pm 15^\circ$ の方向の計算も行った。き裂進展長さは一要素の辺の長さにと

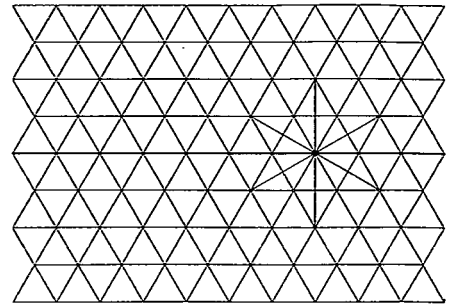


図-2 き裂先端における要素分割

ったが、この値で十分な精度が得られることは昨年度までの研究⁵⁾で確認しており、また、ある位置関係において、き裂各先端におけるエネルギー解放率の最大値は折れ曲がり角度 θ が -60° から 60° の中にあることがわかっているため、本研究では θ を $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 、 0° の7方向における解析を行った。

き裂の位置関係は、主き裂長さ $l=4\text{cm}$ ($l/W=0.4$)を固定し、干渉き裂長さ $2a$ 、水平き裂間距離 d 、鉛直き裂間隔 h を変えた、き裂配置における解析を行い、干渉き裂の存在が主き裂の進展を抑制する場合についての検討を行う。特に水平き裂間距離 d の違いがき裂進展挙動に及ぼす影響を考察する。

2.2 解析方法

エネルギー解放率を求めるためのE積分の式は均質な線形弾性体の場合、次式で表わせる¹⁾。

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

ここに、 Γ は進展き裂先端を含む領域の境界、 $\mathbf{s}$ 、 $\mathbf{u}$ は Γ 上での表面応力ベクトル及び変位ベクトルであり、 l はき裂長さである。また、 l による偏微分は右微分係数($\Delta l \rightarrow +0$)を示す。式(1)を有限要素解析に用いるため、次式(2)のように、 l に関する微分項に2点差分近似を行う⁷⁾。

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\mathbf{s}_i(l) \cdot \mathbf{u}_i(l + \Delta l) - \mathbf{u}_i(l) \cdot \mathbf{s}_i(l + \Delta l)}{\Delta l} \right\} \quad (2)$$

ここに、 n は積分経路における節点の数、 $\mathbf{s}_i$ は各節点における表面力ベクトル、 $\mathbf{u}_i$ は各節点における変位ベクトル、そして Δl はき裂進展長さ

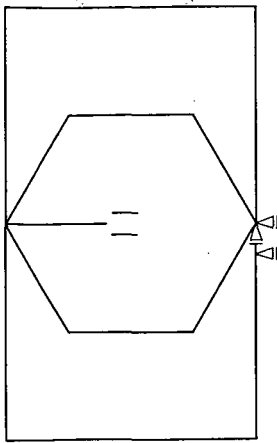


図-3 積分経路と拘束条件

である。また、 (l) および $(l+\Delta l)$ は、それぞれ、き裂が進展する前と進展した後のモデルの物理量を表している。

E積分値を求めるための積分経路は、経路独立性を利用し、図-3に示すように、き裂先端付近における応力の数値計算上の誤差を避けるために、最も外側にできる正六角形の経路とした。なお、他の任意の経路を用いても経路独立性が成立することは確認してある。また、本モデルのように応力境界条件の場合は、本来不定であるべき剛体平行移動、および剛体回転が、数値解析すると数値誤差により、一意に決定されてしまう場合が生じる。一方、理論的にはE積分値には客観性があり、それらの剛体移動に関し独立な値をもつが、数値解析した場合は、力の釣り合い条件が完全に満たされないことにより、客観性かつ経路独立性が失われ、E積分値の誤差を大きくすることがある。そこで剛体移動をなくすために、図-3に示すように、主き裂のある横軸の最右端の節点を鉛直方向、水平方向共に拘束し、その真下の節点の水平方向のみを拘束して計算を行った。

3. 結果と考察

3. 1 各き裂先端におけるエネルギー解放率と折れ曲がり角度との関係

干渉き裂の存在による主き裂の進展抑制効果は、主き裂先端近傍の応力の伝達が遮られるように干渉き裂が存在し(図-1参照)、さらに干渉き裂長さ $2a$ が長いほど、鉛直き裂間隔 h が短いほど大きいと考えられる。またこのような時、主き裂が進展せずに干渉き裂先端に飛び移り進展する可能性も大きくなる。

そこでまず、干渉き裂の存在によって、主き裂の進展が抑制され、さらに干渉き裂先端に飛

び移り進展をする位置関係における解析結果を示す。図-4は、 $l/W=0.4$ 、 $2a/l=0.5$ 、 $h/l=0.162$ のき裂配置において、干渉き裂の水平方向の位置を種々変えた場合の解析結果である。ただし、干渉き裂の水平方向の位置は水平き裂間距離 d と主き裂長さ l の比 d/l で表わしてある。図-4において、縦軸はエネルギー解放率、横軸は折れ曲がり角度である。ただし、エネルギー解放率は、線形弾性体を対象としているため、次式(3)で示されるように、干渉き裂が存在せず、一様引張を受ける無限長有限幅帯板の片側中央にある主き裂が直進するときの応力拡大係数 K_I の解析的級数解⁸⁾をエネルギー解放率に換算した値 G_0 で除して、正規化してある。

$$G_0 = K_I^2 / E \quad (3)$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} F(l/W) ; l/W = \xi$$

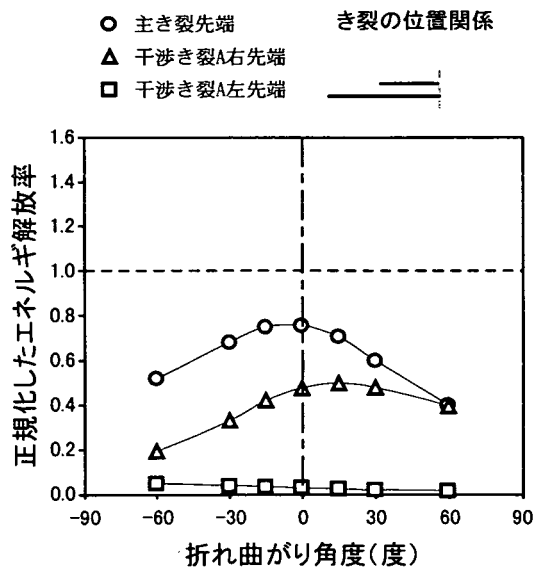
$$F(\xi) = 1.12 - 0.231\xi + 10.55\xi^2 - 21.72\xi^3 + 30.39\xi^4$$

したがって、正規化されたエネルギー解放率の値が1.0より大きい場合は、干渉き裂が存在しない場合よりも、き裂の進展が助長され、帯板の引張破壊強度が小さくなることを意味し、逆に1.0よりも小さければき裂進展が抑制され、引張破壊強度は大きくなることを意味する。

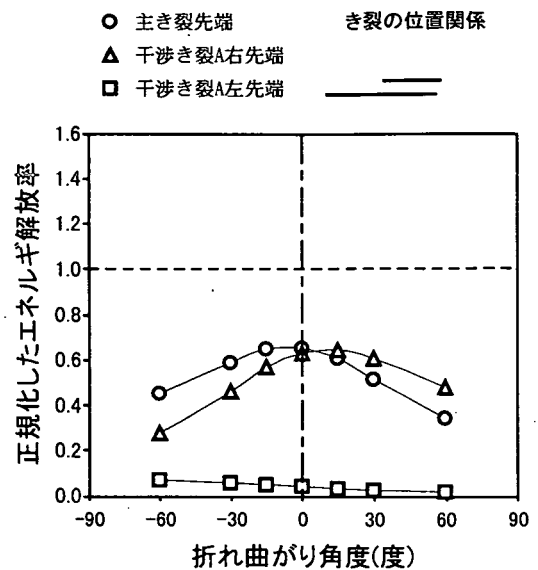
式(3)において、応力拡大係数を算出するための近似式には $l/W \leq 0.6$ で厳密解と0.5%以内の誤差があるが⁸⁾、以後の議論でも、同様に G_0 を一つの基準値と考え、E積分による数値解析により得られたエネルギー解放率は、この G_0 で除した正規化した値で表すことにする。ここに、Eは材料のヤング係数である。

また、図中○印は主き裂先端、△印は干渉き裂右先端、□印は干渉き裂左先端におけるE積分によって求められたエネルギー解放率であり、実線はこれらの値をスプライン近似したものである。

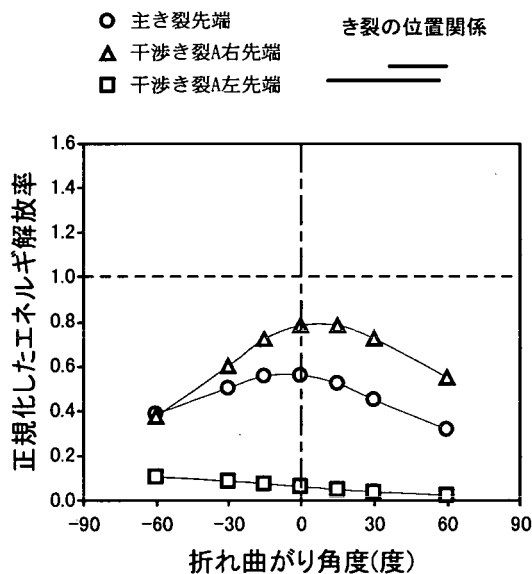
図-4(a)は干渉き裂長さ $2a$ を2cm($2a/l=0.5$)とし、干渉き裂右先端の水平方向の位置が主き裂先端と等しい($d/l=0.5$)場合での各き裂先端における、E積分によるエネルギー解放率の解析結果である。この場合、主き裂先端における正規化されたエネルギー解放率は干渉き裂両端における値よりも大きい。また、最大となる方向は、ほぼ直進であるが、 $\pm 15^\circ$ における値を比較すると、 -15° における値のほうが大きいことから、この場合、主き裂は多少下向きに進展する。しかし、この値は約0.8であり、1.0より小さく、干渉き裂の存在によって主き裂の進展が抑制されていることがわかる。干渉き裂の右先端と左先端では右先端の方のエネルギー解放率が大きく、



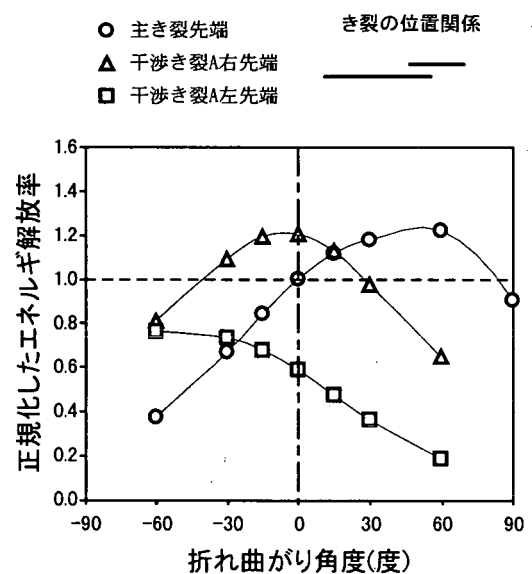
(a) $d/l = -0.5$



(b) $d/l = -0.469$



(c) $d/l = -0.437$



(d) $d/l = -0.219$

図-4 エネルギー解放率と折れ曲がり角度の関係
 $(l/W=0.4, 2a/l=0.5, h/l=0.162)$

左先端は極端に小さいことがわかる。

図-4 (b) は、干渉き裂の位置が(a)の場合よりわずかに右に存在する $d/l = -0.469$ の場合での解析結果である。この場合、主き裂先端と干渉き裂の右先端におけるエネルギー解放率の最大値はほぼ等しいが、わずかに主き裂先端における値の方が大きい。主き裂先端におけるエネルギー解放率は(a)における場合よりも小さくなっており、

干渉き裂の存在によって主き裂の進展は更に抑制されていることがわかる。しかし干渉き裂右先端における値は逆に、主き裂の影響から大きくなっている。これより、干渉き裂を $d/l = -0.469$ より右に存在させると、干渉き裂右先端における値が主き裂先端における値よりも大きくなり、干渉き裂が進展すると考えられる。したがって、この位置より干渉き裂が右に存在すれば、干渉

き裂右先端への飛び移り進展が生じることになる。このときの主き裂先端におけるエネルギー解放率が最大となる方向は(a)の場合と同様ほぼ直進であるが、 -15° における値のほうが大きいことから、この場合も主き裂は多少下向きに進展する。

図-4(c)は、さらに干渉き裂を右に存在させた $d/l=-0.437$ の時の解析結果である。この時は上述のように、干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率が最大となっており、この場合、主き裂は進展せずに、干渉き裂右先端に飛び移り進展することになる。またその方向は、上向きである。ところが、図-4(d)に示す $d/l=-0.219$ のときには再び、主き裂先端におけるエネルギー解放率が再び最大となり主き裂先端が進展する。

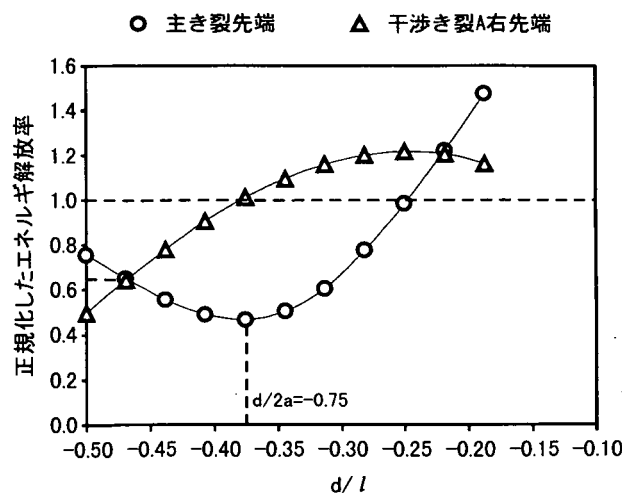
3. 2 水平き裂間距離の違いによる最大エネルギー解放率の変化

(1) 干渉き裂長さを変化させた場合

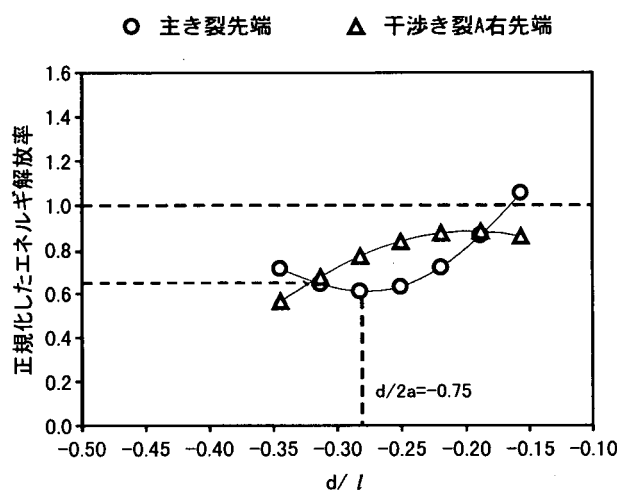
図-4から、主き裂長さ l 、干渉き裂長さ $2a$ 、鉛直き裂間隔 h が等しくとも、水平き裂間距離 d が異なると、き裂の進展特性が大きく異なることがわかる。すなわち、干渉き裂の水平方向の位置の違いによって、主き裂の進展が助長あるいは抑制され、抑制される時にはエネルギー解放率が最大となるき裂先端が変化し、干渉き裂右先端に飛び移り進展する場合があることがわかる。

そこで、水平き裂間距離 d と各き裂先端におけるエネルギー解放率の最大値との関係をグラフ化したものが図-5(a)である。ただし、横軸は d を主き裂長さ l で除して無次元化してある。なお、干渉き裂左先端における値は、最大となる位置関係がなかったので省略してある。また、ここでこの各き裂先端におけるエネルギー解放率の最大値をMAXEと呼ぶことにする。

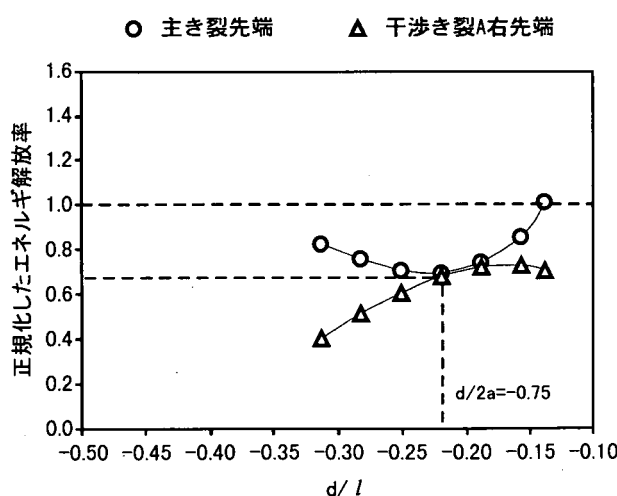
図-5(a)から、 $d/l=-0.469$ のときに、主き裂と干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率の最大値MAXEはほぼ同じ値になっており、この位置よりも干渉き裂が右に存在すると、主き裂よりも干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率の値が大きくなり、干渉き裂右先端への飛び移り進展が生じる。そして、 $d/l=-0.219$ のときに再び主き裂先端と干渉き裂右先端のMAXEは等しくなり、この間の干渉き裂の位置では、干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率が主き裂先端における値よりも大きく、干渉き裂右先端が進展することがわかる。また、 d が大きくなる(絶対値は小さくなる)と、主き裂のエネルギー解放率が最大となる折れ曲がり角度は図-4(d)のように上方向になった。この位置($d/l=-0.219$)よりさらに右に干渉き裂が存在すると、主き裂のエネルギー解放率が非常に大きくなる。



(a) $2a/l=0.5$



(b) $2a/l=0.375$



(c) $2a/l=0.313$

図-5 干渉き裂の水平方向の位置の違いによる最大エネルギー解放率(MAXE)の変化
($l/W=0.4$, $h/l=0.162$)

また、主き裂の進展が最も抑制される干渉き裂の位置、すなわち、主き裂におけるエネルギー解放率が最小となる干渉き裂の位置は、 $d/l=-0.375$ のときである。このとき $d/2a$ をパラメータにとると、 $d/2a=-0.75$ のときである。

しかし、主き裂の進展が抑制されていても、干渉き裂右先端における正規化したエネルギー解放率が1.0より大きければ、材料の引張破壊強度は小さくなる。 $d/l=-0.375$ ($d/2a=-0.75$) のときは、干渉き裂右先端における値がほぼ1.0であるので、材料の破壊強度は主き裂だけがある場合とそれほど変わらない。この位置より右に干渉き裂が存在すると、干渉き裂右先端におけるMAXEは1.0を越えており、干渉き裂がない場合よりも材料の引張破壊強度は小さくなる。そこで、材料の引張破壊強度が最大となる干渉き裂の位置は、主き裂先端と干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率の値がほぼ等しく、正規化された値が1.0よりも小さい $d/l=-0.469$ のときであり、そのときの正規化したエネルギー解放率の値は、ほぼ0.65である。

図-5(b)は、干渉き裂長さ $2a$ を(a)よりも短くした $2a/l=0.375$ ($2a=1.5\text{cm}$) とした時の各き裂先端におけるMAXEを図-5(a)と同様に描いたものである。この場合では、ほぼ $-0.313 < d/l < -0.188$ において、主き裂は進展せずに干渉き裂右先端に飛び移り進展を生じる。干渉き裂長さの長い図-5(a)と比較すると、干渉き裂の存在による主き裂への影響は小さくなっており、飛び移り進展を生じる d の間隔は小さくなっている。飛び移り進展の起きているときにおけるエネルギー解放率の値が1.0を超えることはなく、主き裂および干渉き裂ともに、き裂進展が相互に抑制されていることがわかる。これより、 $2a/l=0.375$ のとき、飛び移り進展の起こる水平き裂間距離 d の範囲 ($-0.313 < d/l < -0.188$) では、材料の引張破壊強度は、干渉き裂がなく、主き裂だけがある場合よりも大きい。また、材料の引張破壊強度が最大となる干渉き裂の位置は、 $d/l=-0.313$ のときであり、そのときの正規化したエネルギー解放率の値は、(a)と同様でほぼ0.65である。また、主き裂のエネルギー解放率が最小となるのは $d/l=-0.256$ ($d/2a=-0.75$) のときである。

図-5(c)は、干渉き裂長さ $2a$ を更に短くした $2a/l=0.281$ ($2a=1.125\text{cm}$) のときの解析結果である。この場合では、干渉き裂の水平方向の位置が異なっても、主き裂先端におけるエネルギー解放率の値が干渉き裂先端における値よりも大きく、飛び移り進展が起きない。 $d/l=-0.219$ のときに、主き裂と干渉き裂右先端における正規化されたエネルギー解放率はほぼ同じ値になっているが、わずかに主き裂先端における値が大きく、飛び移り進展は生じない。この位置よりさらに右に干渉き裂

が存在すると、これ以上主き裂の進展を抑制することはない。また、主き裂におけるエネルギー解放率が最小となるのは $d/l=-0.237$ ($d/2a=-0.75$) のときである。

以上より、3つの図を比較すると、干渉き裂が長いほど、主き裂に与える干渉き裂の影響は大きく、干渉き裂の水平方向の位置が主き裂と重なっている場合には、主き裂における正規化されたエネルギー解放率は小さくなるが、逆に、干渉き裂における正規化されたエネルギー解放率の値が1.0よりも大きくなり、帯板の引張破壊強度が小さくなる場合もある。一方、干渉き裂長さが短くなれば、主き裂への影響は小さくなるが、干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率も小さくなり、両方の正規化したエネルギー解放率が1.0よりも小さくなり、帯板の引張破壊強度は干渉き裂がない場合よりも大きくなる。図-5(c)では、干渉き裂による影響が小さいので、主き裂のエネルギー解放率は図-5(a)の場合より大きくなり、飛び移り進展も生じていないことから、このときは主き裂のみで考慮すれば良いことになる。つまり、主き裂におけるエネルギー解放率の最も小さいところが破壊強度の大きいところになる。また、3つの図を見ると、主き裂におけるエネルギー解放率が最も小さい値の時の d は、 $d/2a$ をパラメータとして、 $d/2a=-0.75$ となることがわかる。また、材料内の引張破壊強度が最大となるときの正規化されたエネルギー解放率は、主き裂と干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率の値が同じでなかつ、1.0より小さいときで、その値を比較してみるとほぼ0.65である。

(2) 鉛直き裂間隔を変化させた場合

次に鉛直き裂間隔 h を変化させた場合の検討を行う。図-6は、 $l/W=0.4$ 、 $2a/l=0.5$ として、鉛直き裂間距離 h を変え、干渉き裂の水平方向の位置(水平き裂間距離 d)の違いによる各き裂先端におけるエネルギー解放率の最大値MAXEの変化を表したものである。なお、図-6(a)は図-5(a)と同じグラフである。

$h/l=0.162$ とした図-6(a)と $h/l=0.217$ とした図-6(b)とを比較すると、主き裂先端におけるエネルギー解放率の値は、鉛直き裂間隔 h が大きい図-6(a)の方が大きい。これは、 h が大きくなると、干渉き裂の主き裂へ及ぼす影響が小さくなり、主き裂進展の抑制効果が小さくなるからである。そのため、図-6(a)の場合には、主き裂先端と干渉き裂右先端における値がほぼ等しい $d/l=-0.469$ のときでも、図-6(b)では明らかに主き裂におけるエネルギー解放率の値が大きくなり、主き裂が進展する。そして、 $d/l=-0.406$ のときに、干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率が主き裂における値より大きくなり、干渉き裂右先端へ飛び移り進展することがわかる。また、この場合、干

渉き裂右先端における正規化されたエネルギー解放率の値は、1.0を超えることはなかった。飛び移り進展は起こるが、帯板の引張破壊強度は干渉き裂がない場合よりも大きくなる。また、エネルギー解放率が最大となる方向はほとんど同じであった。

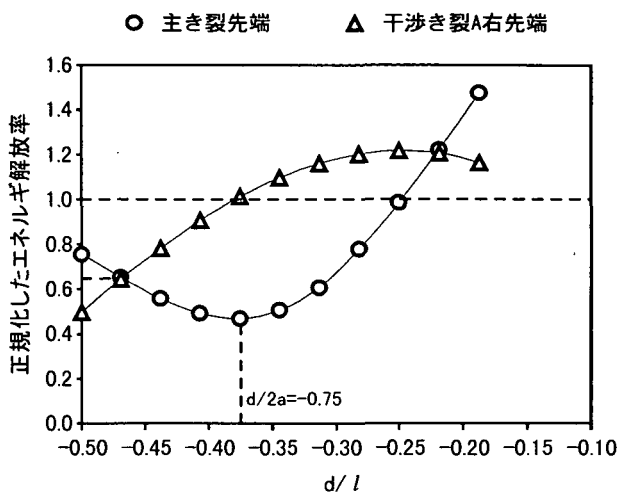
図-6 (c)は、鉛直き裂間隔 h をさらに大きく、 $h/l=0.271$ としたときの解析結果である。この図から、明らかに h が大きくなると干渉き裂の存在が主き裂の進展に及ぼす影響が小さくなり、干渉き裂の水平方向の位置を変えても、主き裂先端におけるエネルギー解放率の値が干渉き裂先端における値よりも大きくなり、干渉き裂への飛び移りは生ずることなく、主き裂先端が進展することになる。また、干渉き裂先端における正規化したエネルギー解放率の値は、1.0を超えることはない。

図-6 (a), (b)および(c)を比較すると、干渉き裂への飛び移り進展が生じている d の範囲は(a)では約 $-0.469 < d/l < -0.219$, (b)では約 $-0.425 < d/l < -0.25$ となっているが、 h が大きい(c)では生じていない。 h を更に大きくすると、干渉き裂がなく、主き裂だけがある場合に近づき、干渉き裂による主き裂進展の抑制効果はなくなると考えられる。また、 $h/l=0.217$ の場合で、干渉き裂に飛び移り進展している場合では、正規化したエネルギー解放率は1.0より小さく、帯板の引張破壊強度は小さくなっている。

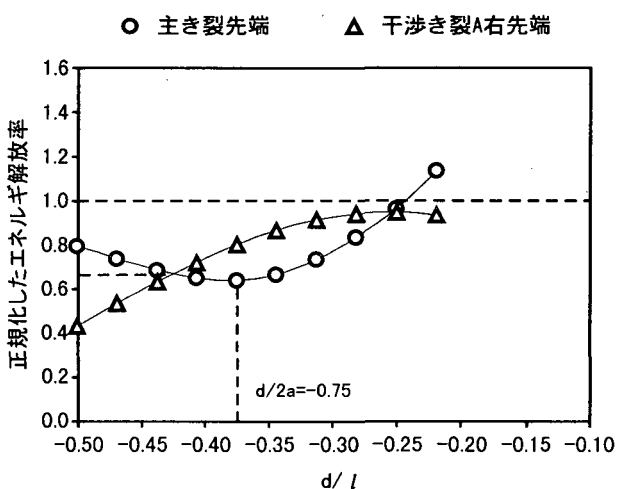
図-6 (b)において、主き裂先端と干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率が同じになっている解析結果はないが、それぞれの解析結果を補間した曲線の交点から、帯板の引張破壊強度が最大となる正規化されたエネルギー解放率の値は、図-6 (a)と同様ほぼ0.65であることがわかる。また、主き裂におけるエネルギー解放率の値が最も小さい干渉き裂の位置は、 $d/2a$ をパラメータとして、 $d/2a=-0.75$ のときである。

図-5及び6から、材料の引張破壊強度が最大となるとき、すなわち、主き裂および干渉き裂右先端におけるエネルギー解放率の値が等しく、かつ、正規化したエネルギー解放率の値が1.0より小さい場合の正規化したエネルギー解放率の値は、飛び移り進展が生じる場合では、ほぼ0.65である。また、主き裂の進展が最も抑制される干渉き裂の水平方向の位置は、 $d/2a$ をパラメータとして $d/2a=-0.75$ のときである。この2つのことをさらに確認するために、 $l/W=0.4$, $h/l=0.217$ とし、干渉き裂長さを長くした場合の解析を行った結果が図-7である。

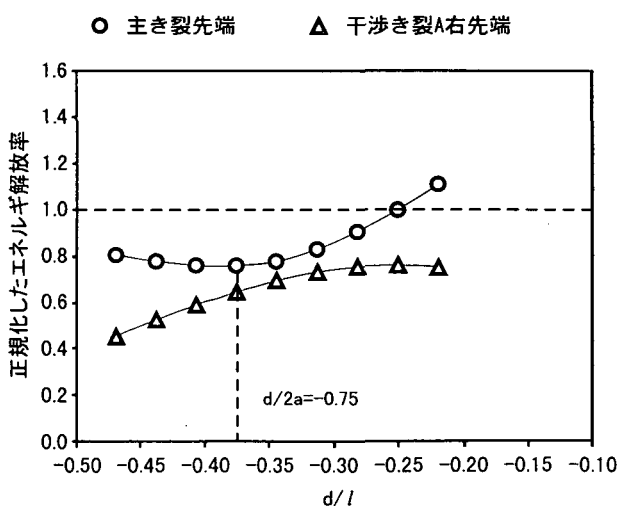
図-7から明らかのようにこの場合もやはり上述の2つの結果が得られた。すなわち、干渉き裂右先端に飛び移り進展が生じる場合、引張破壊強度が最大となるときの正規化されたエネルギー解放率の値はほぼ0.65であり、飛び移り進



(a) $h/l=0.162$

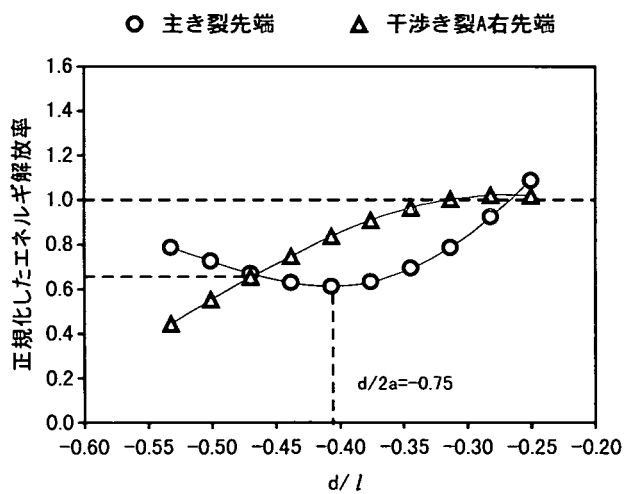


(b) $h/l=0.217$

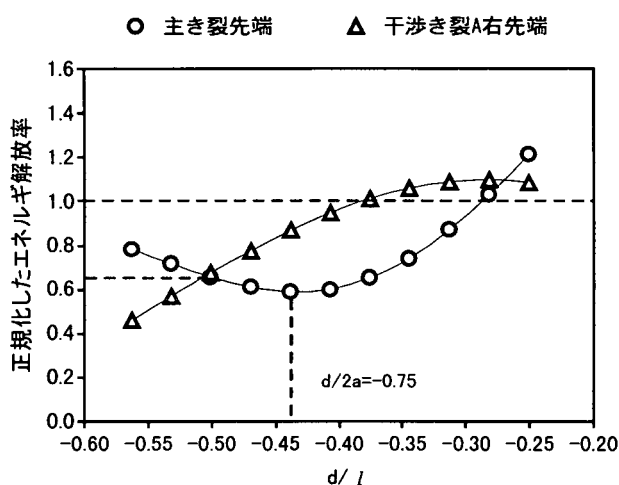


(c) $h/l=0.271$

図-6 干渉き裂の水平方向の位置の違いによる最大エネルギー解放率(MAXE)の変化 ($l/W=0.4$, $2a/l=0.5$)



(a) $2a/l=0.531$



(b) $2a/l=0.563$

図-7 干渉き裂の水平方向の位置の違いによる最大エネルギー解放率(MAXE)の変化
($l/W=0.4$, $h/l=0.217$)

展が生じない場合にはこの値以上の値となる。言い換えれば、干渉き裂を挿入した場合の主き裂の進展抑制効果は最大35%程度であるといえる。

ただし、この結果は本研究で用いたき裂配置におけるものであり、他のき裂の位置関係についての解析は今後の研究課題としたい。

また、図-7においても主き裂の進展が最も抑制される干渉き裂の水平方向の位置は $d/2a \approx -0.75$ のときである。これより、主き裂先端近傍に平行な他のき裂が存在する場合、主き裂の進展が最も抑制される干渉き裂の位置は $d/2a$ をパラメータとして $d/2a \approx -0.75$ の時、すなわち、干渉き裂の主き裂との水平方向の重なりが、干渉き裂長さのほぼ75%の場合であることが明らかと

なった。

4. あとがき

本研究では、線形等方弾性体帯板中に主き裂が存在し、その先端近傍にそれと平行な他のき裂(干渉き裂)が存在する場合のき裂進展特性を、き裂進展がエネルギー解放率による破壊規準に従うものとして検討した。また、エネルギー解放率はE積分により求めた。本研究において、主き裂長さと帯板幅との比 l/W を0.4として行なった解析結果からわかったことは次の通りである。

- 1) 干渉き裂の位置によって、主き裂の進展が抑制され、干渉き裂右先端に飛び移り進展する場合の位置関係にある程度明確にすることができた。
- 2) 主き裂の進展が最も抑制される干渉き裂の水平方向の位置は $d/2a \approx -0.75$ のときである。
- 3) 飛び移り進展が生じているとき帯板の引張破壊強度が最大となるときの、正規化したエネルギー解放率の値はほぼ0.65であり、生じない時はこの値よりも大きい。

本研究では、一様に引張を受ける帯板中にある主き裂と、それと平行な干渉き裂がある場合におけるき裂進展特性を考察したが、本研究における解析結果から得られる結論1)~3)が主き裂及び干渉き裂長さを変えた場合に、同様な結論が得られるかどうかの検討を行なう必要がある。さらに斜荷重が作用する場合、干渉き裂が斜めとなっている場合、干渉き裂の本数が多い場合などの、より複雑な問題の解析を行い、干渉き裂の存在が、主き裂進展に及ぼす影響をより明確にすること今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Yatomi, C. :The energy release rate and the work done by the surface traction in quasi-static elastic crack growth, *Int. J. Solid Structure*,19,pp.183-187,1983.
- 2) Eshelby, J.D. :*The continuum theory of lattice defect*,Vol.3,pp.79-144,Academic Press, New York,1956.
- 3) Rice, J.R. :A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks,*J.Appl.Mech.*,35,pp.376-386,1968.
- 4) 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,第26回岩盤力学に関するシンポジウム論文集,pp.66-70,1995.
- 5) 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規準を用いたき裂干渉問題に関する一考察,第8回破壊力学シンポジウム論文集, pp. 97-101, 1995.

- 6) 橋本堅一, 阿部孝弘, 矢富盟祥: き裂干渉問題における
き裂進展挙動の基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.44A,
pp.437-442, 1998
- 7) 橋本堅一, 矢富盟祥, 石田 啓: E 積分による異方弾性
体内のき裂折れ曲がり時におけるエネルギー解放率の
数値解析, 土木学会論文集, No. 513/ I -31, pp. 17-
25, 1995.
- 8) 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄: 数値破壊力学, 実教出
版, p75, 1980.

(1998年4月24日受付)