

福井工業高等専門学校 正員 阿部孝弘

金沢大学工学部 正員 矢富盟祥

徳山工業高等専門学校 正員 橋本堅一

**1. まえがき** 非破壊検査の技術の進歩に伴い、材料内の微小なき裂の大きさ、数や位置の正確な検証が行われるようになってきている。そしてこのようなき裂の存在が直接、構造物の破壊に至るか否かを判定するために、破壊力学的な検討が非常に重要となってきている。破壊規準として使用される代表的なパラメータとしては、応力拡大係数とエネルギー解放率が挙げられるが、前者が線形弾性体のみを対象としているのに対して、後者は非線形の物質に対しても適用可能なことから、エネルギー解放率を用いた方が有利な点が多いと考えられる。そこで本研究では、平面弾性体中に平行な位置関係にある3本のき裂が存在する場合のき裂の進展特性を、E積分による有限要素解析から得られるエネルギー解放率の算出結果から考察する。

**2. 解析方法** き裂の進展によるエネルギー解放率を求めるには、従来、経路独立なJ積分がよく用いられている。しかしながら、J積分では、その経路独立性を保つためには、積分経路は進展するき裂の先端のみを囲み、経路内ではひずみの不連続面がないことが必要となる。そのため進展するき裂先端近傍の状況が複雑な場合には、積分経路を任意に取ることができない。

J積分と異なり、本研究で用いたE積分は、準静的なき裂である限り、非均質材料、非直線的なき裂、任意方向に進展したき裂などの場合でも、複数のき裂先端を含む任意の経路で、経路独立な積分により、求めようとする進展き裂先端からのエネルギー解放率を得ることができる。

E積分によるエネルギー解放率の表示は次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$E(l, \alpha) = \int_{\Gamma} \int_0^{\alpha} \left( \frac{\partial s}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial l} - \frac{\partial s}{\partial l} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \beta} \right) d\beta ds \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{s}$ は応力ベクトル、 $\mathbf{u}$ は変位ベクトル、 $l$ はき裂長さ、 $\Gamma$ は領域の境界、 $\alpha$ は荷重パラメータである。本研究では線形弾性体を対象としたため、E積分を線形弾性体に適用し、さらに定ひずみ要素による有限要素法を用いるために微分項を2点差分近似をすると、式(1)は次式のようになる。

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

ここに、 $n$ は経路における要素辺の数、 $\Delta s$ は各要素辺の長さ、 $\Delta l$ はき裂進展長さである。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後の物理量を表している。本研究では式(2)を用いて解析を行った。

**3. 結果と考察** 本研究では、一様引張を受ける無限長帯板の中央に、長さの等しい平行な3本のき裂がある場合のき裂進展特性について解析を行った。まず、Fig. 1は3本のき裂が帯板の中央に直列に並んで存在する場合で、中央にあるき裂の右先端が進展するときのエネルギー解放率のE積分およびJ積分による算出値を、積分経路ごとに図示したものである。エネルギー解放率は無限板における解析解で正規化してある。また、積分経路とき裂の模式的な位置関係をFig. 2に示す。図から明らかなように、J積分では経路内のき裂先端の数と向きによって求められるエネルギー解放率は異なる。経路内に、き裂右先端が多いときには正規化したエネルギー解放率は1に近い値となり、左先端が多いときには-1に近くなり、同数の場合には0に近い値となる。すなわち、J積分では経路内にある全てのき裂先端の影響が合計されてしまい、求めようとするき裂先端のエネルギー解放率を任意の経路で求めることはできない。これに対してE積分では、経

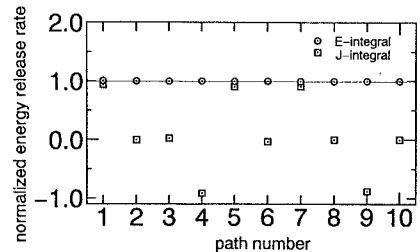


Fig.1 Energy release rates on several integral paths

路による差はほとんどなくほぼ一定の値が得られており、また、無限板解析解とも良く一致している。このようにE積分では、複数のき裂先端を含む経路であっても、任意の経路で精度良く、求めようとするき裂先端からのエネルギー解放率が得られることが分かる。

次に、Fig. 3はFig. 5に示されるように帯板中央にあるき裂Aが、それと平行で対称な位置関係にあるAと長さの等しい2本のき裂Bに挟まれた場合を想定し、垂直き裂間隔 $h$ が非常に小さいときにおける、各き裂先端からのエネルギー解放率をE積分によって算出した結果を、異なる水平き裂距離 $d$ ごとに図示したものである。ただし、エネルギー解放率は無限板中央にき裂が1本ある場合の解析解で正規化しており、 $d$ はき裂長さ $2a$ で無次元化してある。また、Fig. 4は垂直き裂間隔 $h$ をき裂長さの約1.3倍としたときの結果である。筆者等は文献2)で、中央のき裂Aの右先端からのエネルギー解放率についての考察を行ったが、本文では全てのき裂先端におけるエネルギー解放率を求め、その進展特性の考察を行う。ここに、Fig. 3, 4で $d/2a > 0$ における値がき裂右先端、 $d/2a < 0$ における値がき裂左先端からのエネルギー解放率を示す。Fig. 3から、3本のき裂がずれることなく並列に並んだときは( $d=0$ )、若干き裂Bの値が大きいが、き裂Aの値とはほとんど差はなく、エネルギー解放率の破壊規準で考えれば、どのき裂先端が先に進展するか分からない状態である。しかし、 $d$ が増加していくと、中央にあるき裂Aの左先端の値が増加していき、右先端の値はき裂Bによって応力の伝達が遮断されるため、減少していく。き裂Bではこの逆となる。

ところが、き裂Aの右端とき裂Bの左端が同位置( $d/2a=1$ )に近くなると、き裂Aの右先端の値が急激に増大し、最も進展しやすいき裂先端は、き裂Aの左先端から右先端に移行していくことがわかる。また、 $d=0$ のときを除いて、どの $d$ に対してもき裂Bよりき裂Aの先端からのエネルギー解放率が高いことから、 $h$ が非常に小さい場合は、中央にあるき裂のどちらかの先端が先に進展することになる。

しかし、Fig. 4のように $h$ がある程度大きい場合で、 $0 < d/2a < 1$ のときは、き裂Aの左先端とき裂Bの右先端の値がほぼ等しいので、き裂A、Bどちらの先端が先に進展するかは、明確でなくなる。

しかし、Fig. 4のように $h$ がある程度大きい場合で、 $0 < d/2a < 1$ のときは、き裂Aの左先端とき裂Bの右先端の値がほぼ等しいので、き裂A、Bどちらの先端が先に進展するかは、明確でなくなる。

**4. あとがき** 本研究では、複数の平行き裂が存在する場合、それらの位置関係による、進展特性の違いを定量的に考察した。また本研究で用いたE積分は、任意の積分経路で、任意方向に進展する瞬間時のき裂先端からのエネルギー解放率を、精度良く求められることから、種々の位置関係にある複数のき裂の進展特性の考察を、今後の研究課題としたい。

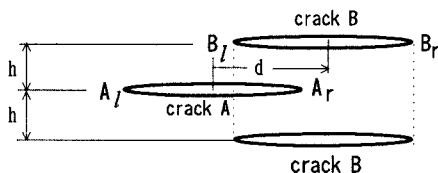


Fig.5 Three parallel cracks with the distance  $h$

#### 参考文献

- 1) 例えば、C. Yatomi: *Int. J. Solids Structures*, Vol. 19, No. 2, pp183~187, 1983
- 2) 阿部, 橋本, 矢富, 小森: 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp66~70, 1995

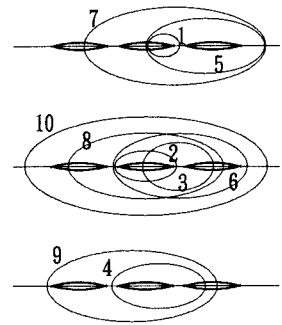


Fig.2 Positions of cracks and integral paths

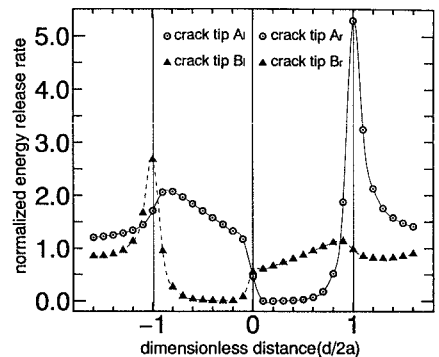


Fig.3 The variations of the energy release rates ( $h/2a=0.0866$ )

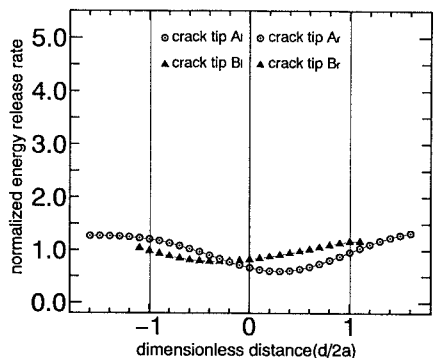


Fig.4 The variations of the energy release rates ( $h/2a=1.299$ )