

異種材界面き裂の混合モード破壊基準*

池田 徹^{*1}, 宮崎 則幸^{*1}
祖田 敏弘^{*2}, 宗像 健^{*1}Mixed Mode Fracture Criteria of Interface Crack
between Dissimilar MaterialsToru IKEDA, Noriyuki MIYAZAKI,
Toshihiro SODA and Tsuyoshi MUNAKATA

This paper presents an application of fracture mechanics to the evaluation of strength of an interface crack between dissimilar materials. Special emphasis is given to mixed mode fracture criteria. The stress intensity factor is one of the basic fracture mechanics parameters, but there exist few applications of the stress intensity factor to fracture criteria of an interface crack. In this study, a concept of the stress intensity factor for an interface crack is discussed in detail, and various types of specimens are tested experimentally for investigating the mixed mode fracture toughness of an interface crack. The specimens are acrylic resin-epoxy resin and aluminum-epoxy resin joints. The mixed mode stress intensity factors for various specimens are analyzed by using BEM and M_I -integral method, an extended version of the J -integral. Two types of the mixed mode fracture criteria of an interface crack are derived. One is characterized by the total energy release rate G for acrylic resin-epoxy resin joints, and the other is characterized by the stress intensity factors K_I and K_{II} for aluminum-epoxy resin joints.

Key Words: Fracture Mechanics, Stress Intensity Factor, Fracture Toughness, Fracture Criterion, J -integral, Boundary Element Method, Interface Crack, Mixed Mode

1. 緒 言

異種材界面に存在するき裂に対しての破壊力学的評価は、接合物の強度に対して重要な意味をもつ。異種材界面のき裂の研究は、まず、Williams⁽¹⁾によってき裂先端近傍の応力の振動性が指摘され、Erdogan⁽²⁾⁽³⁾, England⁽⁴⁾, Rice and Sih⁽⁵⁾などによって、種々の境界条件に対する界面き裂の弾性解が提出され、界面き裂の応力拡大係数に対する議論がなされている。これらの解(古典解)は、き裂先端近傍において応力の振動特異性が現れ、またき裂開口部にOverlappingが生ずることが知られている。近年になって、このような現象は物理的におかしいと考えて、き裂面の接触を考慮したモデル(修正解)がComninou⁽⁶⁾, Atkinson⁽⁷⁾, Mak⁽⁸⁾などにより、提出されている。一方、き裂に垂直な引張荷重が作用する場合には、振動特異性やOverlappingが生ずる範囲は極めて小さく無視できるとする考え方から、古典解を用いて問題ないとする意見も多い。市川⁽⁹⁾は古典解と修正解を比較して、Overlappingが問題となる接触域は非常に小さく、その外側では実質的に

古典解と修正解は一致することを指摘している。そこで、本論文では、非常にせん断荷重の影響が大きくなりが広い範囲で閉口する場合以外は、古典解を用いて問題ないものと考えることとした。また、実験による研究において単純な異種材界面き裂に対する実験の例は多くないが、均質体とみなした応力拡大係数を用いて疲労破壊を評価した山崎らの研究⁽¹⁰⁾や、エネルギー解放率のみで静的破壊を評価したMulvilleらの研究⁽¹¹⁾、異種材界面き裂の応力拡大係数とエネルギー解放率で静的破壊を評価した佐藤らの研究⁽¹²⁾などがある。この中で、異種材界面き裂の応力拡大係数を用いて破壊を評価した例は、佐藤らの研究⁽¹²⁾のみであるが、彼らもエネルギー解放率によって静的破壊基準が評価できるとした結果を示している。これは、異種材界面き裂の場合 $K_I^2 + K_{II}^2 = \text{一定}$ の条件によって支配されていることを示しており、各モードの応力拡大係数に分離する必要がないとも考えられるが、さらに幅広い異種材界面き裂の破壊試験を行って検討する必要があると思われる。そこで、本論文においては、界面き裂の応力拡大係数の意味を明確にするため、界面き裂の応力拡大係数の定義と意味について考察を行い、実際に静的破壊試験を行って界面き裂の応力拡大係数を用いた界面き裂の静的破壊基準を検討した。

* 原稿受付 平成4年4月13日。

^{*1} 九州大学工学部 (812 福岡市東区箱崎6-10-1).^{*2} 九州大学大学院。

2. 異種材界面き裂の応力拡大係数の検討

異種材界面き裂の応力拡大係数の定義は、 Erdogan⁽²⁾⁽³⁾などによって与えられており、均質体中のき裂の場合と同様に応力拡大係数によってき裂先端近傍の応力と変位の場が規定される。簡単のため、図1のようにき裂先端からの距離を定義した場合、 x_1 軸上、すなわち $\theta = 0$ としたときの r の関数としてこの応力拡大係数の定義を示すと次式のようになる。

$$K_I + iK_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_{22} + i\sigma_{12}) \left(\frac{r}{l_*} \right)^{-i\alpha} \dots \dots \dots (1)$$

このとき、異種材界面き裂近傍の x_1 軸上の複素応力は、次のように示される。

$$\sigma_{22} + i\sigma_{12} = \frac{K_I + iK_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l_*} \right)^{i\alpha} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 K_I 、 K_{II} はモード I および II の異種材界面き裂に対する応力拡大係数、 $\sigma_{22} + i\sigma_{12}$ は複素応力、 i は複素定数であり、 α は異種材における材料定数で次のように示される。

$$\alpha = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\left(\frac{\kappa_1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right) / \left(\frac{\kappa_2}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1} \right) \right] \dots \dots \dots (3)$$

$$\kappa_j = \begin{cases} 3 - 4\nu_j & (\text{Plane strain}) \\ (3 - \nu_j)/(1 + \nu_j) & (\text{Plane stress}) \end{cases} \dots \dots \dots (4)$$

$$j = 1, 2$$

なお、 μ_j は、せん断弾性係数であり、縦弾性係数 E_j 、ボアソン比 ν_j により、

$$\mu_j = \frac{E_j}{2(1+\nu_j)} \quad (j=1, 2) \dots \dots \dots (5)$$

の関係によって求められる。

ここで、 l_* はき裂長さを代表する任意の長さである。二つの材料定数が同一の場合、 $\alpha = 0$ であるから、式(1)は均質体の場合の応力拡大係数と完全に一致する。

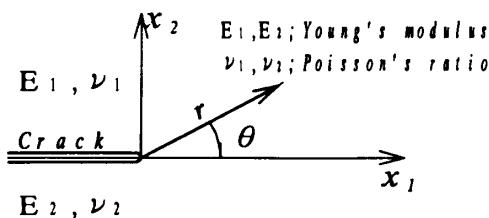


図 1. 異種材界面き裂先端での座標系

まず、式(1)(2)において l_* が変化すると K_I と K_{II} の比が変わってしまう問題について考えてみる。Sun⁽¹³⁾や結城⁽¹⁴⁾は、 $l_* = 2a$ ($2a$ はき裂全長) とすることによって l_* のとりかたによる上記のような矛盾を解消できるとしており、この方法は次第に広く受け入れられつつある。しかしながら、市川⁽⁹⁾は、 $l_* = 2a$ としたのでは、 K_I 、 K_{II} が等しくともき裂長さが異なると、き裂先端付近の応力場が等しくならないため、破壊基準としての意味がなくなることを指摘し、き裂長さに関係のない決まった値に l_* を固定する必要性を主張している。このように、界面き裂の応力拡大係数の定義にはなお混乱があるのが現状である。

そこで、次に示すような K_I 、 K_{II} は同じであるが l_* が下記のような異なる二つの場合について、式(2)の応力場を比較し、図2に示した。

共に、 $E_1 = 1.0 \times 10^5$ (MPa)、 $E_2 = 1.0 \times 10^3$ (MPa)、 $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$

Case 1 $K_I = 1.0$ (MPa·mm $^{1/2}$)、 $K_{II} = 1.0$ (MPa·mm $^{1/2}$)、 $l_* = 1.0$ (mm)

Case 2 $K_I = 1.0$ (MPa·mm $^{1/2}$)、 $K_{II} = 1.0$ (MPa·mm $^{1/2}$)、 $l_* = 10.0$ (mm)

図2に示したように、 l_* が異なる二つの場合では、明らかに異なった応力場を形成していることがわかる。また、どちらの場合も r の減少にともなって応力は $\sigma_{12} - \sigma_{22}$ グラフ上で $\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{22}^2}$ を増大させながら右向きに回転しており、均質体中のき裂では矢印で示したように応力比 σ_{22}/σ_{12} が変化しないのと異なっている。 $\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{22}^2}$ オよび σ_{22}/σ_{12} は、式(2)の複素応力の絶対値と偏角にあたり、次のように表される。

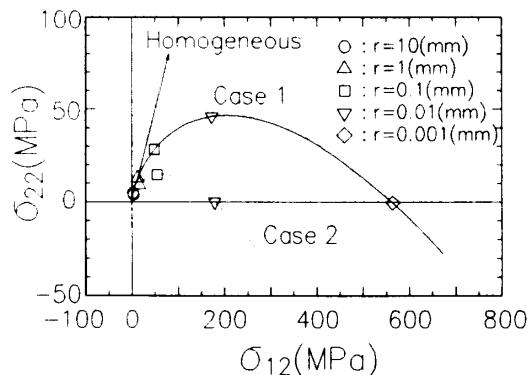


図 2. 異種材界面き裂先端近傍の応力場

ただし、 $R = \alpha \ln\left(\frac{r}{l_*}\right)$ である。

すなわち、 l_* が異なると同じ r における複素応力 $\sigma_{22} + i\sigma_{12}$ の絶対値は等しいが偏角が異なる。そして、 $r = l_*$ のときに $R = 0$ となり、応力拡大係数の比 K_I/K_{II} と応力の比 σ_{22}/σ_{12} が等しくなる。これらのことより、 K_I と K_{II} のみでき裂先端近傍の応力場を代表させるためには、市川が指摘したように l_* の値として同じものを用いなければ意味がないことがわかる。そこで、界面き裂の応力拡大係数の単位は、例えば、 $(\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}})$ [$l_* = 1 \text{ mm}$] のように、 l_* の値を付して記述されるべきと考える。均質体中のき裂の場合の幾何学的な条件が相似な体系では、作用する表面力を σ_0 、代表長さを a とするとき、各モードの応力拡大係数は σ_0/\sqrt{a} に比例する性質をもち、容易に無次元化が可能である。しかしながら、異種材界面き裂において、 l_* として決まった値を用いた場合には、 $\sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$ が σ_0/\sqrt{a} に比例するだけで、各モードの応力拡大係数が σ_0/\sqrt{a} に比例するわけではない。これは、相似な体系であっても、き裂の長さが異なれば応力拡大係数の比が等しくはならないためであるが、このような結果は矛盾しているように感じられるかもしれない。

しかし、このことは、異種材界面に存在するき裂の場合には、幾何学的に相似な体系であっても大きさが異なればき裂先端付近の応力の比 σ_{22}/σ_{12} が同一距離で同じではないことを示しているにすぎない。

さらに、 l_k が異なるときの応力拡大係数 K_I , K_{II} の意味について検討してみる。まず、式(2)について次のように変形する。

$$\sigma_{22} + i \sigma_{12} = \frac{K_1 + i K_{12}}{\sqrt{2\pi r}} e^{iQ\left(\frac{r}{l_*}\right)ia} \\ Q = a \ln\left(\frac{l_*}{l_*}\right) \quad \dots\dots(8)$$

これは、 (K_I, K_{II}) を原点を中心に Q だけ回転することを示しているので、式(8)は次式のように表せる。

$$\sigma_{22} + i\sigma_{12} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (K_1' + i K_{11}') \left(\frac{r}{l_1^*} \right)^{i\alpha} \dots \quad (9)$$

ただし、ここで、

$$\begin{Bmatrix} K_{11}' \\ K_{12}' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos Q & -\sin Q \\ \sin Q & \cos Q \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_{11} \\ K_{12} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(10)$$

このように、 l_s を変えた場合の K_I , K_{II} の値は、式(10)によって求めることができる。このことを利用して、試験片などの規格を作る際には、 $l_s = 2a$ として評価したもの無次元化しておき、実際の試験結果を評価する際には式(10)を用いて同じ l_s の値(例えば $l_s = 1mm$)の応力拡大係数に変換すると便利と考える。

次にモードⅡ応力拡大係数の正負について考察する。図3において、せん断力の作用形態としてせん断力の作用方向が反対である(a)(b)の場合を考える。この二つ状態は、均質体中のき裂の場合では同じ状態であるが、異種材界面き裂の場合には区別する必要が生ずる。モードⅡの応力拡大係数 K_{II} の符号は、(a)では正、(b)では負となり、この二つの状態を K_{II} の符号によって区別できると考えられる。しかしながら、き裂開口部を反対側に見る場合の(a)(b)にそれぞれ等しい(d)(c)の K_{II} の符号は、(a)(b)とは反対になってしまふ。そこで、 $E_2 \leq E_1$ とした場合に、き裂を左に見る(a)(b)の場合を基準として、き裂を右にみる場合には正負を逆転させて表示させることとする。すなわち、図3の(c)(d)では K_{II} の正負を逆転させる。このように、再定義することで、き裂先端付近でのせん断力の作用方向による違いを K_{II} に反映できると考える。上記で $E_2 \leq E_1$ としたが、これではボアソン比のこととは、全く考慮していない。そこで、 $E_2 \leq E_1$ ではなく、

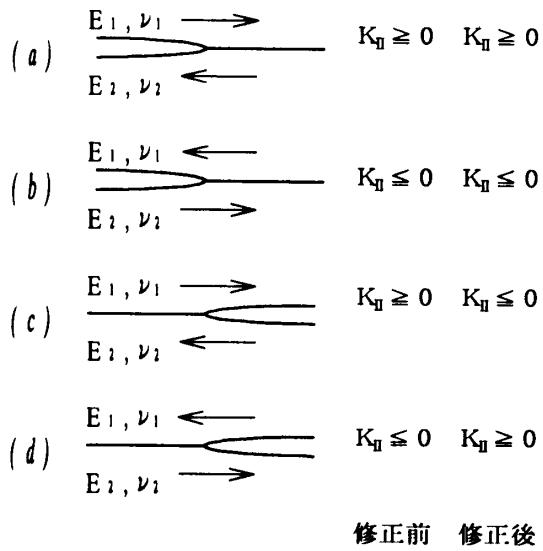


図 3. せん断力の作用方向と K_1 の符号

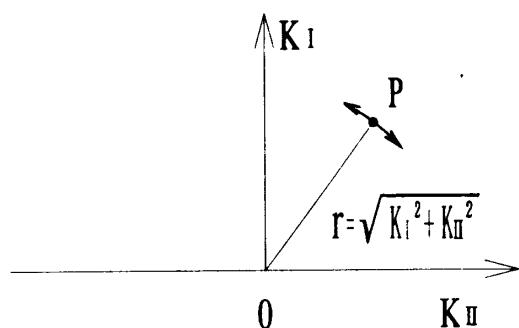


図 4. 異種材界面き裂に対する混合モード破壊韌性値

$\alpha \leq 0$ となるように材料1, 2を配置した場合に、き裂が左側にくるものを基準にすることとする。通常の固体物質の場合、 $E_2 \leq E_1$ の場合はほとんど $\alpha \leq 0$ となる。

以上の様な異材界面き裂の応力拡大係数の定義によって、混合モード異種材界面き裂の静的破壊基準について、図4に示すような破壊時の K_I と K_{II} の関係図によって示すことを考える。この図は、 $K_{II} \leq 0$ の領域が存在する点が均質材と異なる。いま、破壊時のき裂の応力拡大係数が点Pで示されるとする。均質体の応力拡大係数と異なり、界面き裂の応力拡大係数は l_α のとり方によって変化することを前に述べた。 l_α を変えると、式(10)によって点Pは原点を中心とした回転をする。 $\alpha \leq 0$ となるように材料1, 2を配置した場合にき裂を左に見るものを見ることとした場合、 l_α が減少すると点Pは時計回りに回転し、増大すると反対に回転する。もし、この図の中に $\alpha > 0$ のものを一緒にプロットすると l_α が変化したときに逆方向に回転することになり明らかに不都合であり、この点からも α の符号は統一しておかなければならぬと考えられる。

3. 破壊試験の方法

3・1 材料の機械的性質と破壊試験片 実験には、アクリル樹脂-エポキシ系接着剤、アルミニウム-エポキシ系接着剤の二系統の異種材界面き裂破壊試験片を用いた。アクリル樹脂、アルミニウム(7075)、エポキシ系接着剤の室温(24°C)における材料定数の測定結果を表1に示す。

アクリル樹脂-エポキシ系接着剤の界面き裂破壊試験片は、図5に示すような、mode Iの荷重が支配的なMEE試験片(Methacrylic resin - epoxy resin bimaterial plate specimen with an edge crack)からmode IIの荷重の割合が大きくなるMES試験片(Met-

表 1. 使用した材料の材料定数

Materials	Young's modulus	Poisson's ratio
Acrylic resin	2.48×10^3 MPa	0.31
Aluminum	7.31×10^4 MPa	0.32
Epoxy resin	2.25×10^3 MPa	0.38

hacrylic resin - epoxy resin bimaterial plate specimen with a slant edge crack), MELP試験片(Methacrylic resin - epoxy resin single lap joint specimen)までの7種類の試験片を用いた。図に示しているとおり、MES試験片にはき裂の方向と角度が異なる4種類の試験片(MESA45, MESB45, AESa60, AESb60)を、MELP試験片には、き裂の方向が異なる2種類の試験片(MELPa, MELPb)を試験に供した。また、アルミニウム-エポキシ系接着剤の界面き裂試験片には、 $t = 11.5$ (mm)である以外は、図5に示したアクリル樹脂-エポキシ系接着剤の場合と同じ形状の7種類の試験片(AEE, AESa45, AESb45, AESa60, AESb60, AELPa, AELPb)を用いた。これらの試験片によって破壊試験を行うことにより、I・II混合モード状態での異種材界面き裂の破壊試験を行った。

3・2 界面き裂試験片の作成方法

3・2・1 アクリル樹脂-エポキシ系接着剤間界面き裂試験片の作成方法 アクリル樹脂については、厚さ10mmのアクリル樹脂板を所定の寸法に機械加工した後、エタノールで脱脂し、接合予定部分を#240のサンドペーパーで均等に研磨して再びエタノールで洗浄した。エポキシ系接着剤は、アラルダイトAY103(Epoxy resin)とHY956(Hardner)を重量比1:0.18で混合して用いた。混合にあたっては、主剤と硬化剤を静かにビーカーにとった後、真空攪拌装置中で攪拌・脱泡した。さらに先のアクリル樹脂の接合予定部分のうち界面き裂とする部分に厚さ0.08mmのテフロン粘着テープを張り付け、これをはめ込んだ鋳型の中に、攪拌・脱泡の終わった接着剤をシリジンで流し込んだ。接着剤は、常温(20~30°C)で4~8時間以上硬化させ、一週間以上経過したものを機械加工して使用した。き裂を作るために張り付けたテフロン粘着テープは取り除かないまま、模擬き裂として破壊試験に供した。出来上がった試験片の一例を図6に示す。

3・2・2 アルミニウム-エポキシ系接着剤間界面き裂試験片の作成方法 アルミニウム部分は、厚さ

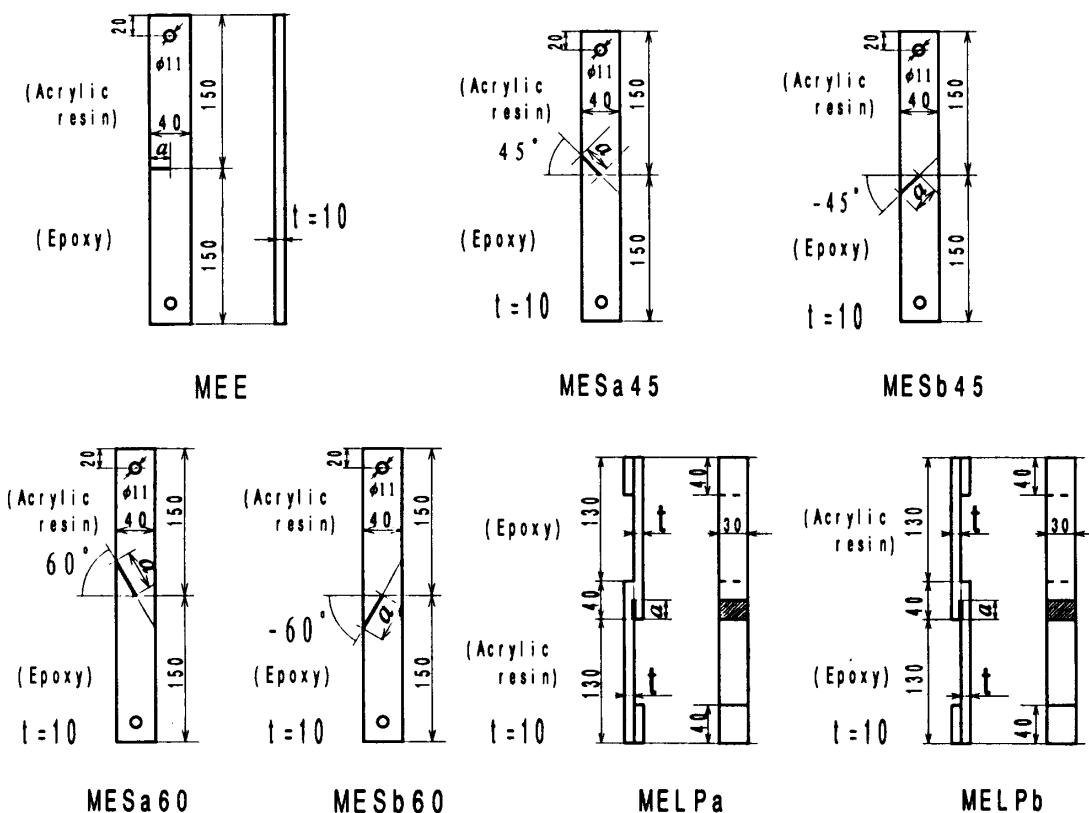
図 5. 異種材界面き裂混合モード破壊試験片 (a : Crack length, t : Thickness)

図 6. 作成した破壊試験片の一例 (MESa60)

11.5mmの7075アルミニウム板を所定の寸法に機械加工した後、トリクロロエタンで脱脂し、接合予定部分を#240のサンドペーパーで均等に研磨してからアセトンに漬けて洗浄した。あとは、アクリル樹脂-エポキシ系接着剤試験片の場合と全く同様にして作成した。

3・3 破壊靭性値の測定

3・3・1 破壊臨界荷重の測定 以上のようにして作成した各種破壊試験片について万能引張試験機

(オートグラフ)を用いて静的破壊荷重を測定した。変位速度は、5mm/minとし、荷重点変位と荷重をX-Yレコーダで記録した。異種材界面き裂の場合、き裂がなくとも端部には応力の特異性が生ずるが、MELPbおよびAELPaではき裂と反対側の端部より破壊が生じたため測定ができなかった。その他の試験片のうちMELPaでは、安定き裂成長が見られたので、ビデオカメラで試験片界面を監視し、き裂の進展が生じた際の荷重を破壊臨界荷重とした。それ以外では、全てき裂は脆的に破壊したため、最大荷重を破壊臨界荷重とした。試験片の中には、き裂進展後エポキシ接着剤側に分岐してゆくものがあったが、いずれも界面上をき裂が進展した後に分岐していたため、界面き裂破壊と考えた。

3・3・2 破壊靭性値の解析 破壊靭性値の決定は、著者らが以前に開発した境界要素法に径路積分法を適用する方法⁽¹⁵⁾によって、測定した破壊荷重における各試験片の異種材界面き裂の応力拡大係数 K_I 、 K_{II} を解析することにより行った。以下にその概要を述べる。この手法においては、 J 積分あるいは次に述べ

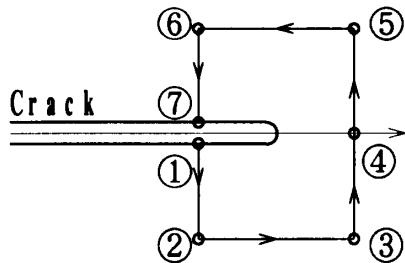


図 7. 適応的自動積分による径路積分

る M_I 積分の径路積分について、適応的自動積分⁽¹⁶⁾を用いることによって自動的に径路積分の積分精度を確保するとともに、入力データの量を軽減している。例えば、図 7 に示すようなき裂の径路積分の場合、積分径路上の座標点①～⑦を指定する事によって、各点の間を適応的自動積分によって積分する。また、この手法においては Yau and Wang⁽¹⁷⁾による M_I 積分法を用いて、異種材界面き裂の応力拡大係数のモード分離を行った。 M_I 積分法では、重ね合わせの原理に基づいて各モードの応力拡大係数に分離する。き裂先端を取り囲むような積分径路内部での解析対象の応力とひずみの状態を(1)とし、同様のき裂に対して、応力拡大係数が既知であるようなある応力とひずみの状態を(2)とするとき、 M_I 積分は次式のように示される。

$$M_I = \int_{\Gamma} \left[\sigma_{i(1)}^{(1)} \epsilon_{i(2)}^{(2)} n_i - \left(T_i^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + T_i^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} \right) \right] d\Gamma \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 Γ は積分径路、 n_i は、 Γ 上での外向き法線ベクトルの x_1 方向成分、 T_i は Γ 上に作用する表面力ベクトル、 u_i 、 $\epsilon_{i(1)}$ 、 $\sigma_{i(1)}$ は、それぞれ Γ 上で変位ベクトル、ひずみテンソルおよび応力テンソルであり、添字(1)、(2)は、それぞれの状態を示している。また、状態(1)、(2)の応力拡大係数と M_I 積分の間には、次のような関係がある。

$$2\beta [K_I^{(1)} K_I^{(2)} + K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)}] = M_I$$

$$\beta = \frac{1}{16 \cosh^2(\alpha\pi)} \left[\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right] \dots \dots \dots (13)$$

式(13)における β 、 $K_I^{(2)}$ 、 $K_{II}^{(2)}$ は、既知であるので、適当な既知の解を用いることによって、式(12)の M_I 積分値より応力拡大係数をモード I、II に分離すること

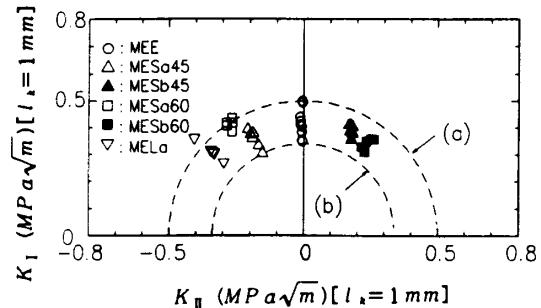


図 8. アクリル樹脂-エポキシ系接着剤接合界面き裂の混合モード破壊韌性

ができる。本手法においては、状態(2)の既知の解として、異種材界面き裂のき裂先端近傍の解⁽²⁾を用いた。

なお、本実験での界面き裂は、テフロンテープによる模擬き裂であるため、破壊試験による破壊時の応力拡大係数の値は正確には破壊韌性値ではないが、便宜的に破壊韌性値と呼ぶこととする。

4. 実験結果

4.1 破壊韌性値の測定結果と考察

4.1.1 アクリル樹脂-エポキシ系接着剤接合界面のき裂 アクリル樹脂-エポキシ系接着剤接合界面き裂をもつ各試験片での破壊韌性値の測定結果を図 8 に示す。破壊基準がエネルギー解放率 $G = \text{一定}$ で支配されるならば、 $K_I^2 + K_{II}^2 = \text{一定}$ となり、混合モード破壊韌性値は原点を中心とする円上に分布するはずである。図 8 中に(a) $K_I^2 + K_{II}^2 = (0.5)^2$ と(b) $K_I^2 + K_{II}^2 = (0.34)^2$ の二つの式を破線で示した。破壊韌性値は、(a) (b) の二つの円の間に分布している。これにより、測定を行った範囲では、ほぼエネルギー解放率 $G = \text{一定}$ の条件が成り立っていることがわかる。しかし、測定値にばらつきがあることや、 K_{II} の割合が大きな場合の韌性値がないことなどから最終的に橢円などの他の形状になることも考えられる。

4.1.2 アルミニウム-エポキシ系接着剤接合界面き裂 次にアルミニウム-エポキシ系接着剤接合界面き裂をもつ試験片での結果を図 9 に示す。これを見ると、明らかに $K_I^2 + K_{II}^2 = \text{一定}$ の条件は成り立っておらず、また均質体中のき裂のような $(K_I/K_{I,cr})^2 + (K_{II}/K_{II,cr})^2 = 1$ の橢円形状の破壊基準とも異なっており、 K_{II} の増加に従って K_I が一旦増加する奇妙な分布となっている。図 9 は、2. 章の定義において $l_s = 1.0 \text{ mm}$ としたときの混合モード破壊韌性値を示して

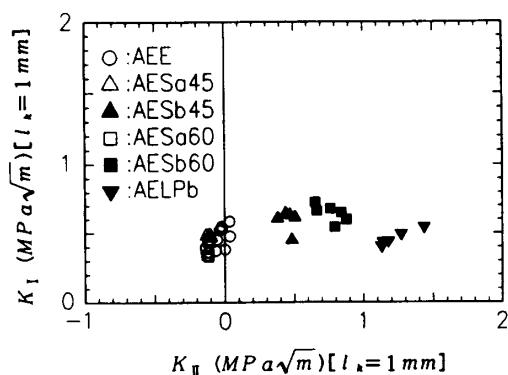


図 9. アルミニウム-エポキシ系接着剤接合界面き裂の混合モード破壊韌性 ($l_k = 1\text{mm}$)

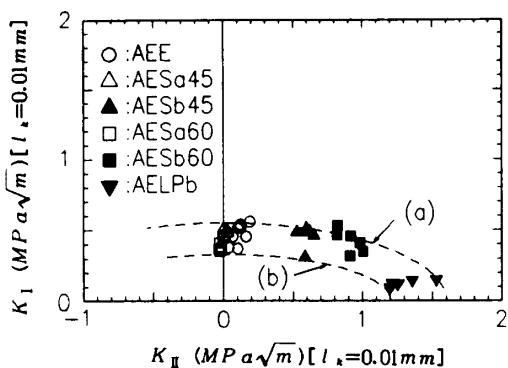


図 10. アルミニウム-エポキシ系接着剤接合界面き裂の混合モード破壊韌性 ($l_k = 0.01\text{mm}$)

いるが、 $L_s = 1.0\text{mm}$ とする必然性はなく、この値は統一的なものを用いるという条件以外は任意である。
 $L_s \rightarrow L_s'$ に変換したときの応力拡大係数の変換は、式(10)によって行われるが、アルミニウム-エポキシ系接着剤の場合で、 $L_s' = 0.1L_s$ とした場合のQの値は $Q = 0.1259(\text{rad}) = 7.213(\text{deg})$ であり、混合モード破壊韌性値の図はこの分だけ原点を中心に右に回転する。すなわち、アルミニウム-エポキシ系接着剤の場合では、 L_s の変化によってかなり急に破壊韌性値の分布図が原点を中心に回転することを意味している。そこで、図9の結果を $L_s = 0.01\text{mm}$ の場合に変換し、図10に示す。図に示した破線は、(a) $(K_I / 0.55)^2 + (K_{II} / 1.6)^2 = 1$ と (b) $(K_I / 0.33)^2 + (K_{II} / 1.2)^2 = 1$ の橿円である。この図では、破壊韌性値が均質体中のき裂の場合の静的破壊韌性値に類似した、ほぼ橿円状

の分布を示している。以上の点より、異種材界面き裂の混合モード破壊基準の一つの案として次式のような基準を提案する。

ここで、 I_{Kcr} は、破壊韌性値の分布が梢円形状となるときに梢円の軸との傾斜角が 0 になるように適当に選んだ I_k の値である。アクリル樹脂-エポキシ系接着剤の場合に考えたように、エネルギー解放率 G = 一定とする場合は、 $KI_{cr} = KII_{cr}$ 、 I_k = 任意である。また、き裂が閉口し、広い範囲で接触するような場合では、別の基準を考える必要があろう。

5. 結 言

従来混乱のあった異種材界面き裂の応力拡大係数の定義についてアクリル樹脂-エポキシ系接着剤接合面、アルミニウム-エポキシ系接着剤接合面にき裂をもつ破壊試験片を用いて、異種材界面き裂の静的混合モード破壊試験を行い、応力拡大係数による異種材界面き裂の破壊基準について検討した。得られた結果を下記に示す。

(1) 界面き裂の応力拡大係数を評価する際には、式(1)(2)における l_s の値として統一したものを用いなければならず、 $(\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}})$ [$l_s = 1\text{mm}$] のように l_s の値を付して記述されることが推奨される。

(2) 異種材界面き裂の応力拡大係数の比は、界面上のき裂先端からの距離 $r = l_s$ での σ_{22} と σ_{12} の比を示しているにすぎず、均質体中のき裂の応力拡大係数 K_1 、 K_2 の比がき裂先端近傍の垂直応力 σ_{22} と σ_{12} の比を表しているのとは異なる。

(3) l_k の値を変えた場合の応力拡大係数の値は、式 (10) によって求められ、 $l_k = 2a$ として求めて無次元化した値を、実際に使用する際に変換して使用することが可能である。

(4) 均質体中のき裂と異なり、異種材界面き裂の場合にはき裂に作用するせん断力の作用方向が破壊基準に影響することが考えられる。このことを考慮するため、 $\alpha \leq 0$ となるように材料1、2を配置した場合にき裂開口部を左に見るようき裂先端の局所座標を設定した場合の応力拡大係数をもって界面き裂の応力

拡大係数 K_I の符号を決定することとした。このため、き裂開口部を右に見る場合には、応力拡大係数 K_I の符号を逆転させることとする。

(アラルダイト)を長瀬チバ株式会社より提供していただきた。ここに謝意を表する。

文 献

(5) このとき、破壊基準を示す $K_{II}-K_I$ 混合モード破壊靭性値の図は、 K_{II} の負の部分をもち、 l_* の変化に伴って原点を中心に回転する性質を有する。

(6) アクリル樹脂-エポキシ系接着剤接合面のき裂の場合の静的破壊は、ほぼエネルギー解放率 $G=$ 一定の条件で生じるという結果が得られた。

(7) アルミニウム-エポキシ系接着剤接合面のき裂の場合、 $l_* = 0.01\text{mm}$ としたときの破壊靭性値の分布が、ほぼ均質体中のき裂の静的破壊の場合と同様の $(K_I/K_{I,cr})^2 + (K_{II}/K_{II,cr})^2 = 1$ の部分橢円で示される傾向が見られた。

(8) 広い範囲のき裂面の接触がなく、破壊が界面上を進展する異種材界面き裂の静的混合モード破壊基準として、モードⅠ・Ⅱの混合モード破壊靭性値が (K_I, K_{II}) 面上で、部分橢円を原点を中心に回転した形状の分布で示されるとする基準を提案する。この部分橢円分布は、 l_* を変えることによって原点を中心に回転し、この部分橢円の傾斜が0となるような適当な $l_* = l_{*,cr}$ を選択することにより、均質体中のき裂と同様の橢円の式式(14)で破壊基準が示される。

なお、本研究は平成3年度文部省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)(受付番号0673)によるものである。また、破壊試験のためのエポキシ系接着剤

- (1) Williams, M. L., Bull. Seism. Soc. Am., 49(1959), 199.
- (2) Erdogan, F., J. Appl. Mech., 30(1963), 232.
- (3) Erdogan, F., J. Appl. Mech., 32(1965), 403.
- (4) England, A. H., J. Appl. Mech., 32(1965), 400.
- (5) Rice, J. R. and Sih, G. C., J. Appl. Mech., 32(1965), 418.
- (6) Comninou, M., J. Appl. Mech., 44(1977), 631.
- (7) Atkinson, C., Int. J. Frac., 18(1982), 161.
- (8) Mak, A. F., Keer, L. M., Chen, S. H. and Lewis, J. Appl. Mech., 47(1980), 347.
- (9) 市川, 機論, 57-538, A(1991), 1346.
- (10) 山崎, 結城, 北川, 機論, 52-476, A(1986), 963.
- (11) Muluvilie, D. R. and Mast, P. W., Eng. Frac. Mech., 8(1976), 555.
- (12) 佐藤, 結城, 吉岡, 機講論, NO.900-14, A(1990), 75.
- (13) Sun, C. T. and Jih, C. J., Eng. Frac. Mech., 28-1(1987), 13.
- (14) 結城・曹, 機論, 55-510, A(1989), 340.
- (15) 宮崎, 池田, 祖田, 宗像, 機論, 57-544, A(1991), 2903.
- (16) 森, 数値計算ノウハウミック, (1986), 187, 岩波書店.
- (17) Yau, J. F. and Wang, S. S., Eng. Frac. Mech., 20-3(1984), 423.