

## 18 結合力モデルを用いた接合界面の混合モード破壊基準

### A Study of Interface Fracture Criteria under Mixed Mode Condition by Using a Cohesive Force Model

○正 大宮正毅 (東工大)      正 井上裕嗣 (東工大)  
 正 岸本喜久雄 (東工大)

Masaki OMIYA, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552  
 Hirotsugu INOUE, Tokyo Institute of Technology  
 Kikuo KISHIMOTO, Tokyo Institute of Technology

Key Words: Interface, Fracture criterion, Cohesive force model, Mixed mode

#### 1. 緒言

異種接合材の強度には、接合材料自身の強度だけでなく、接合界面の強度が重要な役割を果たしている。特に、異種接合材の界面ないし界面端には応力集中が起こるため、界面の強度が母材よりも一般に弱いこともあって、界面に沿っての破壊が生じやすい。そのため、界面破壊現象に対する破壊基準・クライテリオンを明らかにすることは重要である。著者らは、Ma と Kishimoto により導出された界面結合力モデル<sup>1)</sup>を有限要素解析に組み込み、異材接合界面におけるき裂進展シミュレーションを行ってきた。そして、界面破壊基準である応力拡大係数を用いた破壊境界曲線について検討してきた<sup>2)</sup>。本報では、その破壊基準の妥当性を検証するために、種々の接着接合材について混合モード破壊試験を行い、界面破壊靱性値の混合モード破壊基準について検討した。

#### 2. 界面結合力モデル

界面には様々な微小欠陥が含まれており、その特性は複雑である。Ma と Kishimoto<sup>1)</sup>は、図1に示すように、界面の機械的特性をそれと等価なばねを用いることによりモデル化し、損傷力学をもとに界面間距離と界面力との関係を導いている。界面が変形すると、界面間には相対変位が生じる。そこで、次式の界面間距離  $\lambda$  を定義する。

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{U_t}{\delta_t}\right)^2 + \left(\frac{U_n}{\delta_n}\right)^2 + \left(\frac{U_b}{\delta_b}\right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\delta_t, \delta_n, \delta_b$  は界面に対して垂直・せん断方向の臨界界面間距離、 $U_t, U_n, U_b$  は変位である。これを用いると、界面に対して垂直・せん断方向に作用する界面力は次式ようになる。

$$\left. \begin{aligned} P_t &= K_t^0 [1 - \beta_t(\lambda - \lambda_t^0) + (\lambda^2 - (\lambda_t^0)^2)] U_t \\ P_n &= K_n^0 [1 - \beta_n(\lambda - \lambda_n^0) + (\lambda^2 - (\lambda_n^0)^2)] U_n \\ P_b &= K_b^0 [1 - \beta_b(\lambda - \lambda_b^0) + (\lambda^2 - (\lambda_b^0)^2)] U_b \end{aligned} \right\} (2)$$

$K_t^0, K_n^0, K_b^0$  は界面の初期剛性であり、 $\lambda_t^0, \lambda_n^0, \lambda_b^0$  は損傷開始の閾値、 $\beta_t, \beta_n, \beta_b$  は界面パラメータである。

#### 3. 混合モード破壊試験

本研究では、供試材として3種類の材料、鋼、アルミニウム、ABS樹脂を用い、図2に示すようなCTS試験片を作成した。なお、材料の組み合わせは、同一材料同士

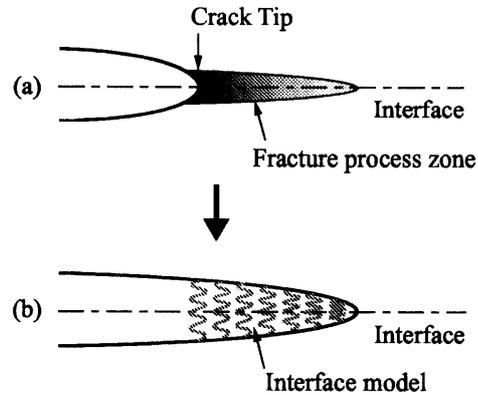


Fig.1 A concept of interfacial cohesive force model.

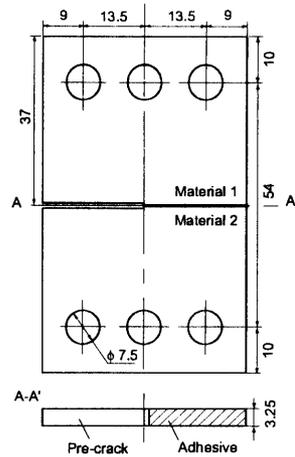


Fig.2 Compact Tension Shear specimen.

を接着した試験片、鋼-アルミニウム、ABS樹脂-アルミニウムの計5種類を作成した。異種接合材の破壊靱性値はモード比に依存するため、広範囲にわたるモード状態での破壊試験を行う必要がある。本研究では、Richardら<sup>3)</sup>により提案された混合モード負荷用治具を用いて混合モード破壊試験を行った。界面の強度評価に際しては、実験より得られた破壊時の負荷荷重をもとに、有限要素解析を行い、破壊時の  $J$  積分値を求め、その後、 $M_1$  積

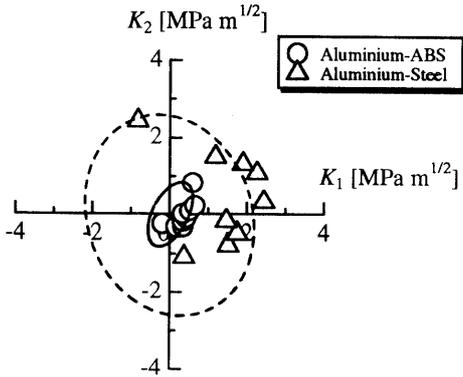


Fig.3 Fracture boundary curve for the dissimilar material specimen:  $L = 2a$ .

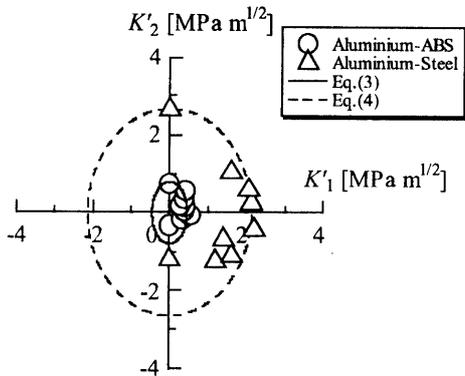


Fig.4 Fracture boundary curve for the dissimilar material specimen:  $L' = 0.1\text{mm}$ .

分法<sup>4)</sup>により応力拡大係数  $K_1, K_2$  を求めた。

図3に異なる材料を接合した場合のき裂進展開始時の応力拡大係数を示す。なお、ここでは応力拡大係数に含まれる代表長さを  $L = 2a$  としている。本実験の結果も従来の研究結果と同様に、破壊境界曲線は中心軸が回転した楕円型として表される。この回転は応力拡大係数の代表長さを適切に採ることによって補正することができるため、代表長さをき裂先端の曲率の10倍である  $L' = 0.1$  (mm) とし、応力拡大係数を変換すると図4のようになる。また、図中の実線及び破線はそれぞれ、

$$\left(\frac{K'_1}{0.46}\right)^2 + \left(\frac{K'_2}{0.80}\right)^2 = 1 \text{ (実線)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\left(\frac{K'_1}{2.1}\right)^2 + \left(\frac{K'_2}{2.7}\right)^2 = 1 \text{ (破線)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

を表している。ただし、ここでは  $\text{MPa}^{1/2}$  単位を用いている。上式の破壊境界曲線で実験結果が良く表されていることがわかる。

4. 界面結合力モデルを用いた有限要素解析

前節で得られた実験結果より、界面結合力モデルのパラメータを決定し、界面結合力モデルを用いた有限要素解析により、き裂進展開始の数値シミュレーションを行った。混合モード破壊試験では、荷重が最大になったところで脆性破壊をしたことから、界面パラメータを  $\beta_t = \beta_n = 1.5$  と仮定した。さらに、臨界面間距離につ

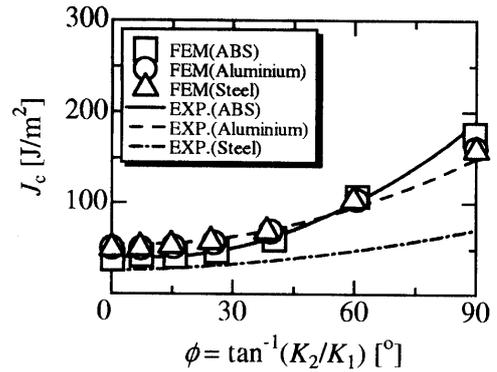


Fig.5 Comparison of the experimental results and numerical results for the fracture toughness.

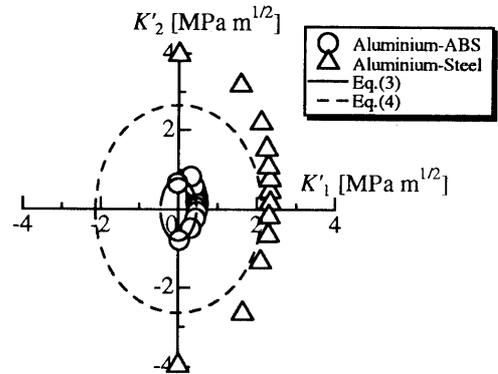


Fig.6 Comparison of the experimental results and numerical results for the fracture boundary curve.

いては、き裂先端の曲率の1/10とした。また、初期剛性率については、ABS樹脂同士を接合した試験片のモードIとモードII負荷に対する実験結果に一致するように決定した。図5に、同一材料を接合した試験片の解析結果を示す。これより、ABS樹脂、アルミニウムの場合については、解析結果と実験結果が良く一致している。つぎに、異種接合材の組み合わせの場合について解析を行った結果を示す。図6は、アルミニウム-ABS樹脂及びアルミニウム-鋼接合材の破壊境界曲線である。図中の実線及び点線は実験結果から得られた近似式(式(3)、(4))を示している。これより、解析結果は実験結果とよく対応していることがわかる。特に、アルミニウム-ABS樹脂については、同一材料を接合した試験結果についても解析結果とよく一致していた。そのため、被接合材の剛性が界面の剛性に比較的近い場合については、同一材料におけるモードIとモードII負荷に対する実験結果から界面の初期剛性率を決定し、界面結合力モデルを用いて有限要素解析を行うことにより、接合界面の破壊境界曲線を求めることができると考えられる。

文 献

( 1 ) F.Ma and K.Kishimoto, JSME Int. J. Series A, 39, 496 (1996).  
 ( 2 ) M.Omiya, K.Kishimoto and T.Shibuya, Mater. Sci. Res. Int., Spec. Tech. Pub.-1, 238 (2001).  
 ( 3 ) H.A.Richard and K.Benitz, Int. J. Fract., 22, R55 (1983).  
 ( 4 ) J.F.Yau and S.S.Wang, Eng. Fract. Mech., 20, 423 (1984).