

## 接着継手の破壊に対する被着材の拘束効果\* (第2報, Gurson モデルによるき裂先端の損傷解析)

池田 徹\*<sup>1</sup>, 馬野 順司\*<sup>2</sup>, 池本 大輔\*<sup>3</sup>  
李 徳 甫\*<sup>4</sup>, 宮崎 則幸\*<sup>1</sup>

### Constraint Effect of Adherends on the Fracture of Adhesive Joint (2nd Report, Failure Analysis around a Crack Tip Using Gurson Model)

Toru IKEDA\*<sup>5</sup>, Junji MANO, Daisuke IKEMOTO,  
Deok bo LEE and Noriyuki MIYAZAKI

\*<sup>5</sup> Department of Chemical Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University,  
6-10-1 Hakozaiki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 812-8581 Japan

It is well known that the fracture toughness of a crack in a thin adhesive layer constrained by hard adherends depends on the thickness of the adhesive layer; however, the precise mechanism of the dependence has not yet been elucidated. In our previous study, we investigated the stress distribution around a crack tip in an adhesive layer using the finite element method (FEM), we discovered the presence of higher hydrostatic stress around a crack tip in thinner adhesive layers. In this study, the damage around crack tips in thin adhesive layers of rubber-modified epoxy resin is analyzed using the FEM in conjunction with Gurson's model, which can well describe the yielding of porous material such as rubber-modified epoxy resin. The decrease of the fracture energy with the decrease of the bond thickness can be estimated by this analysis, but it is not clear why the maximum fracture energy occurs at around 0.4 mm of bond thickness.

**Key Words:** Fracture Mechanics, Fracture Toughness, Adhesive Joints, Damage Mechanics, Bond Thickness, High Polymer Materials

#### 1. 緒 言

接着継手は航空機や工業的な構造物などに幅広く使われている。接着剤を用いて接合した構造物は、接着剤中に存在するき裂の破壊強度が構造物の信頼性に大きい影響を及ぼす。接着剤層の厚みは、接着構造物の重要な設計パラメータの一つであるため、接着剤の破壊靱性値に及ぼす影響について様々な研究が行われている。例えば、Gardon<sup>(1)</sup>は、接着剤の Peel test において、破壊荷重 (Peel test

では、破壊エネルギーと比例関係にある)が接着剤層の厚さの現象とともに低下することを報告している。Mostovoyら<sup>(2)</sup>は、Tapered Double Cantilever Beam(TDCB)接着継手を用いて、エポキシ樹脂の破壊エネルギーが接着剤層厚みの現象に伴って低下することを示した。また、Bascomら<sup>(3)(4)</sup>はゴム変性エポキシ樹脂を接着剤として、TDCB接着継手を用いて実験を行い、接着剤層中のき裂の破壊靱性値は、接着剤層の厚さが薄くなると単調に減少してゆく場合と接着剤層の厚みが損傷域の直径と一致するとき一旦最大となり、それより薄くなると急速に破壊エネルギーが低下する場合があることを報告している。このように、延性接着剤を用いた接着継手の破壊靱性値は、図1の破線で示すように、接着剤層厚さがある程度より薄くなると、単調に減少してゆく場合(Type A)と、一旦増加して、最大値を示した後、急に破壊靱性値が減少するもの(Type B)の二種類がある。

\* 原稿受付 2002年5月17日.

<sup>1</sup> 正員, 九州大学工学研究院(☎812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1).

<sup>2</sup> 九州大学大学院工学研究科.

<sup>3</sup> 東京エレクトロン(株)(☎107-8481 東京都港区赤坂5-3-6).

<sup>4</sup> 正員, 漢陽大学校機械工学部(☎133-791 韓国ソウル城東区杏堂洞17).

E-mail: ikeda@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

Kinlochら<sup>(6)</sup>も、ゴム変性エポキシ樹脂を用いた接着継手について、Bascomらと同じ実験を行い、図1のType Bのような破壊靱性値の接着剤層厚さ依存性を観察している。彼らは、接着継手の破壊エネルギーは損傷域寸法に依存すると考え、次のようなメカニズムを考えた。すなわち、接着剤層厚みが、接着剤層中のき裂先端の損傷域直径 $2r_p$ より大きいときには、損傷域の大きさと破壊エネルギーはバルク接着剤層中のき裂の場合と等しい。次に、接着剤層厚みが減少して $2r_p$ に近づくと、被着材の拘束によって損傷域が発達し、破壊エネルギーが増加し、接着剤層厚みが $2r_p$ に等しいときに損傷域の大きさと破壊エネルギーが最大となる。さらに、接着剤層厚みが損傷域寸法より薄くなると、被着材によって損傷域の発達が妨げられ破壊靱性値が減少すると説明している。

しかし、池田ら<sup>(6)</sup>は、接着剤層が極めて薄い場合の破壊靱性値の低下は、接着剤層が減少するとともにき裂先端近傍の応力が増加するためであり、損傷域の体積と直接には関連づけられないと考えた。Dyghyaniら<sup>(6)</sup>も、ゴム変性エポキシ樹脂を用いたCT試験片による破壊試験と数値解析を行い、接着剤層が非常に薄くなると、破壊形態が接着剤層中央をき裂が進む完全な凝縮破壊から、界面に沿って極めて薄い接着剤層のみを界面に残してき裂が進展する疑似界面破壊に移行することを観察し、それが接着剤層が薄くなった場合の破壊靱性値の低下の原因であると推測している。

このように破壊靱性値の上昇と減少のメカニズムについて諸説がある。さらに、Type AとType Bのような二つの異なった接着剤層厚さ依存性が発現する原因については、全く不明といって良い。

そこで、第1報<sup>(6)</sup>において、実際にアルミニウム被着材をゴム変性エポキシ樹脂接着剤で接合し

た接着継手試験片を作成し、接着剤層中のき裂の破壊靱性値の測定とき裂先端近傍の損傷域の詳細な顕微鏡観察を行った。その結果、破壊靱性値は、接着剤層の厚みが薄くなると一旦上昇し、接着剤層厚さが約0.3mmで最大値をとるが、それより薄くなると急に破壊靱性値が減少するという、Type Bの結果が得られた。また、破壊靱性値が最大値をとる接着剤層厚さ0.3mm付近では、被着材と接着剤層との界面付近で大規模な界面損傷域が観察され、この界面損傷域による応力遮蔽効果が、き裂先端近傍の応力を低下させ、破壊靱性値を上昇させる可能性が示唆された。さらに接着剤層が薄い場合には、き裂は、き裂先端前方の損傷域から、即座に界面損傷域の内部へ進展しており、このことが破壊靱性値を急速に低下させたと考察した。

本研究では、前報で得られた実験結果を、力学的観点から詳しく理解するために、接着剤層の厚みの変化に伴う接着継手中のき裂先端の損傷状態と応力分布を、多孔質材料の塑性構成式として知られるGursonモデルを用いて解析し、接着剤層厚さ依存性のメカニズムについて議論する。

## 2. 解析方法

ゴム変性エポキシ樹脂では、図2に示すようにマトリックス樹脂に分散されたゴム粒子中にキャビテーションが発生することが、主なメカニズムであることが知られている。ここで、黒く見える部分がゴム粒子中のキャビテーションである(空孔の壁で光が乱反射するために黒く見える)。ゴムの弾性率は、エポキシ樹脂に比べて非常に小さいため、一旦キャビテーションが発生すると、その部分は、単なる空孔として振る舞うと考えられる。そこで、本研究では、多孔質材料の塑性構成式として有名なGursonモデルを用いて、ゴム変性エポ

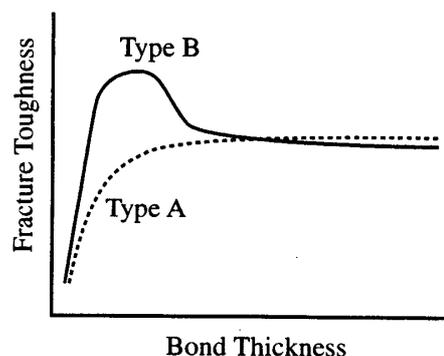


Fig. 1 Typical variations of the fracture toughness of adhesive joints with the bond thickness.

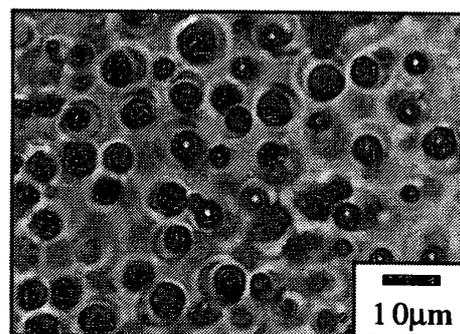


Fig. 2 Cavitations in damaged rubber-modified epoxy resin whose rubber contents is 12.5wt%.

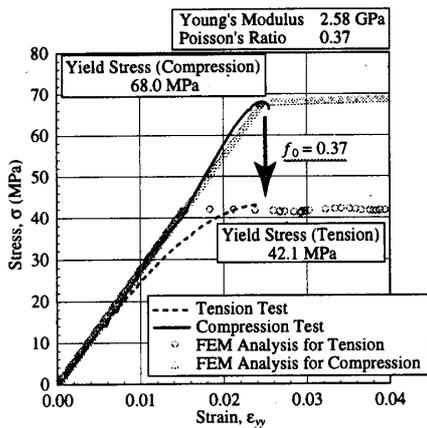


Fig. 3 Stress-strain curves for tensile and compression tests.

キシ樹脂の損傷を考慮した弾塑性解析を行った。また、解析対象としたゴム変性エポキシ樹脂は、第1報<sup>(8)</sup>で報告したものであり、純粋なエポキシ樹脂100重量部に硬化剤5重量部(ナガセケムテックス製AER250およびHY956)に液状ブタジエンゴム15重量部(宇部興産製CTBN 1300×8)を混合した物(ゴム含有率12.5wt%)である。

**2.1. Gurson Model** 本研究で用いたGursonモデルでは、静水圧応力の影響による延性材料のボイドの生成、成長、合体を表現できる。巨視的なボイドと母材の組み合わせの降伏条件は次式のように示される<sup>(9)</sup>。

$$F = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0}\right)^2 + 2f \cosh\left(\frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_0}\right) - 1 - f^2 = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{kk}$ は引張り静水圧応力、 $f$ はボイド率、 $\bar{\sigma}$ はミーゼスの相当応力、 $\sigma_0$ は定数である。ボイド率の増加速度は、既に存在するボイドの拡大と新しいボイドの生成によって表現される。

$$\dot{f} = \dot{f}_{growth} + \dot{f}_{nucleation} \quad (2)$$

ボイドの拡大は、ボイドを囲む母材の非圧縮性をもとに計算される。

$$\dot{f}_{growth} = (1-f)\dot{\epsilon}^p_{kk} \quad (3)$$

ゴム粒子をボイドと考えたとき、ゴム粒子の発生・合体はないことから、解析においてはボイドの成長のみを考えた。ボイド率が0のときには、式(1)はMisesの降伏条件に一致し、 $\sigma_0$ は短軸の降伏応力となる。

解析にあたっては、Gursonモデルの初期ボイド率 $f_0$ をどのように決定するかが問題となる。ゴム変

Table 1 Material properties of rubber-modified epoxy resin.

$E$ (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$f$	$G_c$ (N/m)
2.58	0.37	42.1	68.0	0.37	440

性エポキシ樹脂は、圧縮応力下では、ゴムの非圧縮性のために静水圧応力の影響は小さいと予想されるので、ミーゼス材として振る舞うと考えた。そこで、ゴム変性エポキシ樹脂の円筒試験片の圧縮試験を行い、この際の降伏応力を式(1)の定数 $\sigma_0$ の値とした。次に平滑板の引張試験を行い、この際の応力-ひずみ線図にGursonモデルで解析した同試験片の応力-ひずみ線図が一致するようにボイド率 $f$ の値を決定した。求めたGursonモデルの材料パラメータおよびゴム変性エポキシ樹脂の破壊靱性値を表1に示す。円筒試験片の圧縮試験、平滑板の引張試験およびGursonモデルでの応力-ひずみ線図を図3に示す。実際の解析には、汎用有限要素法コードのMSC.Marc 2000を用い、Updated Lagrange法により解析を行った。以下に示す解析の応力値は、全てCauchy応力である。

## 2.2 バルクゴム変性エポキシ中のき裂の損傷解析

まずバルク材の解析を行い、接着継手の解析を行う際の評価基準となる応力場その他を計算した。解析に使用した試験片寸法を図4に示す。また、J積分値は以下の式より求められる。

$$J = G = \frac{(1-\nu^2)}{E} K_I^2 \quad (4)$$

この試験片に対する、応力拡大係数 $K_I$ は、次の近似式より求めた<sup>(10)</sup>。

$$\begin{cases} K_I = \sigma \sqrt{a} F(a/W) \\ \sigma = P/W, \xi = a/W \\ F(\xi) = 29.6 - 185.5\xi + 655.7\xi^2 \\ \quad - 1017.0\xi^3 + 638.9\xi^4 \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $E, \nu$ はそれぞれゴム変性エポキシ樹脂のヤング率、ポアソン比である。上式を用いて、バルクゴム変性エポキシ樹脂の破壊靱性値に近い値、 $J=400\text{J/m}^2$ に相当するまで、強制変位を与えることにより解析を行った。今回行った解析は、非線形解析であるが、塑性域がき裂先端付近の狭い領域に限定されることから、J積分値は、線形弾性体と仮

定した場合にほぼ等しい。そこで、破壊靱性試験とJ積分値の算出法を統一するためにも、線形弾性体の近似式をJ積分値の基準に用いている。き裂先端近傍での、図4のx軸上での周方向応力分布とボイド率分布について図5, 6に示す。ここで、応力については短軸の引張試験における降伏応力 $\sigma_y = 42.1$  MPaで正規化表示してある。

図5を見ると、き裂先端からある長さまで応力がほぼ一定値を示し、それより先は離れるにつれ応力が小さくなっている。Jの値が大きくなっても、応力の最大値は変化せず、応力が一定値を示す範囲が長くなっていることが分かる。この結果と損傷域等高線図を見比べてみれば、き裂先端からの損傷域の長さとお応力が一定な部分の長さはほぼ等しい。また、Jの値が大きくなっても応力が一定な部分の応力値は変わらないことから、一旦損傷を受けた部分の応力はある程度以上は上昇しないことが分かる。これは、Gursonモデルを用いているため、一旦降伏するとボイドの拡大が始まるため、 $\sigma_0$ がひずみ硬化によって大きくなっても、引張り

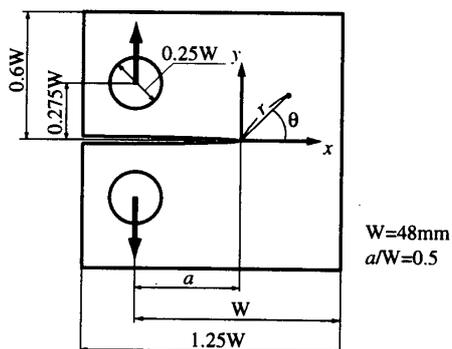


Fig. 4 Bulk CT (compact tension) specimen.

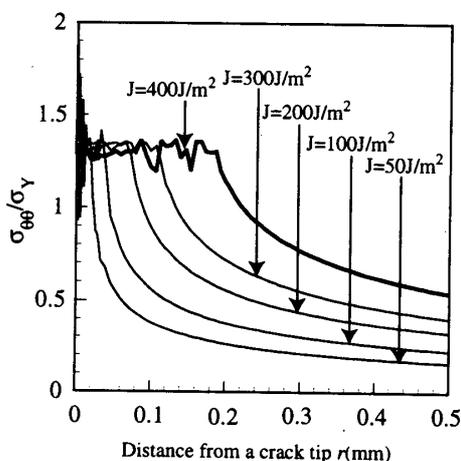


Fig 5 Variation of hoop stress with distance from a crack tip for a bulk CT specimen.

静水圧応力の影響が大きく、全体的な降伏曲面の拡大は、小さいためと考えられる。実際に損傷域中のゴム粒子中に発生したボイドの大きさは、損傷域内ではほぼ同じ大きさをしており、このことから損傷域内の応力がほぼ同じ大きさとなる Gurson モデルは、樹脂の損傷をよく表しているといえる。

損傷域内の応力は、ほぼ一定であるため、損傷域の長さがある一定値を越えると、き裂の進展を押しさえきれなくなるとする、損傷域長さ一定の破壊クライテリオンを考える。図6のバルク接着剤中のき裂先端の損傷域長さは、 $J=400J/m^2$ のとき、0.18 mmと読みとれる。

### 2.3 剛体に挟まれた接着剤層中のき裂の損傷解析

次に、接着剤層の厚みと破壊靱性値との関係を調べるために、接着剤層中の周方向応力分布と損傷域が、接着剤層厚みによってどのように変化するかを解析した。ゴム変性エポキシ樹脂を接着剤とし、被着材にアルミニウムを仮定するとき、アルミニウムの弾性率は、接着剤に対して非常に大きいため、剛体と見なしても近似的には差し支え無いと考えられる。そこで、本研究では、図7に示すような、無限剛体板に挟まれた接着剤層中のき裂の解析を行った。念のために、被着材をアルミニウムとして、接着剤層厚さを変えたCT接着継手中のき裂と図7の剛体に挟まれる接着剤層中のき裂について、き裂先端近傍の応力を比較したが、き裂先端近傍の応力場は、き裂のJ積分値と接着剤層厚さにも依存し、被着材をアルミニウムと考えた場合と剛体と考えた場合の差はほとんど無く、被着材を剛体とすることの妥当性が確かめられた<sup>(1)</sup>。図7のモデルのJ積分値は、次式で示される。

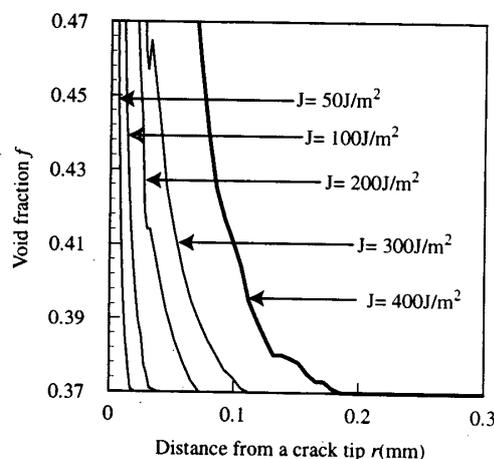


Fig 6 Variation of void fraction with distance from a crack tip for a bulk CT specimen.

$$J = G = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{v_0^2}{H} \quad (6)$$

ここで、 $H$ は接着剤層厚さの1/2、 $v_0$ は、剛体の変位である。解析には、バルク材中のき裂の場合と全く同じGursonモデルを用い、き裂先端近傍

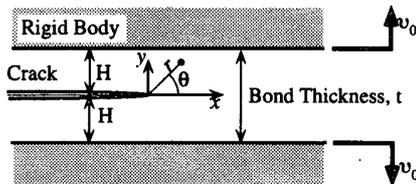


Fig.7 Edge crack in an infinite adhesive layer constrained by rigid bodies.

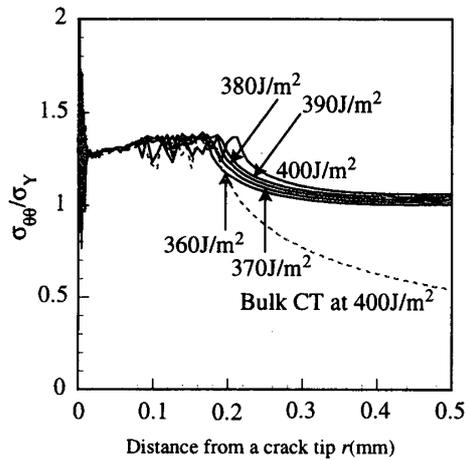


Fig. 8 Variation of hoop stress with distance from a crack tip for an adhesive joint with 1.5mm of bond thickness.

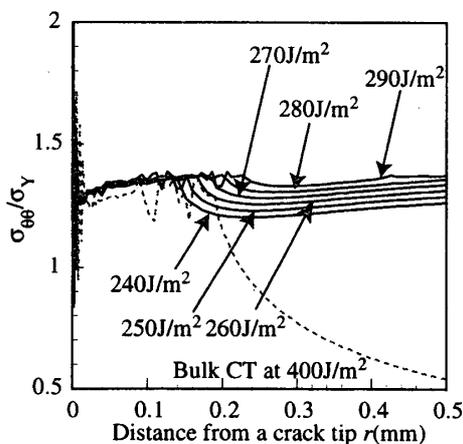


Fig. 10 Variation of hoop stress with distance from a crack tip for an adhesive joint with 0.7mm of bond thickness.

の有限要素の配置も全く同じに設定し、剛体部に強制変位を与えた。接着層の厚みは、1.5mm, 1.0mm, 0.7mm, 0.5mm, 0.3mm, 0.2mm, 0.1mmの7種類に変化させ、き裂J積分値が0から徐々に上昇してゆくように強制変位量を制御した。解析により求められたき裂先端付近のx軸上の周方向応力とボイド率の分布を図8～15に示す。それぞれの図中には、バルク材中のき裂の $J=400\text{J/m}^2$ の場合の結果を破線で示してある。

まず、図8,9の接着剤層厚みが1.5mmのときを見ると、き裂先端の応力がほぼ一定となっている部分が、J積分の上昇に伴って長くなり、 $J=400\text{J/m}^2$ のときに、ほぼバルク材中のき裂先端の $J=400\text{J/m}^2$ の場合に等しくなる。このことは、ボイド率についても同様である。ただし、き裂先端からの距離が

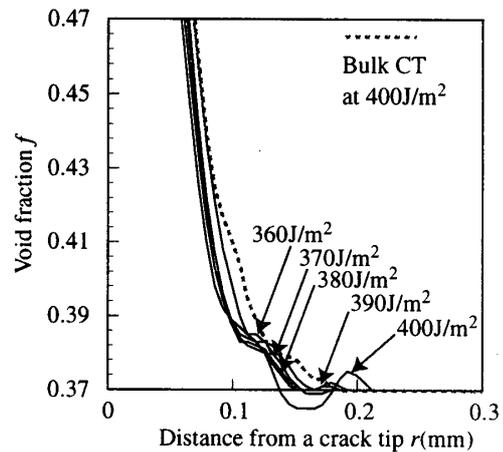


Fig. 9 Variation of void fraction with distance from a crack tip for an adhesive joint with 1.5mm of bond thickness.

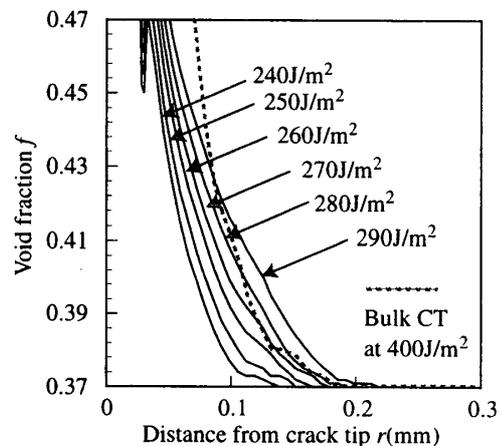


Fig. 11 Variation of void fraction with distance from a crack tip for an adhesive joint with 0.7mm of bond thickness.

0.2mm 以上離れた部分の応力は接着剤層中のき裂の場合の方が高くなっている。しかし、損傷が発生していない部分の応力は、直接破壊に寄与しないと考えられる。これらのことより、接着剤層厚み 1.5mm の場合の解析結果は、バルク材中のき裂とほぼ同じ破壊靱性値をもつことが、解析結果からも予測される。

しかし、図 10, 11 の接着剤層厚さ 0.7mm の結果を見ると、より低い J 積分値で応力が上昇し、損傷域が発達していることが判る。この傾向は、接着剤層厚さが 1.0mm, 0.7mm, 0.5mm と薄くなるにつれて顕著になり、低い J 積分値で、バルク材中のき裂とほぼ同じ損傷域を形成する(接着剤層厚さが 1.0mm と 0.5mm の結果は、0.7mm の場合と傾向が一致し

ているので、紙面の制約上、省略する)。ここで、接着剤層中のき裂は、バルク材中のき裂と同じき裂先端の損傷域長さ(本解析では、0.18mm)に達したときにき裂が進展するとするクライテリオンを用いて、接着剤層厚さによる破壊靱性値の変化を推定することにする。接着剤層厚さ 0.5mm までは、この方法で、き裂の進展を予測できるが、図 12~15 に示すように、接着剤層厚さが 0.3mm 以下になると、き裂先端の損傷域から少し離れたところから損傷域が発生する。この損傷域とき裂先端の損傷域が共に発達しながら接近し、最終的には合体する(図 16, 17 参照)。そこで、このような場合には、き裂先端から少し離れた損傷域が、き裂先端の損傷域と合体する時にき裂の進展が始まると仮定し

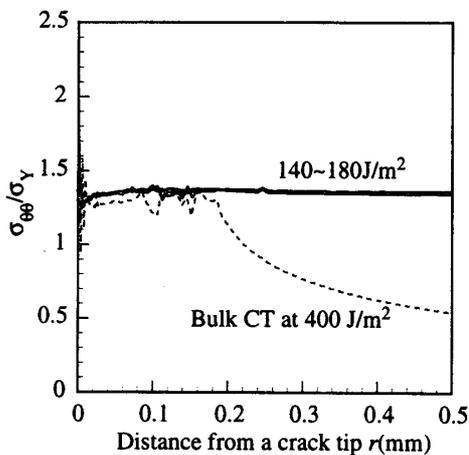


Fig. 12 Variation of hoop stress with distance from a crack tip for an adhesive joint with 0.3mm of bond thickness.

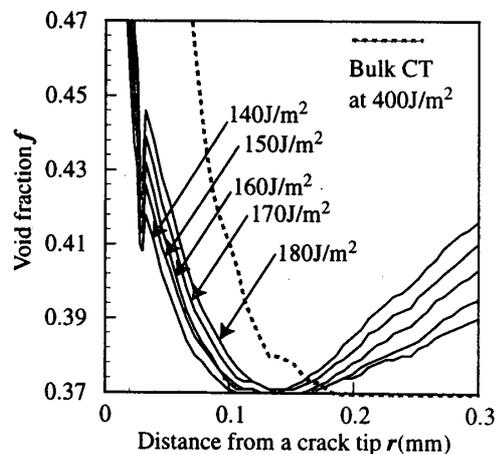


Fig. 13 Variation of void fraction with distance from a crack tip for an adhesive joint with 0.3mm of bond thickness.

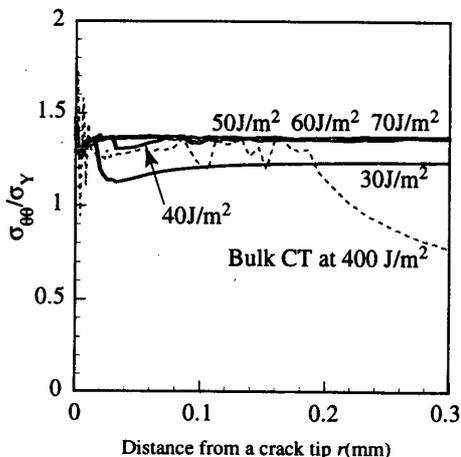


Fig. 14 Variation of hoop stress with distance from a crack tip for an adhesive joint with 0.1mm of bond thickness.

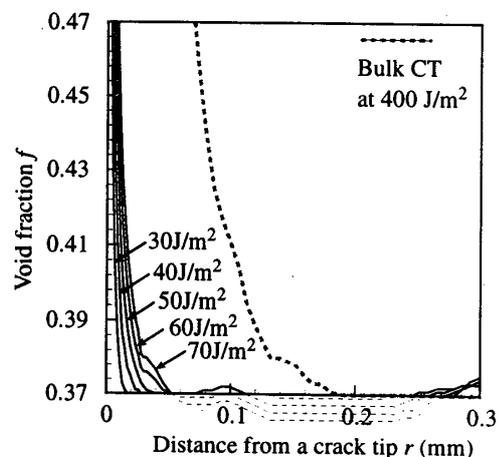


Fig. 15 Variation of void fraction with distance from a crack tip for an adhesive joint with 0.1mm of bond thickness.

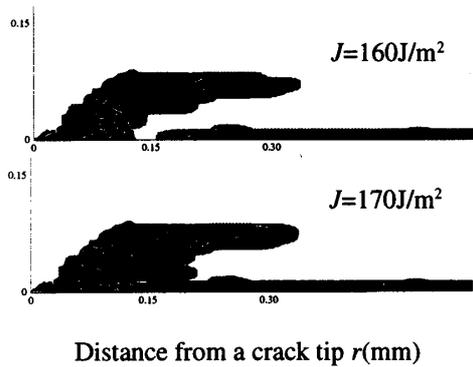


Fig. 16 Distributions of damage zones around a crack tip for an adhesive joint with 0.3mm of bond thickness.

た. 第1報の損傷域の観察結果<sup>(8)</sup>でも, 接着剤層厚さが0.1mmの場合には, 破壊直前に接着剤層がき裂前方の広い範囲に渡って全面的に損傷を受けており, 解析結果と良く一致していた.

このようにして推定した破壊靱性値を図18に○で示す. これをみると, 接着剤層がある程度より薄くなると, 次第に減少していくことが判る. 図18の解析による予測値は, 図1のType Aの接着剤層厚み依存性を良く表している. しかしながら, 図1のType Bの様に, 破壊靱性値がある接着剤層厚さで, 一旦上昇する理由は, 説明がつかない. 第1報の実験結果<sup>(8)</sup>も, 図18の●印で示したとおり, 0.3mm程度の接着剤層厚さで, 一旦, 破壊靱性値が最大値を示している. 第一報では, 被着材と接着剤層との界面に界面損傷域の発生を観察し, その応力遮蔽効果が, き裂先端の応力を低下させるために0.3mm程度の接着剤層厚さで, 破壊靱性値が極大値をとるものと予測した. しかし, 界面付近に界面損傷域が発生すると, 本当いき裂先端付近の応力を低下させる効果があるかどうかは, 証明できていなかった. そこで, 本解析では, 被着材と接着剤層の界面付近にわずかに高い初期ポイド率を与えることで, 界面に人工的に界面損傷域を発生させ, 界面損傷域が発生すれば, き裂先端の応力を低下させ, き裂先端付近の損傷の発達を抑えることができるかどうかを確かめることとした.

**2.4 界面損傷域の影響** 界面損傷域の影響を定性的に調べるために, 剛体とゴム変成エポキシ樹脂の界面に接する厚さ0.01mmの樹脂のポイド率をわずかに大きく( $f=0.40$ )して解析を行った(それ以外の部分は, 0.37). その結果, 接着剤層厚さが薄くなると界面付近の損傷域のポイド率が増大し, き裂先

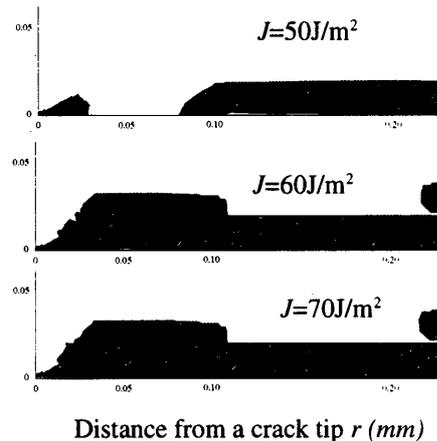


Fig.17 Distributions of damage zones around a crack tip for an adhesive joint with 0.1mm of bond thickness.

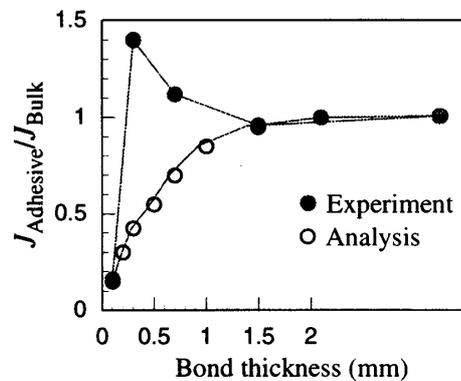


Fig.18 Estimated fracture toughness of rubber-modified epoxy resin with bond thickness.

端付近の応力が低下した. 図19に接着剤層厚さ0.3mmの場合に, 界面損傷域の影響により, き裂先端の損傷域の成長が抑制されている様子を示す.  $J=400\text{J/m}^2$ に至っても, 図16の $J=170\text{J/m}^2$ の場合よりもかなり小さなき裂先端損傷域しか形成されおらず, 界面損傷域には, き裂先端の応力を低下させる, 応力遮蔽効果があることが証明された.

前項と同様に, き裂先端の損傷域の長さが一定値に達したときにき裂が進展するとするクライテリアを適用すると, 表2の様な破壊靱性値の予測値が得られる. 表2に示すように, 接着剤層厚さが1.5mm, 1.0mmの場合は, 界面損傷域を導入したことで, 推定される破壊靱性値はむしろ低下したが, 接着剤層厚さ0.3mm程度より薄くなると破壊靱性値の推定値は上昇した. このことより, 界面損傷域が発生すれば, その応力遮蔽効果により, き裂先端の損傷域の発達が抑えられ, 破壊靱性値が一旦上昇し得ることが, 定性的に示された. なお, この界面ダメージの発生原因としては, 被着材による板

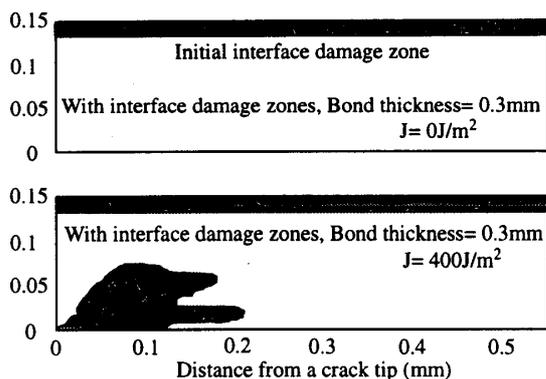


Fig. 19 Shrunk damage zone around a crack tip shielded by interface damage zones in the case of 0.3mm bond thickness.

厚方向の変位拘束により、接着剤層内部よりも被着材との界面付近の方がわずかに三軸引張り応力度が高いことや、界面付近に析出しているゴム粒子(直径 $20\mu\text{m}$ 程度)の方が、その他の部分のゴム粒子(直径 $4\sim 8\mu\text{m}$ 程度)よりも数倍直径が大きいことなどが考えられる<sup>(6)</sup>。

### 3. 結 言

第1報の(き裂先端損傷域の顕微鏡観察)に続き、本論文では、第2報として、Gursonモデルを用いたき裂先端の損傷解析を行い、延性接着剤を用いた接着継手の破壊に対する被着材の拘束効果について、詳細な検討を行った。これらの研究を通じて得られた結論を以下に示す。

- (1) 二次元平面ひずみ状態を仮定したGursonモデルを用いた解析結果は、ある程度より(本研究では、1mm)接着剤層厚さが薄くなるにつれて、き裂先端の損傷域は、より低いJ積分値で、バルク材中のき裂先端と同じ大きさに成長する。このことが、図1のType Aの接着継手の接着剤層厚さ依存性の原因であると考えられる。
- (2) 図1のType Bの様に、ある接着剤層厚さで、一旦破壊靱性値が極大値をとる原因は、第1報の顕微鏡観察の結果より、接着剤層と被着材の界面に形成される界面損傷域の応力遮蔽効果により、き裂先端付近の応力が低下するためと予測された。界面損傷域が存在すれば、き裂先端の応力が低下し、き裂先端における損傷の発達が抑えられることが、解析からも確認された。
- (3) Type Bの接着継手の場合でも、さらに接着剤層が薄くなると、き裂が界面損傷域の中を進展するために、応力遮蔽効果は失われ、破壊靱性値は、

Table2 Estimated fracture toughness of cracks in adhesive layers with and without boundary damage zones.

Bond Thickness (mm)	Estimated Fracture Energy ( $J/m^2$ )	
	Without boundary damage zones	With boundary damage zones
0.1	70	> 400
0.2	120	> 400
0.3	170	> 400
1.0	340	280
1.5	380	320

急に低下すると考えられる。

(4) 延性接着剤を用いた接着継手の破壊靱性値にType AとType Bのものが存在するのは、接着剤の種類や被着材の拘束効果の違いにより、界面損傷域が発達するものとしめないものがあるためではないかと予測する。

本研究の遂行にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金の助成を受けた。記して感謝する。

### [参考文献]

- (1) Gardon, J.L., *J. of applied Polymer Science*, **7**(1963), 625-641.
- (2) Mostovoy, S. and Ripling, E.J., *J. of Applied Polymer Science*, **15**(1971), 661-673.
- (3) Bascom, W.D., Cottingham, R.L., Jones, R.L. and Peyser, P., *J. of Applied Polymer Science*, **19**(1975), 2545-2562.
- (4) Bascom, W.D. and Shaw, S.J., *J. of Adhesion*, **7**(1976), 333-346.
- (5) Kinloch, A. J. and Shaw, S. J., *J. of Adhesion*, **12**(1981), 59-77.
- (6) 池田 徹・山下 章・宮崎 則幸, *機論*, **62**-602, A(1996), 2200-2206.
- (7) Daghyani, H. R., Ye, L. and Mai, Y. W., *J. of Adhesion*, **53** (1995), 163-172.
- (8) 李 德甫, 池田 徹, 宮崎 則幸, 崔 洛三, *機論*, **68**-667, A(2002), 464-470.
- (9) A. L. Gurson, *Trans. ASME, J. Enging Mate. and Tech.*, **99** (1977), 2-15.
- (10) 岡村弘之, *線形破壊力学入門*, 培風館, (1976), 219.
- (11) T. Ikeda, D. Ikemoto, D. Lee and N. Miyazaki, *Proceeding of the First Asian-Pasific Congress on Computational Mechanics*