< 綜 説 >

(受理: 平成 18 年 3 月 30 日)

延性接着剤を用いた接着継手の破壊靱性値 Fracture Toughness of Adhesive Joints Using Ductile Adhesive

池田 徹*・宮崎 則幸*
Toru IKEDA and Noriyuki MIYAZAKI

1. はじめに

今日では、接着剤はさまざまな構造物に用いられるようになってきたが、その際に大きな問題となるのが接着部の脆性破壊である。延性接着剤は、そのような脆性破壊を防ぐ目的で開発されたものである。延性接着剤を用いて接着した接着継手の破壊靱性値は、そうで無いものに較べて数倍から十倍以上も高い値を示す。しかしながら、その破壊靱性値は、ある程度より接着剤層厚みが薄くなると急激に低下する傾向がある。また、急激に低下する前に特定の接着剤層厚みで、破壊靱性値が最大値を示すものもあるが、そのメカニズムを含めて依然不明な点が多い。本総説では、接着継手に対する破壊力学の視点から見た破壊靱性値の接着剤層厚さ依存性とそのメカニズムに対する著者の考え方を解説する。

2. 破壊力学を用いた接着強度試験

破壊力学を用いた接着強度試験では、き裂の入った試験片を用いる。この方法では、試験結果を応力拡大係数やエネルギー解放率といった破壊力学パラメータで整理する。これらの破壊力学パラメータは、試験片の形状によらないローカルな値であるため、より本質的なはく離強度を知ることができるのが特徴である。

まず、き裂をもつ材料において、き裂が進展し、き裂面積が単位面積だけ増加する際に解放されるポテンシャルエネルギーをエネルギー解放率 G と呼ぶ¹⁾。

$$G = -\frac{\partial U}{\partial A} = -\frac{1}{b} \frac{\partial U}{\partial a} \quad (1)$$

ここで、 U は系のポテンシャルエネルギー、 A はき裂面

積、 b は板幅、 a はき裂長さである。また、エネルギー解放率 G は、コンプライアンス C との間に次式の関係がある¹⁾。

$$G = \frac{F^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (2)$$

ここで、 F はき裂をもつ板に作用する荷重を示す。よって、き裂をもつ板のコンプライアンス C のき裂長さ a による変化を知ることができれば、エネルギー解放率を計算することが可能になる。

また、き裂に図 1 に示すようなモード I、II、III の荷重

池 田 徹

略歴：平成 4 年 3 月 九州大学大学院工学研究科博士課程修了
平成 4 年 4 月 九州大学工学部助手
平成 8 年 7 月 九州大学工学部助教授
平成 16 年 3 月 京都大学大学院工学研究科助教授
現在にいたる
趣味：スキューバダイビング、スキューバダイビング

宮 崎 則 幸

略歴：昭和 52 年 3 月 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
昭和 52 年 4 月 日本原子力研究所研究員（安全工学部構造強度研究室）
昭和 58 年 4 月 九州大学工学部助教授
平成 8 年 2 月 同上 教授（同上）
平成 16 年 4 月 京都大学大学院工学研究科教授
現在にいたる
趣味：古都（京都）散策

* 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻
京都市左京区吉田本町 〒606-8501
Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University
Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

図1 き裂の開きモード

図2 き裂先端の座標系

が負荷されたとき、図2に示すような座標系をき裂先端にとると、き裂先端近傍の応力場は、次式で示される¹⁾。

(モード I)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{Bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

(モード II)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

(モード III)

$$\begin{Bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} をモード I、II、IIIの応力拡大係数と呼ぶ。また、応力拡大係数とエネルギー解放率の間には、次式の関係がある。

$$G = \frac{\kappa+1}{8\mu} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2\mu} K_{III}^2 \quad (6)$$

ただし、

$$\kappa = \begin{cases} 3-4\nu & (\text{Plane Strain}) \\ (3-\nu)/(1+\nu) & (\text{Plane Stress}) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 ν 、 μ は、それぞれポアソン比とせん断弾性係数で

(a) ピール試験

(b) ブリスター試験

(c) ダブルカンチレバー(DCB)試験

(d) 傾斜付 DCB(TDCB)試験

図3 き裂付接着試験法の例

ある。また、エネルギー解放率や応力拡大係数の破壊を生じる臨界値を共に破壊靱性値と呼び、 G_c 、 K_{IC} などのように記述する。

図3に示したものは、き裂付き接着試験法の例である。

(a) ピール試験

この試験方法は、単なる機械的試験法としても用いられるが、簡単にはく離荷重をエネルギー解放率に置き換えることができる。長さ a だけはく離させたとすると、外力の仕事 $F_c \lambda_c a$ とはく離した部分に蓄えられたひずみエネルギー $ab h_a W$ 、き裂先端の左側への移動にともなう仕事量 $F_c a \cos \alpha$ とはく離に要されたエネルギー $G_c ab$ が釣り合うので、次式が得られる²⁾。

$$F_c \lambda_c a = ab h_a W + F_c a \cos \alpha + G_c ab \quad (8)$$

ただし、 F_c ははく離荷重、 λ_c は伸び率、 b 、 h_a はたわみ性材料の幅と厚さ、 α は引張り角度である。よって、はく離の際の破壊靱性値は、次のように表せる。

$$G_c = \frac{F_c \lambda_c}{b} - \frac{F_c \cos \alpha}{b} - h_a W \quad (9)$$

もし、たわみ性材料にほとんど伸びがなく、 $\lambda_c \approx 1.0$ 、 $W \approx 0$ が成り立つならば、式(9)は、次のように簡単に

なる。

$$G_C = \frac{F_C}{b} (1 - \cos \alpha) \quad (10)$$

(b) プリスター試験

剛体とみなせるジグの上に接着剤を塗布し、初期はく離の半径を a とするとき、下方から空気圧 P_C を負荷したときにはく離が進展したとする。接着剤の厚さを h_a 、ヤング率を E_a 、ポアソン比を ν_a とするとき、そのエネルギー解放率基準の破壊靱性値 G_C は、次式のように求められている³⁾。

$$G_C = \frac{1}{f(h_a/a)} \frac{P_C^2 a}{E_a} \quad (11)$$

ただし、 $f(h_a/a)$ は、

$$f\left(\frac{h_a}{a}\right) = \frac{1}{1-\nu_a^2} \left[\frac{3}{32} \left\{ \left(\frac{a}{h_a}\right)^3 + \left(\frac{a}{h_a}\right) \frac{4}{1-\nu_a} \right\} + \frac{2}{\pi} \right]^{-1} \quad (12)$$

接着剤の塗布厚さが、初期はく離半径 a よりも十分に小さいとき、式 (11) (12) は、次式のように簡単になる。

$$G_C = \frac{3(1-\nu_a^2)}{32} \left(\frac{a}{h_a}\right)^3 \frac{P_C^2 a}{E_a} \quad (13)$$

(c) ダブルカンチレバービーム (DCB) 試験

接着剤の破壊靱性試験にしばしば用いられる試験で、エネルギー解放率 G は、古典材料力学の梁の曲げ理論より求められる²⁾。

$$G_{IC} = \frac{4F_C^2}{b^2 E_S} \left(\frac{3a^2}{d^3} + \frac{1}{d} \right) \quad (14)$$

ここで、 F_C は破壊荷重、 b は板幅、 E_S は被着材のヤング率、 d はビームの高さである。接着剤層が十分薄ければ基本的にほとんどのひずみエネルギーがビーム部に蓄えられるため、接着剤の厚みに依存しないのが特徴である。また、負荷モードも完全なモード I であるので、エネルギー解放率基準の破壊靱性値も G_{IC} と記述した。

(d) 傾斜付き DCB (TDCB) 試験

上述の DCB 試験の梁の高さを徐々に変化させることで、エネルギー解放率が荷重のみから計算できる様に工夫したものである。エネルギー解放率基準の破壊靱性値は、次式で示される²⁾。

$$G_{IC} = \frac{4F_C^2 m_b}{b^2 E_S} \quad (15)$$

$$m_b = \left(\frac{3a^2}{d^3} + \frac{1}{d} \right) = \text{const.} \quad (16)$$

3. 応力拡大係数におよぼす接着剤層厚さの影響

接着剤層の厚みは、一般に薄い方が接着強度が強いと考えられているが、このことを破壊力学の観点から考えてみたい。まず、図 4 に示すような剛体に挟まれた接着剤層を

図4 剛体に挟まれた接着剤層

考える。いま、剛体と接着剤層の間は、完全に固着していると考え、上下の剛体に強制変位 v_0 を与えたときのき裂の応力拡大係数は、平面ひずみ状態の場合、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{E_a}{(1+\nu_a)\sqrt{1-2\nu_a}} \frac{\nu_0}{\sqrt{H}} \\ &= \frac{E_a}{(1+\nu_a)\sqrt{1-2\nu_a}} \varepsilon_y \sqrt{H} \end{aligned} \quad (17)$$

もし、突き合わせ継手のように遠方で一様応力を負荷する場合、接着剤層中のひずみ ε_y は、明らかに応力に比例するため、接着剤層中の微小き裂先端での応力拡大係数は同じ荷重に対して $\sqrt{H}$ に比例して大きくなると考えられる。言い換えると、もし同じ破壊靱性値 K_{IC} において破壊が生じるとすると、破壊荷重は、 $\sqrt{H}$ に反比例するように減少するはずである。すなわち、突き合わせ継手において、接着剤層厚さよりも十分に長いき裂が欠陥として存在した場合に、予測される公称破壊応力は、次式で表される。

$$\sigma_c \approx E_a \varepsilon_y = \frac{K_{IC}(1+\nu)\sqrt{1-2\nu}}{\sqrt{H}} \quad (18)$$

この式に、平均的なエポキシ樹脂の物性値、 $K_{IC}=0.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}} \approx 16\text{N}(\text{mm})^{-3/2}$ 、 $E_a=4000\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $\nu=0.4$ を代入し、接着剤層の厚さの半分 H に対して、予測される破壊応力をプロットしたのが図 5 である。このように、もし破壊靱性値に接着剤層厚さ依存性が無ければ、突き合わせ継手の公称破壊応力は、接着剤層が薄ければ薄いほど高くなる。この意味では、接着剤層が薄い方が強度が上がると考えられていることは、間違っていないのである。

しかしながら、図 3 の DCB 試験片、TDCB 試験片など

図5 典型的なエポキシ樹脂を突き合わせ継手で接合したときに推定される公称破壊応力

では、突き合わせ継手の場合のように接着剤層厚さによって、同じ荷重にたいするエネルギー解放率が変化するというわけではない。これは、これらの試験法では、被着材にひずみエネルギーのほとんどが蓄積されるため、き裂が進展する際に解放されるエネルギーは、被着材に蓄積されたひずみエネルギーがほとんどだからである⁴⁾。

4. 破壊靱性値におよぼす接着剤層厚さの影響

前項において、接着剤の破壊靱性値が接着剤層厚さに対して不変であれば、突き合わせ継手の強度は、接着剤層が薄いほど上昇すると述べた。しかしながら、延性的な性質をもつ接着剤では、ある程度以上に接着剤層を薄くすると、破壊靱性値そのものが低下することが知られている。接着剤層の厚さによって破壊靱性値が変化する例として、Gardon⁵⁾ はピール試験において、接着剤層厚さが薄くなるほどピール強度 (荷重が) 小さくなることを見いだしている。式 (10) より、ピール荷重と破壊靱性値は比例するため、接着剤層が薄くなると破壊靱性値が低下したと言える。Mostovoy と Rippling⁶⁾ は、同様の減少を TDCB 試験によって見いだしている。Bascom ら^{7,8)} は、ゴム変成エポキシ樹脂について接着剤層厚さを変えた破壊靱性値の測定を TDCB 試験片を用いて行い、厚い接着剤層から徐々に接着剤層厚さを減じてゆくと、き裂先端塑性域代表寸法 $2r_p$ とほぼ同じ接着剤層厚さになるまで少しずつ破壊靱性値が増大し、その後、さらに接着剤層厚さが薄くなると急激に破壊靱性値が減少することを見いだしている。Irwin によって提案された有名なき裂先端塑性域代表寸法の第一近似値は、次式で示される。

$$\begin{cases} r_p = \frac{1}{2\pi} \frac{E_a G}{\sigma_0^2} & \text{Plane Stress} \\ r_p = \frac{1}{6\pi} \frac{E_a G}{\sigma_0^2 (1-\nu_a^2)} & \text{Plane Strain} \end{cases} \quad (19)$$

ここで、 G はエネルギー解放率、 E_a 、 ν_a は接着剤のヤング率とポアソン比、 σ_0 は接着剤の降伏応力である。また、同様の実験は、Kinloch と Shaw⁹⁾ によっても確かめられている。

また、Varias ら¹⁰⁾、Hsia ら¹¹⁾、Tvergaard と Hutchinson¹²⁾ によって、セラミックスを金属でロウ付けした場合の、金属の厚さとき裂先端近傍の応力場の関係が解析されている。彼らによるといずれも金属層の厚さがある厚さよりも薄くなると、同じ J 積分値に対して、き裂先端近傍の応力場が上昇するとする結果を得ている。このことは、被着体の拘束により、き裂先端近傍のプロセスゾーン付近の応力が上昇することを示しているの、結果的に金属層の厚みがある程度よりも薄くなると破壊靱性値が低下してゆくことを示している。

表 1 被着材と接着剤の材料定数

Material	E (GPa)	ν	σ_0 (MPa)	α	n
Mild Steel	210	0.3			
Epoxy Resin	2.7	0.4	68	0.2	4

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n, \quad \varepsilon_0 = \sigma_0 / E$$

そこで、ゴム変成エポキシ樹脂接着剤について、接着剤単体中のき裂と軟鋼の被着材に拘束された場合のき裂先端近傍の応力場について、単体のエポキシ樹脂の破壊靱性値 $J_c = 2000$ (N/m) よりやや低い $J = 1500$ (N/m) での分布を調べてみた⁴⁾。実際の破壊靱性値よりもやや低いレベルのエネルギー解放率での応力分布を調べたのは、破壊靱性値にあまりにも近い応力状態を調べようとする、き裂先端付近での変形が大きくなりすぎて、大変形解析での計算が収束できなくなるからである。解析は、表 1 の物性値を用いて、市販の FEM コードである MARC を用いて、Update Lagrange 法で大変形弾塑性解析を行った。TDCB 試験片と Edge Cacked Plate Adhesive Joint under Uniform Tension (ECP) 試験片の FEM モデルを作成し、 $J = 1500$ (N/m) でのき裂先端付近での三軸引張り応力 σ_H を解析した結果を図 6 に示す。この図より、 σ_H が接着剤層厚さが薄くなると上昇していることがわかる。ゴム変成エポキシ樹脂のプロセスゾーンはき裂先端の白化域の数分の 1 はあると考えると、少なくとも $50 \mu\text{m}$ 以上はあると思われる。そこで、き裂先端から $50 \mu\text{m}$ での三軸引張り応力 σ_H の接着剤層厚さによる変化を図 7 に示す。これより、接着剤層厚さが 0.5mm 程度になると急に σ_H の値が増大していることがわかる。このことは、接着剤層が薄くなるとある厚さよりも薄くなった際に急速に破壊靱性値が減少してゆくことを示している。これは、前述の Gardon⁵⁾ の試験結果や Mostovoy と Rippling⁶⁾ の実験結果の一部を定性的に示している。また、セラミックスを金属で接合した際の接合強度をシミュレーションした、Varias ら¹⁰⁾、Hsia ら¹¹⁾、Tvergaard と Hutchinson¹²⁾ らの結果とも良

図 6 σ_H のき裂先端近傍での分布

図7 き裂先端から $50 \mu m$ における σ_H の接着剤層厚さによる変化

く一致している。

しかしながら、ゴム変成エポキシ樹脂について実験を行った、Bascom ら^{7,8)} や Kinloch と Shaw⁹⁾ の実験結果のように、ある接着剤層厚さで、破壊靱性値が極大値をとる理由は、説明できない。

5. 接着剤層中のき裂先端近傍のダメージゾーンの観察¹³⁾¹⁴⁾

そこで、実際に厚みの異なる接着剤層内のき裂先端損傷域を観察した。ここで用いたゴム変成エポキシ樹脂は、マトリックス材に液体エポキシ樹脂 (AER250, 長瀬チバ)、液状ブタジエンゴムに CTBN (CTBN1300×8, 宇部興産)、硬化剤に芳香族アミン (HY956, 長瀬チバ) を用い、それぞれ、83.3wt%, 12.5wt%, 4.2wt% の割合で混合したものである。これを $120^\circ C$ で 16 時間加熱して硬化させた。接着継手は、接着面をシアンカップリング剤 ($C_9H_{20}O_5Si$) で処理したアルミニウム (A6061) をこのゴム変成接着剤で接着させることにより、接着剤層厚みが $0.1mm$, $0.3mm$, $0.7mm$, $1.5mm$, $2.1mm$ の図8に示すような CT 型接着継手破壊試験片を作成した。接着剤層中のき裂先端には、接着剤の硬化前にあらかじめ厚さ $0.1mm$ のカミソリ刃を挿入

図8 Compact Tension (CT) adhesive 試験片 ($W = 48mm$, thickness = $8mm$, $a/W = 0.5$).

しておき、硬化後に抜き取った。この様にして得られた試験片の破壊靱性値を図9に示す。これより、Bascom ら^{7,8)} や Kinloch と Shaw⁹⁾ の実験結果と同様に、 $0.3mm$ 程度の接着剤層厚さで、破壊靱性値が極大となっていることがわかる。また、それぞれの接着剤層厚さの試験片について、平均破壊荷重の 95% の荷重を負荷した後に除荷した。これらの試験片のき裂先端部付近を低速切断機で切り出し、プレパラート上に貼り付けて厚さ $100 \mu m$ に薄片化し、き裂先端付近のゴム変成エポキシ樹脂の損傷状態を光学顕微鏡により観察した結果の一部を図10に示す。

図9 ギュ変成エポキシ樹脂における接着剤層厚さと破壊靱性値の関係

(a) 接着剤層厚さ $1.5mm$ のケース

(b) 接着剤層厚さ $0.3mm$ のケース

(c) 接着剤層厚さ $0.1mm$ のケース

図10 さまざまな接着剤層厚さによるき裂先端付近のダメージゾーンの変化

図 11 損傷を受ける前後のゴム変成エポキシ樹脂の顕微鏡写真 (損傷後にキャビテーションが発生している)。

これより、接着剤層厚さが 0.7mm 以上の時は、ほぼ同じき裂先端損傷を呈したのに対して、破壊靱性値が極大値を示した厚さ 0.3mm のものでは、接着剤層と被着材の界面に沿って大規模な損傷領域が観察された。また、厚さ 0.1mm のものでは、き裂が界面に向かって屈曲し、この界面損傷域の内部を界面に沿うように進展した。これらの結果より、接着剤層厚さが 0.3mm の場合には、界面損傷がき裂先端の応力を低減する、いわゆる応力遮蔽効果のために破壊靱性値が上昇し、さらに薄い接着剤層厚さ 0.1mm の場合には、上下の界面損傷域同士が接近しすぎ、き裂は、いずれかの界面損傷域の中を進むために破壊靱性値は急激に低下したものと推測される。

6. 有限要素法による損傷解析¹⁵⁾

6.1 損傷解析モデル

本研究で使したゴム変成エポキシ樹脂では、直径 $5\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ のゴム粒子がエポキシ樹脂の中に分散している。これらのゴム粒子は、ダメージを受けることによって、図 11 のように内部にキャビテーションを発生する。このゴム変成エポキシ樹脂の損傷解析を行うために多孔質材料の降伏モデルである、Gurson モデルを用いた。Gurson モデルの降伏関数は次式で示される。

$$F = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} \right)^2 + 2f \cosh \left(\frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_0} \right) - 1 - f^2 = 0 \quad (20)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は Mises 応力、 f は粒子の体積含有率 (ボイド率)、 $\sigma_{kk}/3$ は膨張応力、 σ_0 は定数である。また、体積含有率は、次式の様に変化する。

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{growth}} + \dot{f}_{\text{nucleation}} \quad (21)$$

$$\dot{f}_{\text{growth}} = (1-f) \dot{\epsilon}_{kk}^p \quad (22)$$

本解析では、 σ_0 に樹脂の圧縮試験から得られる降伏応力を用い、初期ボイド率 f_0 は樹脂の引張り試験時の応力ひずみ線図に解析がフィットするように決定し、 $f_0=0.37$ とした。また、通常の Gurson モデルでは、 f の増加にはボイドの体積膨張とボイドの生成を考えるが、本解析ではゴム変成エポキシ樹脂のゴム粒子数が増加するわけでは無いのでボイドの生成は無いものとした。 $f_0=0.37$ という値

表 2 損傷解析に用いたゴム変成エポキシ樹脂の材料定数

E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_0 (MPa)	f_0	G_c (N/m)
2.54	0.37	42.1	68.0	0.37	440

は、明らかにゴム粒子の体積含有率よりも大きい。ここでは、 f_0 の値は現実のボイド率というよりも、降伏関数のフィッティングパラメータとして取り扱った。最終的に求めた物性値を表 2 に示す。

6.2 接着層の簡易解析モデル

有限要素法解析にあたっては、計算時間を節約し、き裂先端付近の応力分布と損傷分布をより細かな要素分割で解析するために、図 4 で示したような、被着材を剛体とし上下の剛体被着体に強制変位を与える簡易モデルを用いた。あらかじめ、被着材をアルミニウムとした CT 接着継手のき裂先端損傷域の解析を行い、剛体被着体モデルと比較したが、接着剤層厚さとエネルギー解放率が同じ場合のき裂先端の応力ひずみ分布は両者ではほぼ等しかったため、このような簡易モデルでの解析で問題ないと考えた。この簡易モデルのエネルギー解放率は、次式より簡単に求められる。

$$G = \frac{E_a(1-\nu_a)}{(1+\nu_a)(1-2\nu_a)} \frac{\nu_0^2}{H} \quad (23)$$

ここで、 E_a と ν_a は、接着剤のヤング率とポアソン比である。

6.3 接着剤層中のき裂の破壊靱性値の推定

ここでは、次式で示されるき裂先端の累積損傷率が一定値に達したときに、き裂が進展すると仮定した。

$$S = \int_0^{l_c} (f - f_0) dx \quad (24)$$

ここで、 S は累積損傷率、 l_c はバルク接着剤におけるき裂先端前方の損傷域の長さである。このようにして、推定した接着継手の破壊靱性値を図 12 に□で示した。この結果は、接着剤層厚さの減少に伴って破壊靱性値が徐々に減少する 4 章での弾塑性解析と同様の傾向を示しており、今回

図12 Gurson モデルを用いて有限要素法解析より予測した破壊靱性値と実験結果の比較

のゴム変成エポキシ樹脂の傾向を表すものではない。すなわち、被着材の二次元的な拘束効果だけでは、接着剤層が薄くなった際の破壊靱性値の減少しか説明できない。

6.4 界面損傷域の考慮

5章に示したとおり、実験による観察では、破壊靱性値が極大値をとる接着剤層厚さ 0.3mm の場合には、接着剤層と被着材の界面に沿って大規模な損傷域が発達していることが観察された。この界面損傷域は、おおむね接着剤層厚さが 0.7mm 以下の場合に観察されている。そこで、上述の損傷解析においても、界面損傷域を模擬するために界面に沿った 0.01mm の薄い領域の初期ボイド率を僅かに他の領域よりも大きくして解析を行った。図12に界面領域の初期ボイド率 f_{01} を 0.3701, 0.371, 0.38 としたときに、式(24)を用いて推定した破壊靱性値を、図13にき裂先端の損傷域の発達の様子を示した。これより、界面に沿った薄い領域の初期ボイド率を僅かに上昇させて解析させた

図13 接着剤層厚さ 0.3mm の場合に、接着剤層と被着材の界面に沿った 0.01mm の領域の Gurson モデルにおける初期ボイド率をわずかに増加させて解析を行った際の、き裂先端近傍のダメージゾーンの分布の変化（わずかな界面損傷がき裂先端の損傷を縮小させている様子がわかる）。

図14 肥大化したアルミニウムと接着剤層の界面付近のゴム粒子

けでも実験結果に近い接着剤層厚み依存性が再現されることがわかった。このことは、界面損傷域の応力遮蔽効果が、ある接着剤層厚みで極大値をとる接着剤層厚み依存性を発現させているとする実験観察からの推定を補強するものと考えられる。また、極大値をとらずに接着剤層厚みの減少に伴って破壊靱性値が減少する接着剤では、この界面損傷があまり発達していないものと予測される。

6.5 界面損傷を発生させるメカニズム

界面損傷域の応力遮蔽効果が特定の接着剤層厚さでの破壊靱性値の極大値を与えているとしても、なぜ界面損傷域が発生するのであろうか。

その一つの理由として、図14に示すように界面付近のゴム粒子の直径が他の部分よりも数倍から十倍程度大きいことが挙げられる。本研究で用いたゴム変成エポキシ樹脂は、液状ゴム（CTBN）を用い、エポキシ硬化時のゴムの析出を利用してゴム粒子を分散させている。アルミニウムとエポキシ樹脂および液状ゴムとの親和性の違いは、アルミニウムが界面にエポキシ樹脂を引き寄せ、わずかに界面から離れた領域にゴム粒子が移動する際にゴム粒子の合体が生じ、この付近のゴム粒子を肥大化させていると考えられる。また、Bucknall¹⁶⁾らは、ゴム変成エポキシ樹脂のキャビテーション発生モデルにおいて、より大きなゴム粒子の方がキャビテーションを発生しやすいことを示している。

7. おわりに

接着継手の破壊靱性について、破壊力学的試験法と接着剤層厚みがエネルギー解放率に与える影響について解説した。さらに接着剤の破壊靱性値そのものが接着剤層厚みの影響を受ける場合があることを示し、そのメカニズムについて実験・解析の両面からのアプローチによって考察した

例を紹介した。

接着剤は、いまやあらゆるところに使用されているにも関わらず、その強度発現のメカニズムは良くわかっていない。今後、接着構造は、ますます他の機械的締結法に代わって利用されるようになると予測されるが、その際に接着構造物が安心して使用されるためには、その強度発現メカニズムが解明され、設計に取り入れられていくことが必要である。

参 考 文 献

- 1) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 培風館, (1976).
- 2) Kinloch, A. J., "Fracture mechanics of adhesive joints," Adhesion and adhesives," Chapman and Hall, 264 (1987).
- 3) Andrews, E. H. and Stevenson, A., Journal of Materials Science, 13, 1680 (1978).
- 4) Ikeda, T., Yamashita, A., Lee, D. and Miyazaki N., Transaction of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, 122, 80 (2000).
- 5) Gardon, J. L., Journal of Applied Polymer Science, 7, 625 (1963).
- 6) Mostovoy, S. and Ripling, E. J., Journal of Applied Polymer Science, 15, 661 (1971).
- 7) Bascom, W.D., Cottingham, R.L., Jones, R.L. and Peyser, P., Journal of Applied Polymer Science, 19, 2545 (1975).
- 8) Bascom, W.D. and Cottingham, R.L., Journal of Adhesion, 7, 333 (1976).
- 9) Kinloch, A. J. and Shaw, S. J., Journal of Adhesion, 12, 59 (1981).
- 10) Varias, A. G., Suo, Z., Shih, C. F., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 39(7), 963 (1991).
- 11) Hsia, K. J., Suo, Z. and Yang, W., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 42(6), 877 (1994).
- 12) Tvergaard, V. and Hutchinson, J., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 44(5), 789 (1996).
- 13) Lee, D., Ikeda, T., Miyazaki, N. and Choi, N. S., Journal of Materials Science Letters, 22, 229 (2003).
- 14) Lee, D., Ikeda, T., Miyazaki, N. and Choi, N. S., Trans. ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, 126, 14 (2004).
- 15) 池田徹, 李徳甫, 宮崎則幸, 日本接着学会誌, 42(3), 97 (2006).
- 16) Bucknall, C.B., Karpodinis, A. and Zhang, X.C., Journal of Materials Sciences, 29, 3377 (1994).