衝撃荷重下における構造用エポキシ系接着剤を用いた 接着継手の有限要素応力解析*

永井利正^{*1}, 岩本 剛^{*2}, 沢 俊行^{*3}
倉本英哲^{*4}, 上杉憲雄^{*5}

A Finite Element Stress Analysis of Adhesive Joint Bonded by Epoxy Resin Structural Adhesive under Impact Loading

Toshimasa NAGAI, Takeshi IWAMOTO^{*6}, Toshiyuki SAWA,
Hideaki KURAMOTO and Norio UESUGI

^{*6} Graduate School of Engineering, Hiroshima University,
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

In order to study a strength of adhesive joint, a joint strength of specimen, which consists of steel pin and color bonded by structural adhesive used in the previous study, is experimentally evaluated in a wide range of deformation rate by using an INSTRON-type material testing machine and a split Hopkinson pressure bar apparatus. A finite element simulation with the previously-proposed three dimensional constitutive model is performed under an impact loading condition. It is shown that the FE simulation used here is valid for a prediction of the impact deformation behavior of the adhesively bonded joint by comparing with the experimental result. A stress distribution of the adhesive layer in the pin-color specimen under an impact shear load is numerically studied. Finally, effects of the mechanical properties of the adhesive and the adhesive thickness on the stress distribution is clarified.

Key Words: Adhesive Joints, Impact Strength, Constitutive Equation, Inelasticity, Finite Element Method

はじめに

近年の高分子科学の発展に伴い、接着接合が機械構造物や電子デバイスなど広範囲に渡り適用範囲を拡大しており⁽¹⁾、接着剤の耐環境性、耐衝撃性に対する信頼性の精密な評価が重要となってきた。特に、自動車等の輸送機器においては、軽量化および炭素排出量低下を目指して、接着接合の使用が積極的に検討されている。例えば、シャフト-ベアリング間や自動車のクロスメンバーの接合において、焼きばめ接合等の機械的接合法に加えて、接着-焼きばめ接合⁽²⁾等の接着接合を併用するものが存在する。最近では、すきまばめ接合が可能な高機能構造用接着剤も開発され、実用化されつつある。以上のような場合、接着接合部

には、衝撃的な荷重が作用することが十分に考えられるため、衝撃負荷作用下における接着継手内の応力を詳細に調査することは重要である^{(3)~(5)}。

このような状況を踏まえ、前報^{(6),(7)}では、エポキシ樹脂系構造用接着剤を単体で硬化させ、バルク材試験片を作成し、様々なひずみ速度における圧縮応力-ひずみ曲線を、インストロン型材料試験機及び代表的な衝撃試験法の一つである分割式ホプキンソン棒法⁽⁸⁾を用いて調査し、降伏応力-ひずみ速度関係を明らかにした。得られた実験結果を元に、高ひずみ速度域において、降伏応力が二次緩和に支配されると仮定し、ねじり自由度の存在を二次緩和の機構として考え、塑性せん断ひずみ速度を定式化し、実験結果と比較することによって妥当性を示した。また、弾性要素を直列に配置した4要素モデルを基礎として三次元速度形多軸構成式を定式化した⁽⁷⁾。定式化した構成式をABAQUS/Explicitに実装し、有限要素シミュレーションを行い、実験結果と比較することによって妥当性を示した。併せて、提案したモデルの汎用性を検討

* 原稿受付 2009年2月23日。

^{*1} 正員、三菱重工(株)神戸造船所(☎652-8585 神戸市兵庫区和田崎町1-1-1)。

^{*2} 正員、広島大学大学院工学研究科機械システム工学専攻(☎739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。

^{*3} 正員、フェロー、広島大学大学院工学研究科機械システム工学専攻。

^{*4} (財)広島市産業振興センター技術振興部広島市工業技術センター(☎730-0052 広島市中区千田町3-8-24)。

^{*5} 正員、(財)広島市産業振興センター技術振興部広島市工業技術センター。

E-mail: iwamoto@mec.hiroshima-u.ac.jp

するため、CTBN 変性エポキシ系構造用接着剤についても実験を行い、提案したモデルがこの種の接着剤についても適用可能であることを示した。

接着剤の静的な接着強度の試験法としては、既に ASTM や JIS⁽⁹⁾ において種々の荷重様式（引張、引張－せん断、ねじり等）に対して詳細な規定が存在するが、衝撃荷重下における接着強度の試験法については、シャルピー衝撃試験機による試験法（ASTM D950 - 94）のみが存在する。なお、この試験法は、接着剤に作用する応力波の影響を全く考慮しておらず、精密な衝撃せん断強度の評価法とはいえない。これを受け、先駆的な研究として、Yokoyama と Shimizu⁽³⁾ は、ピンおよびカラーから構成される接着継手試験片を用い、分割式ホプキンソン棒法⁽⁸⁾により、衝撃負荷下におけるせん断強度を求めた。Bezemer⁽¹⁰⁾らは、Yokoyama と Shimizu⁽³⁾ と同様な円柱及び円筒試験片から構成される接着継手に関して、落錘装置及び空気銃から成る衝撃試験装置を用いて 3 種類の構造用接着剤の衝撃せん断強度の測定を行った。その結果、ポリウレタン系接着剤及びエポキシ系接着剤については、負荷速度の上昇と共にせん断接着強度が上昇することを示した。同時に、衝撃吸収エネルギーが最大となる接着層厚さが存在することも指摘している。このように、接着接合部の衝撃せん断強度に関しては、上記の有益な実験的研究や弾性理論に基づく解析的研究が幾つか挙げられるが、接着層の弾粘塑性変形を考慮した数値解析により、接合部の応力分布を検討したものは見られない。

そこで本研究では、前報^{(6),(7)}で用いた 2 種の構造用接着剤により接合されたピン－カラー接着継手に関して、インストロン型材料試験機を用いた準静的せん断試験及び Yokoyama と Shimizu⁽³⁾ が提案している分割式ホプキンソン棒衝撃試験機を用いた衝撃せん断試験を行い、準静的及び衝撃せん断強度を実験的に調査する。また、前報⁽⁷⁾で提案した弾粘塑性構成式を導入した有限要素法により、衝撃せん断試験の数値シミュレーションを行い、実験結果と比較することによって解析の妥当性を示す。衝撃せん断荷重を受けるピン－カラー接着継手内の継手破断時刻における応力分布を明らかにし、接着剤の機械的性質や継手の寸法形状が界面応力分布に及ぼす影響を調査する。

1. 三次元構成式定式化^{(6),(7)}

ガラス状高分子材の塑性流れに対する抵抗は物理的に異なる二つの抵抗、すなわち分子鎖セグメントの回転に対する分子間の抵抗と分子配向の抵抗に分けられ

ると仮定する⁽¹¹⁾。本研究では、直列に配置した弾性要素、各緩和過程における分子間抵抗を非線形ダッシュポットおよび 8 鎖モデルによる分子配向抵抗を表す非線形 Langevin ばね要素⁽¹²⁾を並列に配置した 4 要素モデルを用いた。

1.1 分子間抵抗 前報⁽⁶⁾では、二次緩和における分子間抵抗が、折れ曲がった分子鎖がねじり変形を受けることによって生じると考え、塑性せん断ひずみ速度とせん断応力の関係を定式化した。また、一次緩和過程においては、Boyce ら⁽¹¹⁾のモデルが適用できるとすれば、一次および二次緩和過程においてそれぞれ以下のように表すことができる。

$$\dot{\gamma}_{\alpha}^p = \dot{\gamma}_{\alpha 0} \exp \left\{ -\frac{A_{\alpha} s_{\alpha 0}}{T} \left[1 - \left(\frac{\tau}{\bar{s}_{\alpha}} \right)^{5/6} \right] \right\} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_{\beta}^p = \dot{\gamma}_{\beta 0} \exp \left\{ -\frac{A_{\beta} s_{\beta 0}}{T} \left(1 - \frac{\tau_{\beta}}{\bar{s}_{\beta}} - \frac{s_{\beta 1}}{\tau_{\beta}} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\bar{s}_{\alpha} = s_{\alpha} + \alpha_{\alpha} p, \quad \dot{s}_{\alpha} = h_{\alpha} \left(1 - \frac{s_{\alpha}}{s_{ss,\alpha}} \right) \dot{\gamma}_{\alpha}^p \quad (3)$$

$$\bar{s}_{\beta} = s_{\beta} + \alpha_{\beta} p, \quad \dot{s}_{\beta} = h_{\beta} \left(1 - \frac{s_{\beta}}{s_{ss,\beta}} \right) \dot{\gamma}_{\beta}^p \quad (4)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_{\alpha 0}$, $\dot{\gamma}_{\beta 0}$, A_{α} , A_{β} , $s_{\beta 0}$, $s_{\beta 1}$ は定数, $s_{\alpha 0} = 0.077G / (1 - \nu)$, T は絶対温度である。 α_{α} , α_{β} は圧力係数, h_{α} , h_{β} は正の定数, $s_{ss,\alpha}$ ($< s_{\alpha 0}$), $s_{ss,\beta}$ ($< s_{\beta 0}$) は安定状態に達する際の s_{α} , s_{β} の値である。

1.2 配向抵抗⁽¹²⁾ 塑性変形が続行すると、分子鎖は塑性ストレッチ方向に配向し、分子鎖によって構成された網目構造内に背応力を発生させ、さらなる変形に対する抵抗となる。分子鎖の両端が各接合点で固定されている 8 鎖ばねモデルを用いた場合、背応力の主成分 b_i は次のように表される。

$$b_i = \frac{1}{3} C^R \sqrt{N} \frac{V_i^{p^2} - \lambda_c^2}{\lambda_c^2} L^{-1} \left(\frac{\lambda_c}{\sqrt{N}} \right) \quad (5)$$

$$\lambda_c = \frac{1}{3} \left(\lambda_1^{p^2} + \lambda_2^{p^2} + \lambda_3^{p^2} \right) \quad (6)$$

ここで、 $C^R = n k_B T$, n は単位体積あたりの鎖数, k_B は Boltzman 定数, N は 1 本の鎖当たりの節数で、 $\sqrt{N}$ は分子鎖の限界ストレッチを表す。 λ_i^p は主塑性ストレッチ, $L(x)$ は x についての Langevin 関数である。

1.3 速度形構成式 Boyce ら⁽¹¹⁾に従って、塑性ひずみ速度を各緩和過程において相当せん断ひずみ速度と背応力テンソルを用いて表現し、全ひずみ速度 D_{ij} が一般化 Hooke の法則に従う直列配置された熱弾性成分と塑性成分の和で表し、塑性成分を表す 3 要素が並列に配置されているモデルに基づけば、次の弾

粘塑性構成式が定式化される.

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_{ij} &= C_{ijkl}^e (D_{kl} - D_{kl}^p) \\ &= C_{ijkl}^e D_{kl} - C_{ijkl}^e \dot{\gamma}_\alpha^p \frac{\sigma_{kl}^{\alpha'}}{\sqrt{2}\tau^\alpha} - B_{ij}^e \dot{T}\end{aligned}\quad (7)$$

$$\sigma_{ij}^\alpha = \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^\beta - B_{ij}, \quad \sigma_{ij}^\beta = \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^\alpha - B_{ij}, \quad (8)$$

$$\tau^\alpha = \sqrt{\frac{\sigma_{ij}^{\alpha'} \sigma_{ij}^{\alpha'}}{2}}, \quad \tau^\beta = \sqrt{\frac{\sigma_{ij}^{\beta'} \sigma_{ij}^{\beta'}}{2}} \quad (9)$$

ここで, σ_{ij} は Cauchy 応力, $\dot{\sigma}_{ij}$ は Cauchy 応力の Green-Naghdi 速度, C_{ijkl}^e は弾性係数テンソル, $\sigma_{ij}^{\alpha'}$, $\sigma_{ij}^{\beta'}$ はそれぞれ各緩和過程における駆動応力 σ_{ij}^α , σ_{ij}^β の偏差成分を表す.

また, 上式中, σ_{ij}^α , σ_{ij}^β が未知数となるが, 以下の連立方程式を解くことによって求めることが可能となる.

$$\left(1 + \frac{\dot{\gamma}_\alpha^p \tau^\beta}{\dot{\gamma}_\beta^p \tau^\alpha}\right) \sigma_{ij}^{\alpha'} = \sigma_{ij}' - B_{ij}' \quad (10)$$

$$\left(1 + \frac{\dot{\gamma}_\beta^p \tau^\alpha}{\dot{\gamma}_\alpha^p \tau^\beta}\right) \sigma_{ij}^{\beta'} = \sigma_{ij}' - B_{ij}' \quad (11)$$

しかしながら実際には, 上式は式 (1), (2), (8) および (9) も含めると, σ_{ij}^α に関して非線形連立方程式となることから, Newton-Raphson 法を用いて数値的に求める. なお, 前報では, 上述の構成式が, 以下で述べる 2 種類の接着剤単体の応力 - ひずみ曲線を首尾よく表現できることを示しており⁽⁷⁾, 式中のパラメータについては, 前報⁽⁷⁾に掲載した値を用いる.

2. 実験方法

2.1 試験片 図 1 に接着継手の準静的 ~ 衝撃せん断試験に用いるピン及びカラー試験片を示す. 試験片形状ならびに寸法は, Yokoyama と Shimizu⁽³⁾ が行った試験の通りであり, 試験片の材質は高クロム炭素軸受鋼 SUJ2 (JIS) を用いる. ピン及びカラー試験片の加工精度に関しては, 最小寸法表示が $1 \mu\text{m}$ であるデジタルマイクロメータを用いて, 目的寸法に対する誤差が $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度であることを確認している.

本研究では, ピン及びカラー試験片の接着に, 前報^{(6),(7)}における研究対象であった 2 液混合型熱硬化性エポキシ系構造用接着剤 (住友 3M 製 Scotch-Weld 1838), ならびに 2 液混合型 CTBN 変性エポキシ系構造用接着剤 (住友 3M 製 DP-460) を用いた. これらの接着剤を個別に定量混合した後, シリンジに吐出し, 脱泡機 (THINKY 製, AR-100) を用いてシリンジごと脱泡した. プタノンを用いて脱脂洗浄後, 十分乾燥させたピンとカラーの接着面に塗布し, 治具を用いてそれらを接合した. 次に, 真空状態に設定したデ

Fig. 1 Pin and color specimen for impact shear experiment of adhesively joint strength

シケータ内に治具ごと置いた状態で, 室温において 24 時間完全硬化させた. さらに, 前報^{(6),(7)}に記した条件にてポストキュアリングを行った. ここで, 接着層厚さを変化させるため, 図中の d を 10.4, 10.6, 10.8 mm と変化させたピンを用意し, 接着接合を行った.

2.2 準静的および衝撃せん断試験 前報⁽⁶⁾同様, 準静的圧縮試験 (公称ひずみ速度 $10^{-4} \sim 1 \text{ s}^{-1}$) は, インストロン型材料試験機 (オートグラフ AG-1 250kN, 島津製作所製) により, 衝撃圧縮試験 (ひずみ速度 10^3 s^{-1}) は, 分割式ホプキンソン棒衝撃試験機を用いて室温で行った. 試験片の両端面での摩擦拘束の影響を極力少なくするために, 市販の黒鉛グリス, 二硫化モリブデンを用いて, ピン両端面, カラーの応力棒接触部に塗布した.

準静的試験において, 接着接合したピン - カラー試験片を中ぐり穴 (直径 11 mm) を有するダイ上に設置し, 試験機を用いて一定のクロスヘッド速度でピン先端に圧縮荷重を与えることによって接着層にせん断荷重を作用させる. JIS 規格⁽⁹⁾にある試験法とは, カラーの厚さが異なることから, クロスヘッド速度 5 mm/min で試験を行う.

図 2 に, 衝撃せん断試験に用いる改良型分割式ホプキンソン棒衝撃試験機の概略を示す⁽³⁾. 本試験の概要は, Yokoyama と Shimizu⁽³⁾ と同様である. 応力棒の材質は, ピン及びカラー試験片との機械的インピーダンスを可能な限り小さくするために同一材料である高クロム炭素軸受鋼 SUJ2 (JIS) を用いる. 図に示すように出力棒は, 左端面に直径 11.5 mm, 深さ 20 mm の穴を有し, 入力棒端面との間にピン - カラー試験片を挟み, 衝撃試験を行う. 応力棒の両端に作用する荷重 P 及び変位速度 $\dot{\delta}$ およびせん断強度の算出には, 一次元弾性伝播理論に基づいた Yokoyama と Shimizu⁽³⁾ の方法を用いた.

衝撃せん断試験後、走査型電子顕微鏡（日立製作所製、S-3000H2）を用いて接着層の破面観察を行った。この際、観察中のチャージアップを防ぐため、SEM 観察前に接着層破面に金蒸着を十分に施した。

Fig. 2 Schematic illustration of the split Hopkinson bar apparatus used here

3. 解析方法

解析に用いた有限要素コードは ABAQUS/Explicit Ver. 6.8 であり、上記構成式を、ABAQUS/Explicit がもつカスタマイズ機能の 1 つであるユーザーサブルーチン VUMAT に組み込み、解析を行った。図 3 に示すように、解析モデルは前述の実験に用いたピン・カラー接着継手試験片と同一寸法ならびに形状をもち、全体を解析対象とした。この解析対象を軸対称 6 節点三角形低減積分要素を用いて要素分割を行った。この際、総要素数 5592、総節点数 7912 となり、最小メッシュサイズは $2\text{ }\mu\text{m}$ である。解析条件はピン左端面に試験時と同じ変位速度、対称部分に対称境界条件を与え、カラー右端を z 方向に固定、 r 方向はせん断自由とし、環境温度は 296 K に設定した。また、ピン及びカラーは、実験で用いた軸受鋼 SUJ2 を仮定し、縦弾性係数 $E = 209\text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、密度 $\rho = 7843\text{ kg/m}^3$ をもつ線形弾性体、接着層は上述したモデルで表現可能な接着剤 DP-460 の場合のみとし、解析を行った。なお、与えた変位速度 $\dot{\delta}$ は、Hopkinson 棒法衝撃試験装置の応力棒のひずみ波形を用いて、その時系列を与えた。

また、接着継手端部における応力分布に及ぼす接着剤の力学物性等の影響を詳細に検討するため、CTBN 変性接着剤 DP-460 の試験で求めた値を基準として、接着層の縦弾性係数を 0.5 及び 2 倍、ひずみ軟化勾配の大きさを決定するパラメータである式 (4) 中の h_β を 2 及び 3 倍、二次緩和に起因する衝撃変形時の降伏応力の増大を抑制するパラメータである式 (2) 中の $\dot{\gamma}_{\beta 0}$ を 2 及び 3 倍、接着層厚さを 0.1, 0.15, 0.2 及び 0.3 mm と変化させて解析を行った。

Fig. 3 Finite element model of pin and color specimen for evaluating adhesive joint strength

4. 実験結果

図 4 に準静的および衝撃せん断試験より得られたせん断応力速度 - せん断接着強度を示す。ここで、測定されたせん断強度を破壊開始時刻で除した値をせん断応力速度 $[\text{MPa/s}]$ と定義する。これより、準静的せん断試験の場合に比して衝撃せん断試験の場合、せん断強度がおおよそ 2 倍に増加していることがわかる。

Fig. 4 Effect of stress rate on shear strength of adhesive joints subjected to quasi-static to impact shear loadings

図 5 に準静的および衝撃せん断試験より得られたせん断強度 - 接着層厚さを示す。図中、平均値を点で、標準偏差をエラーバーで表している。これより、準静的せん断強度に関しては、用いた接着剤に関わらず接

着層厚さの増加に伴いせん断強度が低下することがわかる。また、衝撃せん断強度に関しては、接着層厚さの増加に伴いせん断強度は一旦増加するが、さらに接着層厚さが増加した場合、強度が低下する傾向にあることがわかる。

Fig. 5 Effect of adhesive thickness on shear strength of adhesive joints subjected to quasi-static to impact shear loadings

図6は、衝撃せん断試験後のSEM観察により得られた、衝撃せん断試験時に破壊が最初に生じると考えられる接着界面端部近傍のピンに残留した接着層の代表的な破面写真を示す。この図上部に見られる横縞模様

Fig. 6 SEM observation of fracture surface around the edge of adhesive interfaces

様は、カラー上にある接着面のツールマークであると考えられ、界面破壊が生じたことがわかる。しかしながら、図の下方では、界面破壊とは異なった様相の破面が表れており、これは凝集破壊に伴って表れたものであると考えられる。この結果は、衝撃荷重下におい

て、界面破壊と凝集破壊の組み合わせである混合破壊の発生を示唆しており、過去の報告^{(3),(4)}の結果と一致する。

5. 接着層内応力分布に及ぼす接着剤の物性ならびに幾何学的特性の影響

図7に衝撃せん断試験及び有限要素解析より得られた試験片両端に作用する圧縮荷重の時系列変化を示す。この図から、有限要素解析結果と衝撃せん断試験結果はよく一致しており、本解析が妥当であることがわかる。

Fig. 7 Comparison of applied force on adhesive joint between obtained from impact shear experiment and finite element analysis

接着層の縦弾性係数の影響を検討するため、図8に位置 z を接着層長手方向長さ l で無次元化した座標 - 接着層厚さ方向中央部におけるせん断応力成分 τ_{rz} を平均せん断応力 τ_m で無次元化したせん断応力の関係を接着層の縦弾性係数 E_a をパラメータに示す。図中、縦弾性係数は被着体である SUJ2 の縦弾性係数 E_s との比 E_s / E_a で示し、図7に示した有限要素解析により得られた荷重のピーク値を、接着層断面積で除した値を τ_m と定義している。なお、接着部端面に生じる特異応力が接着継手の破壊に大きく影響を及ぼすという立場⁽²⁾をとるため、この図以降、せん断応力 τ_{rz} が最大となる右端部について、横軸は右端部近傍を拡大して示すこととする。この図に示す通り、 τ_{rz} は接着部端面でほぼ0となり、内部向かうとともに増加し、最大応力値を示すような分布を示している。さらに中心に向かうとともに、 τ_{rz} は減少し、ほぼ一定値に近づいていることがわかる。この最大値に注目す

Fig. 8 Effects of Young's modulus on shear stress distributions around the edge of the adhesive interfaces

ると、この図より、接着層の縦弾性係数が小さくなるとともに、接着界面端部に作用する最大の τ_{rz} は減少することがわかる。

次に、式 (4) 中にある接着層の降伏直後におけるひずみ軟化勾配 h_β が継手破断時の接着界面におけるせん断応力分布に及ぼす影響を検討するため、図 9 に無次元化座標 z/ℓ - 無次元化せん断応力 τ_{rz}/τ_m の関係を h_β をパラメータに示す。この図より、 h_β が大きくなるとともに、接着界面端部に作用する τ_{rz} が減少することがわかる。

また、接着層の二次緩和に伴う降伏応力の増大現象の影響を検討するため、図 10 に無次元化座標 z/ℓ - 無次元化せん断応力 τ_{rz}/τ_m の関係を、この現象を司る $\dot{\gamma}_{\beta 0}$ をパラメータに示す。この図より、 $\dot{\gamma}_{\beta 0}$ の増加とともに、 τ_{rz} が減少することがわかる。すなわち、二次緩和における衝撃変形時の降伏応力の増大を抑制することができれば、接着界面端部に作用するせん断応力を減少させることができることが示唆される。以上より、接着剤の特性として、縦弾性係数が可能な限り小さく、二次緩和の影響が小さく、すなわち分子鎖のねじり変形が発生しやすい、あるいは分子鎖の曲げによる変形が発生しやすい特性を持ち、ひずみ軟化発生の程度が可能な限り大きい接着剤を用いると、継手の衝撃せん断強度が増加することが示唆される。一般に、材料特性が変化すれば付随する強度も変化する。しかしながら、前述のように特異応力を減少させる材料特性の傾向をつかむことが肝要と考えるのが本研究

Fig. 9 Effects of h_β in Eq. (4) on shear stress distributions around the edge of the adhesive interfaces

Fig. 10 Effects of $\dot{\gamma}_{\beta 0}$ in Eq. (2) on shear stress distributions around the edge of the adhesive interfaces

の立場であり、適切な材料設計への指針が得られるものとする。したがって、このような材料特性の変化が強度に及ぼす影響を検討する必要があり、今後の検討課題とする。

さらに、接着層厚さの影響を検討するため、図 11 に無次元化座標 z/ℓ - 無次元化せん断応力 τ_{rz}/τ_m の関係を、接着層厚さをパラメータに示す。この図よ

Fig. 11 Effects of adhesive thickness on shear stress distributions around the edge of the adhesive interfaces

り、接着層厚さの増大とともに、接着層端部に作用するせん断応力は一旦減少する。しかしながら、さらに接着層厚さが増大すると、再び接着界面端部に作用するせん断応力は増加している。このことは、Bezemer⁽¹⁰⁾や Yokoyama と Shimizu⁽³⁾ が示した、衝撃エネルギー吸収特性が最大となる接着層厚さが存在するという実験結果、ならびに図 5 で示した本研究の実験結果と傾向が一致している。

6. お わ り に

本研究では、ピン及びカラーから構成される接着継手試験片を用い、準静的－衝撃せん断試験を行い、幅広い変形速度において 2 種の構造用接着剤のせん断強度を実験的に調査した。また、衝撃せん断試験後の接着層破面に関して走査型電子顕微鏡を用いた破面観察を行い、継手の破断は接着界面における界面破壊により開始し、き裂進展後間もなく接着層内へ亀裂が進展し凝集破壊が支配的となることを示した。前報で提案した理論に基づく弾粘塑性構成式を導入した有限要素応力解析を行い、接着層の力学物性や接着層厚さが接着界面応力分布に及ぼす影響を示した。

謝 辞

本研究を遂行するに当たって、東京工業大学精密工学研究所准教授 佐藤 千明 博士に有益な実験デー

タをご提供頂いた。なお、ABAQUS の学術ライセンス版によって解析を行った。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Fay, P. A., *Adhesive bonding* (ed. Adams, R. D.), (2005), p. 2-18, Woodhead Publishing Ltd.
- (2) Yoneno, M., Sawa, T., Shimotakahara, K., Motegi, Y., Axisymmetric stress analysis and strength of bonded shrink-fitted joints of solid shafts subjected to push-off forces, *Transactions of the JSME Series A*, Vol. 63, No. 606 (1997), pp. 328-122.
- (3) Yokoyama, T., Shimizu, H., Evaluation of impact shear strength of adhesive joints with the split Hopkinson bar, *JSME International Journal Series A*, Vol. 41, No. 4, (1998), pp. 503-509.
- (4) Sato, C., Ikegami, K., Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 20, No. 1 (2000), pp. 17-25.
- (5) Sato, C., Ikegami, K., Strength of adhesively-bonded butt joints of tubes subjected to combined high-rate loads, *The Journal of Adhesion*, Vol. 7, No. 1 & 2 (1999), pp. 57-73.
- (6) Iwamoto, T., Nagai, T., Sawa, T., Kuramoto, H., Uesugi, N., On strain rate sensitivity of deformation behavior of bulk epoxy resin structural adhesive (Part I: Formulation of plastic shear strain rate), *Transactions of the JSME Series A*, (2009), submitted.
- (7) Iwamoto, T., Nagai, T., Sawa, T., Kuramoto, H., Uesugi, N., On strain rate sensitivity of deformation behavior of bulk epoxy resin structural adhesive (Part II: Three-dimensional constitutive formulation and finite element simulation), *Transactions of the JSME Series A*, (2009), submitted.
- (8) Kolsky, H., An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, *Proceedings of the Physical Society*, Vol. B62, No. 2 (1949), pp. 676-700.
- (9) Japan Standards Association ed., Adhesion (in Japanese), *JIS Handbook*, Vol. 29, (1995).
- (10) Bezemer, A. A., Guyt, C. B., Vlot, A., New impact specimen for adhesives: optimization of high-speed-loaded adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 18, No. 4 & 5 (1998), pp. 255-260.
- (11) Boyce, M. C., Parks, D. M., Argon, A. S., Inelastic deformation of glassy polymers. Part I: Rate dependent constitutive model, *Mechanics of Materials*, Vol. 7, No. 1 (1988), pp. 15-33.
- (12) Arruda, E. M., Boyce, M. C., A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 41, No. 2 (1993), pp. 389-412.