< 綜 説 >

(受理: 平成 12 年 12 月 4 日)

単純重ね合わせ継手強度に及ぼすフィレット の効果とそのメカニズム Effect of Fillets on the Tensile Shear Strength of Adhesively Bonded Joints

藤井 透*・大窪 和也*・松井 隆司**
Toru FUJII, Kazuya OKUBO and Takashi MATSUI

1. 緒 言

接着継手・構造物の破壊は接着剤層中のき裂の成長によりもたらされる。そのため、き裂の発生は継手の強度に強く関わる。材料および形状の不連続性から、接着継手・構造物には応力特異性が現われる。この応力が特異となる地点からき裂が発生しやすくなる。そのため、例えば、重ね合わせ接着継手の強度を考えると、ラップ端の接着剤層の幾何学的形状が問題となる。

一般に、ラップ端では接着剤がはみ出し、フィレットが形成される。このフィレットにより単純重ね合わせ継手(単に、SLJと呼ぶことがある)の強度が増すとの報告がある¹⁾。Adams らは、フィレットにより SLJ の接合端部の応力集中が緩和されることを示した²⁾。また、M. Y. Tsai らは、複合材料単純重ね合わせ継手のラップ端に生じるはく離応力(ひずみ)およびせん断応力(ひずみ)集中はフィレットの導入により大きく減少することを明らかにし、この応力の減少は、フィレットがせん断応力のある程度伝えるためであると説明している³⁾。有限要素法解析により、T. P. Lang らは重ね合わせ継手の最大応力は、フィレットの存在だけでなくフィレットの形状とサイズに依存していることを示した⁴⁾。杉林らも、フィレットを付けることにより、接着層内の主応

藤 井 透

略歴: 1948年生まれ。同志社大学工学研究科修了。工学博士。同志社大学工学部教授。防衛庁第4研究所(1972~82年)を経て現職。主な研究テーマは、(1)エポキシ接着剤の強度に及ぼす微量水分の影響、(2)Vベルトを用いたCVTの摩擦伝動機構、など。日本接着学会、日本材料学会、日本機械学会、日本複合材料学会、自動車技術会、他に所属。

大 窪 和 也

略歴: 1964年生まれ。同志社大学工学研究科修了。博士(工学)。同志社大学工学部専任講師。ニッタ株式会社開発本部(1992~98年)を経て現職。主な研究テーマは、(1)極低温環境を想定した繊維強化高分子複合材料(FRP)の疲労損傷メカニズムの解明、(2)カーボン繊維強化複合材料(FRP)の水分浸入プロセスと疲労損傷メカニズムの解明など。日本接着学会、日本材料学会、日本機械学会、日本複合材料学会、自動車技術会、他に所属。

松 井 隆 司

略歴: 1974年生まれ。同志社大学工学研究科機械工学専攻修士(前期)課程修了。研究当時(1997~99年)、同構造工学研究室所属。接着構造物の破壊やき裂進展などを、弾塑性を含めたFEM(有限要素法)や応力特異場を考慮した実測実験などにより研究。現シャープ株式会社勤務。

*同志社大学工学部
京田辺市多々羅都谷 1-3 〒610-0321
Department of Mechanical Engineering,
Doshisha University
1-3, Kyo-Tanabe, Kyoto, 610-0321 Japan

**同志社大学大学院工学研究科(現シャープ(株))
Graduate Student of Doshisha University, Fujii Lab.,
(Currently SHARP co.)
1-3, Kyo-Tanabe, Kyoto, 610-0321 Japan

力が平滑化し、バット継手の最大応力の値は低下すると報告している⁵⁾。しかし、これらの研究では、有限要素法による接着剤層の弾塑性応力解析のみであったり、数値解析による接合端部の応力分布と強度を比較するのみであり、フィレットによる強度向上のメカニズムの詳細は明らかにされていない。特に、き裂発生及び進展を含む力学的特性の見地から、フィレットの効果を適切に説明していない。

本稿では、著者らの先の研究（フィレットを付与した SLJ とフィレットを付与させない SLJ の引張りせん断試験結果）⁶⁾ に基づき、単純重ね合わせ継手の、フィレットによる引張りせん断強度向上のメカニズムを明らかにする。

2. 試験片及び実験方法

2.1 試験片

強度試験には図 1 に示す単純重ね合わせ継手 (SLJ) を用いた (長さ 100, 幅 25, 厚さ 3, ラップ長さ 12.5 mm)。引張りせん断試験中、被着体が降伏しないよう、同材料には炭素工具鋼鋼材 SK5 を用いた。接着継手強度には被着体の表面処理が大きく影響する。ここでは、以下の 3 種類の表面処理を別個に施した。

- ・処理 1: 被着体の接着面は機械研磨した後、アセトンにより脱脂する。[未処理と呼ぶ]
- ・処理 2: 被着体の接着面は機械研磨した後、サンドブラストした。サンドブラスト後、接着面をアセトンにより洗浄する。[サンドブラッシング処理]

- ・処理 3: 「処理 1」後、重クロム酸ソーダ／濃硫酸／純水を 20/50/150 (重量比) の割合で混合した溶液 (71~77°C) に 10 分間浸した後、水洗浄する。[重クロム酸処理]

接着剤にはエポキシ樹脂 (Shell Epikote 828) をベースとする未変性及びゴム変性によりじん性を高めた (CNBR 体積含有率 5.5%) 変性接着剤を用いた。実験室環境下、室温で接着・硬化させた後 (3 日間)、電気炉中で 80°C、一時間のアフターキュアを行い試験片を製作した。

接着面に働く圧力を一定にして、接着剤層厚さを概ね 0.3mm に制御した。端面に半径 3.3mm の丸棒を押し当て、フィレット側面形状 (横断面) を図に示すような円弧形に整えた。フィレットを有さない試験片では、端面にはみ出た接着剤を硬化直前に鋭いカッターで削り取った。

2.2 実験方法

静的引張りせん断試験は、変位制御 (引張り速度 0.5mm/min) のもと、実験室環境下で行った。本実験では、き裂が発生するときの荷重 (P_{pop-in} : Pop-in 荷重と呼ぶ) を調べるため、AE センサを被着体に取り付け、AE の発生を測定した。被着体が未変性エポキシ接着剤の試験片についてのみ Pop-in 荷重を計測した。U. P. Singh らによれば、Pop-in は、突然現れる小さなき裂の進展量 (0.2~1mm) であり Pop-in き裂発生は接着継手の破壊の前駆現象として重要であると報告している⁷⁾。ここで破断強度 τ_{max} 及び τ_{pop-in} は破断荷重 P_{max} 及び P_{pop-in} を接着面積 A (ラップ長さ×幅) で除

図 1 Configuration and dimensions of the single lap joint specimens
(a) Dimensions
(b) Configuration of lap ends

することにより、次式のように与えられる。

$$\tau_{max} = P_{max}/A \quad \tau_{Pop-in} = P_{Pop-in}/A \quad (2-1)$$

引張りせん断試験はすべて接着してから一週間後（アフターキュア後、4日後）に行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 接着継手の強度に及ぼすフィレットの影響

図2に単軸引張り試験から得られた未変性及びCNBR変性エポキシ系接着剤の応力-ひずみ（S-S）特性を示す。試験片は接着剤を板状の型に流し込み、硬化した後切り出して製作した。単軸引張り試験は荷重点変位速度0.5mm/minで行っている。どちらの接着剤においてもほぼ同じ静的破断強度が得られた。しかし、破断ひずみは、CNBR変性することにより増加した。S-S曲線か

図2 Stress-Strain curves of bulk unmodified and CNBR modified epoxy adhesives.

図3 Effect of fillets on ultimate tensile shear strength of SLJ.

ら、CNBR変性を施すことによりエポキシ接着剤は一層顕著な弾塑性挙動を示すことがわかる。

図3に未変性及びCNBR変性エポキシ系接着剤を使用した継手（いずれもサンドブラस्टィング処理）について、フィレットを有する継手（以下、SLJ_{wf}と呼ぶ）と無い継手（SLJ_{wof}と呼ぶ）の引張りせん断強度を示す。図より、いずれの接着剤でもフィレットが存在することにより継手の破断強度が向上することがわかる。フィレットが無ければ、未変性接着剤のSLJ_{wf}の強度はCNBR変性接着剤のそれにほぼ等しい。しかし、フィレットが有ればCNBR変性接着剤に比べ未変性接着剤を用いた方が継手の破断強度は高くなっている。これより、脆性的な接着剤の方がフィレットの効果は大きいようである[†]。

写真1に各試験片の破面を示す。フィレットがない場合、界面破壊と凝集破壊が混在する混合破壊、フィレットがある場合、全面凝集破壊を示した。SLJ_{wof}ではラップ端部から約1~2mm界面き裂が入りその後接着層をき裂が進行すると考えられる。SLJ_{wf}では、接着層からき裂が発生しそのまま凝集破壊が起こると考えられる。接着剤の変性の有無にかかわらず、破壊形態は同様な傾向を示す。フィレットの有無に関わらず、ラップ中心付近では凝集破壊であるのに対し、ラップ端部では、フィレット有無により破壊形態が異なる。このことは、フィレットの効果、強度向上メカニズムを理解するためには、き裂の発生挙動に注目する必要があることを示している。

3.2 き裂発生特性に及ぼすフィレットの影響

SLJ_{wof}及びSLJ_{wf}（サンドブラस्टィング処理）のPop-in強度と破断強度の関係を図4に示す。図におけるデータは未変性エポキシ系接着剤を用いた測定結果である。SLJ_{wof}では、Pop-in強度が増加するとともに、破断強度も向上する。破断強度はPop-in強度に依存していると考えられる。一方、SLJ_{wf}では、Pop-in強度によらず破断強度が一定となっている。SLJ_{wf}の破断強度とPop-in強度の間の相関は小さい。図4中の破線は、SLJ_{wof}及びSLJ_{wf}のPop-in強度の平均値を示す。Pop-in強度のばらつきは大きいもののフィレット付与によりPop-in強度が約20%向上していることがわかる。

3.3 弾性有限要素解析

接着剤層中の応力の観点からフィレットの効果を明らかにするため、Adamsらは重ね合わせ継手のフィレット部を含めた接合端部の応力分布を有限要素法により解

[†]ゴム変性により、モードI荷重下での破壊じん性値は2~3倍増している。

(a) Without fillets (unmodified)

(b) With fillets (unmodified)

(c) Without fillets (CNBR)

(d) With fillets (CNBR)

写真1 Fractured surface of SLJ with and without fillets.

図4 Relationship between pop-in and ultimate tensile shear strengths.

析した²⁾。彼らの解析では、接着剤層の弾塑性変形も考慮している。しかし、当時の計算機の能力に制限され、(今日から見れば)要素分割も粗く、フィレット内の被着体端部における応力特異場を積極的に解析しようとはしていない。我々は接着端部の応力特異場に焦点を当て、単純重ね合わせ継手に引張り荷重が作用するときの接着剤層中の詳細な応力分布を弾性有限要素法解析により求めた。材料ならびに幾何学的非線形は考えていない。解析に用いた材料特性を表1に示す。本解析では、四角形四節点アイソパラメトリック平面ひずみ要素を用いた。接合端部の応力特異性を評価するため、最小要素の長さは $0.5\mu\text{m}$ とした。SLJ_{wof}とSLJ_{wf}、どちらのモデルに

表1 Materials properties of unmodified epoxy adhesive and SK 5 adherend.

	Unmodified epoxy adhesive	SK 5 steel adherend
Young's modulus [GPa]	2.65	206
Poisson's ratio	0.385	0.31
Yield stress [MPa]	18.6	—

おいても、SLJ_{wof}の平均Pop-in荷重に相当する荷重(3000N)を負荷した。図5にSLJ_{wof}とSLJ_{wf}の端部周辺の応力分布図を示す。界面を含む接着剤層中のき裂の発生は最大主応力に支配されると考えられるので、図では最大主応力分布(等応力線図)を示した(図中、界面に沿っての応力分布も示す。SLJ_{wof}ではA点側界面、SLJ_{wf}ではD点側界面とその延長線上の応力値である)。なお、初期き裂の発生前には応力特異点付近で接着剤が塑性変形するので弾塑性解析を行うのが本来ではあるが、応力特異点付近の扱いを単純化するため、ここではフィレットの有無による応力分布の違いを弾性解析で比較した。計算結果より、接着剤層中での最大主応力は、SLJ_{wf}ではD点、SLJ_{wof}ではA点で生じる。SLJ_{wof}の場合、D点でも応力は特異となるが、その程度はA点より遙かに小さい。SLJ_{wf}では、フィレット終点のB点あるいはC点での応力の特異性も小さくなる(A点で応力は特異とならない)。次にそれぞれSLJ_{wof}、SLJ_{wf}の応力特異性の強さを調べた。図6にはそれぞれA、D

図5 Maximum principal stress distribution in the adhesive layer near the lap end.

点からの距離 r (図示参照) と主応力の関係 (両軸とも対数軸) を示す。図より、フィレット付与により明らかに $\sigma_{\text{pr}}-r$ 曲線の傾きが減少し、特異点付近での主応力が顕著に減少することがわかる (言い換えれば、特異応力場の強さが小さくなる)。特異点から $1\mu\text{m}$ の位置での最大主応力の値は、 SLJ_{wof} に比べ SLJ_{wf} は 3.5 倍と高い。従って、 SLJ_{wof} では初期き裂は A 点から発生し、 SLJ_{wf} はでは初期き裂は D 点から生じることがわかる^{††}。また、フィレット付与により Pop-in 強度が増すことも理解される^{†††}。

3.4 被着体表面処理の影響

図7に未処理、サンドブラस्ट処理、重クロム

図6 Max. principal stress variation with respect to the distance from the stress singularity point.

†† 異種材料接合界面での特異応力場の強さの評価に対して、いくつかの理論的アプローチが試みられている^(**)。しかし、著者の知る限り、均一等方性材料中の 180° クラックに対する応力拡大係数 K ほどに整理され、一般的に受け入れられている考え (指標) は現在のところ無い。特に、 SLJ_{wof} の A 点と SLJ_{wf} の D 点のように、二つの幾何学的形状が異なる場合、その応力特異性の強さを単純に比較することは難しい。しかし、図6に見られるように、特異点近傍での二つの主応力分布を調べると、 SLJ_{wof} の応力は常に SLJ_{wf} のそれより大きく、 r に対する傾きも大きい。これより、両者ともそれぞれ A、D 点で同じように応力が特異になるとしても、 SLJ_{wf} の D 点に比べて SLJ_{wof} の A 点の方が同一の荷重に対していわずその強さは強いと見ることができる。その結果、き裂が発生する荷重は、 SLJ_{wf} に比べて SLJ_{wof} の方が低くなると考えることは妥当であろう。

††† フィレット付与による実際の Pop-in 強度の増加は、いずれの接着剤でも精々 20% であり、弾性応力解析結果とは定量的に大きな開きがある。未変性接着剤も含め、初期き裂の発生前に応力特異点付近で接着剤が塑性変形していることもその差の一因であろうと推測される。初期き裂の発生の精度の高い予測は今後の課題である。

図7 Effect of surface treatment of steel adherend on ultimate joint strength.

酸処理された SLJ の破断強度を示す。フィレットが無い場合、接着性が改善された順に若干強度が大きくなっている。また、フィレットを付与した場合には、サンドブラस्ट処理により重クロム酸処理と同程度の破断強度が得られることがわかる。すべての試験片について見れば、表面処理のいかにかわらずフィレット付与により破断強度が向上することがわかる。き裂の発生特性のみでは SLJ の強度特性を説明することができないと考えられる。

3.5 フィレットによる強度向上メカニズム

「なぜフィレットを付着させることにより継手強度が向上するか?」は、以下のように説明できると考えられる。図8(a), (b)に弾塑性解析により評価した塑性域の広がり分布の計算結果を示す。計算では図2に示した未変性接着剤の応力-ひずみ線図を降伏点が18.55MPaとするバイリニアな2本の直線で近似し、Von Misesの降伏条件を仮定した。図では被着材も同時に示す。図中の白い部分が接着剤の塑性域を超える相当応力を発生する部分である^{†††}。 τ/τ_{max} が公称せん断強度に対する計算上の負荷値を示し、図の左上から右下にかけてが負荷の上昇に伴う塑性域の変化を示す。この結果より考えた二つの継手の破壊に至るまでのプロセスを図9(a), (b)に模式的に示す。SLJ_{wof}の場合、き裂は二つの応力特異点(AおよびA'点)の中、応力場の強い方(A点)から生じる。しかし、フィレットがある場合、SLJ_{wof}の高い方の特異応力場は消失し、き裂は残りの特異応力場(A'点)から発生する。このことは、接着剤の種類が異なっても変わらない。未変性接着剤を用いたSLJでは、フィレットが無い場合、負荷の早い時期にA点より微小き裂が発生する。未変性接着剤でもS-S曲線に塑性域が認められる。そのため、き裂が生じる少し前にはA点近傍の接着剤は僅かながらも塑性変形する。しかし、その領域は限られている。また、僅かながらも未変性接着剤のき裂進展特性にR曲線特性があることからき裂はすぐには不安定成長しない。界面での最大主応力も高いことから、き裂は界面に沿って安定成長する。しかし、未変性接着剤ではき裂前縁での接着剤の塑性変形も領域が限られていることから、また、R曲線特性も顕著でないことからき裂の成長とともに、すぐにき裂進展抵抗の増加も止む。その結果、Pop-in後荷重が少し増加しただけでき裂は不安定成長し、試験片は一気に破壊する。また、き裂は、界面上を進むため、たとえ端部から塑性変形が広がったとしても、き裂の成長は塑性変形の影響をあまり受けないと考えられる。

一方フィレットがある場合、A点での応力特異場は消失し、A'点のみで応力は特異となる。しかし、その強さはA点に比べて小さい。そのため、微小き裂の入るときの引張りせん断荷重もフィレットの無い場合に比べて高くなる。また、ラップ端での応力分布もなだらかなため、この時点では、ラップ端内側、接着剤層の広い範囲まで塑性降伏が進んでいると思われる。き裂の発生場所がA'点であるため、その後、き裂が接着層中央付

近を進む。その後、フィレットの無い場合と同様なき裂進展経路を辿る(界面に移る)としても、接着剤層中を長く進展する。そのため、き裂前縁での接着剤の降伏は引き続き広がる。き裂進展抵抗にR曲線特性の小さい未変性接着剤でもフィレット付きSLJ(SLJ_{wf})では、き裂は大規模降伏した領域を進むため、局所的なき裂進展抵抗の増加とともに、見かけのき裂進展抵抗は増し、A'点で微小き裂が生じても、荷重の増加ともにき裂は安定成長すると考えられる。その結果、フィレットの無い(SLJ_{wof})に比べてSLJ_{wf}の破断強度は増加する。また、たとえ負荷の少し早い段階でA'点付近に微小き裂が発生しても、最終破断強度はあまりPop-in強度に影響されないことになる。

(1) き裂の安定成長と継手の破断

上述のモデルを検証するため、Pop-in後のき裂の安定成長とその後の不安定成長、それに続く継手の破断への遷移を明らかにする必要がある。不安定破壊付近でのき裂長さを推測するため、シングルラップ継手に引張せん断荷重を加えた後、一旦試験を止め、ラップ端に水性インキ塗布した。使用した接着剤は未変性である。3日間放置し十分乾燥させた後、再度引張試験を行った。破面のインキ痕から、各荷重下におけるき裂長さを計測した。SLJ_{wof}では、荷重が4, 5, 6, 6.8 kN, SLJ_{wf}では5, 6, 7, 8.5 kNでのき裂の進展量を調べた。図10にき裂長さと荷重の関係を示す。SLJ_{wof}では、低い荷重で界面き裂がある程度進展し、6kNからはあまりき裂長さは増加しない。SLJ_{wf}では、約7kNが破断強度である。不安定破壊が起こる時のき裂長さは1.8~2.5mmであると考えられる。また、安定成長は、界面き裂だけでなく凝集き裂でも起こっており、不安定破壊は凝集面で起こると考えられる。SLJ_{wf}の場合、低荷重では、き裂長さは小さく7, 8kN近くでき裂長さが大きく増加していることがわかる。

次に、レーザー顕微鏡により計測したき裂の進展経路(トレース)を図11に示す。ラップ端から1.5~2.5mmではき裂経路にSLJ_{wof}とSLJ_{wf}で若干の違いが認められるが、ラップ端から2.5mm以遠では、き裂進展経路は両者ともほぼ等しい。図10から、き裂長さ約2~2.5mm^{††††}でのSLJ_{wf}の荷重は約8kNであると見積もられる。もし、この時点でSLJ_{wf}中のき裂が不安定成長を始めるなら、SLJ_{wf}の強度はフィレットにより約十数%のしか向上しないことになる。仮に、破壊じん性値(樹脂中のき裂進展抵抗)が同じであったならば、破断強度差も約10数%になるはずである。しかし、実験結

††† 接着剤の塑性変形領域の広がり性を表すために簡便的に全体を同配色で示した。被着材の白色の部分は被着材が塑性変形している事を表すものではない。

†††† SLJ_{wof}で不安定成長開始の遷移点と考えられるき裂長さ。

図8 算出等価応力分布のフィレットの有無による違い
(a) フィレットなし
(b) フィレットあり

図9 Illustration for failure process in the adhesive layer for single lap joints with and without fillets
(a) without fillets
(b) with fillets

果では、フィレットによる強度向上率は約35%もある。このことから、先ほど述べたように、塑性変形の広がりによる樹脂の変化、見かけの破壊じん性値の向上が推測される。安定成長から不安定進展開始に至るまでのき裂の進展特性の違いにより、フィレットにより強度が大幅に向上したものと考えられる。

(2) 破壊じん性値に及ぼす塑性変形の影響

上述の推測の妥当性を検証するためには、予め塑性変形した接着剤層中をき裂が進展するとき、その進展抵抗は増すことを明らかに必要がある。Kinlochらは、TDCB試験により塑性域が発達することで破壊じん性値が向上すると報告している⁸⁾。しかし、実際に塑性変形によって接着剤の破壊じん性値が向上することを詳細

図 11 Crack propagation path in the adhesive layer for both SLJ with and without fillets.

図 10 Crack growth from the lap end of SLJ with respect to applied tensile load.

に明らかにした研究例は著者らの知る限りない。そこで、通常の CT (Compact Tension) 試験片 (NCT と呼ぶ)、及び塑性変形させた CT 試験片 (PYCT と呼ぶ) を用い、それらの Mode I 破壊じん性値を調べた。引張り速度は 0.5mm/min である。PYCT を用いた試験では、図 12 (a) に示すダンベル型試験片に予め 0.3% の塑性ひずみを生じさせる引張り荷重を与えて塑性変形を起こさせ、除荷した後図 (b) の CT 試験片を切り出した。

それぞれの破壊じん性値を図 13 に示す。本実験では最大荷重点における G_I を G_{Ic} とした。図より、未変性エポキシ樹脂を十分塑性変形させることにより、破壊靱性値が 20% 程度増加することがわかる。すなわちき裂進展抵抗が増すと考えられる。このことから、フィレットにより SLJ の破断強度が向上したのは、フィレットによりラップ端での初期き裂の発生が押さえられ (Pop-in 荷重の上昇)、初期き裂発生時にはその高い Pop-in 荷重のためラップ端近傍の接着剤層は広い範囲で塑性降伏し、継手の最終破断をもたらすき裂は予め大きく塑性変

図 12 Configuration and dimensions of CT and PYCT specimens for the bulk adhesive.

- (a) Dog-bone specimen for applying plastic deformation prior to the Mode I fracture test.
(b) CT specimen.

形した領域を進展するからである。予め大きく塑性変形した接着剤層の破壊じん性値は、ほとんど塑性変形していない場合に比べて大きく、き裂の不安定進展により強度が支配されるシングルラップ継手では、最終破断時の SLJ_{wf} の引張りせん断荷重も SLJ_{wof} に比べて大きくなる。

図 13 Effect of pre-yielding on the Mode I fracture toughness for the unmodified epoxy adhesive.

4. 結 論

本稿では、重ね合わせ継手 (SLJ) のフィレットによる引張りせん断強度向上のメカニズムを、ラップ端でのき裂の発生、成長に焦点を当てて明らかにすることを試みた。そのため、標準的な SLJ の引張りせん断試験を行い、引張り強度とフィレットの有無の関係を調べるとともに、き裂の発生、成長を詳細に観察した。その結果、継手強度に及ぼすフィレット効果に関し、以下の結論を得た。

- (1) 未変性、ゴム変性接着剤、いずれもフィレットにより単純重ね合わせ継手の引張り強度が向上する。
- (2) あらかじめ塑性変形させることにより、接着剤のき裂進展抵抗は著しく増加する。
- (3) フィレットにより継手強度が向上したのは、フィレットによる応力特異性の低減だけではなく、フィレットにより塑性域が広がり、予め塑性変形した接着層中をき裂が進展するからである。

おわりに

本研究は、文部科学省の補助による同志社大学大学院 RCAST 大学院の支援を受けた。本成果の整理に際しては、加藤俊祐氏 (同志社大学大学院学生、研究当時) が尽力を尽くした。

参 考 文 献

- 1) R. D. Adams and J. A. Harris, The influence of local geometry on the strength of adhesive joints, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 7, pp. 69-80 (1987)
- 2) R. D. Adams and W. C. Wake, *Structural Adhesive Joints in Engineering*, ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHERS, pp. 34-69 (1968)
- 3) M. Y. Tsai, The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints, *Composite Structure*, Vol. 32, pp. 123-131 (1995)
- 4) T. P. Lang, Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints, *I. J. Adhesion and adhesives*, Vol. 18, pp. 167-177 (1998)
- 5) 杉林俊雄ら, 径と接着層厚さの比率が突合せ継手の強度に及ぼす影響, 日本機械学会講演論文集, p. 25 (1995)
- 6) 藤井透, 大窪和也, 松井隆司, 第 38 回日本接着学会年次大会講演要旨集, p. 235-238 (2000)
- 7) U. P. Singh, On the origin of pop-in crack extension, *Acta metall. mater.*, Vol. 39, pp. 1073-1084 (1991)
- 8) A. J. Kinloch and S. J. Shaw, The Fracture Resistance of a Toughened Epoxy Adhesives, *J. Adhesion*, Vol. 12, pp. 59-77 (1981)