

アルミニウム合金/CFRP 重ね合わせ接着継手の 破壊挙動に及ぼす被着体剛性および接着条件の影響 Effects of adherend stiffness and overlapping geometry on fracture characteristics of aluminum alloy/CFRP adhesive joints

知能機械工学コース

材料強度学研究室 1275019 竹又 裕也

1. 緒言

世界的な CO₂ 排出量規制の影響を受け、自動車や航空機等の分野では、ますます輸送機器の軽量化に対するニーズが高まっている。この軽量化の手段として、適材適所で複数の材料を組み合わせて使用するマルチマテリアル技術が注目されている。特に、軽量かつ高強度という特徴を持つ炭素繊維強化プラスチック (CFRP) と展延性、加工性に優れた金属との組み合わせが広く使用されている。CFRP を用いる場合、金属同士の接合に多く用いられる溶接やボルトやリベットによる機械的接合は困難であるため接着接合が使用されることが多い。接着接合は機械的接合に比べ軽量化に有利で、接合部での応力集中を低減できるなどの利点がある。しかしながら継手強度は被着体の機械的特性や表面状態、接着厚さなどに大きく依存するため、強度特性に及ぼすこれらの影響を把握しておく必要がある。

本研究では、積層構成により剛性を変化させた 3 種類の CFRP 直交積層板と、アルミニウム合金 A5052 を被着体とした単純重ね合わせ異材接着継手 (SLJ) の静的引張試験を行い、継手の破壊特性に及ぼす被着体剛性ならびに接着長さ、接着厚さの影響について調査した。また、エネルギー解放率を基準とした CZM を利用することで、CFRP の層間剥離破壊が起きる条件についても検討を行った。

2. 材料, 実験方法

本研究では板厚 1.5 mm の A5052 と CFRP を被着体とした単純重ね合わせ接着継手 (SLJ) を試験片として用いた。A5052 被着体は圧延板から 100 (106.25) × 25 mm に機械加工した。被着体長さは、接着長さを変えた SLJ を作製するため 2 種類準備した。接着剤には、二液エポキシ樹脂接着剤 (Araldite2011) を用いた。CFRP 被着体は、プリプレグ TR350C100S (三菱ケミカル) を用いて成形した。150 × 150 に切断した厚さ 0.08 mm のプリプレグシートを 20 枚積層し、130℃ で 2 時間保持し加圧成形した。CFRP の剛性を変化させる目的でその積層構成を [0₂₀], [0₄/90₆]_s および [0₂/90₈]_s の 3 種類に変えた。以後、それぞれを, UD, CF4/6, CF2/8 と記す。成形後、ダイヤモンドカッターを用いて A5052 の被着体と同一寸法に切断した。各被着体の長手方向ヤング率および曲げ剛性を表 1 に示す。作製した SLJ 試験片の形状および寸法を図 1 に示す。接着長さ L を 12.5 mm, および 25 mm の 2 種類, 接着厚さ t を 0.2 mm, および 0.4 mm の 2 種類とした。被着体の接着面を 500 番のエメリー紙で研磨をし、アセトンを用いて脱脂した後、真空脱泡した接着剤を塗布し、治具を用いて接着厚さを制御しながら硬化させた。硬化条件は 70℃/1 h とした。硬化後、はみ出した接着剤を小刀で丁寧に除去し、つかみ部のタブを接着した。なお接着層端部の被着体裏面 2 箇所にゲージ長 2 mm のひずみゲージを貼付した。引張り試験は精密万能試験機 (島津製作所, 容量 100 kN) を用いて、クロスヘッドスピード

0.5 mm/min で行った。チャック間における試験片の伸びの計測にはクリップゲージを使用した。

Table 1 Elastic properties of adherends

	Young's modulus in axial direction (GPa)	Flexural rigidity (N m ²)
[UD]	153	1.30
[CF4/6]	62.1	0.919
[CF2/8]	38.7	0.599
A5052	69.7	0.45

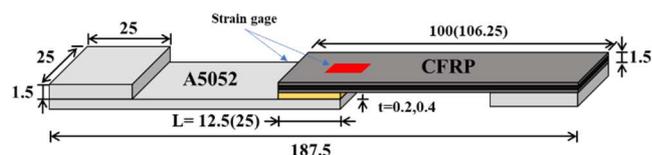


Fig. 1 Configurations of the SLJ specimen (mm)

3. 有限要素解析

SLJ の破壊挙動のシミュレーションのため、結合力モデル (CZM) による FEM 解析を行った。解析に用いたのは汎用 FEM ソフトの ANSYS2021 R1 二次元 8 節点要素を用いて、材料特性および変形の変位も考慮した。CZM は結合力 - 相対変位則を用いてエネルギー基準に基づき裂進展を表現できる。SLJ ではモード I およびモード II の混合モード下で裂が進展するため、本研究では各モードごとに 2 直線型の結合力 - 相対変位則を用いた。G_C は破壊エネルギーを示す。ここで、G_I, G_{II} はそれぞれモード I, II 成分である。混合モードでの破壊過程のエネルギー基準⁽¹⁾ は式 (1) を用いた。

$$\left(\frac{G_I}{G_C}\right) + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right) = 1 \quad (1)$$

Table 2 Mechanical properties of materials in FEM

CFRP	Longitudinal Young's modulus (GPa)	153
	Transverse Young's modulus (GPa)	10.6
	Major poisson's ratio	0.3
	Minor poisson's ratio	0.06
A5052	Young's modulus (GPa)	68.7
	Poisson's ratio	0.33
	Yield stress (MPa)	175
Araldite2011	Young's modulus (GPa)	1.3
	Poisson's ratio	0.33
	Yield stress (MPa)	10

厚さ 0 の CZM 要素を接着剤と被着体の両界面に、また層間剥離挙動を解析するため CFRP と接着剤との界面から 0.039 mm の CFRP 内の計 3 か所に挿入した。解析に用いた各材料の材料特性と、界面および層間に配置した CZM 要素のパラメータを表 2、表 3 に示す。界面破壊における特性値は実験により求めた実測値で、層間剥離における値は文献⁽²⁾における値を用いた。

Table3 CZM parameters of interface and interlayer

Parameter	Interlayer(CFRP)	interface
Maximum normal cohesive Traction (MPa)	38	19.1
Maximum tangential cohesive Traction (MPa)	52	28.8
Mode I critical strain energy release rate (J/m ²)	200	135
Mode II critical strain energy release rate (J/m ²)	650	800
Mode I cohesive stiffness (N/mm ³)	1.0×10 ⁵	1.0×10 ⁵
Mode II cohesive stiffness (N/mm ³)	1.0×10 ⁵	1.0×10 ⁵

4. 結果および考察

4.1 引張り試験

図 2 に、引張り試験において得られた各試験片の破断時の荷重を接着面積で除したせん断応力の平均をせん断強度 τ_r として示した。L = 12.5 の場合、 τ_r に及ぼす CFRP の積層構成の影響が顕著であることがわかる。すなわち UD、CF4/6、CF2/8 の順に τ_r が低下し、剛性が大きい場合の強度が高い。t = 0.2 では、CF2/8 は UD に比べて 29%、t = 0.4 では、27%減少した。L = 25 においてはこのような影響はあまり見られないことから、接着長さが長くなると、強度に及ぼす被着体の剛性の影響が小さくなることがわかった。

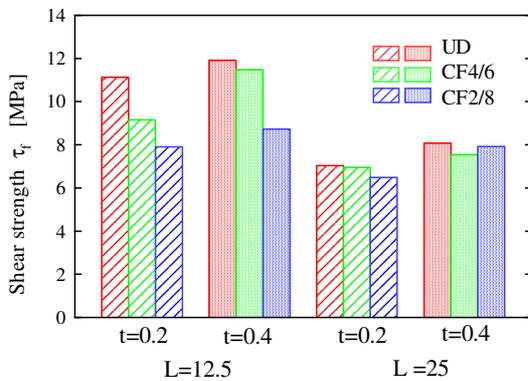


Fig.2 Shear strength of SLJs

L = 12.5 では、すべての破壊が A5052 と接着剤との界面破壊となった。破面様相に CFRP の剛性の違いによる変化は見られなかった。同様に t による違いも見られなかった。L = 25 でも、同様に A5052 と接着剤との界面破壊が支配的であったが、CF2/8 の場合 t に関係なく、破面の A5052 に炭素繊維が付着している領域が見られ、CFRP で層間剥離破壊が生じていることが確認された。層間剥離が生じるといづれの条件においても τ_r および、破断までの伸びが著しく増加することがわかった。

4.2 CFRP 層間剥離シミュレーション

CF2/8 について CZM 解析で得られた平均せん断応力 - 伸び関係と実験結果との比較を図 3 および図 4 に示す。実験において、層間剥離が見られたのは L = 25 の CF2/8 材のみであった。まず層間剥離が生じない L = 12.5 においては図 4 に示すとおり実験と CZM 解析結果は良い一致が見られた。このときの CZM における破壊は実験と同じく A5052 と接着剤との界面に配置した CZM 要素での破壊となった。一方、L = 25 の CF2/8 での実験では層間剥離が生じる場合とそうでない場合の両者が見られたが、CZM 解析では CFRP の層間に配置した CZM 要素から破壊した。図 4 に示した比較では層間剥離となったときの実験結果と解析結果は同じ傾向となり、破断までの伸びが増加するとともに破断時の平均せん断応力も層間剥離が生じない場合のそれに比べて高くなった。

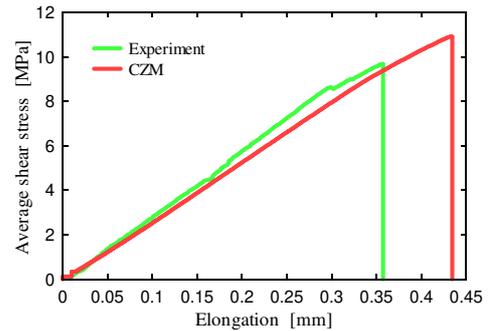


Fig.3 Comparison of average shear stress-elongation between experimental results and CZM analyses $\ell = 12.5$, CF2/8

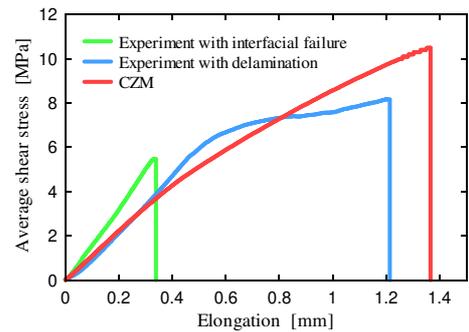


Fig.4 Comparison of average shear stress-elongation between experimental results and CZM analyses $\ell = 25$, CF2/8

5. 結言

接着条件にかかわらず、CFRP の剛性が小さくなる程せん断強度は低下した。破壊は基本的に A5052 被着体と接着剤との界面で生じたが、接着長さが長く、CFRP の剛性が小さい場合、CFRP において層間剥離が生じる傾向にあった。またこの層間剥離が生じる場合、破断荷重の増加と破断までの伸びが著しく増加することがわかった。CZM により CFRP の剛性が小さい場合に界面に近い CFRP の層間で剥離が生じることを予測することができた。

文献

- (1) Sekiguchi, Y., Cohesive zone model (CZM) for numerical analysis, Journal of the Adhesion society of Japan, Vol.56 (2020), pp.447-455
- (2) 清水理能, 足立忠晴, 荒井政大, 中原拓也, 松本浩之, 一方向 CFRP 積層板の ModeI および ModeII 層間破値に及ぼす環境温度の影響, 日本機械学会論文集, Vol.65, No.630 (1999), pp.282-286