

異種材料単純重ね合わせ接着継手の強度特性に及ぼす被着材特性の影響 Effect of adherend properties on tensile shear strength of dissimilar material adhesive joints

知能機械工学コース
材料強度学研究室 1245031 横山 遥大

1. 緒言

国連サミットで可決された SDGs に各国が取り組む中、日本の輸送機器分野では地球温暖化の改善に向け、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)を用いたマルチマテリアル化による車体の軽量化が進められている。マルチマテリアル化において CFRP を用いる場合、機械的接合や溶接は困難であるため接着接合が使用されることが多い。接着接合は他の接合方法と比較して、軽量で接合部の応力集中を低減できるなどの利点があるが、継手強度が被着材の特性や表面性状、接着厚さなどに左右される。そのため、製品として信頼性を確保するためには強度特性の把握を十分に行う必要がある。

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 と熱処理により強度を変化させた 2 種類のアルミニウム合金を被着材に用いた。被着材同士を接合する際、接着厚さを 2 種類とすることで合計 12 種類の接着継手を作製し静的引張試験を行った。試験結果から接着継手の破壊挙動に及ぼす被着材の剛性と強度、接着厚さの影響を明らかにした。加えて、有限要素(FEM)解析用いた強度シミュレーションを行い実験結果との比較、検討を行った。

2. 材料および試験片

本研究ではアルミニウム合金 A2017 と CFRP 積層板を被着材とし、二液エポキシ系接着剤(Araldite2011)で接着した異種材料の単純重ね合わせ接着継手(SLJ)を作製した。

A2017 は T3 処理が施された納入材(T3 材)と、T3 処理に加え 410°C、2.5hr の条件で焼きなまし処理を施した O 材の 2 種類を用いた。T3 材と O 材の降伏応力はそれぞれ 298MPa、104MPa であり、焼きなまし処理により降伏応力は 65%低下した。

CFRP の成形には CFRP プリプレグ TR350C100S(三菱ケミカル)を用いた。積層構成は $[0_2/90_8]_S$ (A 材)、 $[0_4/90_6]_S$ (B 材)及び $[0_{20}]$ (C 材)の 3 種類とし、130°C、2hr の条件で加圧成形した。CFRP 積層板と A2017 の軸方向ヤング率、曲げ剛性及び 0.2%耐力を表 1 に示す。

Table.1 Elastic properties of the adherend.

	Axial Young's modulus [GPa]	Bending rigidity [$N \cdot m^2$]	0.2% proof stress[MPa]
$[0_2/90_8]_S$ (A)	40.3	0.51	
$[0_4/90_6]_S$ (B)	67.8	0.76	
$[0_{20}]$ (C)	153	1.01	
A2017 (T3)			298
A2017 (O)	68.9	0.52	104

A 材は A2017 と曲げ剛性を、B 材は A2017 と軸方向ヤング率を揃える目的で積層構成を決定した。一方向材である C 材は 3 種類の CFRP の中で最も剛性が大きくなっている。

接着剤は主剤と硬化剤を質量比 5:4 で混合し、真空中にて 20 分間脱泡した。その後、エメリー紙#500 で研磨した被着材の接着面に塗布した。接着厚さは 0.2mm、0.4mm の 2 種類とし、治具を用いることで接着厚さを制御しつつ 70°C、1hr で加熱硬化させ SLJ 試験片を作製した。硬化後、被着材それぞれの接着層端部裏面にひずみゲージ(ゲージ長 2mm)を貼付した。本実験で使用した SLJ 試験片(接着厚さ 0.2mm)を図 1 に示す。

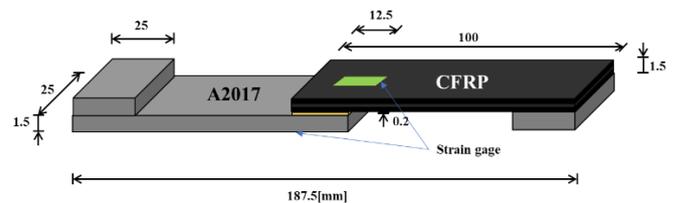


Fig.1 SLJ specimen.

3. 実験結果

静的引張試験には、万能材料試験機(容量 100kN)を使用した。クロスヘッド変位速度を 0.5mm/min とし、SLJ が破断するまでの荷重、クロスヘッド変位およびひずみの変化を記録した。引張試験より得られた平均せん断応力-変位線図を T3 材と O 材別にまとめたものを図 2 および 3 に示す。ここで t は接着厚さを表す。

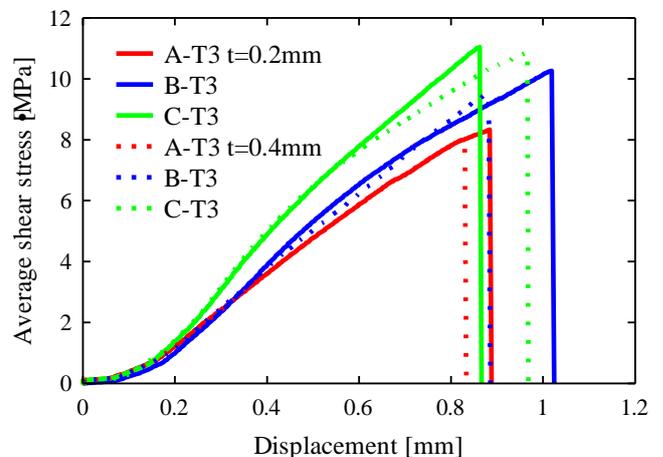


Fig.2 Average shear stress displacement curves. (CFRP-T3) (Static tensile test)

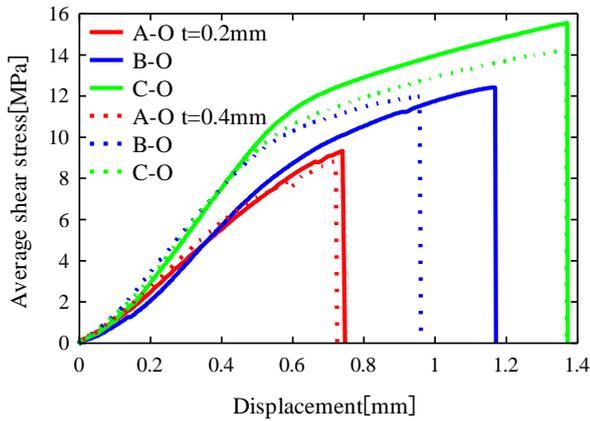


Fig.3 Average shear stress-displacement curves. (CFRP-O) (Static tensile test)

図 2 より T3 材を被着材とした場合は、CFRP の剛性が大きいほど破断強度が大きくなった。しかし、接着厚さの影響はあまり見られなかった。

図 3 より O 材を被着材とした場合も CFRP の剛性の影響が見られた。C-O 材に着目すると破断荷重が C-T3 材と比較して増大していることがわかる。これは O 材の強度が低いため C 材と接合した場合はその塑性変形量が大きくなったことと、後述するような破壊形態の変化が影響していると考えられる。C-O 材を破断後に確認したところ、O 材は面外方向に約 2.0mm の永久変形が見られ、大きなはく離応力が接着部に加わったと考えられる。また、C-O 材では、接着厚さの影響も見られ、 $t=0.2\text{mm}$ の破断荷重が $t=0.4$ より大きくなった。

試験片の破断後の接着面を観察したところ、いずれの試験片も破壊形態は A2017 と接着剤との界面破壊であった。しかし、O 材を被着材とした試験片では A2017 面にも接着剤が付着しており、その接着剤には炭素繊維が見られたことから CFRP の母材はく離が生じていることがわかった。これは、被着材と接着剤の界面、及び CFRP の母材はく離における相対強度の差によるものである。O 材を用いることで被着材に大きな破断変形が生じ、はく離成分が大きくなるため、CFRP の母材はく離が生じたと考えられる。

4. 破断強度シミュレーション

汎用 FEM 解析ソフト ANSYS を用いて接着継手の 2 次元モデルを作成し、接着継手の静的引張強度予測を行った。A2017 と Araldite2011 については塑性変形を考慮し、CFRP は直交異方弾性体としてモデル化した。SLJ に引張力が負荷されると、接着部は Mode I(開口型)と Mode II(面内せん断型)の混合モードの負荷がかかり破壊に至る。そこで本解析では、被着材と接着剤の界面に厚さ 0 mm の結合力(CZM)要素を挿入し、その CZM 要素に Model, ModelII それぞれの臨界エネルギー解放率と最大応力を与えることで、接着剤のはく離き裂進展挙動を表現した。使用した CZM パラメータを表 2 に示す。

作成した接着継手モデルの右端を変位速度 0.5mm/min で引

張り、モデル固定部に生じる反力とモデルの変位から静的引張強度を予測した。解析より得られた T3 材についての平均せん断応力-変位線図を図 4 に示す。

Table.2 CZM parameters.

	Mode I	Mode II
Energy Release Rate[J/m ²]	135	1270
Fracture stress [MPa]	19.1	28.8

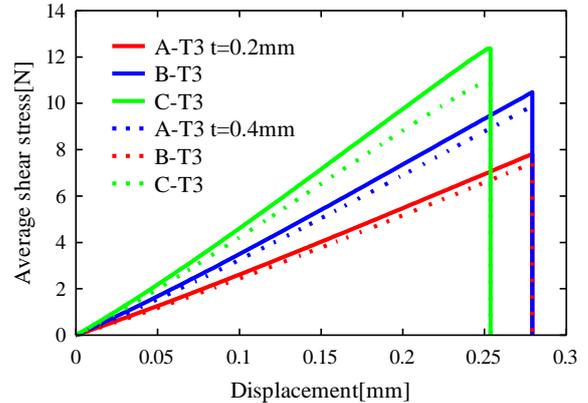


Fig4 Average shear stress-displacement curves. (CFRP-T3) (FEM analysis)

図 4 より最大荷重は剛性の高い CFRP ほど大きくなる結果が得られた。この結果は実験結果と一致したものの、剛性の影響は実験結果よりも大きく表れた。また接着厚さの影響では、接着厚さが薄い場合の最大荷重が大きくなり、その効果は、CFRP の剛性が大きくなるほど増大する結果となった。O 材に関する破壊強度予測は、T3 材ほどの一致は見られず実験結果より低い値となった。これは FEM 解析において A2017 の塑性変形挙動が十分シミュレートできていなかったことと、実験で生じた CFRP の母材はく離が CZM では考慮されなかったことが原因として考えられる。被着材を T3 材とした場合は CZM 要素の挿入により破断強度の予測が可能だが、O 材の場合は CFRP 内部にき裂が進展することも想定し、CFRP 層間部にも CZM 要素を用いる必要がある。

5. 結言

以上の研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 静的引張試験の結果から、本試験条件下では剛性の高い CFRP と強度の低い A2017 を接着厚さ 0.2mm で接着することで継手強度が最も大きくなる。
- (2) T3 材を被着材とした場合は被着材と接着剤の界面破壊が支配的であったが、O 材を被着材とした場合は界面破壊のみならず CFRP の母材はく離も生じた。
- (3) T3 材を被着材とした場合の破断荷重が実験値と解析値で近い値をとっていたことから、CZM 要素を挿入することで強度予測が可能であると考えられる。

文献省略