

# CFRP 直交積層板とアルミニウム合金の 単純重ね合せ接着継手の破壊挙動

## Fatigue behaviors of adhesively bonded single lap joints of CFRP cross-ply laminates and aluminum alloy

知能機械工学コース

材料強度学研究室 1235086 砂田敬太

### 1. 緒言

近年、環境への負荷低減のため、輸送機器などの軽量化が進められている。マルチマテリアル化はこの観点から注目されているが、課題となるのが接合方法である。軽量かつ高強度な材料として広く使用されている炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、機械的接合や溶接が困難であり、その接合には接着接合が多く用いられる。接着接合は他の接合方法に比べて応力集中を低減できるなどの利点も有するが、接着継手の強度は被着材の表面性状や機械的特性に大きく依存する。特に剛性の異なる材料どうしを被着材として用いた場合、同一外力に対して接着部に生じる応力は被着体間の剛性の差異によって変化する。そのため、より信頼性の高い設計のためには、継手の強度特性に及ぼす被着材の剛性の影響を明らかにする必要がある。

本研究では CFRP とアルミニウム合金を被着体とする接着継手の破壊挙動に対し、CFRP の積層構成の違いから生じる剛性の差異が及ぼす影響について調査した。また接着前の機械的特性を詳細に調べ、これによる有限要素(FEM)解析を行い、実験結果との比較検討を行った。

### 2. 材料および試験片

本研究では被着体にアルミニウム合金 A2017 と CFRP、接着剤に 2 液性エポキシ接着剤 Araldite2011 を使用した単純重ね合せ継手(SLJ)を用いた。CFRP は CFRP プリプレグ(TR350C100S, 三菱ケミカル)を 20 枚積層し、40 MPa、130°C で 2 時間保持する条件で成形した。中央の 90°層を 0°層で挟む対称積層構成とし、各層の割合を変化させ剛性の異なる 4 種類の CFRP 積層板を作製した。それぞれの材料について、実験により求めた機械的特性の結果を表 2 に示す。

被着材の接着面をエメリー紙#500 で研磨した後、アセトンを用いて十分に脱脂を行った。治具を用いた接着時に、厚さ 0.2 mm のテフロンシートを用いることで接着層厚さを制御しつつ、60°C、45 min で加熱硬化させた。作製した継手の形状を図 1 に示す。

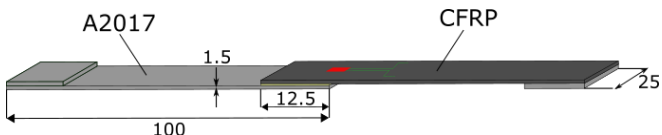


Fig.1 Dimension of SLJ specimen[mm].

Table.1 Elastic properties of materials.

	Young's Modulus [GPa]	Poisson's ratio
A2017	68.9	0.35
Araldite2011	1.36	0.38
[0 <sub>20</sub> ]	153	0.35
[0 <sub>7</sub> /90 <sub>6</sub> /0 <sub>7</sub> ]	97.1	0.061
[0 <sub>4</sub> /90 <sub>12</sub> /0 <sub>4</sub> ]	62.1	0.024
[0 <sub>2</sub> /90 <sub>16</sub> /0 <sub>2</sub> ]	38.7	0.026

### 3. 実験結果

#### 3.1 静的引張試験

万能引張試験機(容量 100 kN)を使用し、クロスヘッド変位速度を 0.3 mm/min の負荷速度で、継手に対して静的引張試験を実施した。図 2 に引張試験により得られた各試験片の代表的な荷重変位曲線を示す。

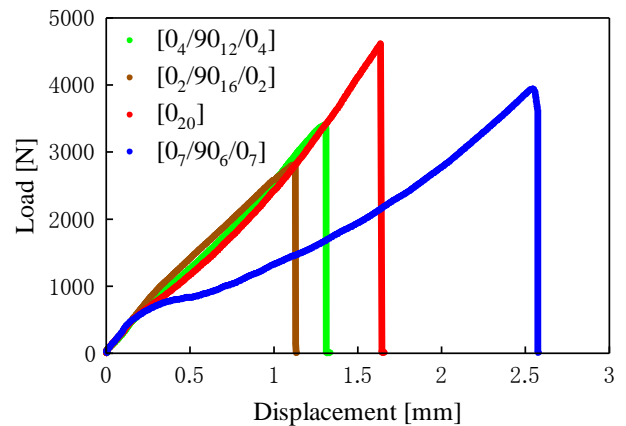


Fig.2 P-δ curves of SLJ.

図 2 から明らかに CFRP の長手方向ヤング率の低下に伴い破断荷重 $P_f$ の値が低下することがわかった。破断時の変位 $\delta_f$ は継手の強度の増加に伴い増加しているが、[0<sub>7</sub>/90<sub>6</sub>/0<sub>7</sub>]の挙動のみ逸脱している。これは CFRP 内部にき裂が発生したことが原因として考えられる。

強度が低下した原因については、CFRP の剛性が低下したことから接着端部に生じる剥離方向応力が増加したためだと考える。後述する FEM 解析で、A2017 と Araldite2011 の界面での応力分布を調べた結果、CFRP の剛性の低下に伴い接着端部に生じる剥離方向応力が大きくなることが分った。接着剤は剥離方向の力に弱い<sup>(1)</sup>結果として継手の強度が低下

したと考える。

### 3.2 疲労試験

油圧サーボ式疲労試験機を用いて、疲労試験を実施した。試験条件は繰り返し周波数を 10 Hz、応力比  $R=0$  とした。また最大荷重  $P_{max}$  を 0.5~2 kN の範囲とし、各繰り返し荷重下での疲労寿命を求めた。本研究では繰り返し数の上限を 200 万回として試験を打ち切った。図 3 に疲労試験で得られた S-N 曲線を示す。

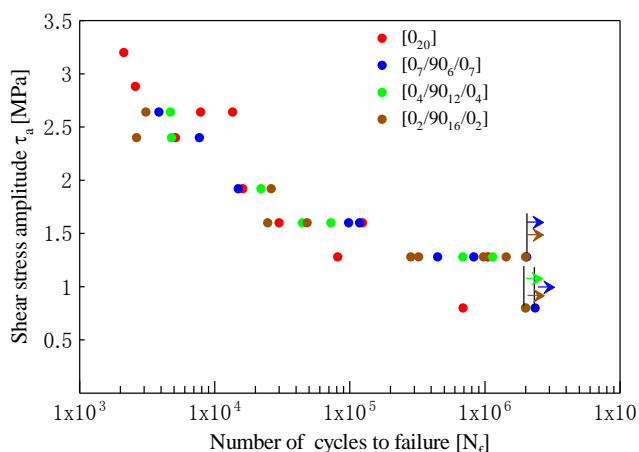


Fig.3 S-N curves of SLJ.

図 3 は繰り返しせん断応力振幅  $\tau_a$  と破断までの繰り返し数の関係を示している。  $\tau_a$  は最大繰り返し荷重を接着部面積で除した公称値である。試験片により破断寿命にばらつきが生じたものの、  $\tau_a$  が低い場合  $[0_{20}]$  を用いた継手は他の直交積層材のものに比べて疲労寿命が短くなることが分った。しかし、直交積層材を用いた継手では積層構成による疲労寿命の違いは見られなかった。また破面観察の結果から継手の破壊は使用した CFRP の積層構成に関係なく全ての試験片において A2017 と Araldite2011 の界面破壊であった。

### 4. FEM 解析

汎用 FEM パッケージ ANSYS を用いて、継手の 2 次元有限要素モデルを作成し、静的引張せん断強度の予測を試みた。本解析では被着体と接着剤の界面に厚さ 0 mm の結合力 (CZM) 要素を組み込むことで、接着剤の剥離挙動も考慮に入れた。CZM 要素には Mode I、Mode II それぞれの臨界エネルギー解放率に加えて、純粋な引張および、せん断強度が必要なため、別途試験により実測した。解析に使用した CZM パラメータを表 2 に示す。モデル作成時、CFRP については一方向材の材料定数により積層構造体をモデル化した。また A2017 と Araldite2011 については材料非線形性を考慮した。解析により得られた荷重変位曲線を図 4 に示す。

Table.2 CZM parameter.

Model Energy release rate [J/m <sup>2</sup> ]	135
Tensile strength [MPa]	19.1
ModeII Energy release rate [J/m <sup>2</sup> ]	1270
Shear strength [MPa]	28.8

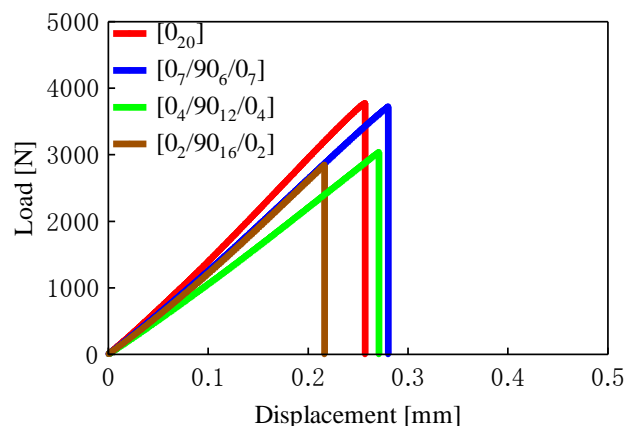


Fig.4 P-δ curves of SLJ(FEM).

図 4 は継手固定部の反力と、荷重の作用点の変位の関係を示している。継手の破断強度は  $[0_{20}]$  が最も高く、CFRP の長手方向ヤング率の低下に伴い、強度は低下し  $[0_2/90_{16}/0_2]$  が最も低くなる結果が得られた。変位については CFRP のヤング率の低下にともない増大している。

図 2 に示した静的引張試験から得られた荷重-変位線図と比較すると両者の傾向が良く一致していることが分る。実際の試験ではタブの滑りなどの影響で、解析に比べてかなり大きな変位を示しているが、破断荷重を比較すると両者の値は非常に近い。このことから積層構成および CZM のパラメータの取得により、A2017-CFRP SLJ の破断強度を予測することができる。

### 5. 結言

熱処理型アルミニウム合金 A2017 および、CFRP を被着体とし、熱硬化性エポキシ系接着剤で接着した単純重ね合せ接着継手を作製し、その強度特性を調査した。CFRP の積層構成を変えることでその剛性を変化させ、継手の強度に及ぼす剛性の影響について静的引張り、および繰り返し負荷による疲労試験により明らかにした。また FEM 解析により接着層に生じる応力の違いなどを検討するとともに CZM による強度予測を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 積層構成の異なる CFRP を用いた SLJ に対し、静的引張試験を行った結果、CFRP のヤング率の増加に伴い、継手の静的破断強度が向上することが分った。
- (2) 同様の SLJ に対し、疲労試験を実施した結果、繰り返し荷重が高い場合、CFRP の積層構成による疲労寿命の差は見られなかった。しかし繰り返し荷重の値が低下するにつれて、  $[0_{20}]$  の積層構成の CFRP を用いた継手は疲労寿命が低下することが分った。
- (3) FEM 解析において、CZM を用いて継手の破断強度の予測を行った結果、実験による継手破断強度とよく一致した。

### 文献

- (1) 佐藤千明, "CFRP/CFRTP とマルチマテリアルの接合 3. CFRP/金属との接着接合", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.69, No.8, pp.626-629, Aug.2020