

卒業論文要旨

CFRP-アルミニウム合金単純重ね合わせ接着継手の疲労強度特性

Fatigue strength properties of CFRP and aluminum alloy bonded single joints

システム工学群

材料強度学研究室 1210022 稲田 啓佑

1. 緒言

近年、自動車や航空機分野では車両、機体の軽量化が進められている。そのため、従来の金属を主とした構造から、これに高強度、軽量である複合材を組み合わせた構造が採用されるようになってきた。複合材として注目されているのが、高剛性、高強度かつ軽量という特徴を有する炭素繊維強化プラスチック (CFRP) である。しかし、CFRP は材料及び製造のコストが高いことや、複雑な形状を実現することが困難などの課題があるため、異種材料と組み合わせる必要が生じる。異種材料を組み合わせるための接合においては、従来の接合、締結法では、剛性の低下や高コストなどのデメリットがあるため、接着接合が利用されている。

接着接合の利点としては、部品数の削減、応力分散、剛性の向上などがあるものの、剥離に対する抵抗が小さいことや、強度のばらつき、表面処理の問題点もある。接合部の強度に関しては被着材料の剛性なども大きく影響することが考えられるため、これらが疲労強度にどのように影響するのかを知ることが重要である。

本研究では、積層構成を変えた 4 種類の CFRP と自動車や航空分野で広く使われるアルミニウム合金を用いて、単純重ね合わせ接着継手を作製し、疲労試験を行い、CFRP 被着材の剛性が疲労強度に及ぼす影響について調査した。

2. 材料および実験方法

2.1 材料および試験片

実験に使用した試験片は板厚 1.5mm のアルミニウム合金 A2017 と CFRP 積層板を接着した、単純重ね合わせ (SLJ) 試験片である。CFRP はプリプレグ (TR350C100S, 三菱ケミカル社製) を 20 枚重ね合わせて成形したもので、積層構成は $[0_2]_0$ (以下, UD), $[0_7/90_3]_s$ (以下 1/1), $[0_4/90_6]_s$ (以下, 1/3), $[0_2/90_8]_s$ (以下, 1/8) の 4 種類とした。積層後、ホットプレスを用いて 130°C, 40MPa, 2 時間の条件で硬化させた。接着剤には Araldite2011 を用いた。CFRP 板、A2017 の弾性特性を表 1 に示す。なお、これらの値は、25×100×1.5mm の試験片を用いて得られた実測値である。

SLJ 試験片の形状及び寸法を図 1 に示した。CFRP 及び A2017 を 25×100×1.5mm の被着体に加工し、A2017 については被着部分 (25×12.5mm) をエメリーシート #500 で研磨した後、アセトンで脱脂した。Araldite2011 の主剤と硬化剤を 1:0.8 の割合で混合し、30 分の脱泡後、塗布し、接着層厚さが 0.2mm となるようにテフロンシートで隙間を調整しつつ、70°C で 1 時間硬化させた。硬化後、接着部から出てきた余分な接着剤は小刀等で除去した。

Table.1 Properties of materials.

Material, (symbol)	Young's modulus in axial direction (GPa)	Flexural rigidity (N·m ²)
$[0_2]_0$, (UD)	150	0.953
$[0_7/90_6/0_7]_s$, (1/1)	97.1	0.912
$[0_4/90_{12}/0_4]_s$, (1/3)	62.1	0.918
$[0_2/90_{16}/0_2]_s$, (1/8)	40.0	0.554
A2017	69.7	0.513

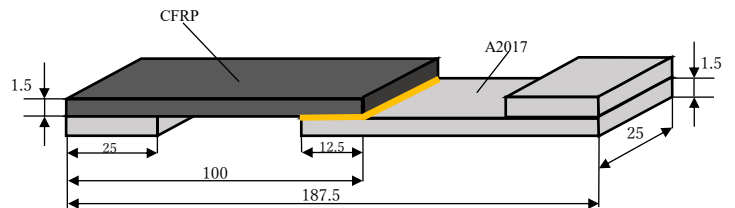


Fig.1 Configuration of SLJ specimen.

2.2 実験方法

疲労試験には、油圧サーボ式材料試験機 (容量 10 kN) を使用した。試験条件は 10Hz の荷重制御で、荷重比を 0 とした。繰返し数の上限は 2×10^6 と設定した。疲労試験中、適当な間隔で負荷荷重と変位の関係を記録し、 $P = k \delta$ の関係より剛性 k の変化を求めた。

3. 結果および考察

3.1 平均せん断応力-サイクル数関係

疲労試験により得られた平均せん断応力(最大荷重/接着面積)と破壊までの繰返し数 N_f の関係を図 2 に示す。

平均せん断応力振幅が 1.28MPa 時に、1/8 及び 1/1 材では繰返し数が上限の 2×10^6 を超えた。また、UD 材は繰返しせん断応力が大きい場合、破断までの繰返し数にばらつきが見られる。繰返し数が 1×10^4 以下の低寿命領域では、疲労強度に対する積層構成の影響はあまり見られないが、UD 材が若干長寿命になる傾向がある。しかしながら、 1×10^4 を超えた領域では、明らかに UD 材の疲労強度が低下することがわかった。

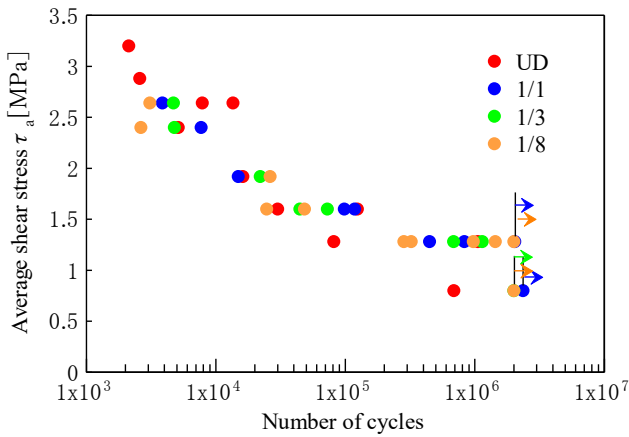


Fig.2 S-N curves.

3.2 疲労損傷

同一の負荷せん断応力下(1.28MPa)でかつ破断寿命 N_f にあまり差が見られなかった, UD 材 ($N_f=1.05 \times 10^6$) と 1/8 材 ($N_f=0.98 \times 10^6$) について疲労損傷の度合いを剛性変化の観点より調査した. 両材料の試験開始から破断までの剛性の変化を正規化して図 3 に示す. 1/8 材では, 破断寿命の 1 割 ($N/N_f=0.1$) 程度の段階より剛性は緩やかに低下し始め, 最終破断時には, 初期剛性 k_0 の 93% 程度まで低下した. 一方 UD 材では, 初期より急激に剛性は低下し, $N/N_f=0.3$ 以上で, その低下割合は緩やかなものとなる. 最終破断時の剛性は初期剛性 k_0 の 92% 程度となった. いずれの材料でも N/N_f が 0.98 程度から急激な剛性低下が見られた.

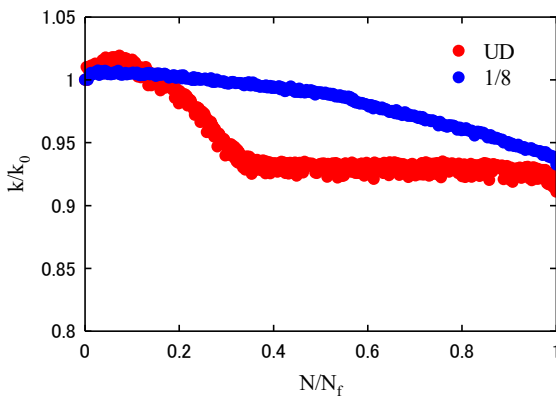


Fig.3 Relationship between normalized stiffness and normalized number of cycles for under average shear stress of 2.56MPa.

4 有限要素解析法

試験片の支配的なき裂の変形モードと, き裂が進展することによるき裂の変形モードの変化について調査するために有限要素解析法 (FEM) により破壊力学パラメータ G_I , G_{II} を求めた. 解析には汎用 FEM パッケージ ANSYS (Mechanical APDL 2019 R1) を用いた. 解析モデルを図 4 に示す. 実験結果よりき裂は A2017 と接着層の界面で進展することがわかったので, この部分にき裂を導入し, その長さ a を 0.5~5.0mm まで変化させた. FEM 解析に使用した材料特性を表 2 に示す.

平均せん断応力が 3.2MPa となるように引張荷重をかけた時の G_I 及び G_{II} の変化を図 5 に示す. き裂長さに関わらず,

G_I は 1/8 材の方が大きく, 逆に G_{II} は, UD 材の方が大きくなった. これは, CFRP の積層構成による曲げ剛性の違いに起因するものであり, 1/8 材では剛性が小さいため曲げ変形が大きくなり, 接着面での peel 成分が大きくなるためだと考えられる.

巨視的なき裂が全寿命に対し, どの段階で発生したかは不明ではあるが, G_I , G_{II} はかなりのき裂長さまで変化が見られないこと, 及び図 3 に示した剛性の変化過程より, 破断直前でき裂が生じたと考えられる. すなわち, き裂の伝播寿命は剛性の急激な低下が見られるごくわずかな期間と考えられる.

Table.2 Properties of materials.

Material	Young's modulus in axial direction (GPa)		Shear modulus (GPa)	
	X	Y	XY	YZ
CFRP	X	153	XY	5.52
	Y	10.6	YZ	5.52
	Z	10.6	ZX	3.21
A2017	70		25.9	
Araldite2011	1.3		0.489	

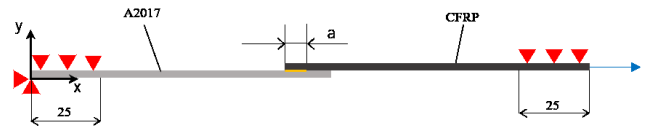


Fig.4 Analysis model.

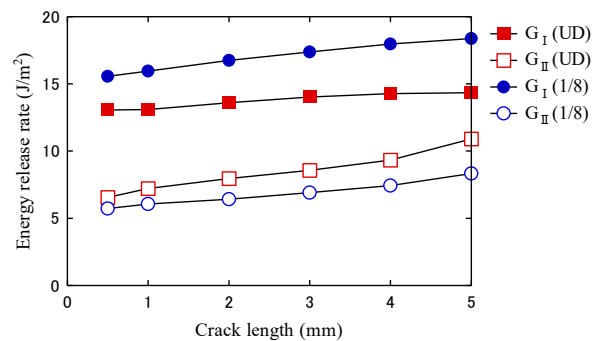


Fig.5 Relationship between energy release rate and crack length of UD and 1/8 specimens.

5. 結言

A2017 と積層構成を変えた CFRP 板を被着体として, 接着接合し作製した SLJ 試験片について疲労試験を行った. CFRP の積層の違いによる疲労強度特性の違い及び, 剛性の変化を調査した. また, FEM によるエネルギー解放率の解析を行った. 本研究で得られた, 結果を以下に示す.

- (1) S-N 曲線では, 低寿命において疲労強度に積層構成による影響は見られなかったが, 長寿命域では, UD 材の強度が低下する傾向があった.
- (2) UD 材は全寿命の 5~35% 程度で剛性が急激に低下し, その後はほとんど低下せずに破断した. 一方, 1/8 材では, ほぼ全寿命を通して緩やかに剛性が低下した. いずれも寿命の終盤 2% で急激に低下し破断に至る.
- (3) FEM による解析では, CFRP の剛性が小さい場合, 剛性の大きいものと比べて G_I モード成分が大きく, G_{II} モード成分は小さくなることがわかった.