

CFRP-アルミニウム合金単純重ね合わせ接着継手の疲労特性

Fatigue characteristics of CFRP/Aluminum alloy single lap adhesive joints

知能機械工学コース

材料強度学研究室 1255004 稲田 啓佑

1. 緒言

近年、自動車や航空機分野では車両、機体の軽量化が強く求められている。そのため従来の金属を主とした構造から、高強度、軽量である複合材料を多用する構造が採用されるようになってきた。複合材料の代表的なものとして、比強度に加え比剛性にも優れるといった特徴を有する炭素繊維強化プラスチック (CFRP) がある。しかし、CFRP は材料及び製造のコストが高いことや、複雑な形状の構造を単体で作製するのが困難であるため、特に自動車分野などでは金属材料と組み合わせるいわゆるマルチマテリアル化における主要な材料として使用されつつある。この場合、異種材料の接合が必要となるが、従来一般的な締結法では、剛性の低下や重量の増加などの問題が解決できないため、接着接合が使用されることが多い。

異種材料の接着継手の静的強度に関してはいくつかの報告⁽¹⁾⁽²⁾がある。本研究でも A2017 と CFRP を組み合わせた SLJ の引張強度に及ぼす CFRP の剛性の影響について検討を行ってきた。しかしこれら継手の長期使用に対する信頼性を確保するには、繰返し荷重下における強度特性についても明らかにしておくことが重要である。

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被着体として単純重ね合わせ接着継手 (SLJ) を作製し、その疲労試験を行い CFRP の剛性が疲労強度に及ぼす影響について調査した。また、被着体の表面形状の影響についても調査するため機械研磨と陽極酸化処理について比較を行った。

2. 材料及び実験方法

2.1 材料及び試験片

実験に使用した材料は板厚 1.5mm のアルミニウム合金 A2017 と CFRP 直交積層板である。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 [0₂₀], [0₇/90₃]_s, [0₄/90₆]_s, [0₂/90₈]_s の 4 種類とした。積層後、ホットプレスを用いて 130°C、2 時間の条件で硬化させた。表 1 に CFRP, A2017 の材料特性を示す。本研究に用いた SLJ 試験片の形状及び寸法を図 1 に示した。A2017 については接着部分を #500 のエメリー紙で研磨した後、アセトンで脱脂した。陽極酸化処理は機械研磨を施した A2017 を脱脂し、超音波洗浄を行った後、10wt% のリン酸溶液を用いて行った。SUS304 板を陰極として 2.0A の電流を 30 分間通電した。機械研磨のみを施した SLJ 試験片は CFRP の積層構成の違いから UD, 1/1, 1/3, 1/8 試験片とし、陽極酸化処理では UD-A, 1/1-A, 1/3-A, 1/8-A とした。接着剤には Araldite2011 を用いた。主剤と硬化剤を 1:0.8 の割合で混合し、30 分間の脱泡後塗布した。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、1 時間保持の条件で硬化させた。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 Elastic properties of adherends

Material, [symbol]	Young's modulus in axial direction[GPa]	Flexural rigidity [N·m ²]
[0 ₂₀], [UD]	153	1.30
[0 ₇ /90 ₃] _s , [1/1]	97.1	1.14
[0 ₄ /90 ₆] _s , [1/3]	62.1	0.919
[0 ₂ /90 ₈] _s , [1/8]	38.7	0.599
A2017	68.7	0.520

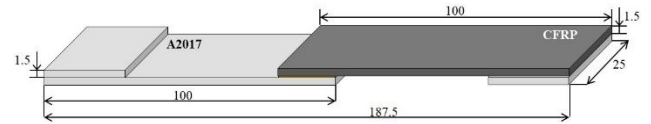


Fig.1 Configurations of SLJ specimen [mm]

2.2 実験方法

疲労試験には、油圧サーボ式疲労試験機 (容量 10kN) を使用した。試験条件は 10Hz の荷重制御で、荷重比 (P_{min}/P_{max}) を 0 とした。繰返し数の上限は 2×10^6 回と設定した。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、剛性 k の変化を調査した。

3. 結果及び考察

3.1 疲労強度

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

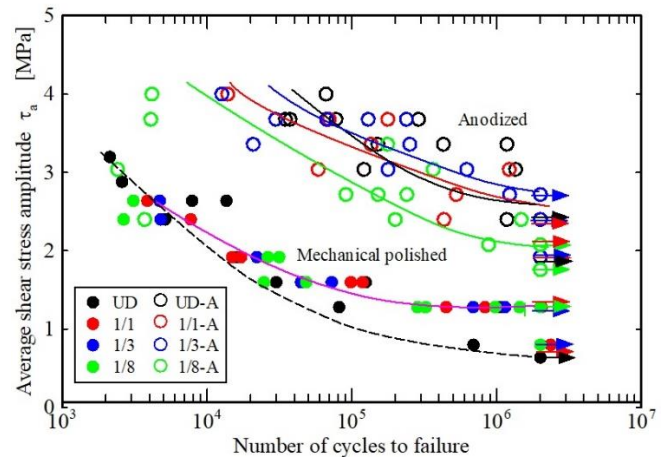


Fig.2 S-N curves

機械研磨を施した A2017 を被着体とした場合、UD 試験片以外は CFRP の積層構成によらず $\tau_a = 1.3\text{MPa}$ で切りの繰返し数を越え、破断に至らなかった。そのため、この応力レベルが 2×10^6 回時間強度となる。UD 試験片ではこれ以下の τ_a でも破断が生じており若干疲労強度が低いと考えられる。一方、 $\tau_a = 1.6\text{MPa}$ 以上では、疲労強度に及ぼす積層構成の影

響は見られなかった。また、すべての試験片で A2017 と接着剤界面で破壊が生じた。

陽極酸化処理を施した A2017 を被着体とした場合、いずれの積層構成においても疲労強度は2倍以上向上した。しかし、CFRP の積層構成が同一であっても同じ τ_a に対する寿命はかなりばらつく傾向があった。また、剛性の小さい 1/8-A 試験片の疲労強度が他の試験片と比べ低下する結果となった。破断繰返し数が著しく短くなった 1/8-A 試験片は後述するように破壊様式が他の試験片と異なるのが原因であると考えられた。

3.2 剛性の変化

機械研磨のみを施した A2017 を被着体に用いた試験片に $\tau_a = 1.6\text{MPa}$ を負荷した場合の剛性変化を初期剛性 k_0 及び破断寿命 N_f により正規化して図 3 に示す。

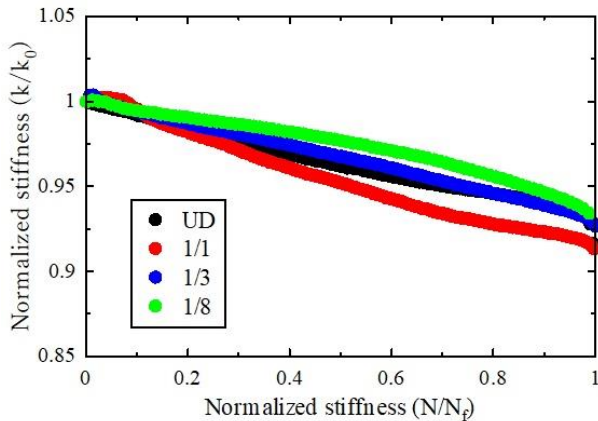


Fig.3 Variation of specimen stiffness during fatigue

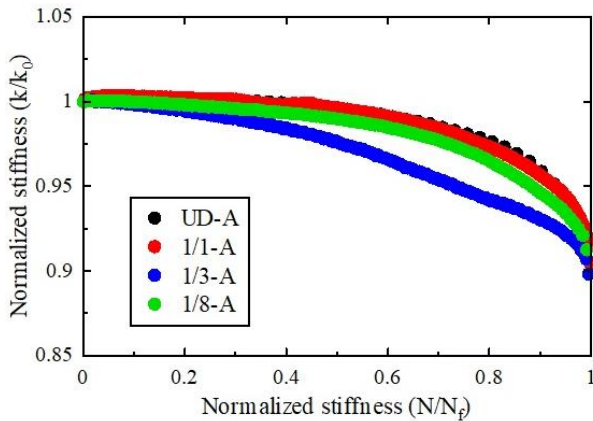


Fig.4 Variation of specimen stiffness during fatigue

図 3 においては、全ての試験片で、疲労初期 ($N/N_f=0.1$) の段階より剛性が一定の割合で低下し、最終破断時には、 k_0 の 90%程度まで低下した。これは疲労初期の段階でき裂が発生し、そのき裂が一定の割合で伝播したためだと考えられる。

また、陽極酸化処理を施した A2017 を被着体に用いた試験片に $\tau_a = 3.0\text{MPa}$ を負荷した場合も同様に剛性の変化を図 4 に示す。図 4 においては、全ての試験片で、疲労初期 ($N/N_f=0.1$) の段階より剛性が緩やかに低下し始め、全寿命の 60%付近から急激な低下を示し、 k_0 の 90%程度まで低下した後、破断した。この急激な剛性の低下はき裂の進展速度が速くなったためだと考えられる。実際にき裂の挙動を観察すると、剛性が急激に低下した繰返し数で新たなき裂の発生、もしくはき裂

の進展速度が加速していた。従って、剛性の低下はき裂の挙動に影響されているといえる。図 4 の 1/3-A 試験片のみ途中の k/k_0 の値が他の材料に比べ小さくなっているものの疲労に伴う剛性変化の挙動は基本的に他の試験片と同じだと考えられる。

3.3 破面観察

A2017 に機械研磨を施した場合、陽極酸化処理を施した場合、それぞれの破面の典型例を図 5 に示す。

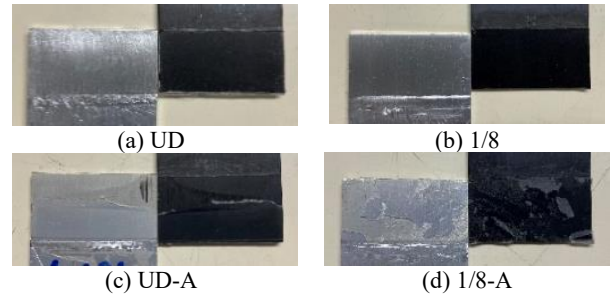


Fig.5 (a)(b)Fracture surface in the case of polished A2017
(c)(d) Fracture surface in the case of anodized A2017

機械研磨では A2017 と接着剤界面での破壊であった。界面破壊の場合、き裂進展に対する抵抗が低くなり疲労強度が低くなったと思われる。このため寿命のばらつきも小さかった。

一方、陽極酸化処理では界面破壊と凝集破壊が混在する破面となった。このことが寿命のばらつき大きな原因である。破断後の A2017 表面を電子顕微鏡でより詳細に観察すると、A2017 表面の凹凸に接着剤が侵入しており、アンカー効果が認められた。また、3.1 節で述べた N_f が著しく小さい 1/8-A 試験片の破面は界面破壊であった。

4. 結言

A2017 と積層構成を変えた CFRP 直交積層板を被着体とした SLJ 試験片について疲労試験を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

1. 機械研磨を施した A2017 を被着体とした場合、UD 試験片を除いて、疲労強度に CFRP 剛性の影響は見られなかった。UD 試験片では、長寿命領域で疲労強度の低下が見られた。また、剛性の低下は寿命の初期の段階から始まり、一定の割合で低下した。
2. 陽極酸化処理を施した A2017 を被着体とした場合、疲労強度は各材料とも大きく向上した。CFRP の剛性が小さい場合の疲労強度が低下する傾向が見られた。また、全寿命の 60%付近で剛性が急激に低下した。これは新たなき裂の発生及びき裂の進展速度の増加が原因であった。
3. 機械研磨を施した A2017 を被着体とした場合、A2017 と接着剤の界面破壊となった。一方、陽極酸化処理を施した A2017 を被着体とした場合、凝集破壊と界面破壊が混在した。

文献

- (1) Seyyed, M.H, Beom, C., P, Heoung-Jae, C., Jong-Chan, P, Hong, S.C, "Failure mechanism of bonded joints with similar and dissimilar material", *Composites: Part B* 161 (2019), pp. 702-709.
- (2) Adnan, O, Betul, Y, Salih, A, Murat, D.A, Semsettin, T, "A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends", *Composite: Part B* 62 (2014), pp. 167-174.