

# エポキシ接着剤を用いた塗分け接着継手の強度特性に関する研究

## Strength properties of epoxy bi-adhesives joints

知能機械工学コース

材料強度学研究室 1265012 澤地 真魁

### 1. 緒言

自動車や航空機などの輸送機器分野では、適切な材料を適切な箇所で使用するマルチマテリアル化が進んでいる。これに伴い、軽量化に加え異種材料の接合が可能な接着接合が広く用いられている<sup>(1)</sup>。接着接合には機械的な接合と比較して、応力集中を低減できるなどの利点があるが、単純重ね合わせ継手 (=Single Lap Joints:以下 SLJ) などの場合、依然として接着端部における応力集中が避けられない。

上述の応力集中を低減させる方法の一つに異なる接着剤を併用して塗り分ける (bi-Ad) 継手があり、これは低弾性率の接着剤を SLJ 接着領域の端部に、高弾性率の接着剤を中央部に配置し応力集中を低減する手法である。この bi-Ad は一般的に複数の接着剤を用いられるが<sup>(2)</sup>、硬化温度の違いなど、施工上の問題が生じ取り扱いが難しい。これに対し、微粒子などを接着剤に添加し、一種類でかつ特性の異なる接着剤を bi-Ad 継手とする手法が考えられる。

本研究では中空微粒子 (以下 MB) をエポキシ樹脂接着剤に添加し、弾性率を低下させた接着剤と無添加の高弾性率の接着剤を用いて bi-Ad 継手を作製し、その機械的特性を調査した。また有限要素法 (FEM) 解析、あるいはデジタル画像相関法 (DIC) を用いたひずみ分布測定による応力分布から検討を行った。

### 2. 材料および実験方法

被着体としてアルミニウム合金 A2017、接着剤として 2 液型エポキシ樹脂接着剤の Alardite2015 を用いた。引張試験により得られた A2017 の機械的性質を表 1 に示す。MB は松本油脂製薬株式会社の MHL-HD60CA(平均粒子径 60 μm)を用いた。接着剤は主剤と硬化剤を 1:1 の割合で混合し MB を 0.5, 1.0 および 5.0 wt% 添加して、真空脱泡を行った。接着面をアセトンで脱脂し、接着剤を塗布した。硬化条件は 70°C で 1 時間保持とした。

Table.1 Properties of the A2017 adherend.

Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Tensile strength [MPa]	0.2% proof stress [MPa]
68.9	0.35	396	298

本研究ではエポキシ接着剤に MB を添加した接着剤の機械的性質を求めるため、100×12×3 [mm] のバルク試験片を作製し、万能試験機 (容量 100kN) を用いて引張速度 0.1 mm/min にて静的引張試験を行った。

SLJ は図 1 に示す形状および寸法のものを使用した。接着長さ L を 12.5 mm 一定とし、一種類のみを塗布して単一接着継手 (mono-Ad) と、中央部と端部で異なる接着剤を塗布した塗分け接着継手 (bi-Ad) を作製した。塗分け比  $d = L_1/L_2$

を 1 および 1/8 に変えた。SLJ の静的引張試験において引張速度を、バルク材と同じく 0.1 mm/min とした。

接着層のひずみ測定には DIC を用いた。SLJ 端部を黒地に塗り白色のランダムパターンをつけ、引張り荷重を 0.15 kN および負荷した時にカメラで撮影した画像から、ひずみ分布を求めた。

汎用解析ソフト ANSYS を用いて、SLJ の FEM モデルを作成し応力解析を行った。本解析に用いた二次元モデルには、8 節点平面ひずみ要素を用いた。応力分布は DIC の測定箇所と同じく接着層中央に沿って求めた。

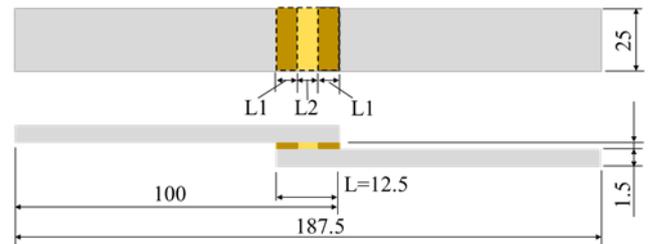


Fig.1 Configuration of SLJs specimen [mm]

### 3. 結果および考察

#### 3.1 接着バルク材の機械的性質

MB を各割合で添加したバルク材について得られた縦弾性係数を図 2 に示す。MB を添加することで縦弾性係数は大きく低下、MB を 5.0 wt% 添加したものは、非添加材に比べ、76.6 % 低下した。

またポアソン比は無添加のものが 0.343、MB を 5.0 wt% 添加したものが 0.337 となりほとんど変化がなかった。一方破壊強度に関しても MB の添加によって低下し、無添加のものが 14.2 MPa、MB を 5.0 wt% 添加したものが 5.69 MPa となり 60.1 % 低下した。

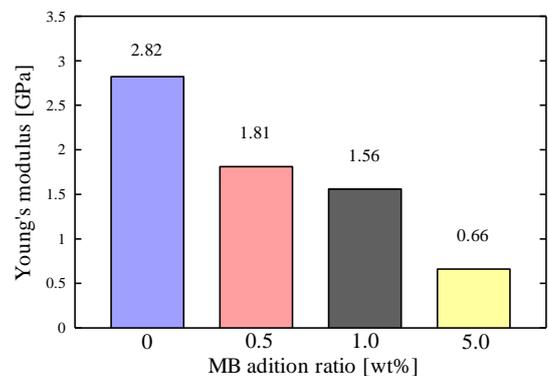


Fig.2 Young's Modulus of adhesive bulk

### 3.2 SLJ 強度

SLJ 強度試験で得られた mono-Ad と bi-Ad, それぞれについて, 破断荷重を接着面積で除した破壊平均せん断応力を破壊強度と定義し, 表 2 に示す.  $t=0.2\text{ mm}$  の場合, bi-Ad とした場合,  $d=1, 1/8$  いずれにおいても強度低下する結果となったが,  $t=0.5\text{ mm}$  の接着厚さが厚い場合は bi-Ad とすることで強度が 1.4 倍ほど向上した. ただし接着厚さが薄い mono-Ad の強度には達しないことが分かった

Table.2 Average fracture strength of SLJs [MPa]

		$t=0.2\text{ mm}$	$t=0.5\text{ mm}$
mono-Ad		17.3	8.80
bi-Ad	$d=1$	10.4	-
	$d=1/8$	12.0	12.3

### 3.3 破面観察

破断後の破面の様相を図 3 に示す. 図 3 の(a)および(c)に示すように接着厚さが薄い場合, 破壊形態は凝集破壊であったが, 厚くなると界面破壊となっている. このため,  $t=0.5$  では接着強度が大きく低下したと考えられる. しかし,  $t=0.5$  でも bi-Ad とした場合, 破面は凝集破壊を維持しており, mono-Ad と比して強度が向上した.

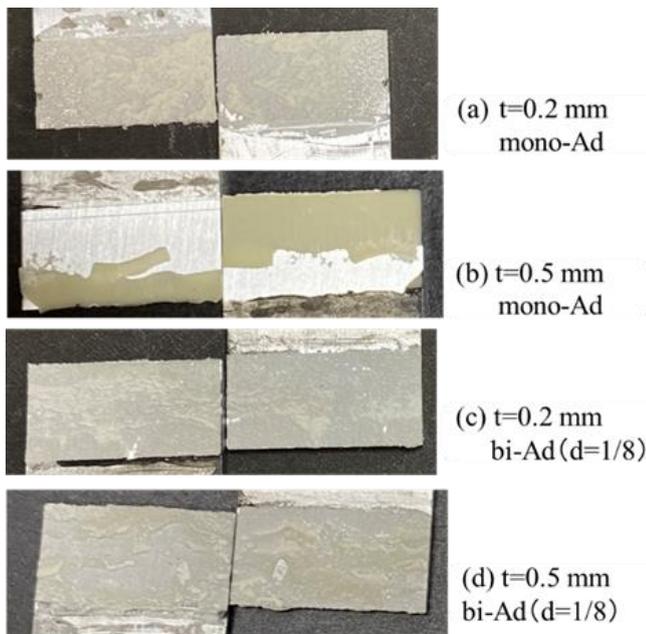


Fig.3 Fracture surface

### 3.4 DIC 結果及び FEM 解析から求めた応力分布

$t=0.5\text{ mm}$  について DIC により測定したひずみに基づいた応力分布と FEM による応力解析で得られた応力分布と比較したものを図 4 に示す. 図 4 は接着層端部から中央に向かった距離で表した応力分布である. 応力値には DIC と FEM の結果を比較するため標準化せん断応力  $\tau/\tau_{center}$  を用いた. ここで  $\tau_{center}$  は中央部のせん断応力である.

DIC による測定結果を比較すると, mono-Ad は応力が端部

に近づくほど増加する応力集中が得られたのに対して bi-Ad では塗分けの境界までは mono-Ad と同様に応力が増加している. 塗分け境界 (端部より  $1.25\text{ mm}$ ) で応力が急激に低下している. mono-Ad に対する bi-Ad の端部における  $\tau/\tau_{center}$  は接着厚さ  $0.2\text{ mm}$  では  $87.7\%$ ,  $0.5\text{ mm}$  においては  $75.0\%$  低下した. FEM の解析結果では端部で 0 となるが, 端部近傍を除く領域では DIC 測定結果と定性的によく一致している.

このように接着厚さが厚い場合には, bi-Ad とすることでせん断応力の最大値を有効に低下させることが可能で, かつ破壊形態も界面型に遷移することを抑制して接着強度を向上させることが可能である

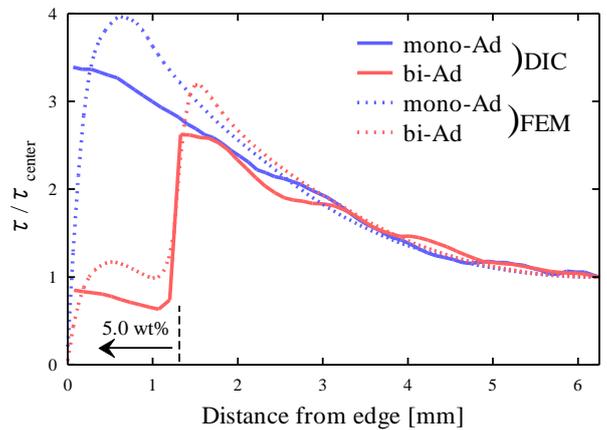


Fig.4 Comparison of shear stress distribution with DIC and FEM ( $t=0.5\text{ mm}$ )

### 4. 結言

本研究で得られた結果を以下に示す.

- (1) 縦弾性係数は MB の添加割合の値が増加するにしたがって低下した. MB を  $5.0\text{ wt}\%$  添加した試験片の縦弾性係数が最も低く, 非添加材に対し,  $76.6\%$  低下した
- (2) SLJ 強度は, mono-Ad に比べ接着厚さ  $0.2\text{ mm}$  では bi-Ad にすることで強度が低下した. しかし, bi-Ad は接着厚さを  $0.5\text{ mm}$  に増加させても強度の低下が起きなかった.
- (3) SLJ の破面を観察すると mono-Ad では接着厚さの増加により破壊形態が界面破壊に変化した, bi-Ad では破壊形態は変化せず凝集破壊が支配的であった.
- (4) DIC の結果を基にした応力分布より, MB の添加により作製した bi-Ad も,従来の bi-Ad と同様に各接着剤間の境界で応力集中が生じ,重ね合わせ端部において応力集中が低減したのではないかと考えられる. FEM の解析結果も同様の傾向を示した.

### 文献

- (1) 中田一博, マルチマテリアル化における接合技術と異種材料接合の展開, 表面技術, 2021, vol72, No12, pp.2-8
- (2) Akhavan-Safar, F. Ramezani, F. Delzendehrooy, M.R. Ayatollahi, L.F.M. da Silva, A review on bi-adhesive joints: Benefits and challenges, International Journal of Adhesion and Adhesives Volume 114, April 2022, 103098