

卒業論文要旨

デジタル画像相関法による SLJ 継手接着層のひずみ分布測定

システム工学群

材料強度学研究室 1230150 牧野 優人

1. 緒言

接着継手は溶接やボルトによる接合と比べて軽量化が可能であること、異種材料間の接合が可能であること、ガルバニック腐食を防ぐことができるなどのメリットがある。そのため近年、接着継手は様々な分野で使用されている。中でも航空業界や自動車業界では軽量化のためにマルチマテリアル化が進んでおり、異種材料間の接合ができる接着接合が注目されている。接着接合は面接合で応力集中を低減できるとされているが、接着端部では少なからず応力集中が生じるため、強度信頼性の観点から注意を要する。

このような応力集中を低減するために接着剤の機械的特性を連続的に変化させ、傾斜機能化する研究が行われている。傾斜機能化に対し接着剤に中空微粒子であるマイクロバルーン(MB)を添加することで接着剤の機械的性質を変えることが可能である。本研究ではこの接着剤を組み合わせ継手に用いたとき、応力集中低減の効果を確認する方法としてデジタル画像相関法(DIC)を用いて単純重ね合わせ継手(SLJ)における接着層のひずみ分布を測定することを試みた。

2. 材料および実験方法

2.1. 材料および試験片

SLJ 試験片には被着体としてアルミニウム合金 A2017 を、接着剤として 2 液型エポキシ樹脂接着剤の Araldite2015 を用いた。また MB には松本油脂製薬株式会社の MFL-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 の割合で混合した。MB を添加する場合はこの時に投入し、攪拌機を用いて 5 分間 300 rpm で攪拌した。その後、15 分間真空脱泡を行った。

被着体は接着面を 1000 番の耐水ペーパーで研磨し、超音波洗浄で洗浄、アセトンで脱脂した後、接着剤を塗布した。接着層の厚さを 0.2 mm に制御しながら、硬化条件 70 $^{\circ}\text{C}$ で 1 時間保持の条件で硬化させた。

試験片の形状および寸法を図 1 に示す。

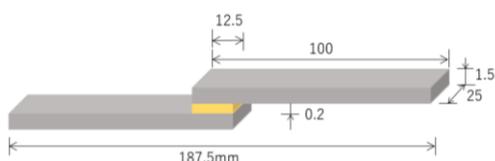
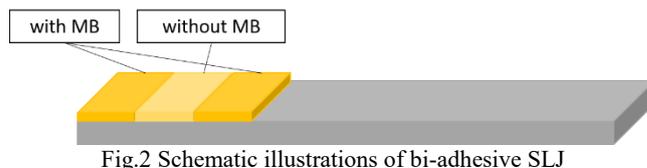


Fig1 Dimension of SLJ specimen

接着部に 2 種類の接着剤を塗り分けた bi-adhesive 継手も作製した。これは図 2 に示すように接着層を長手方向に 3 分割し、両端部に MB を添加した接着剤、中心部に MB を加えていない接着剤を手作業で塗り分けた。MB を 1.0 wt% および 0.5 wt% 添加した接着剤を用いたものを作製した。以下それぞれ MB1.0, MB0.5, MB を添加していない試験片を MB0 と表記する。



2.2. デジタル画像相関法

デジタル画像相関法は、測定対象物表面に塗布したスペckルパターンの変形前後の差異から変位場を測定し、これからひずみ場を算出する手法である。非接触でのひずみ計測が可能であり、近年応用範囲が広がっている。図3に示したスペckルパターンを対象に塗布し変形前後の画像を撮影、変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示す変形後のサブセットを数値解析で探索する⁽¹⁾。

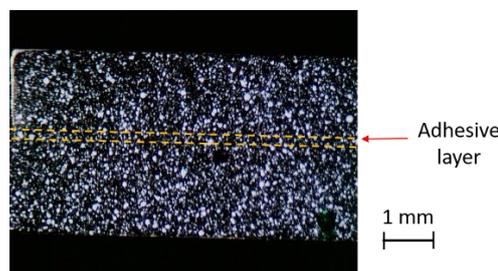


Fig3 Speckle pattern

一般にその探索には式(1)に示すような輝度の残差を最小にする方法を利用する。

$$C(X+u, Y+v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) - I_u(X+i, Y+j) \quad (1)$$

ここで $I_u(X, Y)$, $I_d(X+u, Y+v)$ はそれぞれ変形前後の輝度を示す。X, Y は、サブセットの中心座標を表す。u, v は、それぞれ x 方向, y 方向への移動量を示す。

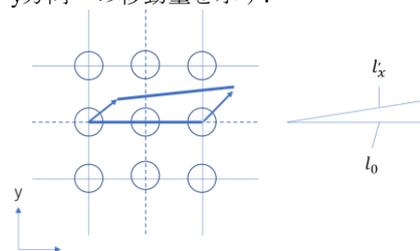


Fig.4 Strain analysis

ひずみ分布は以上により得られた変形量を利用して、例えば x 方向のひずみであれば図4に示す変位場から式(2)を用いて算出する。

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{l_x - l_0}{l_0} \quad (2)$$

これによってひずみゲージによるひずみ計測が困難な狭い場所での測定や連続的なひずみ分布の測定が可能である。

2.3. 実験方法

DIC のためのスペックルパターンは試験片の測定領域を黒く塗りつぶした上にスプレーガンで白色の斑点を付着させることで作成した。万能試験機を用いて予荷重を 0.15 kN 加えた後、カメラ (DS-2500) で変形前のパターンを撮影した。これを初期画像とした。次に 1.5 kN 荷重を加えて変形後のパターンを撮影した。こちらを参照画像とした。再び 0.15 kN 以下まで荷重を戻した後、1.5 kN 荷重を加え、撮影する作業を 3 回繰り返した。それぞれの MB 添加量ごとに 2 枚の試験片を作成し、合計 6 回撮影した。なお、カメラの倍率が低くなると DIC の精度が低下するため、撮影範囲は接着層長さの半分までとした。そして、得られた画像からフリーの解析ソフト Ncorr を用いてひずみ分布を求めた。DIC パラメータについてはサブセット半径を 60 pixel、サブセット間隔は 5 pixel とした。

3. 実験結果及び考察

3.1. MB を添加した接着剤の特性

MB を 0.5 wt% および 1.0 wt% 添加した接着剤のバルク試験片 (12×100×2 mm) を作製し、4 点曲げ試験によりヤング率およびポアソン比を測定した。結果を表 1 に示す。MB を添加することでヤング率は 17% 程度低下する。0.5 wt% から 1.0 wt% に添加量を増してもヤング率の低下はわずかであった。

Table.1 Adhesive properties

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
MB0	2.25	0.42
MB0.5	1.87	0.37
MB1.0	1.77	0.35

3.2. 均一接着 SLJ のひずみ分布

図 5 に MB0 材の接着層内の DIC により測定したせん断ひずみ分布を示す。接着端部を基準として接着長さの 1/2 までの分布である。比較として有限要素法 (FEM) により計算されたひずみ分布を図中に破線により示した。FEM には ANSYS を用い 8 節点四角要素、最小要素サイズ 10 μm で解析した。最大ひずみを比較すると、DIC は FEM に対して 47.4% 低かった。

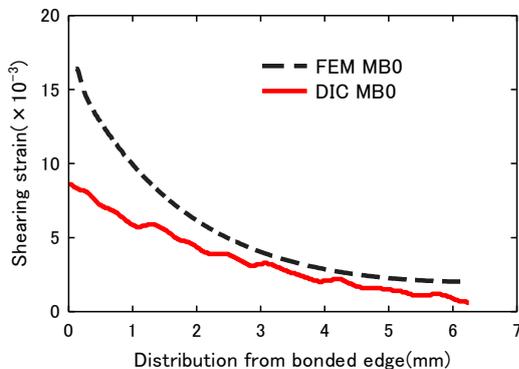


Fig.5 Comparison of strain distribution by DIC and FEM

3.3. bi-adhesive SLJ のひずみ分布

図 6 に DIC によって得られた bi-adhesive SLJ 接着層のせん断ひずみ分布を示す。MB を添加した試験片では添加していない試験片と比べてひずみの集中が低減されていることが確認された。MB0.5 と MB1.0 を比較して、MB の添加量が多いほどひずみが小さくなっている。接着層中央に向かって一定のひずみに収束している。また、それぞれの試験片での最大ひずみは MB0 で $8.6 \times 10^{-3} \varepsilon$ 、MB0.5 で $5.9 \times 10^{-3} \varepsilon$ 、MB1.0 で $4.2 \times 10^{-3} \varepsilon$ となり、MB0 と MB0.5 を比較すると最大ひずみは 31.4% 低下した。MB0.5 と MB1.0 を比較すると最大ひずみは 28.8% 低下した。

図 7 に SLJ 接着層の垂直ひずみ分布を示す。MB を添加していない試験片と FEM による解析は同様の傾向が見られた。MB1.0 と MB0.5 は接着層先端でせん断ひずみと同様に垂直ひずみも大きく低減されていることが分かった。MB を添加した試験片では MB0 と比べてばらつく傾向が大きくなった。これは MB を添加した接着剤を被着体に塗布する際、手作業で塗り分けを行ったことや被着体で接着剤を挟んだ時に MB 添加部と非添加部が延ばされ不均一になった結果であると考えられる。

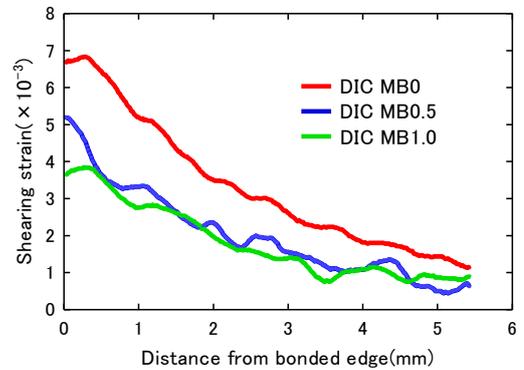


Fig.6 Shearing strain distribution in bi-adhesive SLJ

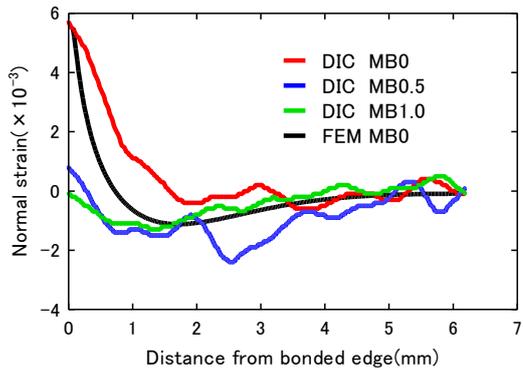


Fig.7 Normal strain distribution of bi-adhesive SLJ

4. 結言

本研究によって得られた結果を以下に示す。

- (1) FEM による解析と DIC による計測では最大せん断ひずみにおいて大きな差が生じ、その差は 47.4% であった。
- (2) bi-adhesive とすることで接着層端部のせん断ひずみおよび垂直ひずみが低減された。

文献

- (1) 出水亨, 松田浩, 森崎雅俊, 内野正和, 伊藤幸広, “デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究”, 土木学会論文集 A2, Vol. 68, No. 2, I_683-I_690, 2012