

# エポキシ樹脂接着剤による単純重ね合わせ継手のクリープ特性

## Creep characteristics of single-lap joints with epoxy resin adhesive

知能機械工学コース

材料強度学研究室 1275029 牧野 優人

### 1. 緒言

近年、航空機や自動車などの輸送機器の分野において、二酸化炭素排出量の低減、燃費向上を目的とし、構造体の軽量化に注力されている。その手法の一つとして、異なる特性を持つ材料を組み合わせるマルチマテリアル化が注目されている。マルチマテリアル化においては異種材料を接合できる接着接合が多く用いられる。加えて、接着接合はねじによる締結に比べて軽量化が期待でき、またガルバニック腐食を防止できるという利点もある。さらに、応力集中の軽減や複合材料などの機械加工が困難な被着体の接合にも適している。

異種材料を接合した接着継手の強度特性に関する研究は多く報告されている<sup>(1)</sup>。一方、接着剤は粘弾性体の高分子材料であり、長時間の荷重により変形が進行することもある。このため接着接合の設計においては、静的強度だけでなく、繰り返し荷重による疲労<sup>(2)</sup>や長時間に及ぶ負荷に対する耐久性も考慮する必要がある。特に高温や高湿度環境では、高分子の結合力が低下し、クリープ変形が急激に進行し、突然の破壊につながる可能性がある。現在、異なる環境下や温度条件下でのクリープ応答を調査する研究が数多く行われているが、水中浸漬による試験<sup>(3)</sup>や荷重負荷前に高温や水中に曝す研究<sup>(4)</sup>が中心であり、高温の空気中での試験を対象とした研究は限定的である。このような背景から本研究では、エポキシ樹脂接着剤を使用した単純重ね合わせ継手の高温環境下におけるクリープ特性を調査した。

また、クリープひずみの評価には長時間の試験が必要であり、実験を複数回行い、寿命を直接確認することは現実的ではない。そこで、シミュレーションは時間およびコストの削減に大きく貢献する手法として有効である。本研究では、単純重ね合わせ継手のクリープひずみを対象に、Burgers モデルを用いたひずみシミュレーションを実施した。

### 2. 試験片および実験方法

#### 2.1 試験片

単純重ね合わせ継手 (SLJ) 試験片の被着体として板厚 1.5 mm のアルミニウム合金 A2017-T3 を用いた。50 × 12.5 mm の長方形板に機械加工した後、接着面を 1000 番の耐水ペーパーで研磨し、アセトンで脱脂した。接着剤として 2 液型エポキシ樹脂接着剤の Araldite 2015 を用いた。なお本接着剤のガラス転移温度は 87°C である。

主剤と硬化剤を重量比 1:1 で混合し、攪拌機を用いて 5 分間 300 rpm で攪拌した。その後、真空中で 15 分間脱泡し、被着体の接着面に塗布した。治具とテフロンシートを使用して接着厚さを制御し、70°C、1 時間保持の条件で硬化させた。荷重をピンを介して負荷するため試験片に直径 5 mm の穴を加工した。試験片の形状および寸法を図 1 に示す。

#### 2.2 試験機

クリープ試験に際して試験機を作製した。その模式図を図 2 に示す。1:5 のてこ比で試験片に静的引張荷重を負荷す

る機構を有する。荷重測定用のロードセルには LC1122-K250 (容量 250 kN) を用いた。試験中の試験片の伸びを測定するために、静電容量型変位計 (DL1-203BE-SP) を使用し、3D プリンターを用いて作製した専用治具で試験片の隣に配置した。試験中の環境温度を一定にするためにマントルヒーターと温度指示調節計 (DSM5-020P013-63111-0060) を用いて試験片周辺の温度を制御した。

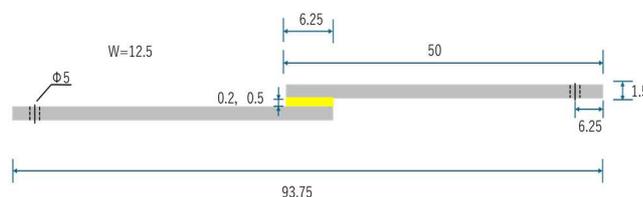


Fig.1 Configuration of SLJ specimen (in mm)

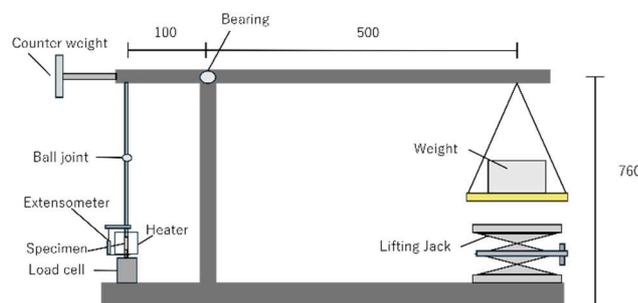


Fig.2 Schematic illustration of the creep testing machine (in mm)

### 2.3 実験方法

前述のクリープ試験機を用いて所定の荷重荷重となるようにおもりを調整した。試験温度は 25, 35, 44 および 66°C の 4 種類として破断までの時間および変形量を計測した。48 h (172.8 × 10<sup>3</sup> s) 経過後も破断しなかった場合はそこで試験を打ち切った。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 荷重応力と破断時間の関係

図 3 に荷重を接着面積で除した接着部平均せん断応力  $\tau_a$  と破断時間  $t_f$  の関係を示す。同一温度条件下では、平均せん断応力が増加するにつれて破断時間が短くなる傾向が確認された。66°C においては、2 MPa 以下というわずかな応力でも、全ての試験片が 48 時間未満で破断した。また、各温度における即破断が生じる下限応力値と 48 時間以内に破断が生じない上限応力値の幅を見ると、25°C 及び 35°C では約 4 MPa であるのに対し、44°C では約 6 MPa と広がっている。この結果は、44°C では接着剤の剛性が低下し、接着端部での弾性的な応力集中が緩和されたため、高応力下でも破断までの時間

が延びたと考えられる。

破壊形態については界面破壊が支配的であった。図4に破面の観察の例を示す。ほとんどの試験片において、温度条件や破断時間の長短に関わらず、破壊形態は界面破壊であった。接着剤自体のクリープ変形は進行するが破壊は界面で生じていることが分かった。

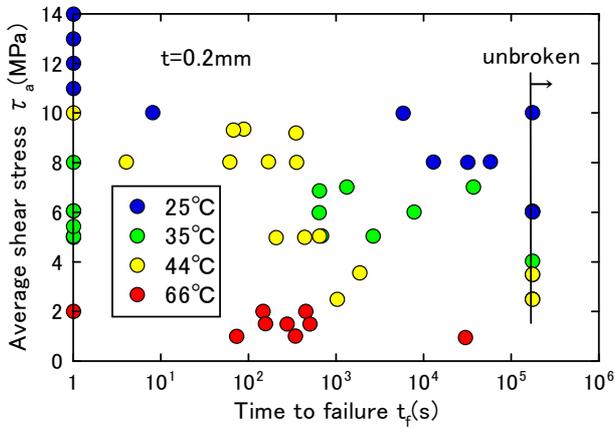


Fig.3 Relationship between average share stress and time to failure

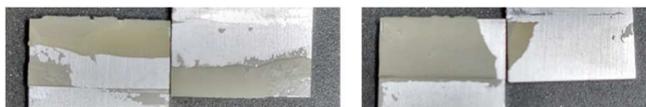


Fig.4 Photographs of fracture surface

### 3.2 クリープ変形シミュレーション

実験で長時間のクリープ試験を行い、寿命を直接確認することは現実的ではない。そこで、シミュレーションは、クリープ挙動を予測するだけでなく、時間およびコスト削減に大きく貢献する手法として有効である。本研究では、クリープ変形シミュレーションに Burgers モデル (図5) を使用した。

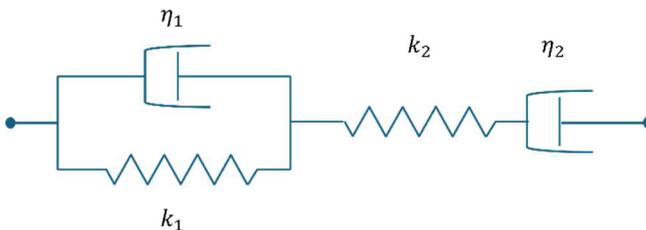


図5 Burgers model

Burgers モデルの構成方程式は以下の式 (1) で表される。

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{E_1} + \frac{\tau_0}{c_1} t + \frac{\tau_0}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2}{c_2} t\right) \right] \quad (1)$$

ここで $\gamma(t)$ はせん断ひずみ、 $E_1$ および $E_2$ はばね要素の弾性率、 $c_1$ および $c_2$ はダッシュポット要素の粘性率、 $\tau_0$ は平均せん断応力、 $t$ は時間である。

式 (1) の第一項は弾性変形を表し、応力を受けた瞬間に

発生する弾性的な変形を表す。ただし本実験においては弾性変形の領域を捉えることができないため第一項は除外している。第2項は粘性変形を表し、時間 $t$ に比例して変形が増大する特性を表現する。第3項では遅延弾性変形を表し、変形が徐々に進行し、最終的に一定になる挙動を表現する。

環境温度 66°Cで行った 1 MPa の実験データを基にして Burgers モデルのパラメータを計算した。一般化簡約勾配法により得られたパラメータにより、せん断応力を 1.5 MPa と 2 MPa に変更してひずみ変化を計算した (図6)。その結果、各応力条件で良好な相関を示した。また、異なる応力条件においても変形が約 0.1 mm 付近で加速クリープが進行し始める傾向が見られた。

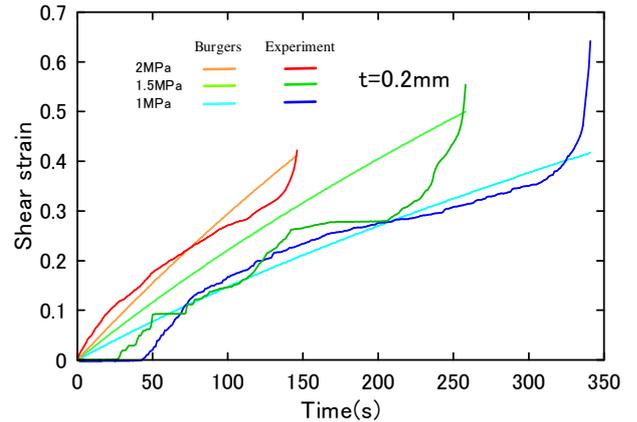


Fig.6 Comparison with 1.5 MPa and 2 MPa simulations based on 1 MPa experimental data at 66°C conditions

### 4. まとめ

- (1) 温度を制御したクリープ試験の結果、高温になるほど破断時間が短くなった。特に 66°Cでは 2 MPa 以下の小さな応力で 48 時間以内にすべての試験片が破断した。
- (2) 44°Cの試験では、ほかの温度条件の試験と比べて応力幅が広がった。
- (3) クリープ破壊の試験片破面は界面破壊が支配的であった。
- (4) Burgers モデルを用いて SLJ 試験片の各温度条件下におけるクリープ変形シミュレーションを行った。Burgers モデルは各応力条件で良好な相関を示した。
- (5) 異なる温度条件においても SLJ 試験片が加速クリープを開始する際の変位は約 0.1 mm であった。

### 文献

- (1) Ozel A, Yazici B, Akpinar S, Aydin M, Temiz Ş. A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. Composites Part B 2014, 167-174,62.
- (2) Mariam M, Afendi M, Abdul Majid M, Ridzuan M, Gibson A, Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminum alloy/glass fiber reinforced composites fabricated with different joining methods, Composite Structures 2018, 647-658, 200.
- (3) C. d. Zeeuwa, "Creep behaviour of steel bonded joints under hygrothermal conditions," International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019.
- (4) R. S. A. Khoramishad, "Creep behavior of polymeric adhesive joints exposed to different environmental conditions," Society of Plastics Engineers, 2020.