

中空微粒子を添加したエポキシ接着剤の疲労き裂伝ば挙動

Fatigue crack propagation behavior of epoxy resin adhesives adding a microballoon

知能機械工学コース

材料強度学研究室 高橋 幸也

1. 緒言

近年、CO₂排出量削減などの要求から自動車、航空機などの輸送機器の軽量化が進められている。軽量化に有利な接合方法として接着が挙げられる。接着接合は軽量化に有利なことに加え、ボルトやリベット等を用いた機械的接合と比較して、応力集中の低減や異材接合が可能など様々な利点がある。しかし、応力集中が皆無とは言えず例えば、代表的な接着継手である単純重ね合わせ継手 (SLJ) では、接着端部においてピール応力やせん断応力の集中が生じる。このような応力集中を防ぐために、傾斜機能接合に関する研究が行われている。傾斜機能接合では、接着剤の機械的性質を徐々に変えながら接着部に適用するが、これまでにも第二世代のアクリル接着剤を複数用いて塗分ける方法や誘導加熱で接着部の特性を部分的に変える方法などが報告されている。これまで研究室ではエポキシ接着剤に中空微粒子を添加することで、硬化後の接着剤の弾性係数が大きく変わることを利用した、塗り分け接着継手を検討してきた。そこでは、SLJ 接着部の両端部に弾性係数の小さい中空微粒子を添加した接着剤を用いることで、応力集中を低下させることが可能であることがわかった。

一方、接着継手の実用上重要な問題として継手の疲労特性の把握が挙げられる。接着継手の疲労特性に関する研究は多く報告されているものの、中空微粒子等を添加した接着継手の疲労特性に関してはデータがない。本研究では、上述の中空微粒子、および比較としてガラスビーズを添加した接着剤における疲労き裂伝ば挙動について、き裂の変形モード、および添加割合の影響を破壊力学パラメータであるエネルギー解放率範囲を用いて評価を行った。

2. 材料および実験方法

2.1 材料

本研究に使用した接着剤は 2 液型エポキシ樹脂接着剤 Araldite2015 である。中空微粒子 (MB) およびガラスビーズ (GB) を添加する場合は、主剤に所定量の MB または GB を混合し十分に攪拌した後、硬化剤を加えてさらに攪拌した。攪拌後 15 min の真空脱泡処理を行った後被着体に塗布した。MB の添加量は 1 wt% および 5 wt% とし、GB は 32.5 wt% および 44.4 wt% とした。後者の条件は MB を 1 wt% 添加した場合と同じ体積分率となる。本実験に使用した MB の平均粒径は 50~70 μm (MFL-HD60CA)、GB のそれは 63~88 μm であった。

2.2 試験片

被着体には板厚 2 mm のアルミニウム合金 A2017 を用いた。130×23 mm の形状に機械加工した後、ホワイトアルミナ#120 を研磨剤として用い、接着面にサンドブラスト処理を施した。疲労き裂伝ば試験はモード I およびモード II 繰り返し荷重下で行うため、それぞれ DCB 試験片および ENF 試験片を作製した。それぞれの試験片形状および寸法を図 1 に示す。DCB 試験片には、モード I 荷重のためのヒンジを図 1(a) に示す位置に接着した。予き裂寸法は DCB および ENF それぞれについて 30 mm および 40 mm とした。なお接着層の厚さは厚さ 0.2

mm のテフロンシートと治具を用いて制御した。

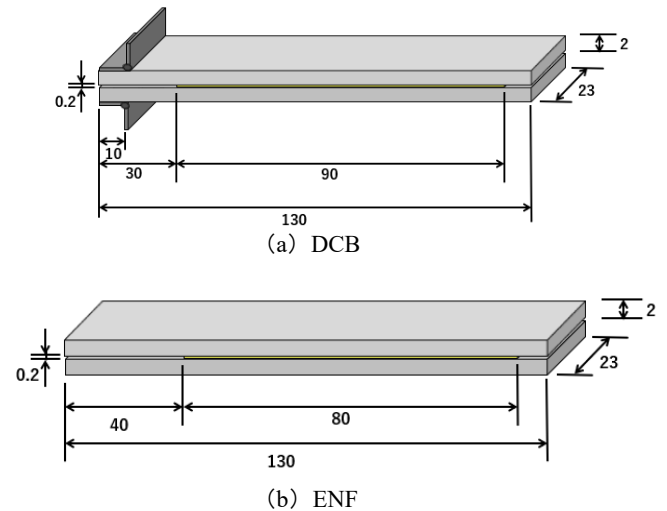


Fig.1 Configurations of specimens used in fatigue crack propagation tests (in mm)

2.3 実験方法

疲労き裂伝ば試験は油圧サーボ疲労試験機 (島津製作所, EHF-F1, 容量 10 kN) を用いて行った。荷重比は 0.1 で、荷重制御もしくは変位制御で繰返し速度 5 Hz の正弦波荷重をかけた。

各モードにおけるエネルギー解放率範囲 ΔG_I および ΔG_{II} はそれぞれ式 (1) および式 (2) を用いて算出した。

$$\Delta G_I = G_{I \max} - G_{I \min} = \frac{12(P_{\max}^2 - P_{\min}^2)a^2}{EB^2H^3} \quad (1)$$

$$\Delta G_{II} = G_{II \max} - G_{II \min} = \frac{9(P_{\max}^2 - P_{\min}^2)a^2}{16EB^2H^3} \quad (2)$$

ここで P は荷重荷重, E は被着体のヤング率, a はき裂長さ, B は被着体の幅, H は被着体の厚さを示している。

3. 実験結果および考察

3.1 モード I 疲労き裂伝ば挙動

モード I 疲労き裂伝ば試験で得られたエネルギー解放率範囲 ΔG_I とき裂伝ば速度 da/dN の関係を両対数表示で図 2 に示す。試験は各材料につき 3 本以上実施した。

MB を 1 wt% 添加すると、添加しない 0 wt% 材と比較してき裂伝ば抵抗が向上した。これは MB を添加することで、き裂先端付近の応力場が有効に低下したためだと考えられる。一方で、MB を 5 wt% 添加した場合はき裂伝ば抵抗が低下した。MB を 5 wt% 添加すると接着剤自体の強度が大幅に低下するとともに、MB の過度な添加が MB を欠陥として作用させたことが原因と考えられる。

一方、GB を添加すると、添加量が増加するに従ってき裂の伝ば抵抗が向上した。MB、GB を同体積分率添加した条件で比較すると、き裂伝ば抵抗が同程度であった。添加した微粒子の量が過剰でない場合、これらがき裂伝ばに及ぼす影響は、中空であるか、中実であるかの違いによらないことがわかった。

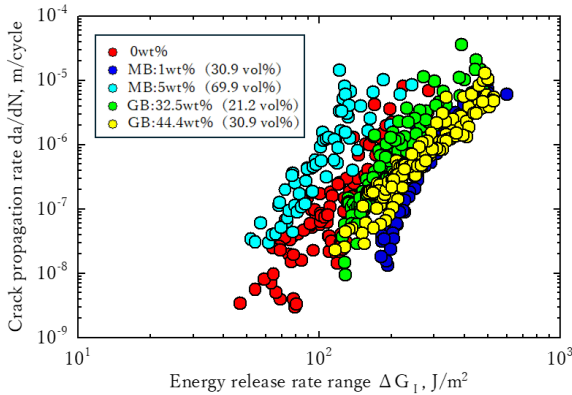


Fig.2 Relationship between crack propagation rate and energy release rate range in Mode I

3.2 モードII疲労き裂伝ば挙動

モードII疲労き裂伝ば試験で得られたエネルギー解放率範囲 ΔG_{II} とき裂伝ば速度 da/dN の関係を両対数表示で図3に示す。試験は各材料につき3本以上実施した。モードIIにおける da/dN と ΔG_{II} の関係ではモードIに比べてばらつきが小さくほぼ1本の曲線でこれを表すことができた。またモードIIでは、MBの添加量が増加するに従ってき裂伝ば抵抗が低下した。原因については次節で考察する。

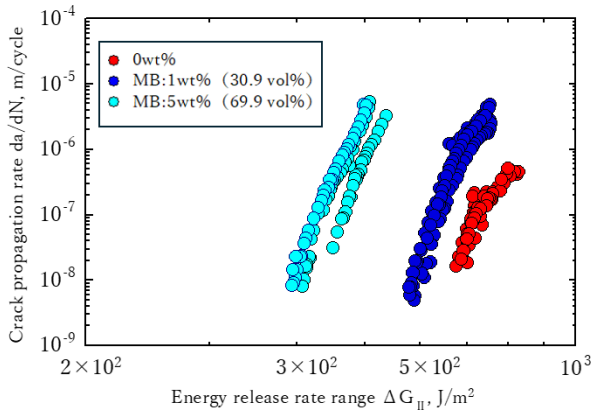


Fig.3 Relationship between crack propagation rate and energy release rate range in Mode II

3.3 破面観察

0 wt%材およびGBを添加した試験片の巨視的破面を観察した結果、モードIおよびモードII条件のいずれにおいても図4(a)の模式図に示すように一方の被着体表面近傍から、他方の被着体表面近傍へ、き裂が屈曲しながら伝ばしており凹凸の段差が確認された。一方、MBを添加した試験片の破面ではモードIおよびモードII条件のいずれにおいても図4(b)の模式図に示すように、いずれか一方の被着体表面近傍の接着剤中をき裂が直線的に伝ばしており平坦な破面様相を示すことが確認された。モードIIでは、き裂面の大部分でせん断によるずれの変形が生じるため、MBを添加せず、図4(a)に示したようなき裂経路となる場合、き裂が伝ばしにくくなると考えられる。以上のことからMBの添加が da/dN を加速

させたと考えられる。

図5に走査型電子顕微鏡 (SEM) によって観察した微視的破面を示す。図5(a)に示すようにMBを添加したモードIの破面では、き裂がMBの殻膜を破壊しながら伝ばする。一方、モードIIでは、殻膜自体の破壊が生じず、図5(b)に示すように破面上にこれらが観察される。

GBを添加したモードIの破面では、前述したように段差が確認された(図5(c))。またGBを避けてき裂がガラスと接着剤の界面で伝ばしており(図5(d))、MBを添加した場合とき裂伝ば経路が異なる。モードI条件下においては適量のMBを添加することにより応力場が有効に低下するのに対し、GBの添加はき裂の直線的伝ばを妨げるという別のメカニズムでき裂伝ば抵抗が向上したと考えられる。

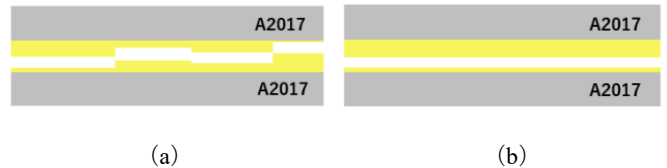


Fig.4 Schematic diagram of fracture surface

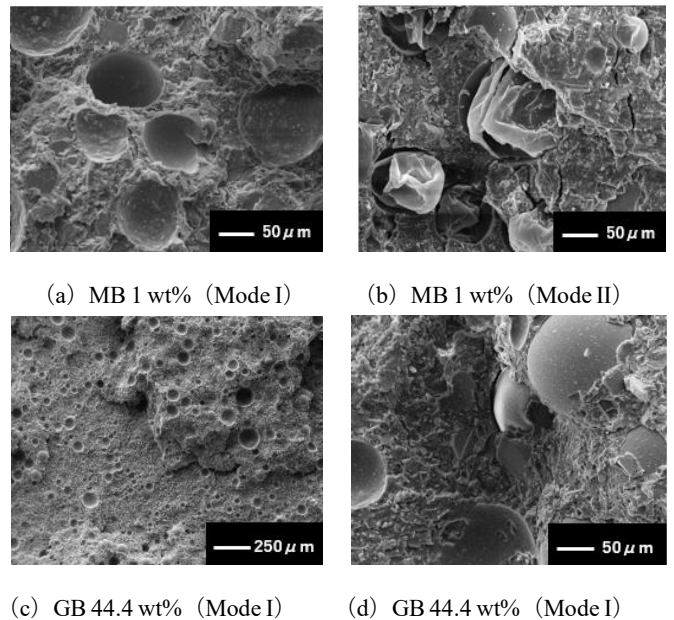


Fig.5. SEM observations of fracture surface

4. 結言

MB および GB を添加したエポキシ樹脂接着剤の疲労き裂伝ば抵抗について、得られた結果を以下に示す。

- (1) モードI試験では、MBを1 wt%添加することでき裂伝ば抵抗が向上したが、5 wt%添加すると混合量が過剰となり伝ば抵抗が低下した。
- (2) モードII試験では、MB添加によってき裂が直線的に伝ばしており、これが原因でMBの添加量が増加するに従い、き裂伝ば抵抗が低下した。
- (3) モードI試験では、MBおよびGBを同体積分率添加した際とき裂伝ば抵抗は同程度であり、添加した微粒子が適量の場合、微粒子がき裂伝ば挙動に及ぼす影響は中空であるか中実であるかには依存しなかった。

(参考文献省略)