

卒業論文要旨

中空微粒子を添加した接着剤による接着継手のモード I 疲労き裂進展挙動

Mode I fatigue crack propagation behavior of adhesive joints using adhesives containing hollow particles

システム工学群

材料強度学研究室 1250178 吉田 耕生

1. 緒言

近年、地球温暖化が進行し、温室効果ガス排出削減が重要視されている。輸送機器分野では CO₂ 排出量削減のため、車体の軽量化が課題となっており、接着接合技術が注目されている。接着接合は、従来の機械的接合に比べて軽量化、振動吸収性、応力集中緩和などの利点があり、異種材料の接合にも対応できる。ただし、接合強度のばらつきや被着体表面に対する依存性、応力集中が課題であり、接着部の形状設計や接着剤の最適化が必要である。これらの課題を克服するため、接着層端部にフィレットを設ける方法[1]や異なる弾性係数の接着剤を組み合わせる方法が提案されているが、施工の難しさや硬化条件の問題がある。そこで中空微粒子を混合する方法が注目されている。先行研究[2]では、接着層中央部に高剛性な接着剤を塗布し、端部に中空微粒子を混合した剛性が小さい接着剤を塗布する手法で応力集中の緩和を図った。その結果、端部の応力集中は緩和し、静的強度が向上した。

本研究では、この中空微粒子を添加した接着剤による継手に対し、長期稼働における信頼性を確保するのに必要な繰返し荷重下での疲労特性、特に疲労き裂進展挙動に注目し、これに及ぼす中空微粒子混合の影響を明らかにすることを目的としている。

2. 材料および実験方法

2.1 試験片

本研究では、被着体としてアルミニウム合金 A2017、接着剤として二液型エポキシ接着剤 Alardite2015 (HUNTSMAN Corporation)、中空微粒子は平均粒子径 50~70 μm の MFL-HD60CA (松本油脂製薬株式会社) [3] を使用した。被着体および接着剤の機械的特性を表 1 に示す。

Table. 1 Mechanical properties

	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Poisson's ratio
A2017	68.9	396	0.35
Alardite2015	2.82	15.4	0.343

接着剤は主剤と硬化剤を 1:1 の割合で混合し、中空微粒子を 0, 1, および 5 wt% 添加し、真空脱泡を 15 分間行った。被着体接着面にサンドブラスト加工を施し、接着剤を塗布した。接着厚さを制御するため、治具および 0.2 mm 厚さのテフロンシートを使用し、70℃で 1 時間保持し硬化させた。硬化後、余分な接着剤はスクレイパーなどを用いて除去した。試験片に一液型加熱硬化型接着剤 XA7416 (3M Company) を用いて蝶番を取り付けた。使用した試験片形状および寸法を図 1 に示す。

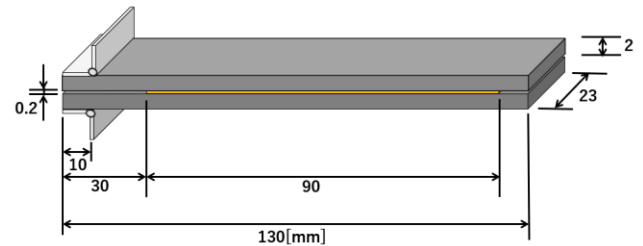


Fig. 1 Specimen shape and dimensions

2.2 実験方法

本研究では、モード I 疲労き裂進展試験として二重片持ちはり試験 (DCB 試験) を行った。試験には油圧式疲労試験機 EHF-F1 (島津製作所) を用いた。試験条件として、繰返し速度 5.0 Hz、応力比 0.1、正弦波、荷重制御および変位制御で行った。また、き裂が約 0.5 mm 進む毎に 2 秒間 1000 個の荷重、変位のデータ、サイクル数を記録した。

まず荷重制御で試験を行い、パリス則の直線近似領域を超え、不安定破壊領域に達するまで行った。その際変位のデータをとり、そのデータをもとに変位制御に変更し、き裂進展速度が 1 サイクルあたり $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}$ 以下になるまで試験を行った。また、荷重制御、変位制御ともに実測したコンプライアンス C からき裂長さ a を算出し、エネルギー解放率範囲 ΔG_I を算出した。

試験終了後、試験片に荷重を加え破断させ、走査型電子顕微鏡 JCM-5000 (日本電子株式会社) を用いて破面観察を行った。

3. 実験結果

3.1 モード I 疲労き裂進展試験

本研究で得られたき裂進展速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG_I の関係を図 2 に示す。

中空微粒子添加量に関わらず、すべての試験片で金属材料の疲労き裂進展挙動にみられる指数則 (パリス則) が成り立つことが分かった。また、中空微粒子を添加していない場合と比較すると、1 wt% 中空微粒子を添加した場合では、同一のエネルギー解放率範囲に対するき裂進展速度が低下した。この原因として、次節の破面観察結果からも示されるように、0 wt% では一部に段差が生じていたことが挙げられる。この段差が発生した領域では、き裂の進展が促進され、結果としてき裂進展抵抗の低下が引き起こされたと考えられる。対して 5 wt% 中空微粒子を添加した場合では、中空微粒子を添加していない場合と比較すると、き裂進展速度が上昇した。この原因として、中空微粒子の過剰な添加により接着剤中の欠

陥として働き、き裂進展抵抗の低下を招いたと考えられる。

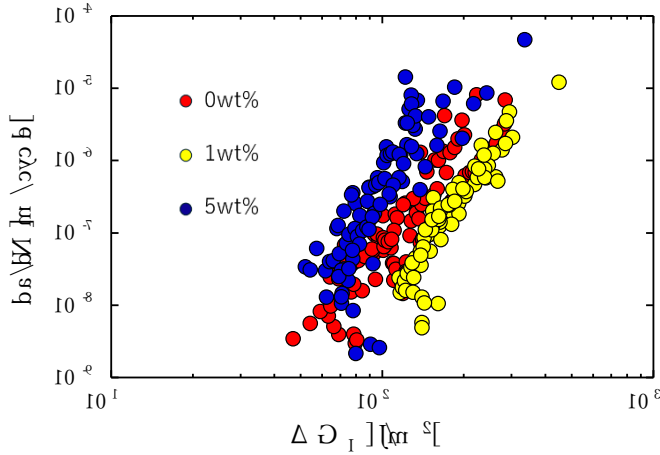


Fig. 2 Relationship between the crack growth rate and energy release rate range

3.2 破面観察

図 3 に各中空微粒子添加量の試験片の巨視的な破面を示す。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した破面を図 4 に示す。

すべての試験片で凝集破壊が支配的だった。しかし中空微粒子 0 wt% の試験片の破面では、一部で段差が見られた。加えて、SEM を用いた破面観察の結果、中空微粒子を添加した試験片 (1 wt%, 5 wt%) においては、き裂長さが短い領域と長い領域を比較して、変化が見られなかったものの、中空微粒子 0 wt% の試験片では、き裂長さが長い領域のほうが破面の凹凸が少し粗くなり、平らなファセットが一部見られる。このことは、き裂長さの増加に伴いき裂進展速度が加速され、その結果き裂長さが短い領域と比較して 1 サイクルあたりのき裂進展が大きくなったことと関係していると思われる。

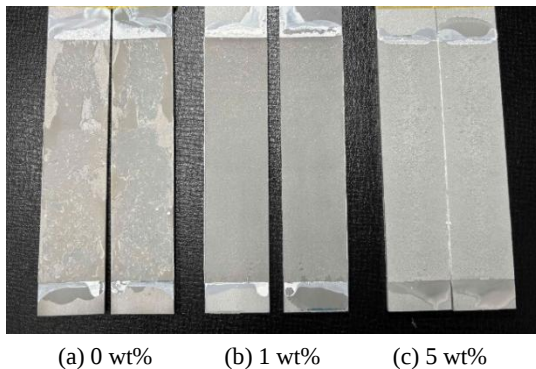
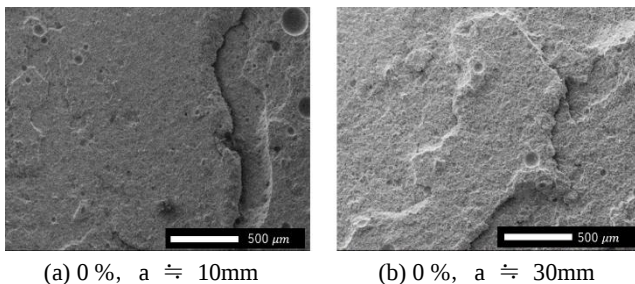


Fig. 3 Macroscopic fracture surface observation of specimens



(a) 0 %, a ≒ 10mm

(b) 0 %, a ≒ 30mm

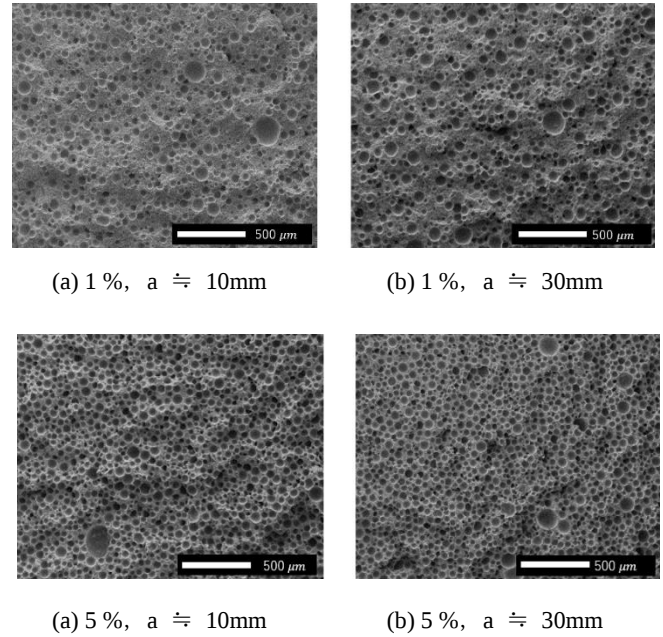


Fig. 4 SEM observation of fracture surface

4. 結言

本研究では、二重片持ち梁試験片 (DCB 試験片) でモード I 疲労き裂進展試験を行い、中空微粒子混合の影響を調査した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 中空微粒子添加量に関わらず、き裂進展速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG_I の間にパリス則が成り立つことが分かった。
- (2) 中空微粒子添加量に対するき裂進展抵抗が高い順に 1 wt%, 0 wt%, 5 wt% となった。
- (3) 破面観察の結果、中空微粒子混合に関わらず凝集破壊が支配的だった。しかし中空微粒子 0 wt% では破面に段差が見られた。
- (4) 中空微粒子 0 wt% では破面が、き裂長さが短い領域と長い領域を比較して、き裂長さが長い領域のほうが破面の凹凸が少し粗くなり、平らなファセットが一部見られることが分かった。

文献

- [1] Salih Akpınar, Muhammet Onur Doru, Adnan Ozel, Murat Demir Aydin, Hamed Ghaffarzadeh Jahanpasand, Elsevier, 55, 55-64 (2013)
- [2] 澤地真魁, 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, 2023
- [3] 松本油脂製薬株式会社, “マツモトマイクロスフェア MFL シリーズ | 一般工業関連 | 製品情報 TOP | 製品情報 | 松本油脂製薬株式会社”, 2008, <https://www.mtmty.co.jp/product/general/data02.html> (参照 2025/01/15)