

マイクロコンポジットを用いた繊維／樹脂 界面の疲労強度評価

京都大学 正○北條 正樹
京都大学〔院〕 寺島 啓太
京都大学 正 井上 忠信

京都大学〔院〕 志田 穰
京都大学 正 落合 庄治郎
大工研 正 澤田 吉裕

1. はじめに

繊維強化樹脂複合材料の強度評価に関して、マクロな特性は、疲労、衝撃、クリープ等を含め、近年活発な研究がなされ、大まかな傾向はほぼとらえられるようになってきた。複合材料の場合、これらのマクロな特性は、繊維、樹脂、界面といったメゾ構造の挙動（メゾ事象）の協力現象として発生するが、これらの素過程の直接評価、およびメゾ事象の協力状態を記述するメゾメカニクスの確立は遅れている。

繊維／樹脂界面の特性評価については、これまで種々の方法が提案されてきたが[1-3]、いずれも境界条件等に問題があり、定性的評価に留まっていた[4]。また、変動荷重に対する評価が困難な手法も多い。

本研究では、比較的实际の複合材料の境界条件を満たす、マイクロコンポジット法 [4,5] を用い、新たに開発した低荷重疲労試験機と組み合わせ、繊維／エポキシ樹脂界面の静的および疲労強度評価を試みた。

2. 実験方法

2.1 材料・試験片 用いた炭素繊維は、旭化成（株）のPAN系繊維AT-400で、通常の陽極酸化処理をしたものと、無処理のものの2種類を用意した。なお、繊維にサイジング処理は行っていない。エポキシ樹脂はエビコート828とし、硬化剤としてトリエチレントトラアミンを10%加えた。自作した治具を用いて、Fig. 1に示す7本の繊維からなるマイクロコンポジットを作製した。その後、片側で中央繊維、もう一方で周辺の6本の繊維を切断し、JIS R7601に準拠してゲージ長15mmの紙枠に張り付け、試験片とした。

2.2 疲労試験 試験は、電磁アクチュエータを荷重源とする低荷重疲労試験機（容量9.8N）に2.5Nのロードセルを取り付けて実施した。静的試験は 2×10^{-3} mm/sec、疲労試験は繰り返し速度30Hz、応力比 $R=0.1$ 及び 0.5 で行った。負荷した荷重は静的試験で150mN、疲労試験で100-130mN程度である。

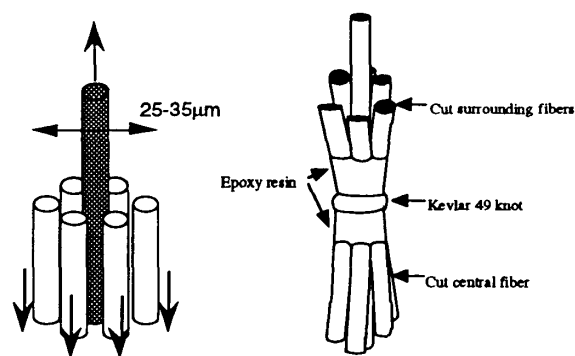


Fig. 1. Schematics of microcomposite specimen.

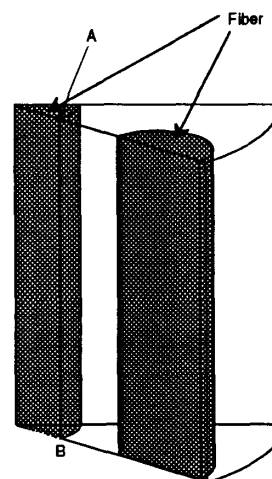


Fig. 2. Model of FEM analysis.

2.3 応力解析 Fig. 2のようにマイクロコンポジットの1/12を取り出して、3次元弾性有限要素解析を行った。解析にはMARC K6を用い、繊維径は $7 \mu\text{m}$ 、繊維間の距離は $8 \mu\text{m}$ 、繊維弾性率は236GPa、樹脂弾性率は4GPaとした。マイクロコンポジット長さは100, 200, 400 μm の3種類とした。

3. 結果および考察

3.1 FEM解析及び静的試験の結果 FEM解析による界面の繊維長手方向の応力分布（Fig. 2のAB上）をFig. 3に示す。横軸はマイクロコンポジット上端からの距離を示したものであるが、図のように上端で応力集中が起きている。しかし、Fig. 3のよ

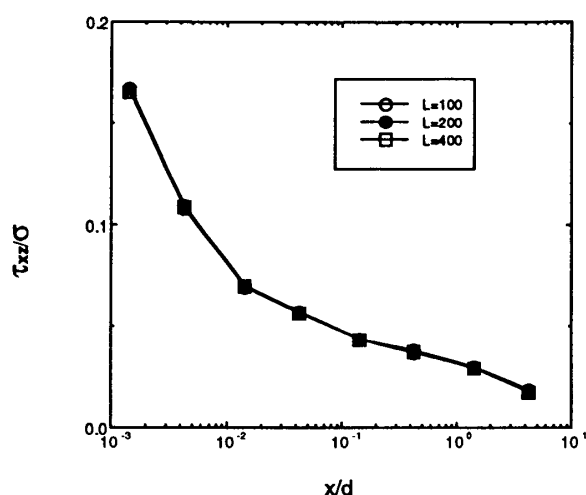


Fig.3. Stress distribution along the central fiber.
d : fiber diameter, x : distance from top of microcomposites, L : microcomposite length (μm) .

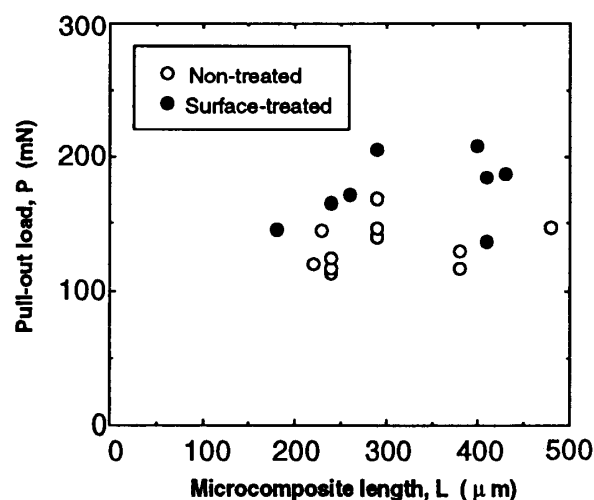


Fig.4. Relation between pullout load and microcomposite length.

うに、引張応力で無次元化した応力分布はマイクロコンポジット長さにほとんど依存しない。したがって、破壊基準を特定することには困難が伴うが、マイクロコンポジットの引張破断荷重が、界面強度の絶対的な評価を与えることがわかる。そこで、Fig.4に、静的試験における引張破断荷重とマイクロコンポジット長さの関係を示した。図のように、長さ依存性がなくなり、定量的な評価を与えていることがわかる。表面処理により、界面強度は約30%増大する。

3.2 疲労試験結果 Fig. 5に界面疲労試験のL (荷重) -N関係を示す。L-N関係はほぼ水平であり、比較的脆い破壊の様相を示している。静的な破壊と比べ未処理のCFは荷重レベルが類似しているが、表面処理をした炭素繊維では、疲労荷重下のほうが荷重レベルが低下している。また、表面処理の効果

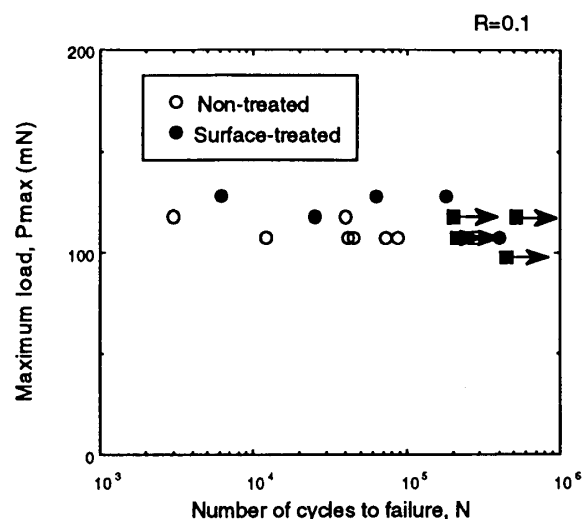


Fig.5. Relation between pullout load and number of cycles to failure.

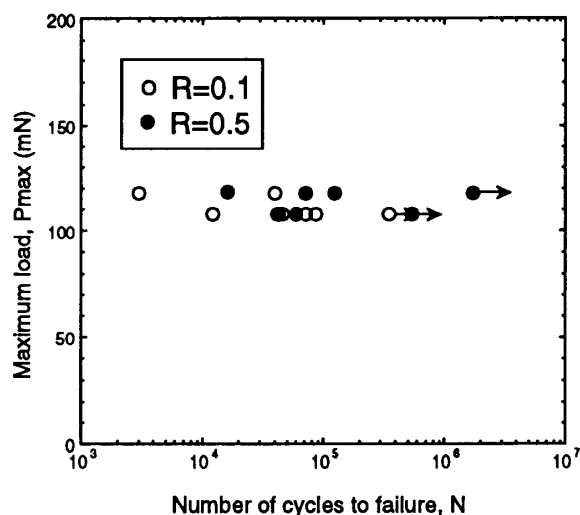


Fig. 6. Effect of load ratio on the relation between pullout load and number of cycles to failure.

は静的な試験と比べ明らかに低下しており、その差は約10%となった。

表面処理なしの繊維について、L-N関係の応力比依存性を調べた結果をFig. 6に示す。図のように、最大荷重で整理した場合、応力比依存性はほとんどなく、Fig. 5の脆い破壊の様相とも一致している。

疲労荷重下での界面強度は、基本的には同じせん断モードであるモードIIの疲労き裂伝ば挙動やせん断疲労試験の結果と大きく異なっており、マイクロコンポジットでの界面の疲労の微視的な機構が複合材料のマクロなせん断疲労破壊と異なることを示唆している。今後詳細な微視観察が必要であると考えられる。

結言、参考文献略