

# 一方向炭素繊維強化プラスチックの モード III き裂進展挙動

名古屋大学 正 田中 啓介 名古屋大学 正 ○田中 拓

## 1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP: Carbon Fiber-Reinforced Plastic) の破壊は、繊維に沿った層間はく離き裂 (Interlaminar crack) あるいは層内き裂 (Intralaminar crack) の発生・進展に起因することが多い。しかしながら、層間や層内の破壊靱性に関する従来の研究のほとんどは、モード I (開口) 荷重とモード II (面内せん断) 荷重を対象としており、モード III (面外せん断) 荷重によるき裂進展挙動を検討したものは少ない。

本研究では、2種類のCFRPを用いて分割片持ちはり (SCB: Split Cantilever Beam) 法によるモード III 破壊靱性試験を行い、モード III き裂の進展挙動を明らかにするとともに、得られた破壊靱性値をモード I あるいはモード II き裂のものと比較検討した。

## 2. 実験方法

**2.1 供試材** 本研究では、炭素繊維/エポキシ積層板、東レ T800H/#3631 (以下ではCF/Epoxy)、および炭素繊維/熱可塑性樹脂積層板、AS4/PEEK (以下ではCF/PEEK) を用いた。いずれも一方向強化材を実験に供した。

**2.2 SCB 試験** SCB 試験は、中央面にき裂を有する試験片に対し、Fig. 1 のような面外せん断荷重を与える。繊維方向は試験片の長手方向 (き裂進展方向) であり、これを  $x$  方向とする直交座標系をとる。き裂面に垂直な方向 ( $y$  方向) の試験片幅を  $2b$ 、荷重軸方向 ( $z$  方向) の試験片高さを  $H$

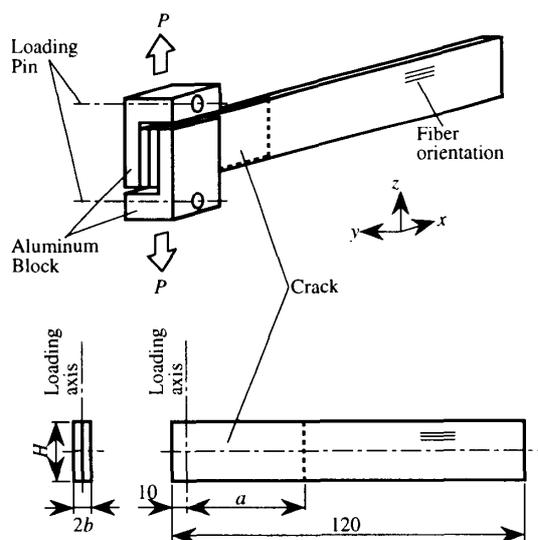


Fig. 1. SCB test.

を表す。

CF/Epoxy では層間靱性試験と層内靱性試験を行った。一方、CF/PEEK は層間試験のみ実施した。試験本数はそれぞれ3本である。層間試験では厚さ  $12\mu\text{m}$  のカプトンフィルムを初期欠陥とし、モード II 荷重による予き裂を導入してから試験を行った。層内試験の場合、マイクロカッターを用いて繊維に平行かつ層間に垂直なき裂状切欠き (幅  $0.8\text{mm}$ ) を導入し、同様にモード II の予き裂を進展させた後、試験を実施した。試験片高さ  $H$  は層間試験で  $20\text{mm}$ 、層内試験では  $15\text{mm}$  である。また、 $2b$  は層間試験で約  $6\text{mm}$ 、層内試験では  $10\text{mm}$  とした。

**2.3 エネルギー解放率および応力拡大係数** モード III エネルギー解放率  $G_{III}$  および応力拡大係数  $K_{III}$  は3次元境界要素法によって計算した。SCB 試験片では、モード III エネルギー解放率  $G_{III}$  がき裂前縁 ( $z$  方向) に沿って一定とならず、 $G_{III}$  は試験片中央で最大となり、試験片表面付近ではやや低下する。逆に、表面付近ではエネルギー解放率のモード II 成分  $G_{II}$  が発生する。しかしながら、本研究では荷重点コンプライアンスが5%変化した時点でも、試験片表面ではき裂の進展が観察されなかったため、モード III 荷重によって試験片中央部を起点としてき裂が進展したと考えられる。モード III 破壊靱性値は、き裂の進展開始荷重に対応する、試験片中央の  $G_{III}$  あるいは  $K_{III}$  の値とした。

## 3. 実験結果および考察

**3.1 モード III 破壊靱性値** CF/Epoxy の層間試験で得られた荷重-変位曲線の例を Fig. 2 に示

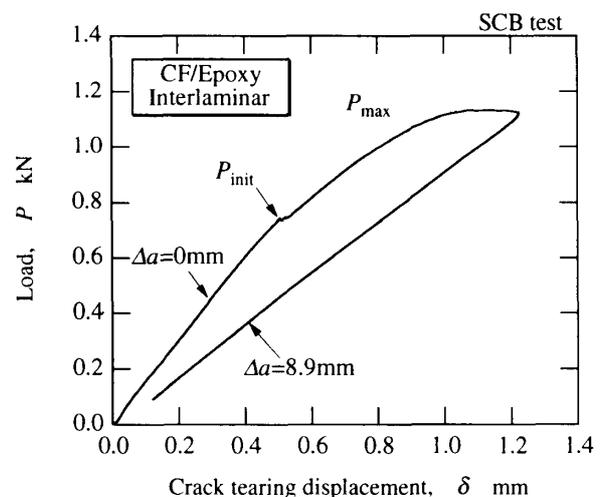


Fig. 2. Load-displacement curve (CF/Epoxy, Interlaminar).

Table 1. Results of SCB test.

Material	Fracture mode	Fracture toughness (kJ/m <sup>2</sup> )	
		G <sub>MC</sub>	G <sub>MR</sub>
CF/Epoxy	Interlaminar	0.77±0.07	1.96±0.11
	Intralaminar	0.73±0.06	1.91±0.18
CF/PEEK	Interlaminar	3.9±0.2	8.7±0.8

す。初期の線形部分の後、荷重  $P_{init}$  において曲線の折れ曲がりが生じる。その後は曲線が上に凸の非線形を示し、最大荷重  $P_{max}$  に達する。この間のき裂進展量は 8.9mm であった。本研究では、 $P_{init}$  に対応する破壊靱性値を  $G_{MC}$  あるいは  $K_{MC}$ 、また  $P_{max}$  に対応する値を  $G_{MR}$  あるいは  $K_{MR}$  で表す。

一方、CF/PEEK の場合、荷重 - 変位曲線に明瞭な折れ曲がり点は見られなかった。CF/PEEK では 5% オフセット荷重を  $P_{init}$  とした。  $P_{init}$  を越えた後も荷重は上昇し、最大荷重  $P_{max}$  までにコンプライアンスは著しく増加した。

Table 1 に、得られた破壊靱性値  $G_{MC}$  および  $G_{MR}$  の値を標準偏差とともに示した。いずれの場合も  $G_{MR}$  は  $G_{MC}$  の 2 倍以上に達しており、モード III き裂進展は顕著な増加型 R カーブ挙動を示す。CF/Epoxy の場合、層間靱性と層内靱性はほぼ一致した。CF/PEEK の靱性値は CF/Epoxy に比べて、 $G_{MC}$ 、 $G_{MR}$  ともに 5 倍程度大きくなっている。

**3.2 き裂進展機構** CF/Epoxy の層間試験の後、繊維直交断面で試験片を切断し、研磨を施してから断面を観察した。Fig. 3 に断面写真とその模式図を示す。ただし、観察面は最終き裂先端から充分荷重点側であり、紙面奥行き方向がき裂進展方向である。モード III 主き裂と交差するように、長さや方向が比較的揃った斜めのき裂が多数見られる。

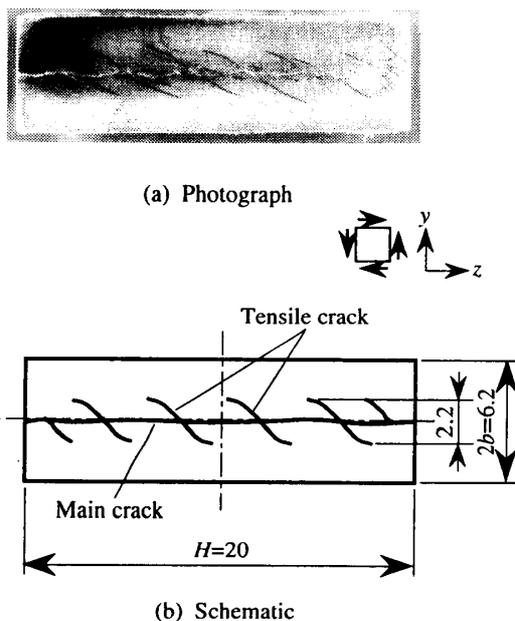


Fig. 3. Cross section of SCB specimen (CF/Epoxy, Interlaminar).

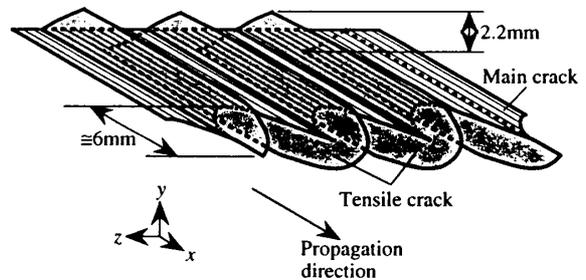


Fig. 4. Schematic of mode III crack propagation in CF/Epoxy.

これらの斜めき裂は、モード III 面外せん断荷重による引張主応力によって生じたき裂と考えられる。斜めき裂の生じた領域は、試験片幅  $2b \approx 6\text{mm}$  の 1/3 程度にまで及んでいる。また、斜めき裂は同材料の層内試験片でも観察された。

斜めき裂の 3 次元的な形状・寸法を調べ、Fig. 4 に模式図として示した。斜めき裂の前縁はほぼ半楕円形であった。斜めき裂はモード III 主き裂先端より 6mm 程度も先行していることから、モード III 主き裂の進展に先立って発生したと考えられる。Fig. 2 の荷重  $P_{init}$  は斜めき裂の発生に対応していると予想される。最大荷重  $P_{max}$  の時点では斜めき裂による損傷域が十分に成長しており、この損傷域寸法は明らかに小規模降伏の範囲を逸脱している。したがって、 $P_{max}$  に対応する破壊靱性値  $G_{MR}$  は線形破壊力学のパラメータとしての意味を失っていると考えられる。モード III 破壊靱性値としては、 $P_{init}$  に対応する  $G_{MC}$  あるいは  $K_{MC}$  の方が物理的意味が明確である。

CF/PEEK の場合は斜めき裂が観察されなかった。CF/PEEK の靱性値が  $G_{MC}$  から  $G_{MR}$  まで増加する原因としては、マトリックス樹脂の塑性変形の発達と考えられる。

**3.3 モード I と II の破壊靱性値との比較** Table 2 は、層間はく離き裂の  $G_{MC}$ 、 $K_{MC}$  をモード I およびモード II の破壊靱性値と比較したものである。応力拡大係数で比べた場合、モード III 靱性値はモード I と II の間にあり、モード I の方に近い。特に CF/PEEK では  $K_{IC}$  と  $K_{MC}$  がほぼ一致している。一方、エネルギー解放率で比較すると、CF/Epoxy ではモード III とモード II の靱性値がほぼ等しく、CF/PEEK ではモード III 靱性値が最大となるのがわかる。

(結言、参考文献は省略)

Table 2. Effect of loading mode on interlaminar fracture toughness.

Material	Stress intensity factor (MPa√m)			Energy release rate (kJ/m <sup>2</sup> )		
	$K_{IC}$	$K_{IIC}$	$K_{MC}$	$G_{IC}$	$G_{IIC}$	$G_{MC}$
CF/Epoxy	1.4	6.0	2.3	0.14	0.76	0.77
CF/PEEK	5.6	10.5	5.8	2.0	2.2	3.9