

# 高強度 GFRP のモード I 層間はく離疲労き裂進展におよぼす 繊維架橋の影響\*

松原 剛<sup>\*1</sup>, 尾野英夫<sup>\*2</sup>, 田中啓介<sup>\*3</sup>

## Effect of Fiber Bridging on Growth Behavior of Mode I Interlaminar Fatigue Cracks in High Strength GFRP

Go MATSUBARA<sup>\*4</sup>, Hideo ONO and Keisuke TANAKA<sup>\*4</sup> KAWAJU TECHNO SERVICE CORP.,

3-1 Kawasaki-cho, Akashi-shi, Hyogo, 673-0014 Japan

The mode I crack growth behavior from delamination was investigated with two kinds of laminates, UD laminates (made of unidirectional laminates) and C laminates (made of unidirectional laminates and cloth laminates), of high strength glass fiber reinforced plastics (GFRP). Crack growth tests were carried out by double cantilever beam specimens under cyclic and monotonic loadings. The fracture toughness at the onset of crack propagation,  $G_{Ic}$ , was not influenced by the lot of laminates and nearly equal for UD laminates and C laminates. On the other hand, the increase of the fracture toughness with crack extension,  $G_{Ir}$ , was very much dependent on the lot, and the value for C laminates was much higher than that of UD laminates. Under cyclic loading with a stress ratio of  $R=0.1$ , the fatigue crack propagation rate expressed in terms of a power function of the maximum crack-tip value,  $G_{Iupmax}$ , of the energy release rate was nearly identical in UD and C laminates. The increase of the bridging component of the energy release rate,  $G_{Ibridge} / G_{Iupmax}$ , with crack extension was dependent on the lot and the kind of laminates. Fractographic observation of UD laminates showed mode II crack propagation on the surface of fibers, while mode I crack propagation in resin. In C laminates, crack propagation path was on the interface of cloth laminates and fiber bridging caused by fibers of cloth laminates.

**Key Words:** Mode I Crack, Fatigue, Delamination, GFRP, Energy Release Rate, Crack Propagation, Fiber Bridging, Composite Material

## 1. 緒 言

高強度ガラス繊維強化プラスチックス (GFRP : Glass Fiber Reinforced Plastics) などの積層材料は層間強度が弱いが、低剛性で許容ひずみが大きく減衰効果に優れることから、ヘリコプターのブレードを支えるハブ部品に適している。この GFRP 製ハブはブレードの遠心力だけでなく、面外方向荷重も支える部品であり、また、バネ特性向上のために板厚を一定としていないので、遠心力でも積層面に面外荷重が発生する。このため製造時の層間はく離や層間に発生するボイドなどの初期欠陥を想定した設計を行う場合、モードⅡのみならずモードⅠによる層間き裂進展特性を把握することが必要となる。

近年、炭素繊維強化プラスチックス (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) の層間き裂進展

特性に関する研究が数多く報告されているが、その中でもモードⅠによるき裂進展特性は、最弱モードであることから多くの研究<sup>(1)~(12)</sup>がされている。特に、層間き裂進展特性における繊維架橋は、層間じん性を向上させた材料において顕著に現れるため活発に研究されている。ただし、研究対象の積層板の積層構成は、一方向シート同士もしくは、織物同士についてである。これに対して高強度 GFRP 積層板は、通常、一方向シートと織物シートとを組み合わせて積層する。そのため高強度 GFRP 積層板の使用には、一方向シート同士の層間き裂進展特性だけでなく、一方向シートと織物シートとの異なるシート間の層間き裂進展特性の把握が重要となる。

そこで本研究では、高強度 GFRP 一方向シートのみで積層した試験片と、一方向シートと朱子織シートとを組み合わせて積層した試験片の2種類について、モードⅠ層間はく離疲労き裂進展試験と破壊じん性試験を行い、層間き裂進展挙動における繊維架橋の影響を評価した。さらに、試験片の破面観察を行い、き裂進展の破壊形態を検討した。なお、繊維

\* 原稿受付 2003年12月8日。

\*1 正員、川重テクノサービス(株)(〒673-0014 明石市川崎町3-1)。

\*2 正員、川崎重工業(株)技術研究所(〒673-8666 明石市川崎町1-1)。

\*3 正員、名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。

E-mail : matubara@ati.khi.co.jp

架橋のき裂進展特性への影響は、試験片の個体差に依存すること<sup>(5)～(7)</sup>が報告されており、本研究でもそれぞれの積層構成に対して成型時期を変えて2ロットの試験片を準備した。

## 2 実験方法

**2・1 材料および試験片** 材料には、一方向シートの纖維にTガラス、朱子織りシートの纖維にEガラス、樹脂に180°C硬化の東レ製エポキシ樹脂#3651を用いた。試験片は、一方向シートのみ積層した一方向積層板（以後UD板と称する）と、一方向シート4層と8本朱子織りシート1層を交互に重ねるクロス積層板（以後C板と称する）の2種類とした。UD板とC板における一方向シートの纖維配向角は、試験片長手方向とした。朱子織りシートの纖維配向角は、試験片長手方向に対し±45°とした。両試験片の物性値を表1に示す。

UD板とC板とともに、ロットの違いの影響を調べるために、成型時期を変えて2パネルを製作した。UD板では、最初のロットで板厚2h=6mmのパネルを成形し、次のロットで2h=9.8mmのパネルを成形した。以後、2h=6mmのパネルをパネルA、2h=9.8mmのパネルをパネルBと称する。C板では、それぞれのロットで2h=10.3mmのパネルを成形した。以後、パネルC、Dと称する。

試験片形状はDCB (Double Cantilever Beam) 試験片である。試験片幅はB=25mm、試験片厚さは成形時のままである。初期欠陥は、成形時に板厚中央に厚さ12.5μmのポリイミドフィルムを挿入することにより導入した。なお、試験片厚さの破壊進展抵抗への影響を検討するため、UD板のパネルBの試験片を機械加工によりパネルAと同じ2h=6mmとした試験片についても破壊じん性試験を実施した。

### 2・2 試験条件 破壊じん性試験および疲労試験

Table 1 Mechanical properties of materials.

Specimen type	Unidirectional laminate	Cloth laminate
Glass fiber	T-glass	T-glass (UD) E-glass (C")
Epoxy resin	#3651	#3651
Stacking sequence	0° <sub>13</sub> //0° <sub>13</sub>	(0° <sub>4</sub> /±45°) <sub>3</sub> // 0° <sub>4</sub> /(±45°/0° <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
Constitution of laminate	0°:UD*	0°:UD*, ±45°:C"
Elastic constants	E <sub>1</sub> (GPa) E <sub>2</sub> (GPa) G <sub>12</sub> (GPa)	55.4 13.4 7.3
$\nu_{12}$	0.29	0.29
Mode II interlaminar fracture toughness G <sub>IIc</sub> (J/m <sup>2</sup> )	1747	3757

UD\*: Unidirectional lamina C\*\*: Cloth lamina

ともに電気－油圧サーボ式疲労試験機（容量：100kN）を用いた。荷重の検出には容量5kNの低容量ロードセルを用いた。破壊じん性試験での荷重点開口変位は試験機変位から計測し、疲労試験においては測定範囲±5mmの伸び計を用いた。破壊じん性試験におけるき裂長さは、50倍の読み取り顕微鏡で測定した。疲労試験における計測では200倍の光学顕微鏡による測定と、伸び計変位と荷重のコンプライアンスを用いる自動測定と併用した。

破壊じん性試験は、日本工業規格JIS K 7086に従い荷重点開口変位速度0.5mm/minで行い、き裂進展量約5mm毎に除荷と負荷を行い、き裂進展開始点および進展抵抗曲線を求めた。

疲労試験では、荷重振幅一定試験と荷重漸減試験を行った。荷重漸減試験はアメリカ材料試験協会規格ASTM E647-00に従い荷重を段階的に減少させた。荷重の減少率は、き裂進展速度が10<sup>-8</sup>m/cycle以上では8%，10<sup>-8</sup>m/cycle未満では4%とした。疲労試験の条件は、繰返し速度f=3～10Hz、応力比R=0.1とした。試験環境は室温大気中である。

**2・3 エネルギ解放率** エネルギ解放率は有限要素法(FEM)解析においてMCCI(Modified crack closure integral)法を適用して求めた。疲労き裂進展挙動を整理するパラメータには、最大エネルギー解放率G<sub>I,max</sub>と、纖維架橋の影響を排除したき裂の真のエネルギー解放率G<sub>I,tip</sub>とを用いた。なお、G<sub>I,tip</sub>の求め方については後述する。

図1に纖維架橋の模式図を示す。図に示すように、纖維架橋ではき裂にσ<sub>ap</sub>が負荷されても纖維がき裂を閉口させる応力σ<sub>bridge</sub>を分担し、き裂先端の応力状態を遮蔽する<sup>(4)(9)</sup>。このことから、き裂の纖維架橋の影響を排除した真のエネルギー解放率G<sub>I,tip</sub>はσ<sub>bridge</sub>によるG<sub>I,bridge</sub>と負荷応力σ<sub>ap</sub>によるG<sub>I,ap</sub>との重ね合わせとなり、次式で定義される。

$$\sqrt{G_{I,tip}} = \sqrt{G_{I,ap}} - \sqrt{G_{I,bridge}} \quad (1)$$

図2に纖維架橋を生じるFRPの疲労進展挙動の模式図を示す。荷重一定試験を実施すると、架橋の生じるFRPでは、実線で示す架橋のない場合(A点からB点へ移動する)に較べて進展抵抗が増してA点からC点へ移動する。この場合、見かけ上のエネルギー解放率はG<sub>I,ap,max</sub>で、B点で示される纖維架橋のない場合の進展速度より低いC点が纖維架橋のある場合の進展速度となる。また、C点の進展速度に対応する纖維架橋の影響を除いた真のエネルギー解放率はD点に対応する値G<sub>I,tip,max</sub>とみなせる。したがって、

$G_{I\text{tip max}}$  値は、き裂進展量  $\Delta a=0$  のときの進展挙動 (AB の線) を基にして、実際の進展速度 (C 点) から逆算して求められる。以上より式(1)は次式に書き換えられる。

$$\sqrt{G_{I\text{tip max}}} = \sqrt{G_{I\text{max}}} - \sqrt{G_{I\text{bridge max}}} \quad (2)$$

破壊じん性試験における  $G_{I\text{tip}}$  は  $\Delta a=0$  のときの破壊じん性値  $G_{Ic}$  に、 $G_{I\text{ap}}$  はき裂進展中のじん性値  $G_{IR}$  に対応する。したがって、次式が成立する。

$$\sqrt{G_{Ic}} = \sqrt{G_{IR}} - \sqrt{G_{I\text{bridge}}} \quad (3)$$

**2・4 破面観察** UD板とC板におけるき裂進展形態の違いを検討するために、破壊じん性試験片と疲労試験片の破面に金蒸着を施し、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning electron microscopy) による破面観察を行った。

### 3. 実験結果および考察

**3・1 一方向積層板とクロス積層板における破壊じん性** 図3にUD板、図4にC板の破壊じん性値  $G_{Ic}$ 、 $G_{IR}$  とき裂進展量  $\Delta a$  との関係を示す。き裂進展開始点に対応するじん性値  $G_{Ic}$  は荷重一荷重点変位曲線の最初の非線形開始点から、また、進

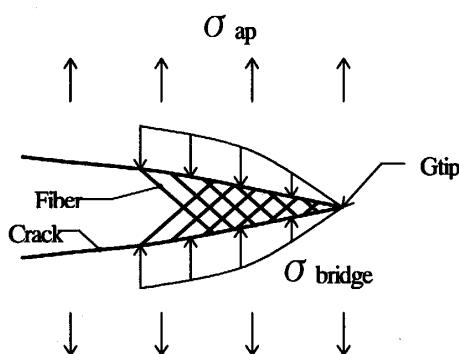


Fig.1 Schematic of crack growth by fiber bridging.

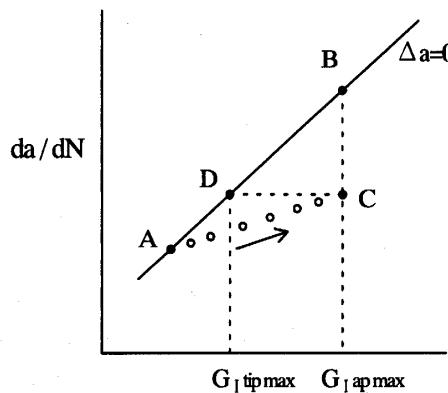


Fig.2 Schematic of crack growth behavior in load constant test.

展後のじん性値  $G_{IR}$  は部分除荷後の負荷時の最大荷重点から算出した。図3より、UD板では  $\Delta a$  の増加に伴い  $G_{IR}$  の増加が見られる。CFRP の場合  $\Delta a=30\text{mm}$  での  $G_{IR}$  が  $G_{Ic}$  の1.2倍となるのに対して、GFRP では3倍以上となっており、GFRP の繊維架橋の著しさを表している。また、パネルA、Bを比較すると  $G_{Ic}$  の値は同程度となるが、 $G_{IR}$  では差が生じる。試験片厚さの破壊じん性値への影響を確認するために、パネルB(板厚  $2h=9.8\text{mm}$ )の試験片を、機械加工でパネルAと同じ  $2h=6\text{mm}$  として試験に供した。図3に示すように、薄くした試験片の  $G_{IR}$  は、厚い試験片の  $G_{IR}$  より近い。以上の結果から、北條らの指摘<sup>⑤</sup>に一致してロットの違いによって  $G_{Ic}$  に大きな差は生じないこと、および板厚よりもロットの違いが  $G_{IR}$  の差になることがわかった。

C板では、図4から  $\Delta a < 10\text{mm}$  で  $G_{IR}$  の著しい増加が見られるが、その後一定となった。また、 $G_{Ic}$  はUD板と同様にロットに寄らず同程度となるが、 $G_{IR}$  にはロットの差が現れた。

さらに、UD板とC板とで  $G_{Ic}$  の値はほぼ同じ値となることがわかった。

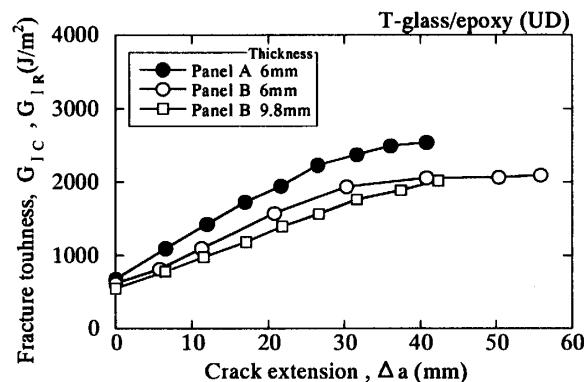


Fig.3 Relation between fracture toughness and crack extension for UD specimens.

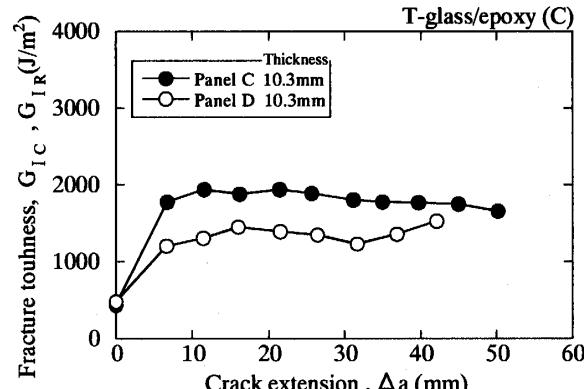


Fig.4 Relation between fracture toughness and crack extension for cloth specimens.

**3・2 一方向積層板における疲労き裂進展挙動**

図5にUD板パネルAの荷重一定疲労試験における各試験片の疲労き裂進展速度  $da/dN$  とき裂進展量  $\Delta a$  との関係を示す。なお、パネルAの試験は初期き裂  $a_0=20\text{mm}$  から開始した。 $\Delta a$  の増加に伴い、 $da/dN$  は直線的に増加する。図中の黒印●は、各試験片の最小2乗近似による  $\Delta a=0\text{mm}$  への外挿点である。図6には  $da/dN$  と  $G_{I_{\max}}$  との関係を示す。図中の実線は  $\Delta a=0\text{mm}$  のデータに対する最小2乗近似線であり、繊維架橋の影響がないときの  $da/dN$  と  $G_{I_{\max}}$  の関係である。以後この推定線を繊維架橋があるとき( $\Delta a>0\text{mm}$ )にも有効な  $G_{I_{\max}}$  による進展抵抗とする。 $\Delta a>0\text{mm}$  の試験データは  $G_{I_{\max}}$  データの近似線に較べて傾きが小さくなっている、繊維架橋による進展抵抗の増大が示唆される。

パネルBでは、3本の試験片について試験をおこなった。1本目(SP1と称する)は荷重一定試験、2本目(SP2と称する)は荷重漸減試験、3本目(SP3と称する)は荷重漸減試験の後、荷重一定試験を実施した。なお、パネルBでは初期き裂  $a_0=25\text{mm}$  から試験を開始した。

図7にパネルBのSP1の試験結果を示す。図中の実線は、上述のパネルAの  $G_{I_{\max}}$  データの近似線である。試験は、 $P_{\max}=235\text{N}$  で開始した。SP1の初期データは、パネルAの  $G_{I_{\max}}$  データの近似線に一致しており、近似線を外れたのは  $\Delta a>10\text{mm}$  であった。パネルAのデータでは、き裂進展開始とともに  $G_{I_{\max}}$  の近似線を外れており、進展挙動の違いが顕著であった。そこで、繊維架橋の影響を確認するためにSP1の  $\Delta a=14\text{mm}$  のときに試験荷重を  $P_{\max}=167\text{N}$  に変更した。その後の進展データと荷重変更前のデータとを、同一  $G_{I_{\max}}$  で比較すると  $da/dN$  が  $1/3$  程度遅くなっている、繊維架橋の影響が見られた。この原因は次節で考察する。

ところで、パネルBの  $G_{I_{\max}}$  の結果も、パネルAの  $G_{I_{\max}}$  の近似線に一致している。したがって破壊じん性と同様に疲労においても進展挙動を  $G_{I_{\max}}$  で整理すると、ロットに影響しない進展挙動が得られることがわかった。

**3・3 一方向積層板の疲労き裂進展挙動における繊維架橋の生成** 図8にFEM解析によるパネルBの荷重点開口変位  $\delta$  とき裂進展量  $\Delta a$  の関係を示す。なお、 $\delta$  の計算には繊維架橋を考慮していない。SP1でパネルAの  $G_{I_{\max}}$  データの近似線と一致する  $\Delta a<10\text{mm}$  では、 $\delta$  が  $0.6\text{mm}$  以下となっている。なお、パネルAの  $\delta$  は、後述する荷重漸減試験の結果

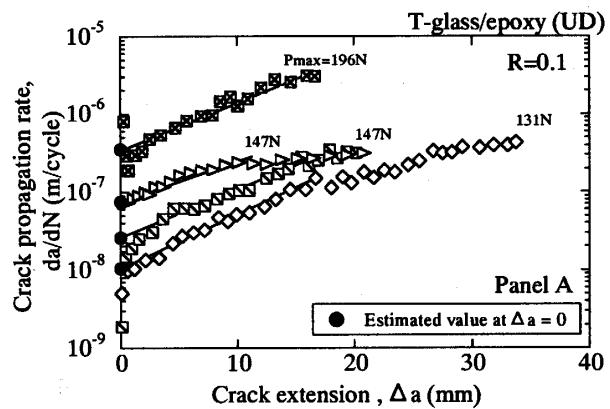


Fig.5 Relation between crack propagation rate and crack extension for UD specimens.

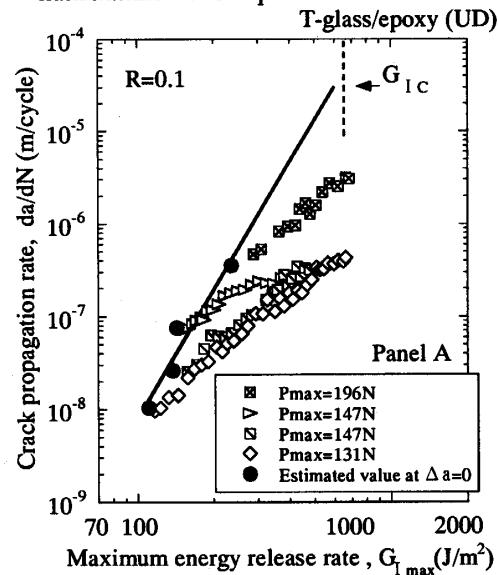


Fig.6 Relation between crack propagation rate and maximum energy release rate for panel A in UD specimens.

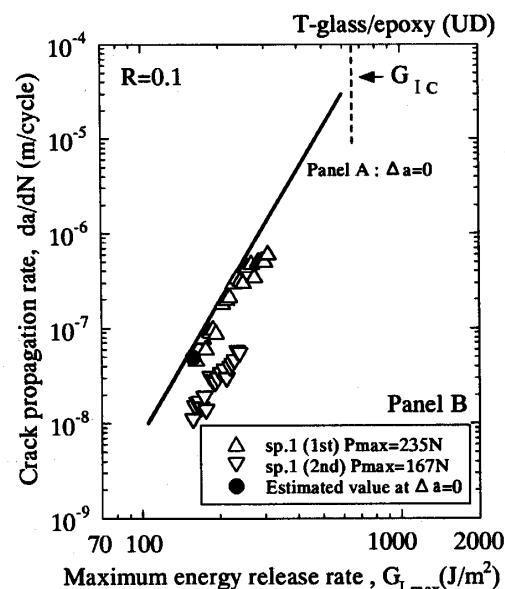


Fig.7 Relation between crack propagation on rate and maximum energy release rate for panel B in UD specimens.

も含めて全試験で 0.6mm 以上であった。そこで、SP2 では  $\delta$  が 0.6mm 以下となるような荷重漸減試験を実施した。その結果を図 9 に示す。SP2 の結果は、パネル A の  $G_{I \text{ tip max}}$  データの近似線に一致した。さらに、SP3 では SP2 よりも試験開始荷重を下げて荷重漸減試験を実施した。SP3 も近似線と一致しており、繊維架橋が抑制されていることがわかる。SP3 については、引き続き実施した  $P_{\max}=151N$  の荷重一定試験、さらに続いて実施した  $P_{\max}=167N$  の試験でも、 $\delta=0.6mm$  以下の範囲（図 8 参照）では繊維架橋のない挙動に一致する。この結果から、パネル B では  $\delta$  が 0.6mm 以下では繊維架橋が影響しないとみなされる。

次に、パネル A, B の  $G_{I \text{ bridge max}}/G_{I \max}$  と  $\Delta a$  との関係を図 10 に示す。両パネル毎に一価の関係にあり、パネル A では  $\Delta a$  の増加に伴い  $G_{I \text{ bridge max}}/G_{I \max}$  が線形的に増加する。一方、パネル B でも  $\delta=0.6mm$  以上となる範囲では、 $\Delta a$  の増加に伴い  $G_{I \text{ bridge max}}/G_{I \max}$  が線形的に増加する。また、パネル B の SP1 では試験荷重の変更前後でもデータに連続性が見られる。なお、パネル A でも表示はしていないが、荷重一定試験の後にひき続き実施した荷重漸減試験の結果が、最初に実施した一定試験結果の延長上に位置することを確認した。この結果から、試験方法や荷重履歴が本結果に影響しないことがわかる。

ところで、図中のパネル B の破壊じん性試験では、き裂進展開始から  $\delta$  が 0.6mm 以上となっており、 $G_{I \text{ bridge max}}/G_{I \max}$  はパネル A と近い値であった。このことから、 $\delta$  が小さいパネル B の疲労データでは繊維架橋が抑制されてパネル A の疲労データよりも小さい値になったと推定される。さらに、 $\delta$  が一定値以上であればロットが異なっても  $G_{I \text{ bridge max}}/G_{I \max}$  と  $\Delta a$  の関係は一価の関係となることが予想される。

### 3・4 クロス積層板における疲労き裂進展挙動

図 11 に C 板の荷重一定試験での  $da/dN$  と  $\Delta a$  との関係を示す。図の黒印●は、各試験片の  $\Delta a=0mm$  への外挿値である。図の中空印はパネル C のもので、 $\Delta a$  は 10mm まで進展させた。中実印はパネル D のもので  $\Delta a$  を 10mm 以上進展させた。UD 板の荷重一定試験では  $\Delta a$  の増加に伴い  $da/dN$  も増加したが、C 板の  $da/dN$  は  $\Delta a=10mm$  程度まで減速した後に、反転し加速した。

図 12 には  $da/dN$  と  $G_{I \max}$  の関係を示す。図中の太線は  $\Delta a=0mm$  のデータの最小 2 乗近似線で、細線は  $da/dN$  が減速から加速に転じた後の加速データの近似線である。試験結果は、 $\Delta a < 10mm$  では  $G_{I \max}$  に

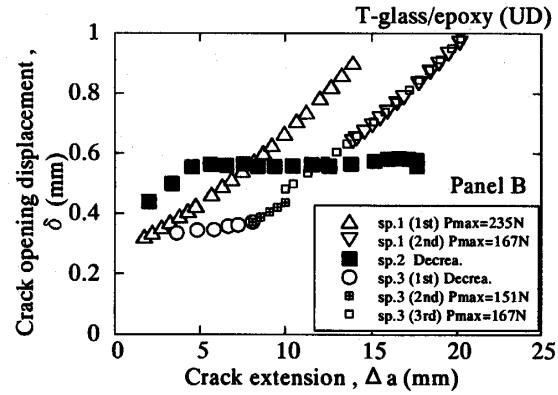


Fig.8 Relation between crack opening displacement and crack extension for panel B in UD specimens.

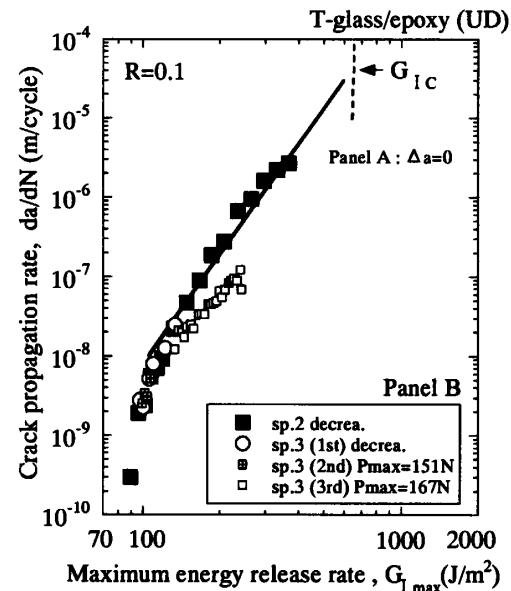


Fig.9 Relation between crack propagation rate and maximum energy release rate for panel B in UD specimens.

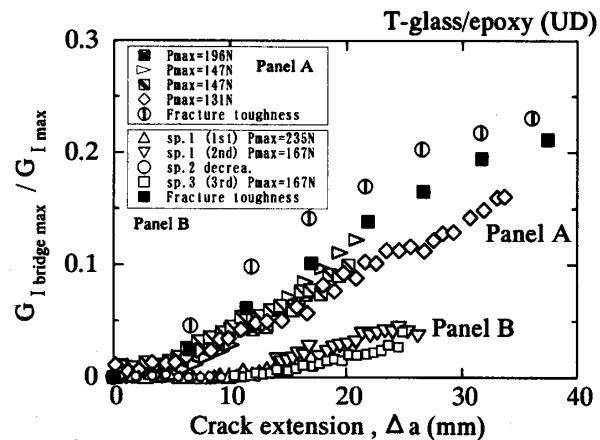


Fig.10 Relation between  $G_{I \text{ bridge max}}/G_{I \max}$  and crack extension for UD specimens.

依らずに  $da/dN$  が低下した。また、上昇に転じた後のデータは、試験荷重や進展量に依存せずに、細線

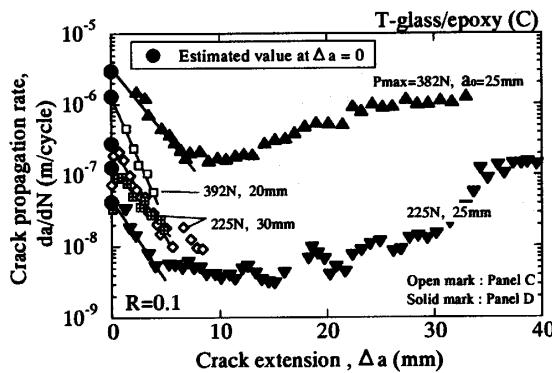


Fig.11 Relation between crack propagation rate and crack extension for cloth specimens.

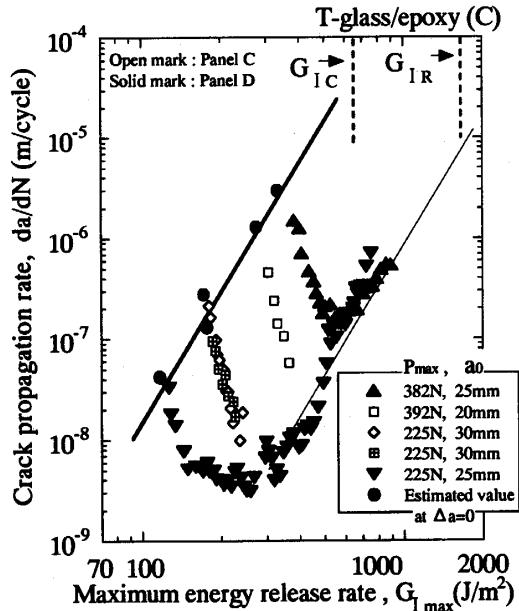


Fig.12 Relation between crack propagation rate and maximum energy release rate for cloth specimens.

で表される進展挙動を示した。さらに、 $G_{I,\text{tip},\text{max}}$  の近似線の傾きと  $\Delta a > 10\text{mm}$  の近似線との傾きとはほぼ等しく、繊維架橋の影響のない場合の進展抵抗と繊維架橋の生成と消滅が平衡する場合の進展抵抗と同じ傾きとなることがわかった。

次に図 13 に C 板の  $G_{I,\text{bridge},\text{max}}/G_{I,\text{max}}$  と  $\Delta a$  との関係を示す。パネル C, D, そして疲労と破壊じん性とでデータに差が見られない。 $\Delta a = 10\text{mm}$  まで  $G_{I,\text{bridge},\text{max}}/G_{I,\text{max}}$  は増加するが、その後ほぼ一定となる。この結果に初期き裂の長さや負荷形式の影響はない。

**3・5 一方向積層板とクロス積層板の疲労き裂進展挙動の比較** 図 14 に UD 板と C 板の  $da/dN$  と  $G_{I,\text{tip},\text{max}}$  の関係を示す。また、UD 板と C 板のモード II の進展挙動の近似線を太線で示す<sup>(13)</sup>。モード II では、 $1 \times 10^{-8}\text{m/cycle}$  付近で UD 板と C 板の  $G_{II,\text{max}}$  が等しくなるが、 $da/dN$  が大きくなると C 板の進展抵抗が大きくなる。一方、モード I の UD 板と C 板と

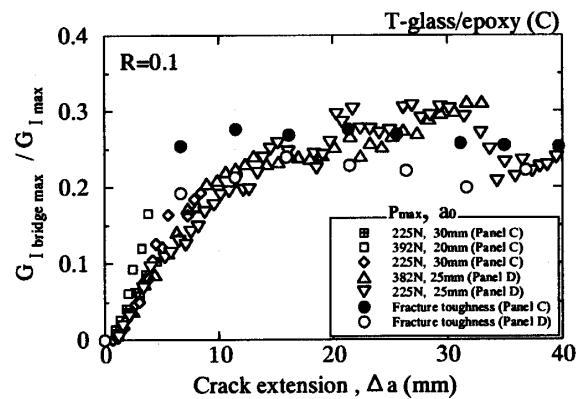


Fig.13 Relation between  $G_{I,\text{bridge},\text{max}}/G_{I,\text{max}}$  and crack extension for cloth specimens.

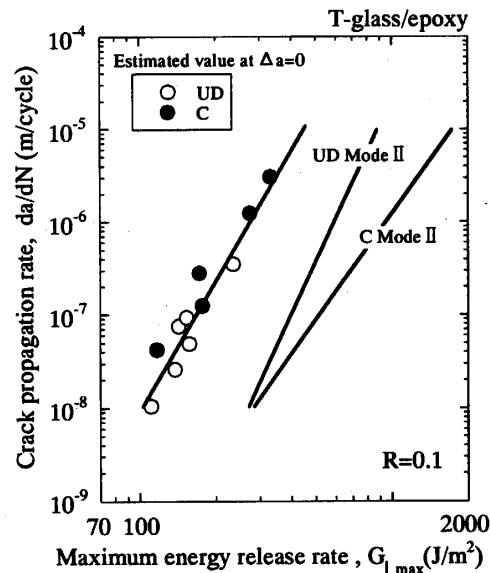


Fig.14 Relation between crack propagation rate and maximum energy release rate.

の  $G_{I,\text{tip},\text{max}}$  のデータは同一線上にあり、同じ進展抵抗となる。モード I ではモード II と異なり、疲労き裂が一方向シート同士の層間と一方向シートと朱子織りシートの層間を進展する場合とで、進展抵抗が変わらないことを意味しており、後述のようにモード I ではき裂が繊維界面ではなく繊維間の樹脂中を進展することに対応する。

**3・6 一方向積層板の破面形態** 図 15 は UD 板の SEM 写真である。図中右下の矢印はき裂の進展方向を示す。(a) は低倍率の破壊じん性試験の破面である。疲労でも同様な様相となっており、繊維が浮いていることから繊維架橋の跡とわかる。(c)において白破線の左側がモード I の疲労破面で、右側がモード II の静的破面である。参考のために(d)にモード II の疲労破面<sup>(13)</sup>を示す。白破線の左側がモード II の疲労破面である。モード II の破面では、疲労、静的に依らず、繊維表面が観察され、ハックルが樹

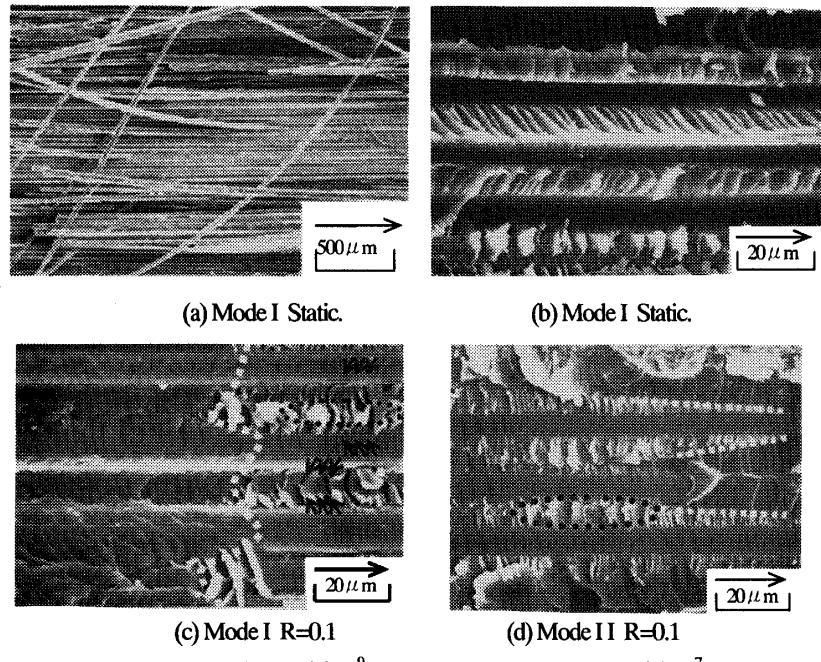


Fig.15 SEM fractographs of fracture surface for UD laminate.

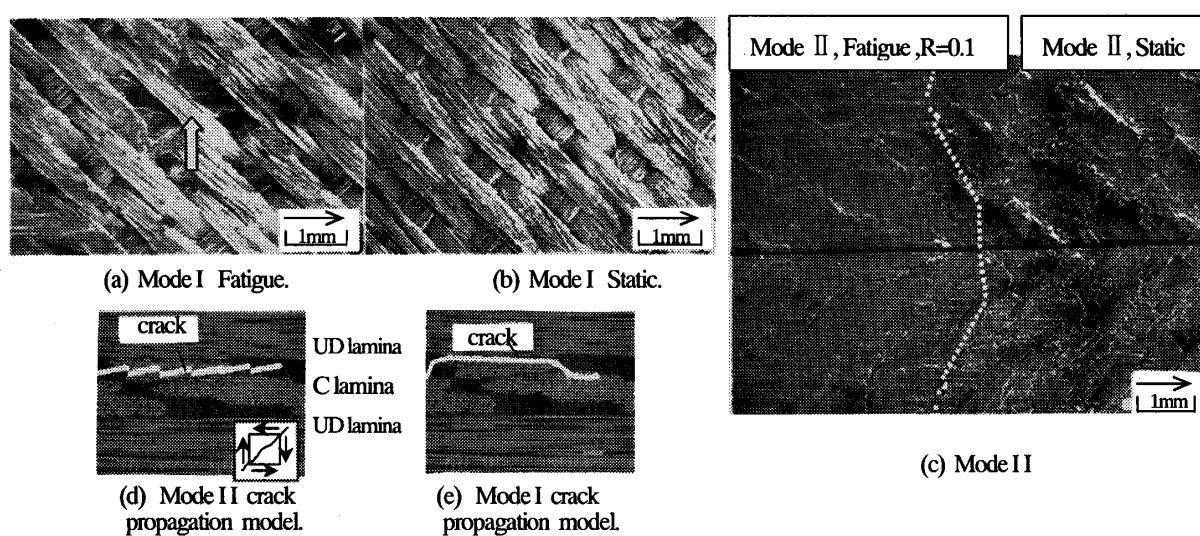


Fig.16 SEM fractographs of fracture surface for cloth laminate.

脂部中央で合流している（黒破線の囲み部分）。一方、(c)のモード I の疲労破面では繊維表面が見られず、繊維に樹脂が付着している。また、(b)のモード I の静的破面は疲労破面と異なり、繊維表面が見られるが、ハックルは樹脂部中央で合流していない。モード I では、疲労、静的とともに繊維と樹脂がまとめて割れている。すなわち、モード I ではき裂が樹脂中を進展していることがわかる。

**3・7 クロス積層板の破面形態** 図 16 はC板のSEM写真である。図中右下の矢印はき裂の進展方向を示す。(a) (b)はモード I の疲労破面と静的破面である。(c)にはモード II の破面<sup>(3)</sup>を示す。(c)の上

側と下側は、試験片の上下に対応している。白破線の左側が疲労破面で、右側は静的破面である。(c)では、一方向シートの繊維表面にわずかに朱子織シートの繊維が付着しており、き裂が一方向シート表面を進展したことがわかる。一方、モード I の(a) (b)では朱子織シートの面が観察されており、き裂が朱子織シート表面を進展したことがわかる。したがって、き裂の進展経路を模式図で表すと、モード II が(d)、モード I が(e)のようになると考えられる。この経路より、C板の繊維架橋は一方向シートの繊維ではなく、朱子織シートの繊維で生じていたことが推察される。なお、(b)の静的破面は(a)の疲

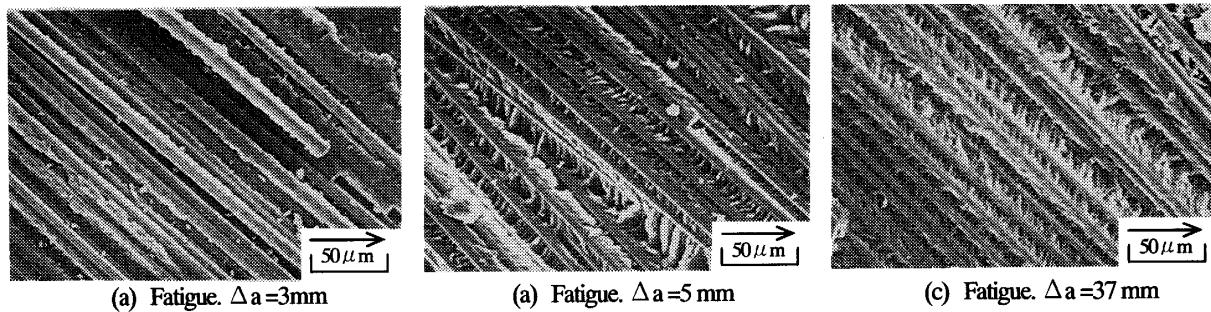


Fig.17 SEM fractographs of mode I fracture surface for cloth laminate.

劣破面より、全体に纖維の抜けが激しく、(a)の疲労破面では、白矢印の先のような纖維束の交差部に、樹脂の平滑な部分が観察された。

図 17 は C 板パネル D の  $P_{max}=225N$  試験片の各進展位置での SEM 写真である。対応する図 11 の進展量と進展速度の関係からも示唆されるように、(a)では纖維架橋が激しくなっており、さらに(b)(c)とき裂が伸びるにつれて、纖維の浮いた部分がなくなり、纖維間の樹脂がえぐれたように観察され、纖維架橋の影響が小さくなることが観察された。

#### 4. 結 言

高強度 GFRP 一方向シートのみで積層した積層板(UD板)と、高強度 GFRP 一方向シートと GFRP 朱子織シートとを組み合わせた積層板(C板)とを用いて、モード I 層間はく離疲労き裂進展試験および破壊じん性試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) UD板とC板のき裂進展開始  $G_{Ic}$  は、ロットの違いに影響されない。ただし、進展後の  $G_{IR}$  にはロットの違いが現われる。また、 $G_{Ic}$  の値は、C板とUD板とでほぼ同じ値となる。
- (2) UD板とC板の疲労き裂進展挙動でも、き裂先端の真のエネルギー解放率  $G_{Itipmax}$  による整理を行うと、ロットが異なっても同一の進展挙動が得られる。また、UD板とC板でも同一の進展挙動となる。
- (3) UD板とC板の疲労き裂進展におけるき裂架橋量  $G_{Ibridge} / G_{Imax}$  はき裂進展量  $\Delta a$  に対して一価の関係が得られ、これをもとに纖維架橋のある場合の進展挙動を推定できる。
- (4) UD板モード I 静的破面のハックルは、モード II のハックルが纖維界面の割れから形成されるのと異なり、樹脂そのものから割れている。また、疲労破面でもモード II と異なり纖維表面が見られず、纖維に樹脂が付着した状態であった。これらのことからモード I のき裂は樹脂そのものを割って進展する

ので、モード I の進展特性は樹脂の特性に関係することが示唆された。

(5) C板では、モード I の場合、疲労、静的に依らずき裂は朱子織シートの表面を進展し、C板の纖維架橋は朱子織シートの纖維で生じる。

#### 参 考 文 献

- (1) 末益博志・細田博幸・奈良敢也、日本複合材料学会誌、13, 5, (1987), 225-232
- (2) 張推敦・金原勲・影山和郎・大沢勇、材料、41-467, (1992), 1292-1298
- (3) 張推敦・金原勲・影山和郎・大沢勇、日本複合材料学会誌、19, 3, (1993), 109-119
- (4) 田中啓介・田中拓・山岸謙二郎、機論、60-573, A(1994), 1176-1182
- (5) Masaki Hojo and Takahira Aoki, ASTM STP, 1156, (1993), 281-298
- (6) 蒋建業・元木信弥・福田武人、材料、47-537, (1998), 606-611
- (7) 田中啓介・田中拓・辻辰也・山岸謙二郎、機論、61-583, A(1995), 523-529
- (8) 田中啓介・田中拓・辻辰也・山岸謙二郎、材料、44-502, (1995), 960-966
- (9) 北條正樹・落合庄治郎・松田聰・伊藤英孝、日本機械学会、[No. 95-14] シンポジウム講演論文集(1995)37-40
- (10) 岩堀豊・石川隆司・林洋一・渡辺直行、日本複合材料学会誌、26, 3, (2000), 90-100
- (11) 藤井善通・村上惇・阿江晴彦・吉識忠繼・前川善一郎・濱田泰似、材料、41-470, (1992), 1680-1685
- (12) 北條正樹・落合庄治郎・青木隆平・伊藤英孝、機論、61-583, A(1995), 516-522
- (13) 松原剛・尾野英夫・田中啓介、機論、70-692, A(2004), 580-587