1 1 2 三点曲げ下における C/C コンポジットの繊維架橋効果

Fiber Bridging Effect in Three-point Bending in C/C Composite

○正 大木順司 (山口大), A.S.Kobayashi (Univ. of Washington),
正 合田公一 (山口大)

Junji OHGI, Yamaguchi University, Tokiwadai 2-16-1, Ube
Albert S. KOBAYASHI, University of Washington
Koich GODA, Yamaguchi University

Key Words: C/C Composite, Bridging Effect, Three-point Bending, Laser Moiré Interferometry Method

1. 緒 言

C/C コンポジットが破壊する際、発生したき裂面において著しい繊維架橋が生じる。そして、これが破壊抵抗となり、この材料の破壊靱性値を向上させる。これまでに、この材料の破壊について数多くの研究が行われているが、この繊維架橋がき裂進展に及ぼす影響については未だに明確にされていない。そこで、本研究では、切欠きを有する C/C コンポジットを用いて三点曲げ試験を実施し、切欠きから発生したき裂の開口挙動を光学的手法を用いて詳細に調査した。さらに、繊維架橋効果がこれに及ぼす影響について検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 供試材料および試験方法

本研究で使用した C/C コンポジットは、航空機のブレーキ用として開発されたもので、Fig.1 に示すように短繊維・平織りの繊維束が積層した構造となっている。

Fig.1 Optical view of C/C composite.

試験片形状と寸法を Fig.2 に示す。試験片は、Fig.1 中 x 方向を試験片長手方向とし、積層方向を試験片幅方向とした。試験片中央部 (図中 A 部) には、深さ $D=4.0\sim6.0\text{mm}$ の切欠きが付与されている。また、試験側面部にはき裂が y 方向に成長しやすいよう幅 0.6mm 、深さ 3mm の側溝を施した。この試験片のヤング率、せん断弾性率およびポアソン比は、それぞれ、 $E_x=48$, $E_y=0.63$, $G_{xy}=1.9\text{GPa}$ および $\nu=0.05$ である。試験は、この試験片に三点曲げ負荷を与えることにより行った。このとき、スパン長 S は 48mm とした。

Fig.2 Shape and dimensions of specimen.

2.2 再切欠導入試験

き裂面に生じる繊維架橋がき裂進展抵抗に及ぼす影響を詳細に調べるため、き裂発生後、き裂のウェイク部分に段階的に切欠きを再導入し、その都度試験片に三点曲げ負荷を与えた。そして、再切欠き長さの増加に伴い荷重-変位関係がどのように変化するかを調べた。

3. 結果および考察

3.1 破面観察

Fig.3(a)に、三点曲げ試験後の破断の様子を示す。これによると、き裂は切欠先端からジグザグ状に屈曲しながら進展していることがわかる。Fig.3(b)は(a)の A 部近傍の破断面を電子顕微鏡で観察した結果である。このように、き裂が大きく屈曲する部分では、ほとんどの場合、試験片長手方向に繊維が配向されていた。この図の B 部を拡大した写真を Fig.3 (c)に示すが、この部分で繊維の引抜けが多く観察された。

(a) General view

(b) Detail of A

(c) Detail of B

Fig.3 SEM observations of fracture surface.

3.2 荷重-変位曲線

Fig.4 に、再切欠きを導入したときの荷重-荷重点変位曲線の変化を示す。これは、初期切欠き深さ $D=4.2\text{mm}$ 、き裂長さ $a=9.25\text{mm}$ における結果である。再切欠き長さが 1.3mm の場合は、導入前のそれとほとんど差を生じなかったが、再切欠きを 3.1mm 以上導入すると変位-荷重関係に大きな差が生じた。この荷重-変位曲線からそれぞれの再

切欠長さにおけるコンプライアンスを測定した。その結果を Fig.5 に示す。この図の横軸は、再切欠長さ D_r で、これは初期切欠先端から再切欠先端までの長さに相当する。したがって、図中 $D_r = 5.05 \text{ mm}$ の位置がき裂先端にあたる。この図から、き裂先端から、 3 mm 以上後方のき裂面における繊維架橋は、コンプライアンスにほとんど影響を与えないことがわかる。言い換えると、き裂先端から 3 mm 以内のき裂面における繊維架橋効果がき裂の進展抵抗となり得ることが示唆される。

Fig.4 Load-displacement curves in re-notch test.

Fig.5 Variation of compliance with re-notch length.

3.3 き裂先端近傍の変位場の計測

本研究では、レーザーモアレ干渉法を用いてき裂周辺の変位場を計測することを試みた。Fig.6 および Fig.7 に計測領域の様子および変位計測結果を示した。この計測結果は、

Fig.6 Optical view of crack.

Fig.7 Measured displacement field.

x 方向の変位場を示しており、一つの縞が、 $1/1200 \text{ mm}$ の変位量に相当する。Fig.7 に示すとおり、き裂の屈曲等により、き裂周辺の変位場はかなり複雑となっていることがわかる。このように、き裂開口変位 COD の分布を計測することは極

めて困難であるため、き裂の先端から 1 mm 以内の領域について変位を計測した。再切欠長さ $D_r = 0$ および 1.3 mm におけるき裂面付近の変位を Fig.8(a) および (b) に示す。いずれの D_r においても、荷重が小さい領域において、荷重の増加に伴い開口変位が小さくなる傾向を示した。これは、き裂発生後除荷した際、き裂面の不整合によりくさび効果が生じたためと考えられる。

(a) $D_r = 0 \text{ mm}$

(b) $D_r = 1.3 \text{ mm}$

Fig.8 Displacement near crack tip.

き裂先端部から後方約 0.5 mm の位置における変位を再切欠長さ D_r に対してプロットした結果を Fig.9 に示す。この図によると、除荷時 (図中 $P = 0.0 \text{ N}$) の変位は、 D_r が増加するほど減少する傾向を示した。これは、左右のき裂面の不整合が、除荷時においてき裂閉口を妨げるため、再切欠きが付与されてき裂面が除去されると、徐々にき裂が閉口し易くなるためである。負荷が大きい場合は、 D_r が増加するに伴いき裂面に作用する繊維架橋によるき裂閉口作用が減少するため、変位が増加する傾向を示す。

Fig.9 Displacement at 0.5mm behind crack tip.

(結言, 参考文献 省略)