

高ひずみ速度下でのCFRP積層材の混合モード破壊じん性と混合モード破壊基準

NEDO ○堀川教世 立命館大学 日下貴之
立命館大学[院] 梶田雅義

1. 緒言

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 材の破壊は主に層間ではなく離損傷に起因することが多い。これは面内の強度は非常に高いが、層間の強度が低いために面外の衝撃荷重などにより層間にはく離などの損傷が生じ、圧縮強度の著しい低下を招くためである。このため、材料の強度・信頼性確保の観点から層間破壊じん性の評価が重要である。

近年、モード I およびモード II 型の破壊様式に対する破壊じん性試験法としてそれぞれ DCB (Double Cantilever Beam), ENF (End Notched Flexure) 試験法が規格化され、多種多様な CFRP の破壊挙動に関する研究が行われている。しかしながら CFRP 材の破壊はモード I もしくはモード II といった単独のモード下だけでなくそれらが複合した混合モード下でも生じるため、より信頼性のある層間破壊じん性の評価を行うためにはこうしたモードも含めて議論する必要がある。

一方、母材として使用されるエポキシ樹脂などの高分子系材料の破壊特性は負荷速度に依存することが知られており、CFRP 材の破壊特性を議論するためには負荷速度の影響についても考慮しなければならない。

このようなことから、本研究では低ひずみおよび高ひずみ速度下において CFRP 材の混合モード (モード I + モード II) 破壊じん性試験を行い、混合モード破壊じん性およびその負荷速度依存性を明らかにした。さらに、混合モード破壊基準についても検討を加えた。

2. 実験方法

2・1 供試材料および実験方法 供試材料は比較的低位じん性の CF/エポキシ複合材 (HTA/112, 東邦レーヨン製) を用いた。積層構成は $[0^{\circ}]_{20}$ 、繊維含有率 V_f は約 55% である。

混合モード破壊じん性試験にはそれぞれ図 1, 2 に示す MMF (Mixed Mode Flexure) 試験片および MMB (Mixed Mode Bending) 試験片を使用した。MMF 試験法¹⁾ではき裂の上側と下側の板厚の比によりモード比を変えることができるが、ここではき裂は板厚中央面にあるためモード比は $G_{II}/G_I = 0.58$ である。一方、MMB 試験法²⁾では着力点の位置 c を変えることによってモード I 成分とモード II 成分の比を任意に変化させることができ、本研究では $c = 13.0, 17.2, 27.5$ mm とし、そのときのモード比はそれぞれ $G_{II}/G_I = 13, 3.0, 0.78$ である。なお、MMF, MMB 試験のモード比は有限要素解析により求めたものである。³⁾

純モード I の試験については DCB 試験法および WIF (Wedge Insert Fracture) 試験法を用いた。また、純モ

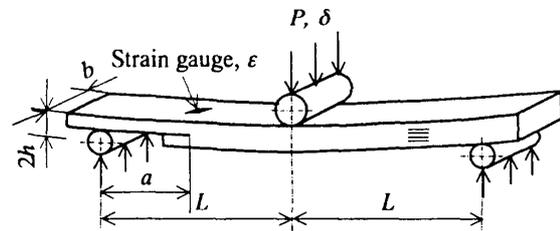


Fig. 1. MMF specimen

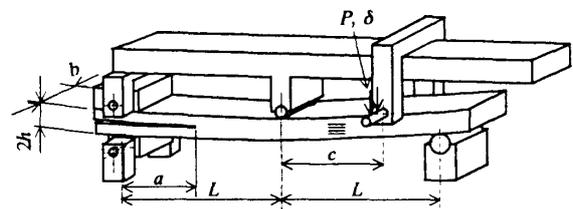


Fig. 2. MMB specimen

ード II の試験については ENF 試験法を用いた。

実験は荷重点変位速度 $\dot{\delta} = 10^{-6} \sim 10^1$ m/s の範囲で行い、低負荷速度 ($\dot{\delta} = 10^{-6} \sim 10^{-2}$ m/s) では万能材料試験機を使用し、高負荷速度 ($\dot{\delta} = 10^0 \sim 10^1$ m/s) では SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) 式衝撃試験機を使用した。なお、DCB 試験法および MMB 試験法は低負荷速度、すなわち静的試験にのみ適用した。

2・2 混合モード破壊じん性値の算出 MMF 試験では次式を用いて混合モードエネルギー解放率 G を算出した。¹⁾

$$G = \frac{21P^2 a^2 C}{2b(2L^3 + 7a^3)} \quad (1)$$

ただし、 P は荷重点の反力、 δ は荷重点の変位、 $C (= \delta/P)$ は荷重点コンプライアンスである。

MMB 試験では次式を用いて混合モードエネルギー解放率 G を算出した。¹⁾

$$G = \frac{21P^2 a^2 C}{2b(2L^3 A + 7a^3)} \quad (2)$$

$$A = \frac{7L^2 + 14Lc + 7c^2}{7L^2 - 18Lc + 39c^2} \quad (3)$$

ただし、 c は着力点の位置である。

また、モード比は次式で与えられる。¹⁾

$$\frac{G_{II}}{G_I} = \frac{3(c+L)}{4(3c-L)} \quad (4)$$

3. 実験結果および考察

3・1 破壊じん性値の負荷速度依存性 図3に層間破壊じん性の負荷速度依存性を示す。図の縦軸は初期臨界点における破壊じん性値 G_{IC} , G_{IIC} , G_C 。横軸はエネルギー解放率の時間変化率 \dot{G}_I , \dot{G}_{II} , \dot{G} である。図中の▲, △ (DCB, WIF 試験) はモード I 破壊じん性値 G_{IC} , ▼, ▽ (ENF 試験) はモード II 破壊じん性値 G_{IIC} , ● (MMB 試験) および■, □ (MMF 試験) は混合モード破壊じん性値 G_C を示している。また、黒塗印と白塗印はそれぞれ静的および衝撃試験結果である。

モード I 破壊じん性値 G_{IC} は $\dot{G}_I = 10^1 \sim 10^3 \text{ J/m}^2/\text{s}$ の領域では負荷速度の上昇に伴って低下し、明確な負荷速度依存性を示した。

モード II 破壊じん性値 G_{IIC} は $\dot{G}_{II} = 10^3 \text{ J/m}^2/\text{s}$ 付近で極大値をとり、それより低速度側では負荷速度の上昇に伴って破壊じん性値は上昇し、高速度側では負荷速度の上昇に伴って破壊じん性値は低下した。

混合モード破壊じん性値 G_C はモード比によらずモード II と同様の負荷速度依存性を示し、 $\dot{G} = 10^1 \sim 10^3 \text{ J/m}^2/\text{s}$ の領域で極大値が存在した。また、 $G_{II}/G_I = 0.58$ と 0.78 では、応力場がモード I 支配型であるにもかかわらず、 $\dot{G} > 10^1 \text{ J/m}^2/\text{s}$ の領域で混合モード破壊じん性値 G_C はモード I 破壊じん性値 G_{IC} よりも大きい値を示した。

3・2 破壊じん性値のモード比依存性 図4に破壊じん性値のモード比依存性を示す。(a) は $\dot{G} \leq 10^1 \text{ J/m}^2/\text{s}$ の領域、(b) は $\dot{G} \geq 10^2 \text{ J/m}^2/\text{s}$ の領域について示したものである。図の横軸は混合モード破壊じん性値のモード I 成分 G_{IC}^{mix} 、縦軸は混合モード破壊じん性値のモード II 成分 G_{IIC}^{mix} を示しており、それぞれ純モード I 破壊じん性値 G_{IC}^{pure} および純モード II 破壊じん性値 G_{IIC}^{pure} で標準化している。図中の破線は次式で示す線形破壊基準⁴⁾に基づいて描いたものである。

$$f(G_C) = \frac{G_{IC}^{mix}}{G_{IC}^{pure}} + \frac{G_{IIC}^{mix}}{G_{IIC}^{pure}} = 1 \quad (5)$$

図より、 $\dot{G} \leq 10^1 \text{ J/m}^2/\text{s}$ の場合には混合モード破壊じ

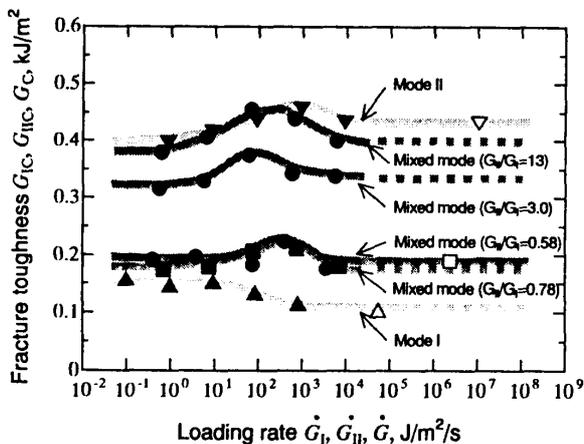
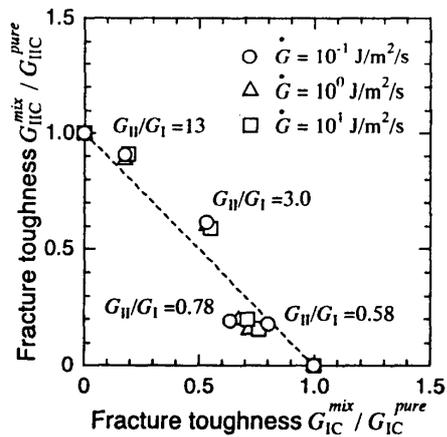
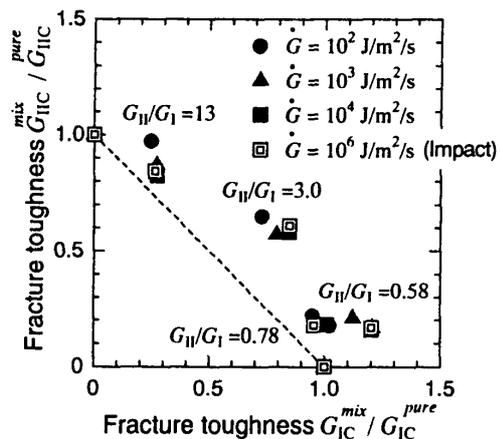


Fig. 3. Rate dependence of mode I, mode II and mixed mode fracture toughness



(a) Lower loading rates ($\dot{G} \leq 10^1 \text{ J/m}^2/\text{s}$)



(b) Higher loading rates ($\dot{G} \geq 10^2 \text{ J/m}^2/\text{s}$)

Fig. 4. Mixed mode fracture diagrams

ん性値は線形破壊基準に従うことが分かる。しかしながら、 $\dot{G} \geq 10^3 \text{ J/m}^2/\text{s}$ の場合にはモード比が小さくなると線形破壊基準から外れ、 $f > 1$ の領域に分布することが分かる。すなわち、モード I 成分の寄与が大きいかつ負荷速度が大きい場合には、モード II 成分は混合モード破壊じん性値に影響を及ぼさないと見える。このことは、図3の $\dot{G} > 10^1 \text{ J/m}^2/\text{s}$ における混合モード破壊じん性値と純モード I 破壊じん性値の負荷速度依存性の違いによって生じたものと考えられる。

4. 結言

- ・モード I 破壊じん性値、モード II 破壊じん性値、混合モード破壊じん性値のいずれについても顕著な負荷速度依存性を示した。
- ・混合モード破壊じん性値はひずみ速度が小さい場合にはほぼ線形破壊基準に従ったが、ひずみ速度が大きい場合には G_{II}/G_I の小さい領域でモード II 成分の寄与がやや小さくなる傾向を示した。

参考文献

- 1) J. G. Williams, Int. J. Fract., 36, 101 (1988).
- 2) J. R. Reeder, ASTM STP 1206, 303 (1993).
- 3) 日下貴之, 堀川教世, 榎田雅義, 足立真一, 材料, 50, 235 (2001).
- 4) A. R. Jurf and B. P. Pipes, J. Compos. Mater., 16, 386 (1982).