

# 311 炭素繊維強化複合材料の混合モード層間はく離 き裂進展の破壊力学特性

田中啓介  
辻 辰哉

(名大工)  
(名大院)

○ 田中 拓 (名大工)

## 1. 緒 言

CFRP 積層板は、繊維方向の強度に比べて層間の強度が著しく落ちるため、近年では層間破壊靱性の評価が盛んに行われている。従来の層間破壊靱性試験の多くは、モード I (開口モード) あるいはモード II (せん断モード) に対するものであったが、実用部材の破壊は一般に混合モード下で起こると考えられる。この混合モード層間破壊試験法として、混合モード曲げ (MMB: Mixed Mode Bending) 試験が提案され注目を集めているが<sup>1)</sup>、混合モード破壊特性の研究は未だに少なく、特に破壊靱性値とき裂進展量の関係 (R カープ挙動) の報告は極めて限られている。

本報では、一方向カーボン/エポキシ積層板を用いて MMB 層間破壊靱性試験を行い、種々の混合モード比でのき裂進展挙動を、純モード I およびモード II の試験結果も交えて検討した。

## 2. 実験方法

**2.1 供試材および試験片** 本研究では、東レ (株) 製の一方向炭素繊維強化エポキシ積層板、T800H/#3631 を用いた。積層板の厚さは  $2h=6.2\text{mm}$ 、積層枚数は 44 プライである。積層板中央面には初期欠陥として厚さ  $12\mu\text{m}$  のポリイミドフィルムが挿入されている。

この積層板から中央はく離試験片を切り出し、試験に供した。繊維方向は試験片長手方向で、幅  $B=20\text{mm}$ 、

試験片全長は  $130\text{mm}$  である。試験片にはピン負荷のためのアルミニウムブロックを接着した。

**2.2 混合モード曲げ (MMB) 試験** MMB 法による混合モード試験の原理を Fig. 1 に示す。支点上に置かれた中央はく離試験片の上に荷重レバーを乗せ、レバー上面に荷重  $P$  を与える。これはモード I の双片持はり (DCB) 試験とモード II の端面切欠き曲げ (ENF) 試験の重ね合わせと考えることができる。MMB 試験では荷重点の位置、すなわち  $c$  を変えると混合モード比が変化する。本研究では、両支点間距離を  $2L=100\text{mm}$ 、初期欠陥長さは約  $17\text{mm}$  とした。ただし、き裂長さ  $a$  は右側支点からの距離である。

応力拡大係数  $K_I$ ,  $K_{II}$  は境界要素法の線形弾性解析で求め、さらに Reeder ら<sup>1)</sup>と同様の方法で幾何学的非線形分を考慮した。非線形の寄与はき裂が短いほど、またレバー比  $c/L$  が小さいほど著しく、 $K_I$  は 10~40% 程度、 $K_{II}$  は 10% 程度、いずれも線形解析に比べ減少する。

**2.3 静的き裂進展試験** 試験は 3 種類のレバー比  $c/L=0.40, 0.50, 0.65$  に対して、それぞれ 2 本ずつ実施した。このときの応力拡大係数の混合モード比  $K_I/K_{II}$  は、順に 0.07, 0.21, 0.40 である。

試験はき裂を安定に成長させるため、座標変換制御<sup>2)</sup>で行った。荷重  $P$  と荷重線変位  $\delta$  を減算回路に通し、得

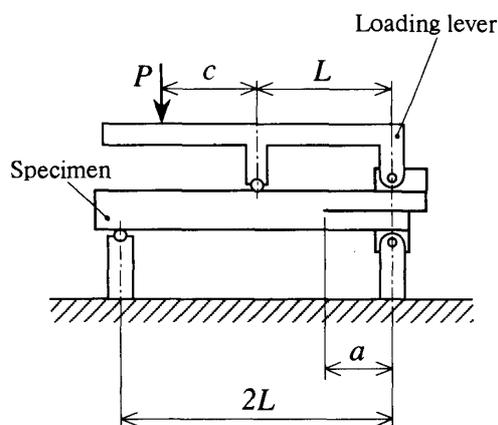


Fig. 1. Schematic of mixed mode bending test.

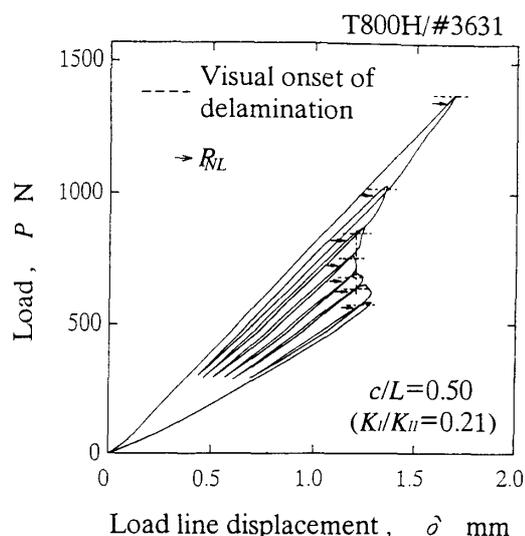


Fig. 2. Load-displacement curve ( $c/L=0.50$ ).

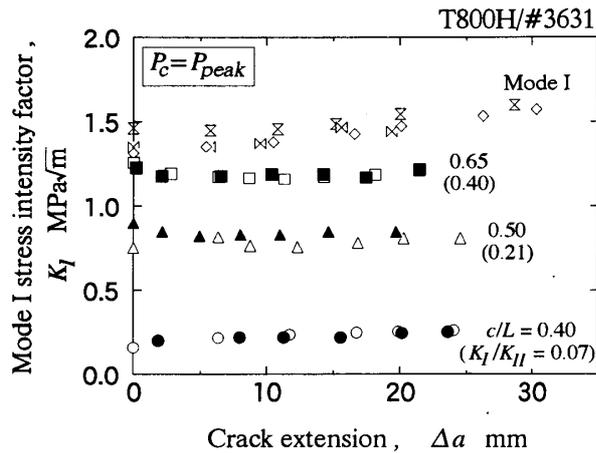


Fig. 3. Change of mode I stress intensity factor with crack extension.

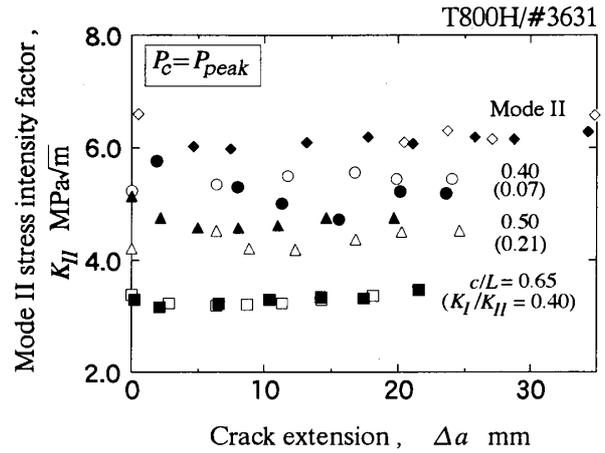


Fig. 4. Change of mode II stress intensity factor with crack extension.

られる出力  $v = \delta - \alpha P$  を制御用信号とする。定数  $\alpha$  を適当に選ぶことで、き裂進展が安定化される。

き裂長さの測定は移動式光学顕微鏡（倍率 50 または 100 倍）を用いて試験片両側面から行い、平均値をもって測定値とした。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 2 に、代表的な荷重-荷重線変位関係として  $c/L=0.50$  の場合を示す。き裂進展初期には荷重、変位ともに減少しているものの、座標変換制御によりき裂進展の安定化が達成されている。いずれの負荷過程においても、ピーク荷重以前にサブ・クリティカルなき裂進展が生じ、曲線は上に凸の非線形を示す。図中に矢印でこの非線形開始点を示した。この負荷過程でのき裂成長開始荷重は除荷直前の荷重より低く、部分除荷・再負荷によりき裂成長の限界荷重が若干低下することが判る。一方、ピーク荷重は除荷直前の荷重とほぼ一致する。

Fig. 3 は、モード I 限界応力拡大係数  $K_I$  のき裂進展による変化、また Fig. 4 は同様にモード II 限界応力拡大係数  $K_{II}$  の変化である。ただし、ここでは限界荷重としてピーク荷重をとった。また両図には、同材料の純モード I およびモード II の結果も比較のために示した。本報の混合モード試験あるいは純モード II では、き裂進展による靱性値の変化は見られず、ほぼ一定値の応力拡大係数でき裂が進展している。これに対して、純モード I の場合のみ上昇型の R カーブ挙動を示している。モード I での靱性値上昇の原因は繊維ブリッジングの発達であるが、混合モードでは繊維ブリッジングがほとんど寄与しないことが判る。

Fig. 5 に、き裂進展限界での  $K_I$  と  $K_{II}$  の関係を示す。ここではき裂進展量によらず得られた靱性値を平均化

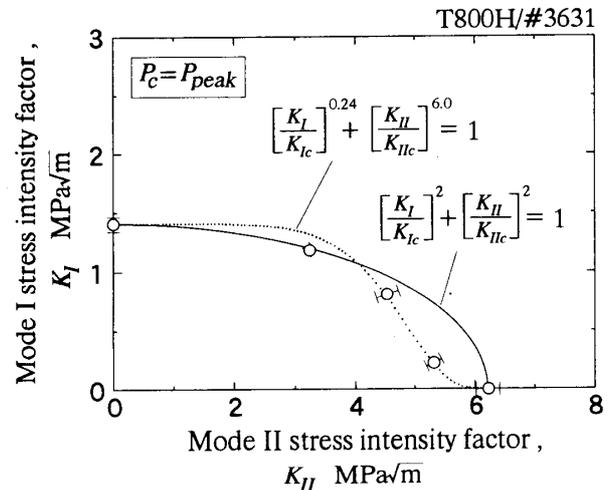


Fig. 5. Relation between  $K_I$  and  $K_{II}$ .

し、その標準偏差とともに示した。なお純モード I では、繊維ブリッジングの影響を除いたき裂先端での  $K_I$  値でプロットした。混合モード下での靱性値は純モードでの靱性値  $K_{Ic}$ 、 $K_{IIc}$  より低く、モード I とモード II の相互作用が明らかに存在する。しかしながら、モード I に近い領域では、モード II 成分の添加に対する  $K_I$  の減少割合が少ない。一方、モード II 側では、わずかなモード I 成分によって  $K_{II}$  値が大きく低下する。

(結言は省略)

### 参考文献

- (1) Reeder, J.R. and Crews, J.H., Jr., *NASA Tech. Memo.*, No. 104210, (1992).
- (2) 田中 潔, 日本複合材料学会 1991 年度研究発表講演会予稿集, (1991), 31.