

# Application News

## No.i257

材料試験機  
Material Testing System

### ASTM D6671 に準拠した CFRP の MMB 試験

MMB Test of CFRP Comforming to ASTM D6671

#### はじめに

Introduction

強度や耐久性が要求される航空機材料等を中心に、従来材料よりも比強度・比剛性が高く、酸化して錆びることのない炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の適用が検討されています。しかし、CFRP 積層材において優れた力学特性を示すのは、強化された方向（繊維方向）に限り、強化されていない方向（層間方向等）の強度は著しく低くなることが知られています。また、CFRP 積層材は衝撃に弱く、CFRP 積層材が面外から衝撃を受けると材料内部に層間剥離等の損傷を生じます。そのため、設計や製品開発において、材料内部の損傷が強度に及ぼす影響を考慮する損傷許容設計が取り入れられています。損傷許容設計を行うためには、層間のき裂伝播の抵抗を明らかにする必要があります。破壊じん性試験が行われています。

均質等方性材料では、一般的に破壊じん性試験としてモード I（開口型）のみを行っていますが、樹脂マトリクスと繊維から成る複合材料は異方性を示すため、モード I だけでなくモード II（面内せん断型）、モード III（面外せん断型）やこれらの混合モードの評価も重要となってきます（Fig. 1 参照）。MMB 試験（the Mixed Mode Bending Test）はモード I とモード II の混合モードの試験を行うことができ、連続的にモード I とモード II の比を変えられることや、モード比がき裂進展によってほとんど変化しないといった特徴があります。均質等方性材料ではじん性の評価として、応力拡大係数  $K$  を用いることが多いですが、異方性材料である複合材料における層間破壊では応力拡大係数  $K$  の 2 乗に比例したエネルギー解放率  $G$  で評価することが一般的です。<sup>1)</sup>

今回は ASTM D6671 に準拠した MMB 試験を行い、モード比（全エネルギー解放率に対するモード II のエネルギー解放率の割合） $G_{II}/G = 0.16, 0.30, 0.50, 0.70$  の 4 条件について臨界エネルギー解放率  $G_c$  を求めました。

Y. Kamei



Fig. 1 モードとは  
Mode I and Mode II

#### ASTM D6671M - 06

ASTM D6671M - 06

Fig. 2 に MMB 試験治具の模式図を示します。MMB 試験の治具はモード I の DCB 試験（ASTM D5528）、モード II の ENF 試験（JIS K 7086）を同時に行うことができます。①ヨーク、②ローラホルダーの位置（ $c$  および  $L$  の値）を変えることで、式（1）に示すように様々なモード比の試験を行うことができます。MMB 試験ではモード比を変えながら試験を行い、臨界エネルギー解放率  $G_c$  のモード比依存性を求めます。

臨界エネルギー解放率  $G_c$  の解析に用いる試験力  $P_c$  の求め方を Fig. 3 に示します。それぞれ (1) NL (2) 5%/max (3) VIS の 3 つで、以下の通りです。

- (1) NL : 非線形挙動の開始点
- (2) 5%/max : 5% オフセット点または最大試験力点
- (3) VIS : 目視によるき裂発生日点

以上の 3 つの方法で臨界エネルギー解放率  $G_c$  を求めることができます。

また、規格のオプションとしてき裂開始点だけでなく、き裂が進展したときのそれぞれのエネルギー解放率  $G$  を求めるといった記載があります。

$$\frac{G_{II}}{G} = \frac{3(c+L)^2(a+0.42Xh)^2}{4(3c-L)^2(a+Xh)^2 + 3(c-L)^2(a+0.42Xh)^2} \quad \text{式 (1)}$$

- $c, L, a, h$ : Fig. 2 参照
- $X$  : き裂長さの補正項（規格参照）
- $G_{II}/G$  : モード比
- $G_I, G_{II}$  : モード、モードのエネルギー解放率（規格参照）
- $G$  : 全エネルギー解放率（ $=G_I + G_{II}$ ）
- $G_c$  : 臨界エネルギー解放率（ $=G|_{P_c, a_0}$ ）

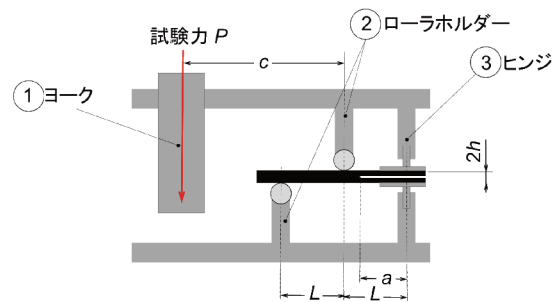


Fig. 2 装置の模式図  
Experimental Equipment

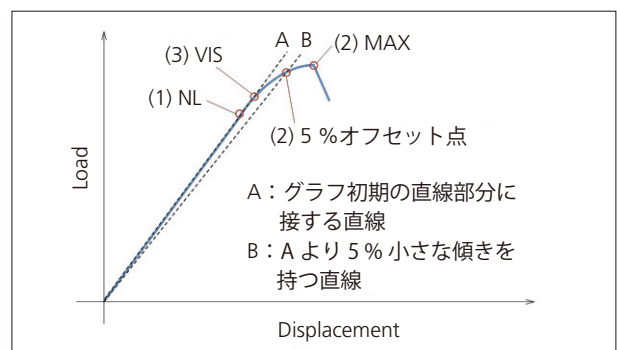


Fig. 3  $G_c$  計算に使用する試験力  
Load Used for  $G_c$  Calculation

## ■測定システム

### Measurement System

Fig. 4 に今回使用した試験片の写真, Fig. 5 に試験の様子, Table 1 に装置構成, Table 2 に今回使用した試験片の情報, Table 3 に試験条件をそれぞれ示します。

試験片の側面にき裂の進展を確認するための目盛りを書き, 試験片にモード I 試験用のタブを接着しています。また, 試験片作製時に 13 μm のフィルムを層間に入れて作製することで, 試験片に初期き裂を加えています。

今回, き裂進展の様子を 10 mm (き裂長さ  $a$  が 35 mm) まで確認しました。ビデオ式非接触伸び幅計 TRViewX に接写リングを取り付け, 高倍率で目盛りの撮影を行い, カメラでき裂進展長さを確認しています。TRViewX を用い動画を記録することで, 試験後に結果と同期した動画を観察しながら, 解析を行うことができます (Fig. 6 参照)。

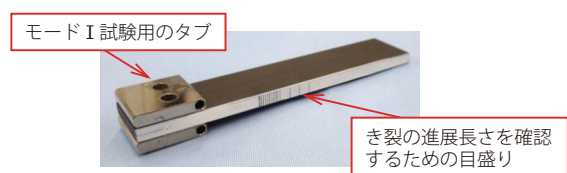


Fig. 4 使用した試験片  
Specimen

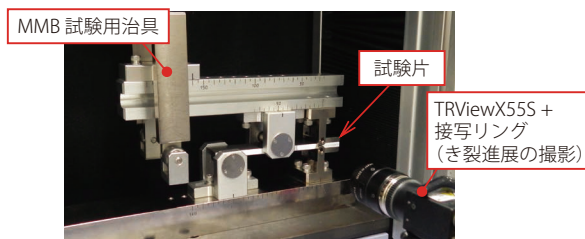


Fig. 5 試験の様子  
Picture of the Apparatus

Table 1 装置構成  
Equipment Composition

試験機	: 精密万能試験機 AG-5kNX plus
ロードセル	: 5 kN
測定治具	: MMB 試験用治具
ソフトウェア	: TRAPEZIUM X (シングル)
き裂長さ観察	: ビデオ式非接触式伸び幅計 TRViewX555 + 接写リング

Table 2 試験片情報  
Specimen Information

プリプレグ	: T800S
積層方法	: [0] <sub>n</sub>
試験片厚さ	: 5.5 mm
試験片幅	: 25.2 mm
試験片長さ	: 137 mm
初期き裂長さ	: 50 mm

Table 3 試験条件  
Test Conditions

試験速度	: 0.5 mm/min
モード比	: 0.16 ( $c=110, L=50$ ) 0.30 ( $c=60, L=50$ ) 0.50 ( $c=40, L=50$ ) 0.70 ( $c=30, L=50$ )

また, 変位を計測する際にはクロスヘッドストロークを用いています。クロスヘッドストロークを変位計測に用いた場合, 変位に試験機の変形等が合算されるため, 正確なエネルギー解放率  $G$  の測定を行うことができません。そのため, 試験系のコンプライアンス補正を以下の通り行いました。

引張弾性率が既知の非常に硬い基準試験片を用いて, 試験片に加わる最大試験力の 75 % まで MMB 試験を行いました。そのとき得られた試験力-ストローク線図から, 傾き  $m_{cal}$  を用いて式 (2) のように計算を行い, コンプライアンス補正の値  $C_{sys}$  を求めました。Table 4 にモード比毎のコンプライアンス補正の値を示します。

$$C_{cal} = \frac{2L(c+L)^2}{E_{cal}b_{cal}t^3}$$

$$C_{sys} = \frac{1}{m_{cal}} - C_{cal} \quad \text{式 (2)}$$

$C_{cal}$  : 基準試験片のコンプライアンス  
 $E_{cal}$  : 基準試験片の公称弾性率  
 $b_{cal}$  : 基準試験片の幅  
 $C_{sys}$  : 装置のコンプライアンス  
 $t$  : 基準試験片の厚み  
 $c, L$  : Fig. 2 参照

Table 4 コンプライアンス補正值  
Compliance Correction Values

モード比 $G_{II}/G$	コンプライアンス $C_{sys} (\times 10^{-4})$
0.16	13.15
0.30	5.55
0.50	3.89
0.70	3.33

## 測定結果

### Measurement Results

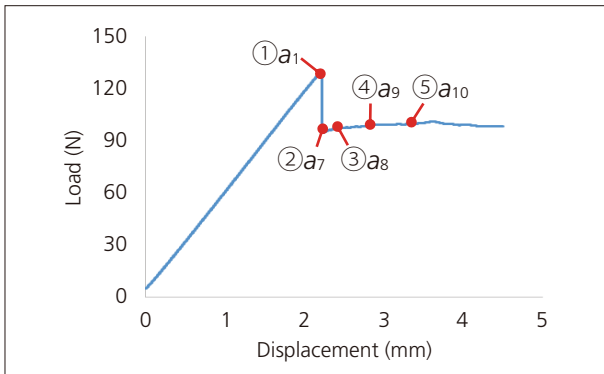
Table 5 はモード比 0.16 の試験結果です。この結果からもモード比はき裂進展によらず一定であることがわかりました。 $a_2 \sim a_6$  までは計算結果がありませんが、この部分はき裂進展が急激に進み、今回撮影した動画からき裂長さが確認できず、計算できませんでした。

ASTM D6671 ではき裂開始点  $a_0$  の値から臨界エネルギー解放率  $G_c$  を求める必要があります。 $a_0$  の求め方として、(1) NL (2) 5 %/max (3) VIS の3通りがありますが、一般的に (2) > (3) > (1) の順に値が大きくなります。

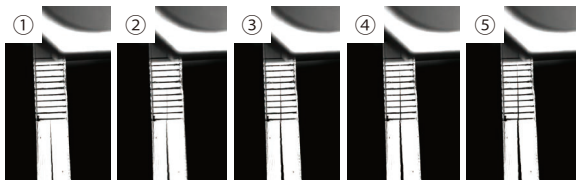
Fig. 6 に Table 5 に示した各き裂長さにおける撮影画像を示します。Fig. 6 (a) の①～⑤における画像が Fig. 6 (b) の①～⑤に対応します。

Table 5 試験結果のまとめ例  
Examples of Test Results

き裂長さ $a$ (mm)	試験力 $P$ (N)	$G_I$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$G_{II}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$G$ (kJ/m <sup>2</sup> )	モード比 $G_{II}/G$
$a_0$ 25	NL	113.7	0.232	0.278	0.165
	5 %/max	130.0	0.303	0.363	0.165
$a_0$ 25	VIS	126.4	0.286	0.343	0.165
	1	97.3	0.664	0.045	1.333
$a_1$ 26	2	—	—	—	—
$a_2$ 27	3	—	—	—	—
$a_3$ 28	4	—	—	—	—
$a_4$ 29	5	—	—	—	—
$a_5$ 30	6	—	—	—	—
$a_6$ 31	7	94.6	0.323	0.062	0.385
$a_7$ 32	8	96.1	0.352	0.068	0.420
$a_8$ 33	9	97.2	0.379	0.074	0.453
$a_9$ 34	10	98.2	0.407	0.512	0.164
$a_{10}$ 35					



(a) 試験力-変位線図  
Load – Displacement Curve



(b) 撮像画像  
State of Crack Delamination

Fig. 6 (a) 試験力-変位線図と (b) 撮像画像  
(a) Load – Displacement Curve and  
(b) State of Crack Delamination

モード比を変えた 4 回の結果について、Fig. 7 に試験力変位線図、Fig. 8、Table 6 に臨界エネルギー解放率  $G_c$  (NL) とモード比の関係を示します。Fig. 8 に示すようにモード比  $G_{II}/G$  が大きくなるほど、臨界エネルギー解放率  $G_c$  (NL) の値が大きくなり、破壊じん性値が高くなることがわかりました。

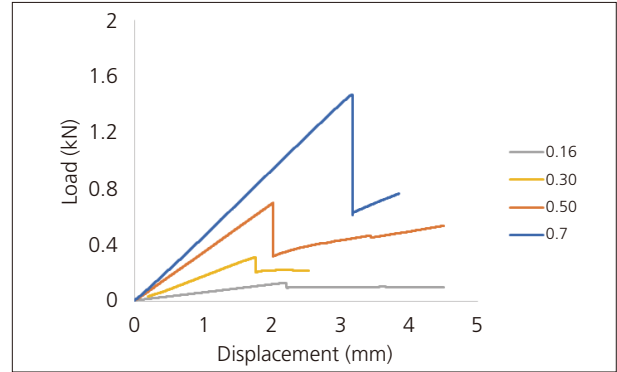


Fig. 7 試験力-変位線図  
Load – Displacement Curves

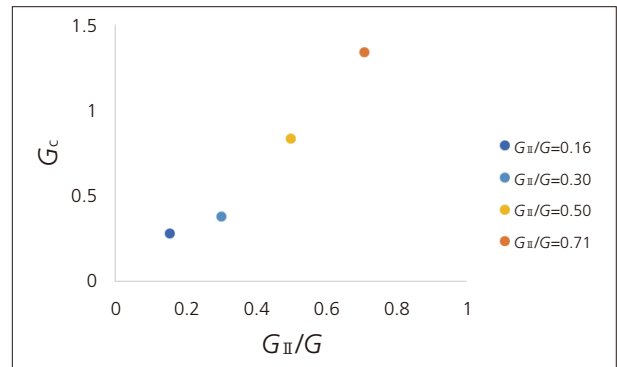


Fig. 8 臨界エネルギー解放率  $G_c$  (NL) とモード比の関係  
Relationship between the Critical Energy Release Rate  $G_c$  (NL) and the Mode Ratio

Table 6 臨界エネルギー解放率  $G_c$  (NL) とモード比の関係  
Relationship between the Critical Energy Release Rate  $G_c$  (NL) and the Mode Ratio

モード比 $G_{II}/G$	$G_c$ (kJ/m <sup>2</sup> )
0.16	0.28
0.30	0.38
0.50	0.84
0.71	1.34

## ■おわりに

### Conclusion

ASTM D6671 に準拠した試験を行い、モード比  $G_{II}/G=0.16, 0.30, 0.50, 0.70$  における臨界エネルギー解放率  $G_c$  を求めました。ASTM D6671 のオプションでは 25 mm (き裂長さ 50 mm) までのき裂進展に対するエネルギー解放率  $G$  の変化を求めるとの記述がありますが、今回は 10 mm (き裂長さ  $a$  が 35 mm) までのエネルギー解放率  $G$  の変化を求めました。

今回、き裂進展の確認方法として TRViewX を用いました。TRViewX を用いることで、試験力-変位線図と同期した試験動画を撮影することができ (Fig. 6 参照)、 $G_c$  の計算を容易に行うことができました。

MMB 試験治具を用いることで、モード I とモード II の混合モード比がほとんど変化しない、混合モードの試験を行うことができます。

## ■参考文献

### Reference

- 1) 新版 複合材料・技術便覧 (2011)