

# 各種積層構成を有する CFRP 積層材の衝撃圧縮特性に関して

日大生産工 (院)      ○江口 雄太  
日大生産工              邊 吾一

## 1. 緒言

炭素繊維強化複合材料 (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) は比強度・比剛性に優れることから、航空・宇宙分野で広く利用されている。今後はその機械的特性の優位性と環境問題の深刻化から、燃費を向上させるため、軽量化が急務である自動車などの輸送機関への利用が考えられている。そこで、CFRP を使用した自動車の衝突安全性確保のための実験と解析<sup>1)</sup>が行われているが、衝撃時の解析には静的試験から得た材料物性値を用いている。そこでより正確な解析を行うため、衝撃負荷時の材料物性値が必要となってくる。また、CFRP 材の圧縮特性は、引張特性よりも不確かな部分が多く、完全に明らかとなっていない。著者らはこれまでに、CFRP 積層材の衝撃圧縮特性を明らかにするため、静的及び衝撃圧縮試験<sup>2)</sup>を行ってきた。本報告では、0 度材、90 度材の静的及び衝撃試験の実験値から、積層理論を用いて 0/90 度材の圧縮強度を予測可能か検討した。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験片

試験には、炭素繊維(東レ(株)T700S)一方向プリプレグを積層、硬化させた積層材を用いた。板厚は、0 度材、90 度材及び 0/90 度材で 1.6mm、2.5mm の 2 種類を使用した。0/90 度材の積層構成はそれぞれ $[0_2/90_2]_s$ 、 $[0_3/90_3]_s$ である。試験片形状は幅 12mm、長さ 80mm で、短冊型試験片の両端に同質で各板厚と同厚のタブを接着した。標点間部は 7mm で、その表裏にはゲージ長さ 1mm のひずみゲージを貼り付け、それらの平均値を圧縮ひずみとして記録した(Fig.1)。

### 2.2 試験装置および試験手順

#### (1) 静的圧縮試験

静的圧縮試験は、島津製作所製オートグラフを用いた。試験片のタブ部をチャックではさみ、Fig.2(a) に示すように試験片を拘束し、静的試験治具 (Fig.2(b)) 内に設置して、試験速度 1mm/min で試験を行った。

#### (2) 衝撃圧縮試験

衝撃圧縮試験は米倉製作所製の空圧式衝撃試験機を用いた。落錘子を空圧により高速でチャックに衝突させて衝撃荷重を与え、試験片を圧縮破壊させる。衝撃試験治具(Fig.2(c))は静的圧縮試験で使用した治具に落錘子が正確にチャックに当たるよう上部にガイドが設けられている。落錘子はスチール製(560g)を使用した。衝撃荷重は試験治具下に設置したロードセルと、高速度カメラ (Vision RESEARCH PhantomV7.1)を用いて測定した。高速度カメラによる衝撃荷重の算出方法は、チャック上部に貼り付けたマークを 0.03msec の間隔で撮影し、運動解析ソフト(キーエンス(株)Motion Analyzer)を用いて変位を求め、その変位から差分法で、落錘子が衝突したときのチャック上部の速度、加速度を求め、その加速度から衝撃荷重を求めた。チャック上部の質量は 345.7g である。また、衝撃試験時の落錘子の速度(試験速度)は、チャックから上部 50mm の位置にガイドに取り付けた速度計で計測した。

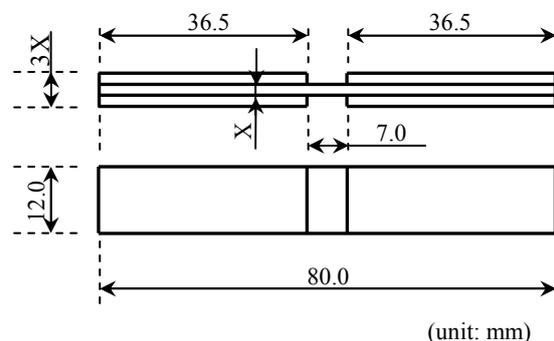


Fig.1 Specimen configuration

Impact Compressive properties of CFRP Laminates  
with Various Stacking Sequence  
Yuta EGUCHI, Goichi BEN

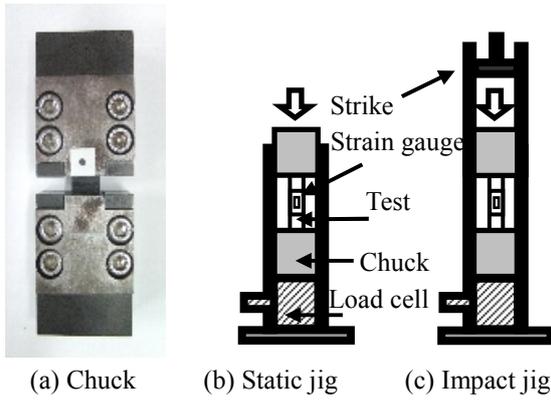


Fig.2 Test jig

### 3. 積層理論による強度計算

Fig.3 に示すように 0 度材と 90 度材が 4 層となっている 0/90 度材に、面内負荷を受ける場合を考える。まず(1)式を用いて、ある単位幅あたりにかかる力  $N_x$  が負荷したときの 0/90 度材のひずみ  $\epsilon_x$  を算出する。次に求めたひずみのもとで各ラミナに発生する応力を(2)式により求める。最後に発生応力を最大応力説((3)式)で各層ごとに破損が起これないか判定し、発生応力がある1つの層の破損則を満たすまで計算を繰り返す。そして破損則を満たしたときに積層材全体が破損したとする。計算に使用した値は静的及び衝撃圧縮試験から得た圧縮強度と圧縮弾性率の平均値を、ポアソン比はカタログ値である  $\nu=0.34$  を使用する。

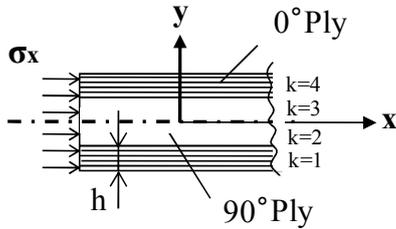


Fig.3 0/90° ply laminate

$$\begin{cases} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{cases} N_x \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} N_x = \sum_{k=1}^n \sigma_x^{(k)} h \\ A_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k h \quad (i, j = 1, 2, 6) \\ Q_{11} = \frac{E_x}{1 - \nu_{xy} \nu_{yx}}, Q_{22} = \frac{E_y}{1 - \nu_{xy} \nu_{yx}} \\ Q_{12} = \frac{\nu_{xy} E_x}{1 - \nu_{xy} \nu_{yx}}, Q_{66} = G_{xy} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{cases} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \tau_{xy} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_{x(k)} > F_{LC} \quad \sigma_{x(k)} > F_{TC} \quad (3)$$

## 4. 静的及び衝撃試験結果

### 4.1 0 度材

0 度材の試験結果を Fig.4 に示す。圧縮特性を見ると、圧縮強度、圧縮弾性率において衝撃試験値の方が高い値を示し、圧縮ひずみは衝撃試験値の方が低い値を示すという結果となった。次に応力-ひずみ線図(Fig.5)を見ると、静的試験はひずみが約 0.5%付近から非線形な挙動を示しているのに対し、衝撃試験は破断まで線形な挙動を示していることがわかる。

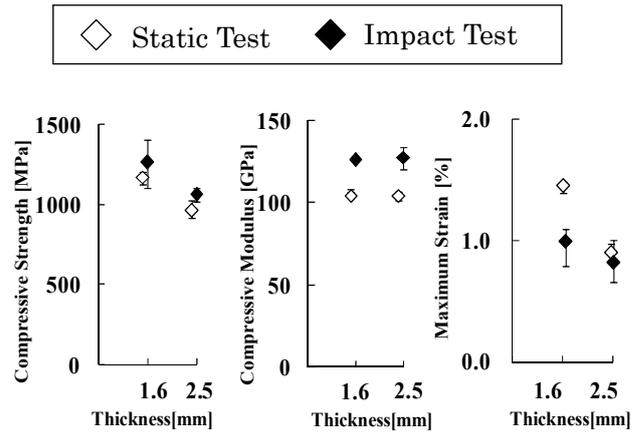
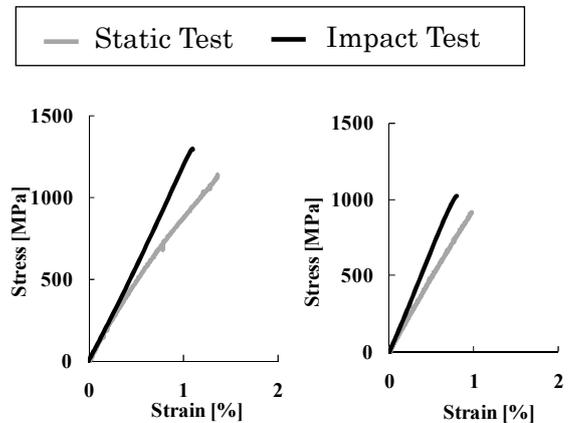


Fig.4 Comparison of Static and Impact Results



(a)  $t=1.6\text{mm}$  ( $V=3.506\text{m/s}$ ) (b)  $t=2.5\text{mm}$  ( $V=7.709\text{m/s}$ )

Fig.5 Stress-Strain Curves

#### 4.2 90度材

90度材の試験結果を Fig.6 に示す。0度材の試験結果と同様に、板厚 1.6mm, 2.5mm 試験片とも圧縮強度、圧縮弾性率において衝撃試験値の方が高い値を示した。しかし圧縮ひずみは、2.5mm 試験片については0度材と同様に衝撃試験値の方が低い値を示したが、1.6mm 試験片は衝撃試験の方が高い値を示した。曲げひずみを計算すると、1.6mm 試験片について、静的試験は 1.43%、衝撃試験では 0.64%、2.5mm 試験片については、静的試験で 0.26%、衝撃試験では 0.27%となった。以上のことから、1.6mm 試験片は静的試験で曲げの影響を受けたため、衝撃試験よりも圧縮ひずみが低くなったと考えられる。

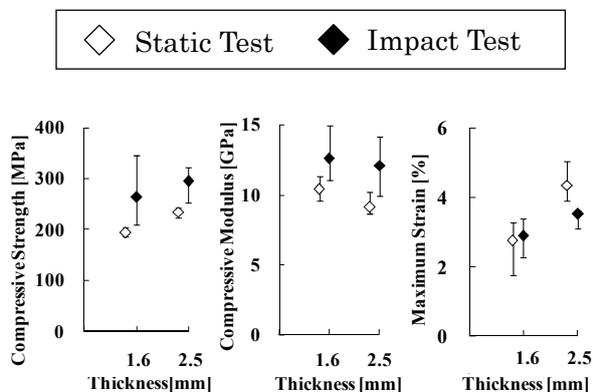
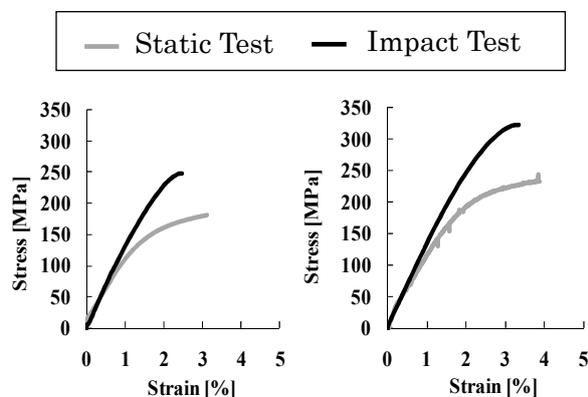


Fig.6 Comparison of Static and Impact Results

Fig.7 に応力-ひずみ線図を示す。静的試験は圧縮ひずみの約 5 割付近から非線形な挙動を、衝撃試験は破断直前まで線形な挙動を示していることがわかる。また、板厚増加による挙動の違いは見られなかった。



(a) t=1.6mm(V=3.546m/s) (b) t=2.5mm(V=5.047m/s)

Fig.7 Stress-Strain Curves

#### 5. 積層理論による強度計算結果

Table.1 に強度計算に使用した値を示す。表の値は先に示した 0 度材, 90 度材の静的及び衝撃試験結果の平均値である。

Table.1 Mechanical properties obtained by Static and Impact Compressive test

		Static	Impact
Compressive Strength	0[deg]	1171.10[MPa]	1309.93[MPa]
	90[deg]	195.63[MPa]	264.57[MPa]
Young's Modulus	0[deg]	104.35[GPa]	126.34[GPa]
	90[deg]	10.43[GPa]	12.60[GPa]

Fig.8 は 0/90 度, 板厚 1.6mm 試験片の静的試験の計算結果を応力-ひずみ線図にしたものである。黒色の実線が計算値, 灰色の実線が圧縮試験の最大値, 破線が最小値である。圧縮ひずみが約 0.5%までは比較的良好な一致を示しているが、0.5%以降は実験値と計算値で一致してないことがわかる。

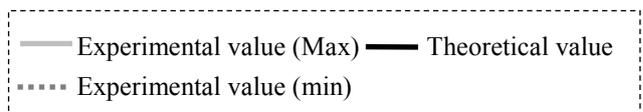


Fig.8 Stress-Strain Curves (Static t=1.6mm)

次に、Fig.5, 7 に示した 0 度材, 90 度材の静的試験の非線形性を考慮し、試験結果の応力-ひずみ線図に合わせて、弾性率を変化させながら計算した結果を Fig.9 に示す。Fig.9 より、Fig.8 の非線形性を考慮しない場合よりも良好な一致を示していることがわかる。破壊の判定は、単位幅辺りの力が 1.054[N/mm]の負荷がかかったときに、0 度層の計算値が  $F_{LC}$  よりも大きくなり、破損則を満たしたので積層材が破断したと判定した。

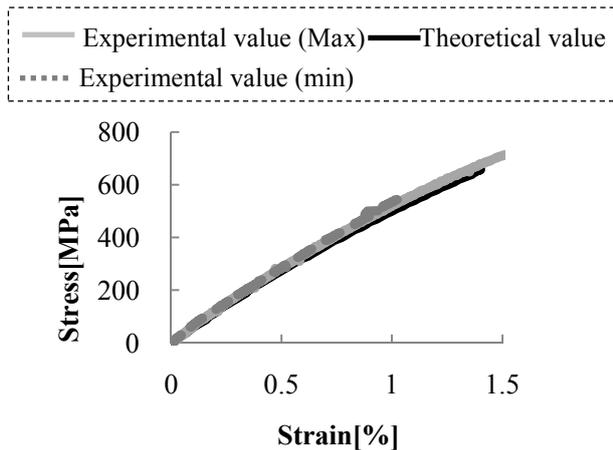


Fig.9 Stress-Strain Curves (Static t=1.6mm)

Fig.10 に衝撃試験の計算結果を示す. 応力-ひずみ線図を見ると, 良好な一致を示していることがわかる. 衝撃試験の計算結果も, 先程の静的試験と同様に, 0 度層が破損則を満たし, 試験片の破断と判定した.

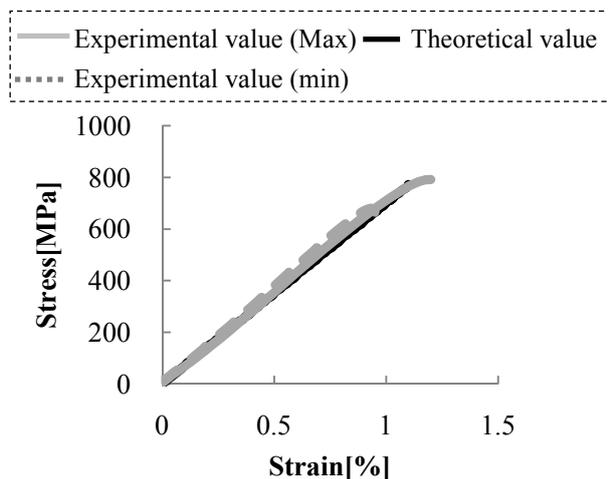


Fig.10 Stress-Strain Curves (Impact t=2.5mm)

次に板厚 2.5mm 試験片の静的及び衝撃試験の計算結果を示す. 応力-ひずみ線図(Fig.11)を見ると, 傾きは実験値と計算値で良く一致しているが, 破壊応力, 圧縮ひずみは計算値の方が, 実験値よりも大きくなっている. また, Table.2 に板厚 1.6mm, 2.5mm の計算値と実験値をまとめたものを示す. 表内の左側から実験値, 理論値 (太字), 誤差 (斜体) で, 表内の値は平均値である. 実験値と理論値を比較すると, 板厚 1.6mm の試験片は静的及び衝撃試験とも誤差が 5%以内となっているが, 板厚 2.5mm 試験片は静的及び衝撃試験とも誤差が大きい結果となった.

0/90 度材の破壊様相を見てみると, 1.6mm 試験片は 0 度層と 90 度層が剥離せず破断しているものも多く見られたが, 2.5mm 試験片は 0

度層と 90 度層で剥離が生じ破断しているものも多く見られた(Fig.12). 従って実験値が理論計算値よりも小さく, 誤差が大きくなったと考えられる. 今後擬似等方性積層材についても検討する予定である.

末筆ながら, 試験体を製作していただいた東レ(株)複合材料研究所に深く感謝します.

参考文献

1) 邊, 杉本他: 日本複合材料学会誌, 34 巻 6 号 pp, 211-218(2008)

2) 邊, 江口: JCOM-38 講演論文集(2008), p.276-279.

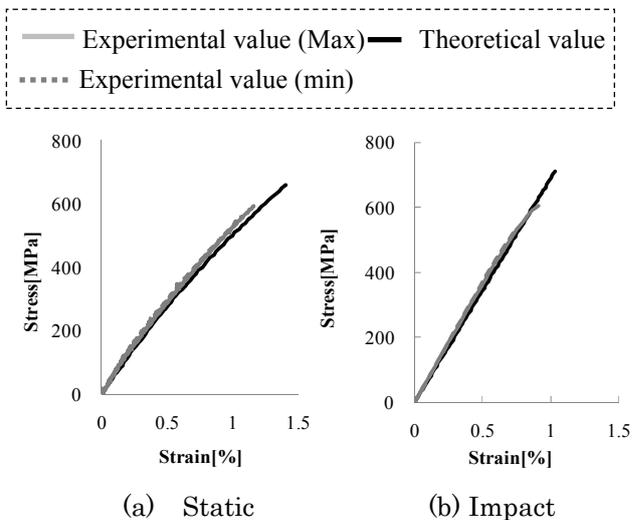


Fig.11 Stress-strain Curves (t=2.5mm)

Table.2 Experimental and Theoretical Strength (unit : MPa)

Stacking sequences	Static Test			Impact Test		
	Exp.	<b>Cal.</b>	<i>Error</i>	Exp.	<b>Cal.</b>	<i>Error</i>
[0 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	654	<b>659</b>	<i>0.80%</i>	737	<b>720</b>	<i>2.30%</i>
[0 <sub>3</sub> /90 <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	562	<b>659</b>	<i>17.20%</i>	560	<b>720</b>	<i>28.60%</i>

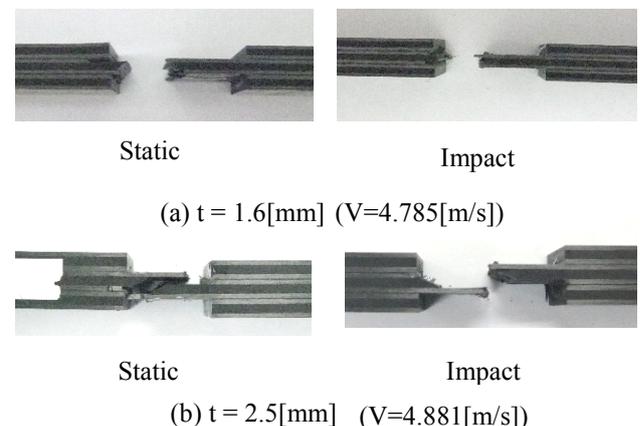


Fig.12 Fracture aspect