積層複合材の板厚方向の衝撃圧縮特性†

横 山 隆*

Through-Thickness Compressive Characteristics of Laminated Composites at High Rates of Strain

by

Takashi YOKOYAMA*

Through-thickness compressive characteristics of laminated composites at high rates of strain are evaluated using the standard split Hopkinson pressure bar. Three types of laminated composites, namely symmetric cross-ply carbon/epoxy, plain-woven carbon/epoxy and plain-woven E-glass/epoxy with almost the same thickness are tested at room temperature. Cylindrical compression specimens are machined such that the longitudinal direction of each specimen is parallel to the thickness direction of the laminates. The effects of strain rate, type of reinforcing fiber and prepreg form on the secant modulus, ultimate compressive strength, ultimate compressive strain and absorbed energy are examined in detail. It is shown that the cross-ply carbon/epoxy laminated composite exhibits the highest strength characteristics at low and high rates of strain, and there is no correlation between the absorbed energies and the Charpy impact energies for the laminated composites tested.

Key words : Absorbed energy, CFRP, Charpy test, GFRP, Hopkinson bar, Impact loading, Laminated composites, Secant modulus, Strain rate, Ultimate compressive strength, Ultimate compressive strain

1 緒 言

複合材料は金属材料と比較して比強度、比剛性が高いため近年、航空機、自動車、スポーツ用具等の分野で広範に使用されている。積層された複合材料（以下積層複合材）の静的強度特性を決定する種々の試験法については、すでに ASTM¹⁾や JIS²⁾において標準化されている。また線形破壊力学に基づくモードⅠ、Ⅱにおける静的層間破壊じん性を決定する試験法も規格化²⁾されている。しかし衝撃荷重下における変形強度や層間破壊じん性を決定する試験法については、まだ標準化されるに至っていない。積層複合材の衝撃特性データは複合材料構造物の安全設計上不可欠であるため、積層面内における圧縮^{3)~8)}引張り^{9)~11)}せん断^{12)~14)}特性などが主としてホプキンソン棒法により測定されてきた。板厚方向の圧縮特性については少数^{15), 16)}を除いては、あまり研究されていないが、積層複合材の衝撃貫通特性と衝撃圧縮特性との相関性を評価する際には重要となる。

本報告の目的は、積層複合材の板厚方向の衝撃圧縮応力一ひずみ特性を評価することである。まず、標準的な圧縮型ホプキンソン棒装置¹⁷⁾を用いて、プリプレグ形態と強化繊維の異なる3種類の積層複合材から板厚方向に切出した薄い円柱状試験片について、高ひずみ速度($\dot{\epsilon} \approx 1000/\text{s}$ オーダ)での破壊までの圧縮応力一ひずみ関係を測定した。この圧縮応力一ひずみ関係から、割線係数、極限圧縮強度、極限圧縮ひずみ、極限圧縮ひずみ値までの吸収エネルギーを決定した。次に、インストロン試験機により低・中ひずみ速度での圧縮応力一ひずみ関係を測

定した。両試験結果の比較に基づき、積層複合材の圧縮特性に及ぼすひずみ速度、プリプレグ形態、強化繊維材の影響を詳細に調べた。さらに、シャルピー衝撃試験機により切欠きのない短冊状積層複合材のフラットワイズ(板面と垂直)方向の曲げ吸収エネルギーの測定を試み、衝撃圧縮荷重下での板厚方向の吸収エネルギーとの相関関係を考察した。

2 積層複合材の引張特性と圧縮試験片の形状寸法

供試材として3種類のほぼ同一の厚さ($h = 3.80 \sim 3.96\text{mm}$)をもつ直交積層 CFRP 材、平織り CFRP 材、平織り GFRP 材(サカイ・コンポジット(株))を使用した。それぞれの積層複合材のプリプレグ形態、板厚 h 、プライ数を、Table I に示す。さらに積層複合材の強化繊維材およびマトリックス樹脂の種類、繊維含有率を、Table II に示す。これらよりその板厚方向に、Fig. 1 に示すような円柱(板)状圧縮試験片(直径8mm)を機械加工により採取した。円柱の直径寸法 d の決定は、等方均質材の衝撃圧縮試験片における最適な細長比($h/d \approx \sqrt{3}/4$)の

Table I. Specifications of three different laminated composites.

		Prepreg	Thickness h (No. of ply)
Carbon/epoxy	A	Unidirectional [0°/90°/0°/90°/0°/90°/0°/90°] _S	3.80 ± 0.04 (16-ply)
	B	Plain-woven fabric	3.85 ± 0.04 (20-ply)
E-glass/epoxy	C	Plain-woven fabric	3.96 ± 0.02 (28-ply)

† 原稿受理 平成 15 年 6 月 18 日 Received June 18, 2003

* 正 会 員 岡山理科大学工学部機械工学科 〒700-0005 岡山市理大町, Dept. of Mech. Eng., Okayama Univ. of Sci., Ridai-cho, Okayama, 700-0005

Table II. Types of reinforcing fibers and resin matrix.

	Unidirectional carbon/epoxy	Plain - woven carbon/epoxy	Plain - woven E-glass/epoxy
Fiber	T700S (Torayca)	T300B-3000 (Torayca)	E-Glass
Matrix	Epoxy #2500 (130°C)*	Epoxy #2500 (130°C)	Epoxy #2500 (130°C)
Fiber volume ratio V_f	0.67	0.60	0.45

* Values in parentheses denote the hardening temperature

Fig. 1. Form and dimensions of compression specimens from laminated composites.

理論的検討¹⁸⁾に基づいている。ホプキンソン棒法による積層複合材の圧縮試験における最適形状寸法については、Woldesenbet と Vinson⁷⁾が一方向強化 CFRP 材の面内方向に採取した $1/2 \leq h/d \leq 2.0$ の細長比を持つ 7 種類の異なる円柱状試験片を使用して、繊維 (1-) 方向 (Fig. 1 参照) とそれと垂直な横 (2-) 方向の極限圧縮強度および極限圧縮ひずみに及ぼす細長比の影響を詳細に調べた。その結果によれば、繊維 (1-) 方向の圧縮試験では縦割れを生じるため試験片の細長比の影響を大きく受けるが、横 (2-) 方向の圧縮試験ではほとんど細長比の影響を受けない。さらに板厚 (3-) 方向の圧縮強度特性は、横 (2-) 方向とほぼ同じと報告されているので、本試験における円柱状試験片の細長比を、等方均質材の場合と同様に $h/d \approx 1/2$ と決定した。

基本的機械的特性として、JIS (K7054, K7073) に規定された形状寸法の引張試験片 (幅 25mm, 長さ 250mm, 厚さ $h/4$) を製作して、インストロン試験機によりクロスヘッド速度 2mm/min で測定した静的面内引張り特性値を、Table III に示す。一方、静的層間せん断強度 τ_{ILSS} は、同様に JIS (K7057, K7078)²⁾ に規定された短い

Table III. Mechanical and physical properties of three different laminated composites.

Property	Cross-ply carbon/epoxy	Plain - woven carbon/epoxy	Plain - woven E-glass/epoxy
E (GPa)	74	66	33
σ_B (MPa)	1067	552	399
τ_{ILSS} (MPa)	52	60	68
ϵ_F (%)	1.6	1.0	2.0
ρ (kg/m ³)	1540	1470	2000

はり試験片 (幅 10mm, 長さ 30mm, 板厚 h , 支点間距離 20mm) について、インストロン試験機によりクロスヘッド速度 5mm/min での 3 点曲げ試験から決定した。

3 試験方法と試験手順

3・1 衝撃圧縮試験

試験に使用した圧縮型ホプキンソン棒装置の概略図を、Fig. 2 に示す。本装置は、直径 16mm, 長さ 1500mm のホプキンソン棒と呼ばれる入出力棒 (JIS SUJ2: $E = 209\text{GPa}$, $\sigma_y > 1200\text{MPa}$) と打出し棒 (JIS SK5: 直径 15.9mm, 長さ 350mm) から構成されている。打出し棒の速度測定装置を含む測定系は省略している。以下に試験手順を簡単に説明する。まず、Fig. 1 に示す円柱状試験片を入力棒と出力棒の間に挟み込んで取り付ける。試験片の両端面には摩擦の影響を軽減するために、潤滑剤 (2 硫化モリブデン) を塗布している。その後、圧力タンク内に蓄えられた圧縮空気を、空気作動弁により解放することにより打出し棒を発射し、入力棒の左端面に衝突させる。このとき、入力棒の衝突面には緩衝材として電磁鋼板製の円板 (厚さ 0.2mm, 直径 16mm) 1 枚を、前述の潤滑剤を塗布して貼り付けている。この緩衝材の使用は、打出し棒による衝撃時に入力棒内に分散性をもつ入射ひずみパルスが発生するのを極力防止するためである。発生した圧縮ひずみパルスは入力棒内を左から右へ伝ばし、試験片との界面で機械的インピーダンスの違いからその一部は反射し、残りは円柱状試験片を通過して出力棒へ透過する。このとき、入出力棒上のひずみゲージ (共和電業: KSP-2-120-E4) により、入射、反射、透

Fig. 2. Schematic diagram of standard split Hopkinson pressure bar (recording system not shown).

過ひずみパルスを測定しデジタル・ストレージ・オシロスコープ (IWATSU: DS-9121) に書込み速度 $1\mu\text{s}/\text{word}$ で記録する。この記録された出力電圧は、データ処理のためにパーソナル・コンピュータ (NEC: PC-9821 Xb10) に転送される。

3・2 ホプキンソン棒法の測定理論

一次元弾性波伝ば理論¹⁹⁾に基づく、円柱状試験片の圧縮における公称ひずみ ε 、公称ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ 、公称応力 σ は、測定された入射、反射、透過ひずみパルス (ε_i , ε_r , ε_t) により、それぞれ次式で与えられる。

$$\varepsilon(t) = \frac{2c_0}{h} \int_0^t \{\varepsilon_i(t') - \varepsilon_t(t')\} dt' \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2c_0}{h} \{\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)\} \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{AE}{A_s} \varepsilon_t(t) \quad (3)$$

ここで、 A , E , c_0 は弾性棒の断面積、ヤング率、縦弾性波の伝ば速度であり、 A_s は圧縮試験片の断面積である。式 (1)~(3) においては、試験片の両端面に作用する動的圧縮応力の釣り合い条件 ($\sigma_1 = \sigma_2$) すなわち

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t) \quad (4)$$

が成り立つことを仮定している。式 (1)~(3) から時間 t を消去することにより、圧縮応力-ひずみ速度-ひずみ関係が求められる。この圧縮応力-ひずみ関係から、割接係数 E_s (ここでは、原点と1%ひずみに対応する応力を結ぶ直線の勾配として定義)、極限圧縮強度 σ_B 、極限圧縮ひずみ ε_B (極限圧縮強度に対応するひずみ値、本試験材料ではこのひずみ値で圧壊を開始しているので破壊ひずみ ε_F と等しくなる) を決定した。吸収エネルギー U_B は極限圧縮ひずみまでの圧縮応力-ひずみ曲線下の面積から求めた。

4 試験結果および考察

4・1 静的圧縮試験

静的圧縮試験はすべてインストロン試験機を使用して、伸び計を上下アンビル間に取り付けて行なった。Fig. 1 に示す円柱状試験片の形状寸法は、静的圧縮試験片の ASTM 規格²⁰⁾ ($h/d = 1.5 \sim 2$) を満足していない。このような細長比の小さい円柱状試験片を使用すると、上下アンビルと試験片端面間での摩擦拘束による樽型変形のために、正確な圧縮応力-ひずみ関係が測定できない。金属板の板厚方向の静的圧縮強度特性の測定では、円板状試験片を重ねてその圧縮応力-ひずみ特性を測定する試験の妥当性が、すでに実験的に立証²¹⁾ されている。そこで本試験でも、円板1枚のみと円板2枚を重ね合わせた2種類の円柱状試験片について、クロスヘッド速度 $1\text{mm}/\text{min}$ で静的試験を行なって、その圧縮応力-ひずみ関係を比較した。一例として、直交積層 CFRP 材の板厚方向の圧縮応力-ひずみ関係の比較を、Fig. 3 に示す。この図からわかるように、両者の圧縮応力-ひずみ関係は圧壊 (X 印) までほぼ直線関係を示す。円板1枚 ($h = 3.75\text{mm}$) の場合には、圧縮荷重の増大に伴う試験片両端面での摩擦拘束の影響による樽型変形のため変位

Fig. 3. Comparison of through-thickness compressive stress-strain curves for cross-ply carbon/epoxy laminated composites with two different thicknesses.

が徐々に過大に評価されて、圧縮応力-ひずみ関係の勾配が円板2枚 ($h = 7.56\text{mm}$) のそれと比較するとやや小さくなって、極限圧縮ひずみと極限圧縮強度が少し過大に評価される傾向がみられた。そのため以下では、3種類の積層複合板について、すべて円板2枚を重ね合わせて静的圧縮試験を実施して、圧壊するまでの圧縮応力-ひずみ関係を精密に決定した。

4・2 衝撃圧縮試験

直交積層 CFRP 板 (板厚 $h = 3.75\text{mm}$) の円柱状試験片についての衝撃圧縮試験におけるひずみゲージ出力の代表的なオシロスコープ記録例を、Fig. 4 に示す。この上部トレースが入力棒上のひずみゲージ No. 1 からの出力波形を、下部トレースが出力棒上のひずみゲージ No. 2 からの出力波形を示している。各トレースの基準時間軸より下 (上) 向きの出力が、圧縮 (引張り) ひずみに対応している。このひずみパルスから試験片の両端面に作用する圧縮応力履歴をもとめると、Fig. 5 のようになる。この図より両応力はよく一致していて、式 (4) の仮定が

Fig. 4. Oscilloscope records from impact compression test on cross-ply carbon/epoxy laminated composite.

Fig. 5. Axial compressive stress histories measured at front and back faces of compression specimen from cross-ply carbon/epoxy laminated composite.

成立することが証明された。また測定したひずみパルス
を式 (1)～(3)に代入後、時間 t を消去して得られる圧縮
応力—ひずみ速度—ひずみ関係を Fig. 6 に示す。この関
係から変形中の試験片内のひずみ速度は一定ではなく、
最大圧縮応力 (867MPa) で試験片が圧壊し始めると急激
に変形抵抗が小さくなり、ひずみ速度が $\dot{\epsilon} = 600/\text{s}$ から $\dot{\epsilon} =$
3300/s まで急速に上昇に転ずることがわかる。 $\epsilon = 0$ から
極限圧縮ひずみ ϵ_B (= 圧縮破壊ひずみ) に至るまでの
ひずみ速度を数値積分し、その値を ϵ_B で除して平均ひず
み速度を求めると、 $\dot{\epsilon} = 1500/\text{s}$ となった。以下に示す衝
撃圧縮応力—ひずみ関係において表示されたひずみ速度
は、全てこのようにして算出した極限圧縮ひずみまでの
平均ひずみ速度を示している。

ひずみ速度が応力—ひずみ関係に及ぼす影響を調べる
ために、直交積層 CFRP 材の静的および衝撃圧縮応力—
ひずみ関係を合せて Fig. 7 に示す。この図における一点
鎖線は、板厚 $h = 7.59\text{mm}$ (円板 2 枚)の円柱状試験片をク
ロスヘッド速度 50mm/min で試験した静的圧縮応力—ひ
ずみ関係を示す。同様に平織り CFRP 材、平織り GFRP
材の静的および衝撃圧縮応力—ひずみ関係の比較を、そ
れぞれ Fig. 8 と Fig. 9 示す。それぞれの衝撃圧縮応力—

Fig. 6. Through-thickness compressive stress-strain and strain rate-strain relations for cross-ply carbon/epoxy laminated composite.

Fig. 7. Through-thickness compressive stress-strain curves for cross-ply carbon/epoxy laminated composite at different strain rates.

Fig. 8. Through-thickness compressive stress-strain curves for plain-woven carbon/epoxy laminated composite at different strain rates.

Fig. 9. Through-thickness compressive stress-strain curves for plain-woven E-glass/epoxy laminated composite at different strain rates.

ひずみ関係を比較すると、直交積層 CFRP 材だけが応力が上昇して極限圧縮強度に達する前に、小さなピークが見られる。これは巨視的な圧壊に至る前に、局所的に層間にはく離を生じたためと思われる。しかし、衝撃圧縮試験後の直交積層 CFRP 材の円柱状試験片は界面と繊維方向に沿って小さく粉砕されており、そのような層間にはく離を直接的には確認することはできなかった。直交積層 CFRP 材は低・中ひずみ速度下では他の 2 種類の積層複合材よりもはるかに大きい極限圧縮強度、極限圧縮ひずみ、吸収エネルギーをもつが、高ひずみ速度下では圧縮強度が著しく低下することに注意する必要がある。このような傾向は、同じ積層構造を有する直交積層 CFRP 材の板厚方向の衝撃圧縮強度について Hosur ほか¹⁶⁾も報告している。この直交積層 CFRP 材の極限圧縮強度の低下の原因は、Table II に示す静的層間せん断強度から推測されるように、層間強度（結合力）が相対的に弱いため衝撃荷重下ではく離損傷が生じ易いことが起因していると思われる。一方、平織り GFRP 積層材の極限圧縮強度はひずみ速度とともに少し上昇している。この結果も Tay ほか¹⁵⁾の GFRP 積層材の板厚方向の圧縮強度のひずみ速度依存性と同じ傾向を示している。

つぎに、3 種類の積層複合材について低ひずみ速度（各試験片 5 個）、中ひずみ速度（各試験片 4 個）、高ひずみ速度（各試験片 4 個）での圧縮応力-ひずみ関係から得た割線係数、極限圧縮強度、極限圧縮ひずみ、極限圧縮ひずみまでの吸収エネルギーのそれぞれの平均値を、ひずみ速度についてプロットした結果を Fig. 10 ~ Fig. 13 に示す。Fig. 10 から全ての積層複合材の割線係数がひずみ速度と共に、大きく上昇していることがわかる。これは積層複合材のマトリックスであるエポキシ樹脂（熱硬化性樹脂）に固有の粘弾性特性によるものである。これと同種類のエポキシ樹脂の圧縮強度のひずみ速度依存性については、円柱状バルク試験片を使用して Tay ほか¹⁵⁾によりすでに実験的に確認されている。

Fig. 11 の極限圧縮強度については、平織り GFRP 材だけが正のひずみ速度依存性を示すことに注意すべきで

Fig. 10. Effect of strain rate on 1% secant modulus for three different laminated composites.

Fig. 11. Effect of strain rate on ultimate compressive strength for three different laminated composites.

Fig. 12. Effect of strain rate on ultimate compressive strain for three different laminated composites.

ある。Fig. 12 から極限圧縮ひずみについては、全ての積層複合材が負のひずみ速度依存性を持つことがわかる。一方、Fig. 13 における吸収エネルギーのひずみ速度依存性の傾向は、積層複合材によって異なる。すなわち、直交積層 CFRP 材は負のひずみ速度依存性を示すが、平織

Fig. 13. Effect of strain rate on absorbed energy for three different laminated composites.

り CFRP 材はほとんどひずみ速度依存性を示さず、平織り GFRP 材は正のひずみ速度依存性を示す。

4・3 シャルピー衝撃試験

3 種類の積層複合材から切欠きなしフラットワイズ衝撃 1 号試験片（長 80mm，幅 10mm，支点間距離 60mm）（JIS K7061，JIS K7077）を切り出して、シャルピー衝撃試験機（Zwick 5101：容量 15J）により曲げ吸収エネルギーを測定した結果を Table IV に示す。平織り CFRP 材・GFRP 材のシャルピー曲げ吸収エネルギーの間には大きな差がみられる。これは Table III に示すように両者の破断伸び ε_F の差が原因と考えられる。直交積層 CFRP 材については、衝撃負荷時に層間にはく離を起こして曲げ破壊しなかったため、吸収エネルギーの決定はできなかった。平織り CFRP 材・GFRP 材のシャルピー曲げ吸収エネルギーの大小関係は Table II に示す静的層間せん断強度のそれと同じような傾向を示し、板厚方向の極限圧縮ひずみまでの衝撃吸収エネルギーの大小関係との相関性は見られない。

5 結 言

3 種類の積層複合材の板厚方向の高ひずみ速度（ $\dot{\varepsilon} = 1100/\text{s} \sim 1500/\text{s}$ ）での圧縮応力-ひずみ特性を、標準型ホプキンソン棒法を使用して評価した。積層複合材の圧縮特性に及ぼすひずみ速度、プリプレグ形態、強化繊維材の影響について調べた結果、次のような知見を得た。

(1) 3 種類の積層複合材の 1% 割線係数は、いずれもひずみ速度の上昇と共に平均して 1.6 ～ 2.3 倍程度増大する。

(2) 直交積層 CFRP 材の極限圧縮強度、極限圧縮ひずみ、吸収エネルギーは調べたひずみ速度範囲内では、他の 2 種類の積層複合材のそれらよりも常に大きい。ひずみ速度の上昇と共に平均してそれぞれ 30%、12%、15% 程度も低下する。

(3) 平織り CFRP 材の極限圧縮強度、極限圧縮ひずみ、吸収エネルギーはひずみ速度の上昇に対して鈍感であり、平均してそれぞれ 5%、18%、2% 程度減少するにすぎない。

(4) 平織り GFRP 材の極限圧縮強度と吸収エネルギー

は、ひずみ速度の上昇と共に平均してそれぞれ 15%、16% 程度上昇するが、極限圧縮ひずみは逆に 9% 程度減少する。

(5) 3 種類の積層複合材の極限圧縮ひずみまでの衝撃吸収エネルギーの大小関係と、フラットワイズ衝撃試験片のシャルピー曲げ吸収エネルギーのそれとの間には特に相関性は認められない。

参 考 文 献

- 1) "ASTM Standards and Literature References for Composite Materials", 2nd Ed. (1990) ASTM, Philadelphia.
- 2) "JIS ハンドブックプラスチック" (1999) 日本規格協会.
- 3) R. L. Sierakowski, G. E. Nevill, Jr., C. A. Ross and E. R. Jones, J. Comp. Mater., **5**, 362 (1971).
- 4) L. J. Griffiths and D. J. Martin, J. Phys. D, Appl. Phys., **7**, 2329 (1974).
- 5) J. Harding, Composites, **24**, 323 (1993).
- 6) J. Yuan, N. Takeda, D.-Y. Song and A. M. Waas, Mater. Sci. Res. Int., **5**, 202 (1999).
- 7) E. Woldesenbet and J. R. Vinson, AIAA, J., **37**, 1102 (1999).
- 8) J. R. Vinson and E. Woldesenbet, J. Comp. Mater., **35**, 509 (2001).
- 9) J. Harding and L. M. Welsh, J. Mater. Sci., **18**, 1810 (1983).
- 10) G. H. Staab and A. Gilat, J. Comp. Mater., **29**, 1308 (1995).
- 11) J. Rodriguez, I. S. Chocron, M. A. Martinez and V. Sanchez-Galvez, Composites : Part B, **27B**, 147 (1996).
- 12) S. M. Werner and C. K. H. Dharan, J. Comp. Mater., **20**, 365 (1986).
- 13) J. Harding and Y. L. Li, Comp. Sci. and Technol., **45**, 161 (1992).
- 14) L. Dong and J. Harding, Composites, **25**, 129 (1994).
- 15) T. E. Tay, H. G. Ang and V. P. W. Shim, Comp. Struct., **33**, 201 (1995).
- 16) M. V. Hosur, J. Alexander, U. K. Vaidya and S. Jeelani, Comp. Struct., **52**, 405 (2001).
- 17) H. Kolsky, Proc. Phys. Soc. London, **B62**, 676 (1949).
- 18) E. D. H. Davies and S. C. Hunter, J. Mech. Phys. Solids, **11**, 155 (1963).
- 19) K. F. Graff, "Wave Motion in Elastic Solids", Chap.2 (1975) Clarendon Press, Oxford.
- 20) ASTM E9-89a, "Annual Book of ASTM Standards", p.101 (1995) ASTM, Philadelphia.
- 21) 福井伸二，工藤英明，吉田清太，阿部邦雄，東京大学理工学研究所報告，**8**，135 (1954).

Table IV. Charpy impact energies for three different laminated composites.

	Cross-ply carbon/epoxy	Plain - woven carbon/epoxy	Plain - woven E-glass/epoxy
Charpy impact energy (J)	Not available	2.5 (5) *	7.5 (5) *

* Figures in parentheses indicate the number of test specimens