

# 一方向強化カーボン／エポキシ複合材の層間せん断強度の評価 — 変形速度の影響 —<sup>†</sup>

横 山 隆\* 中 井 賢 治\*

## Characterization of Interlaminar Shear Strength of a Unidirectional Carbon/Epoxy Laminated Composite : Effect of Deformation Rate

by

Takashi YOKOYAMA\* and Kenji NAKAI\*

The interlaminar shear strength (ILSS) of a unidirectional carbon/epoxy (T700/2521) laminated composite under impact loading is determined using the conventional split Hopkinson pressure bar. Double-notch shear (DNS) specimens with lateral constraint from a supporting jig are used in the static and impact interlaminar compressive shear tests. Short-beam shear specimens are also used under static 3-point bending. Finite element analyses are performed to determine the shear stress and normal stress distributions on the expected failure plane in the DNS specimen using the MSC/NASTRAN package. The effects of deformation rate at failure on the ILSS and failure mode are investigated. It is observed that the ILSS is independent of the deformation rate at failure up to nearly 1.5m/s. The validity of the test results is confirmed by microscopic examinations of both static and impact failure surfaces for the DNS specimens.

**Key words :** Deformation rate, Double-notch shear specimen, Failure mode, FEM, Hopkinson bar, Impact loading, Interlaminar shear strength, SEM observation, Short-beam shear specimen, Unidirectional CFRP

### 1 緒 言

複合材料は金属材料と比較して比強度、比剛性が高く、疲労寿命や耐食性にも優れているため、近年航空機、自動車、スポーツ用具などの分野で広範に使用されている。しかし複合材料は積層構造を有するため、横荷重を受けたときに層間に剥離を生じ破壊し易い固有の弱点を有している。そのため、層間（面外）せん断強度は、複合材構造物の設計における重要な特性値であり、これを測定する2種類の試験法が、ASTM（アメリカ材料・試験学会）に規定されている。一つは短いはり状せん断（SBS）試験片による3点曲げ試験法<sup>1)</sup>であり、他の一つが2重切欠きせん断（DNS）試験片による引張り試験法<sup>2)</sup>である。しかし衝撃荷重下における層間せん断強度を測定する試験法は、未だ規格化されていない。Harding と Li<sup>3)</sup>は2重重合わせせん断試験片を使用して、引張り型ホプキンソン棒法により平織りガラス／エポキシ複合材と平織りカーボン／エポキシ複合材との組合せによる3種類の層間の衝撃せん断強度を測定している。Bouette ほか<sup>4)</sup>は単純重合わせせん断試験片を使用して、引張り型ホプキンソン棒法により、一方向強化カーボン／エポキシ複合材の衝撃層間せん断特性を決定している。Dong と Harding<sup>5)</sup>は、Bouette ほかと同様に単純重合わせせん断試験片を使用して、圧縮型ホプキンソン棒法により、カーボン／エポキシ複合材（0°/0° と ±45°）とカーボン／PEEK 複合材（0°/0°、±45°、0°/90°）の層間せん断強度に及ぼすひず

み速度依存性を明らかにしている。さらに、Harding と Dong<sup>6)</sup>は2重重合わせせん断試験片によりカーボン／エポキシ複合材（0°/0°、±45°、0°/90°）の衝撃層間せん断強度を同様な試験法により決定している。一方、Sugiyama ほか<sup>7)</sup>は2重切欠きせん断試験片を用いて、セラミック基複合材とカーボン長繊維強化 SiC について、圧縮型ホプキンソン棒法により衝撃せん断強度を評価している。しかし、従来のカーボン／エポキシ複合材の層間せん断強度のひずみ速度依存性の傾向は、必ずしも一致していない。

本研究の目的は、圧縮型ホプキンソン棒法<sup>8)</sup>を利用して、一方向強化カーボン／エポキシ複合材の衝撃層間せん断強度を測定することである。試験片形状としては、ASTM に規定された DNS 試験片を採用した。衝撃圧縮せん断荷重—変形関係の最大荷重から静的な評価式に基づいて、衝撃層間せん断強度を決定した。同一形状の DNS 試験片を使用して行なった静的圧縮せん断試験から得た層間せん断強度との比較により、変形速度の影響を明らかにした。その結果より、一方向強化カーボン／エポキシ複合材の層間せん断強度は、破壊時の変形速度が約 1.5m/s ( $\dot{\gamma} \approx 780/s$  に相当) まではあまり変形速度の影響を受けないことがわかった。測定結果の妥当性を微視的立場から考察するために、DNS 試験片の静的・衝撃破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した結果、両破面における破壊モード（層間はく離）には顕著な差は見られなかった。

† 原稿受理 平成 17 年 12 月 20 日 Received Dec. 20, 2005

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

## 2 試験片の形状と有限要素解析

### 2.1 試験片の形状と面内引張り特性

試験に供した複合材料は、サカイ・コンポジット社製の厚さ 3.85mm (16 プライ) の一方向強化カーボン/エポキシ複合材である。このカーボン/エポキシ (T700/2521) 複合材に使用した強化繊維の種類、マトリックス樹脂の種類、繊維体積含有率を、Table 1 に示す。層間せん断強度試験に使用した厚さ  $h = 3.85\text{mm}$  の DNS 試験片 (Fig. 1) の形状寸法は、基本的には ASTM (D3846-79)<sup>2)</sup> の規定に基づいて製作した。図中の座標軸 1-2-3 は、繊維 (縦) 方向を軸 1 とする積層材料の主軸を表わす。その試験片の諸寸法は、長さ  $2L = 20\text{mm}$ 、幅  $b = 12.5\text{mm}$  とし、切欠き形状は切欠きの幅 (溝)  $d = 1\text{mm}$ 、深さ  $\cong h/2$ 、切欠き間距離  $l = 6.5\text{mm}$  とし、切欠き底の半径はフィンカッター用の刃厚 0.4mm の砥石を用いた手作業により、 $R \cong 0.5\text{mm}$  とした。この結果、切欠きの深さは板厚の半分より約 1 プライ ( $\cong 0.24\text{mm}$ ) 程度深くなった。このようにオーバーカットすると、切欠き間において一様なせん断応力分布が得られやすいことが、他の研究者より報告<sup>7), 9)</sup>されている。この一方向強化カーボン/エポキシ複合材の基本的機械特性を測定するために、ASTM (D3039-76) に規定された帯板引張試験片 (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 で試験した。その測定した静的面内引張り特性値を、Table 2 に示す。L は繊維方向を、T は繊維と垂直の方向を表す。Table 2 の結果から一方向強化カーボン/エポキシ複合材の T 方向の引張特性は、L 方向のそれに比べて著しく低いことがわかる。即ち、繊維の配向  $[0]_{16}$  から予測されるように、一方向強化カーボン/エポキシ複合材は極めて強い異方性を示す。

Table 1 Type of reinforcing fiber and matrix resin used in unidirectional carbon/epoxy laminated composite.

	Unidirectional carbon/epoxy
Fiber	T700 (Torayca)
Matrix resin	Epoxy #2521
Fiber volume ratio $V_f$	0.65

### 2.2 有限要素応力解析

圧縮負荷を受ける DNS 試験片の切欠き間に作用するせん断応力分布の一様性を確認するため、MSC/NAS-TRAN 有限要素プログラムを用いて静的応力解析を行った。DNS 試験片の有限要素モデルを Fig. 2 に示す。2次元平面応力問題として取扱い、解析モデルの寸法は Fig. 1 に示す形状寸法にしたがっている。切欠き深さについては、実際の試験片に従い板厚の半分より 1 プライだけオーバーカットしてモデル化を行なった。計算に用いた材料の機械的特性値として、Table 2 の数値データ ( $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ) を用い、他の特性値についてはそれぞれ、 $G_{12} = G_{13} = 5.5\text{GPa}$ ,  $G_{23} = 2.89\text{GPa}$ ,  $\nu_{12} = 0.34$  とした。実際の試験においては、圧縮負荷を受ける DNS 試験片の座屈による曲げ破壊を防止するための治具を使用していることから、試験片上下面の軸 3 方向への変位は拘束し、左端面から静的圧縮せん断試験から得られた最大圧縮荷重 (Fig. 6 参照) を分布荷重  $p_0 = 6.7\text{kN}/12.5\text{mm}$  として与えた。

切欠き間の 3 つの層間面 L1 ~ L3 に沿って作用するせん断応力  $\tau_{13}$  および垂直応力  $\sigma_{33}$  の分布を Fig. 3 に示す。ここで横軸  $x/L$  は、層間面上の各節点の  $x$  座標値を層間面の長さ  $L$  で除した無次元座標である。この左図では、切欠き底付近にはせん断応力の集中が見られるが、その付近を除いてはほぼ一様に分布している。静的圧縮せん断試験から求めた層間せん断強度 (平均値: 図中の破線に相当) とよく一致している。一方、右図では切欠き底付近では大きな圧縮応力が作用しているため、切欠き底付近でのせん断力の応力集中による破壊が抑制されているものと考えられる。したがって、層間せん断強度は、最大圧縮荷重  $P_{\max}$  をせん断破壊面積で除することにより求められる。

Table 2 In-plane tensile properties of unidirectional carbon/epoxy laminated composite.

Property	UD-CFRP	
	L	T
Young's modulus $E$ (GPa)	135	8.6
Tensile strength $\sigma_b$ (MPa)	2016	37
Fracture strain $\varepsilon_f$ (%)	1.8	0.5
Mass density $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1500	

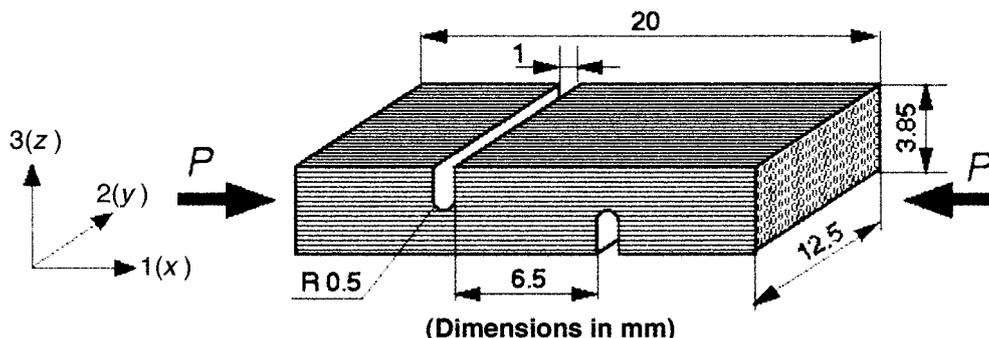
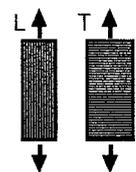


Fig. 1 Shape and nominal dimensions of double-notch shear (DNS) specimen, and principal coordinate axes.

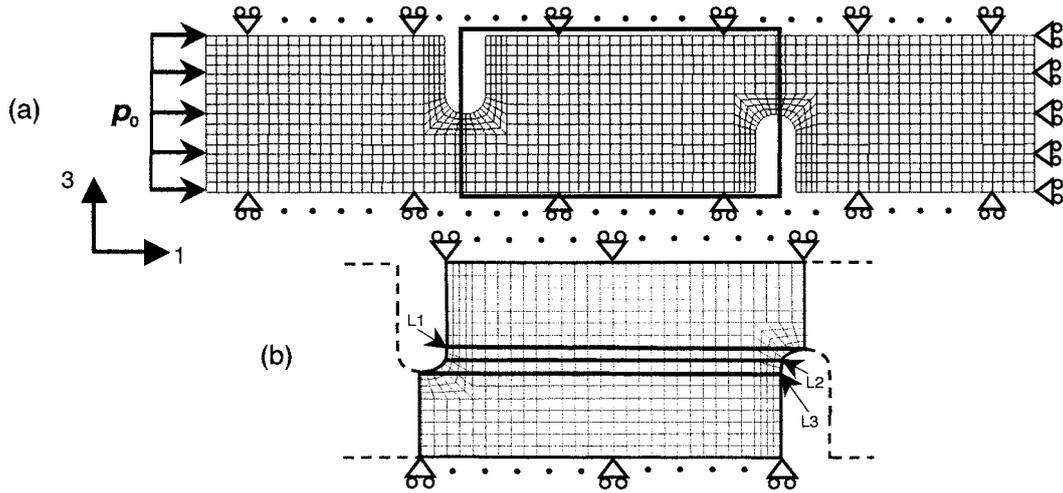


Fig. 2 (a) Finite element model of DNS specimen with lateral constraint ; (b) details of FE mesh.

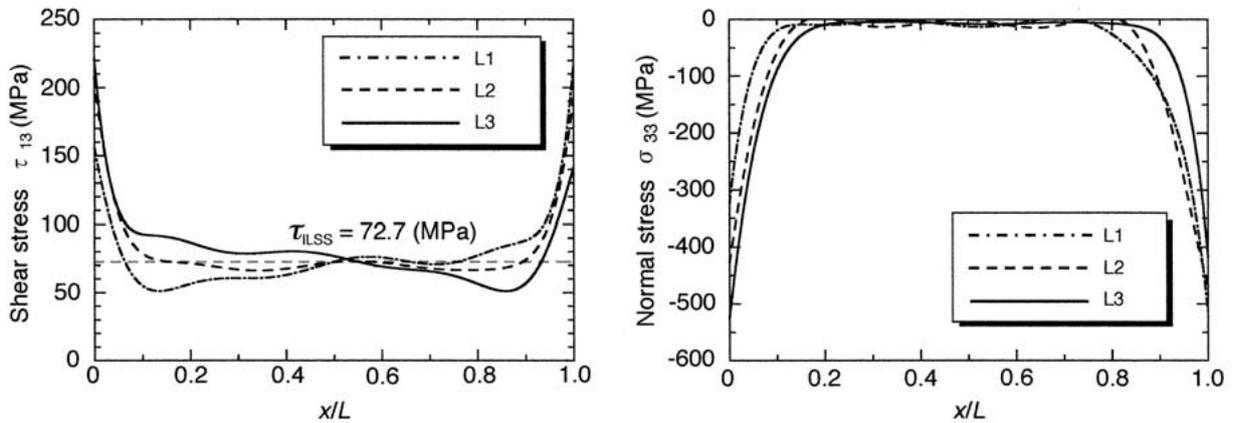


Fig. 3 Shear stress and normal (peeling) stress distributions along three lines on interlaminar planes within DNS specimen under static loading.

### 3 試験方法と測定原理

#### 3・1 衝撃圧縮せん断試験

衝撃層間せん断強度を測定するために使用した圧縮型ホプキンソン棒装置<sup>10), 11)</sup>の概略図を, Fig. 4 に示す. 弾性棒 (入力棒と出力棒) は, 長さ 1500mm, 直径 16mm のアルミニウム合金 (7075-T6), 打出し棒は長さ 350mm, 直径 15.9mm のアルミニウム合金 (7075-T6) である. 試験手順を以下に説明する. まず曲げによる座屈を防止す

る治具 (Fig. 5 参照) を取付けた DNS 試験片を, 入出力棒間に挟み込む (治具と試験片の上下面には, 0.05mm のテフロンシートを挿入し, 摩擦による変形拘束を低減している). 右端の支持ブロックと入力棒に取り付けた停止リング (PVC 製) を使用して DNS 試験片に予圧縮をかけ, 入出力棒と DNS 試験片の両端面の接触面を密着させる (Fig. 5 参照). その後, 圧縮空気により発射した打出し棒を, 入力棒左端面に衝突させる. こ

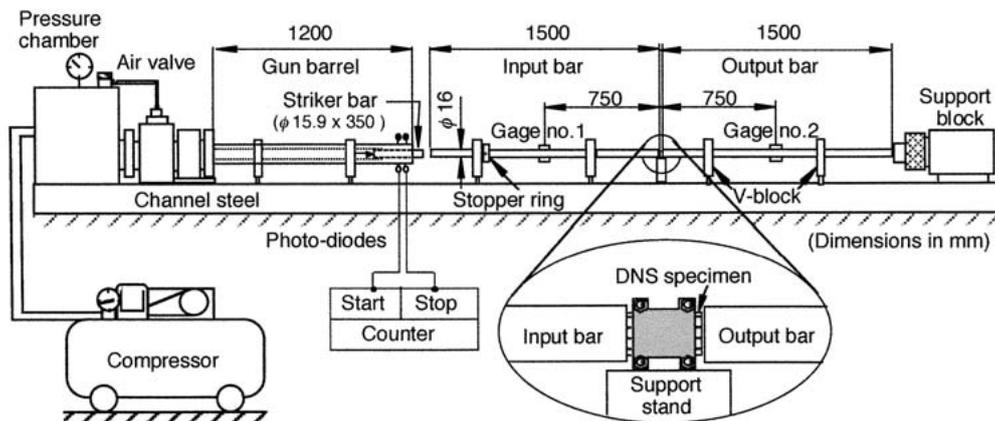


Fig. 4 Schematic diagram of standard SHPB apparatus for impact interlaminar compressive shear testing.

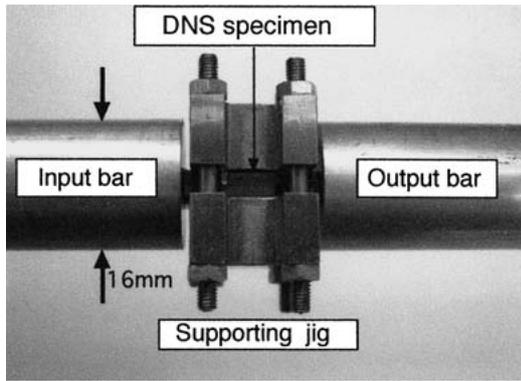


Fig. 5 Edge view of DNS specimen with supporting jig held between two Hopkinson bars.

のとき、入力棒左端面にクッションとしてアルミ円板（直径 15.7mm、厚さ 0.4mm）を、固体潤滑剤により貼付けている。これにより、入力棒内に立上がりのゆるやかな入射圧縮パルスが発生させ、DNS 試験片内に動的な力のつり合いが成立つ以前の破壊を防止している。入力棒内に発生したこの入射圧縮パルスは左から右へ伝ばし DNS 試験片に達すると、機械的インピーダンスの違いによりその界面で一部は反射し、残りは DNS 試験片を透過して出力棒へ伝ばする。この過程において DNS 試験片に作用する圧縮荷重パルスが限界値を越えると DNS 試験片は、切欠き部の底付近からき裂が発生してせん断破壊を生じる。

### 3・2 衝撃圧縮せん断強度の測定原理

DNS 試験片両端に作用する圧縮荷重と圧縮変位をそれぞれ  $P_1$ ,  $P_2$  と  $u_1$ ,  $u_2$  とすると、一次元弾性波伝ば理論<sup>12)</sup>に基づき、試験片の圧縮変形  $\delta(t)$ 、変形速度  $\dot{\delta}(t)$ 、圧縮荷重  $P(t)$  はそれぞれ次式より求めることができる。

$$\delta(t) = u_1(t) - u_2(t) = 2c_0 \int_0^t \{\varepsilon_i(t') - \varepsilon_r(t')\} dt' \quad (1)$$

$$\dot{\delta}(t) = \dot{u}_1(t) - \dot{u}_2(t) = 2c_0 \{\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)\} \quad (2)$$

$$P(t) = P_2(t) = AE\varepsilon_t(t) \quad (3)$$

ここで、圧縮ひずみを正 (+) とする。A と E はそれぞれ弾性棒の断面積とヤング率 (= 71GPa)、 $c_0$  は入出力棒内の縦波弾性波の伝ば速度を表す。但し、これらの式は試験片の両端での動的な力のつり合い  $P_1(t) = P_2(t)$  即ち、 $\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t)$  を仮定している。

## 4 試験結果および考察

### 4・1 静的圧縮せん断・引張せん断試験と 3 点曲げ試験

静的層間せん断強度はインストロン試験機を使用して、SBS 試験片による 3 点曲げ試験（クロスヘッド速度 = 1mm/min）、DNS 試験片による圧縮せん断および引張せん断試験（クロスヘッド速度 = 2mm/min）を行って測定した。治具を取付けた DNS 試験片の圧縮せん断試験より得られた圧縮荷重-変形関係の一例を Fig. 6 に示す。試験片の変形は、試験片に圧縮荷重を加える上下のアンプ間には伸び計を取り付けて測定した。この図から

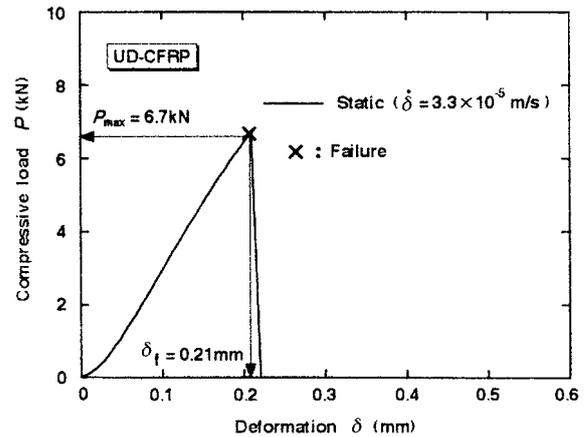


Fig. 6 Compressive load-deformation relation for static interlaminar shear test on DNS specimen.

Table 3 Comparison of average ILLSSs as measured using different test methods.

Test method	No. of specimens	Interlaminar shear strength $\tau_{ILLSS}$ (MPa)
DNS test in compression	5	72.7±1.3
DNS test in tension	4	71.2±0.8
SBS test	3	71.0±0.6

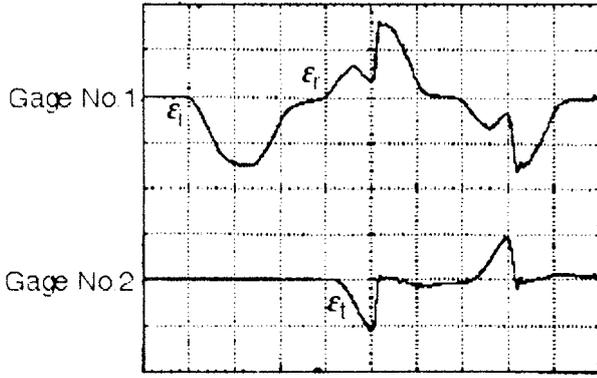
わかるように、圧縮荷重-変形関係はほぼ線形関係を示し、約 0.2mm の変形量で圧縮荷重が急激に 0 まで低下している。この結果から、圧縮荷重の最大値で切欠き底付近からせん断破壊したと考えられる。この最大圧縮荷重  $P_{max}$  を評価式 (4)<sup>2)</sup> に代入して、DNS 試験片の切欠き部間の平均層間せん断強度を決定した。Table 3 に 3 点曲げ試験、圧縮せん断および引張せん断試験より得られた層間せん断強度の比較を示す。この表から、DNS 試験片と SBS 試験片による層間せん断強度はほぼ一致しており、DNS 試験片の切欠き部の応力集中による破壊の発生は、防止できることが確認できた。この結果に基づいて、衝撃試験においても DNS 試験片を使用し、変形速度  $\dot{\delta}(t)$  が層間せん断強度に及ぼす影響を調べた。

$$\tau_{ILLSS} = \frac{P_{max}}{A_s} \quad (4)$$

$P_{max}$ : 最大圧縮荷重,  $A_s$ : せん断破壊面積

### 4・2 衝撃圧縮せん断試験結果

ホプキンソン棒試験より DNS 試験片を使用して得られたひずみゲージ出力の代表的なオシロスコープ記録を、Fig. 7 に示す。この記録の横軸は時間、縦軸は出力電圧を表している。ひずみゲージ 1 より入射ひずみパルス  $\varepsilon_i(t)$ 、反射ひずみパルス  $\varepsilon_r(t)$  が、ひずみゲージ 2 より透過ひずみパルス  $\varepsilon_t(t)$  が測定されている（注：それ以降に記録された反転ひずみパルスは、入出力棒の自由端からの反射波であって、試験結果には全く影響しない）。これらひずみパルスから DNS 試験片の両端に作用する圧縮荷重を決定すると、Fig. 8 のようになる。これより両荷重はよく一致していることから、測定原理における仮定



Sweep rate : 100μs/div  
Vertical sensitivity:  
Upper trace : 200 mV/div (444με/div)  
Lower trace : 200 mV/div (439με/div)

Fig. 7 Oscilloscope records from SHPB test on DNS specimen (striker bar velocity :  $V = 7.2\text{ m/s}$ ).

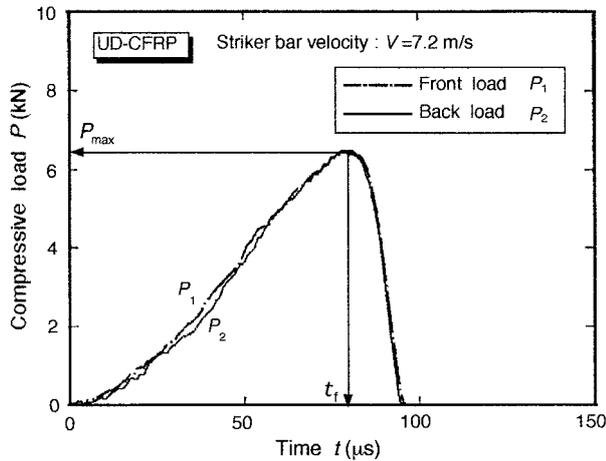


Fig. 8 Compressive load histories at front and back ends of DNS specimen.

の妥当性が立証できた。つぎに DNS 試験片の圧縮荷重—変形速度—変形関係を、Fig. 9 に示す。DNS 試験片は圧縮荷重の最大値  $P_{\max}$  で層間せん断破壊したと考えられるので、この  $P_{\max}$  を式(4)に代入して衝撃層間せん断強度を評価した。Fig. 9 から最大圧縮荷重  $P_{\max}$  で DNS 試験片がせん断破壊を開始すると圧縮荷重は急激に低下するが、それに対応して変形速度が急激に上昇することがわかる。その後、変形速度がさらに上昇し続けるのは、せん断破壊後も DNS 試験片の両端が初期負荷パルスの持続により圧縮変形を受けるためである。変形速度が層間せん断強度に及ぼす影響を調べるために、静的および衝撃層間せん断強度を破壊時の変形速度 ( $\dot{\delta}_f = \delta_f/t_f$ ;  $t_f$  は破壊開始時刻) に対してプロットした結果を Fig. 10 に示す。ただし、 $\dot{\delta}_f$  は層間面での平均せん断ひずみ速度と、 $\dot{\gamma} \approx \dot{\delta}_f/(h/2)$  で近似的に関係づけられる。この図より、層間せん断強度は、破壊時の変形速度が上昇してもほとんど変化しないことがわかる。この結果は、Bouette ほか<sup>4)</sup>の一方方向強化カーボン/エポキシ複合材

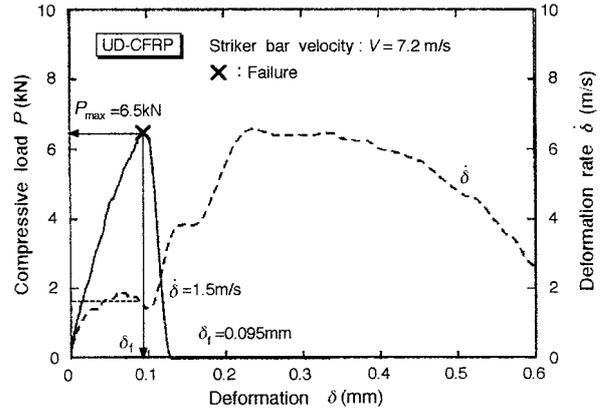


Fig. 9 Compressive load-deformation and deformation rate-deformation relations from SHPB test on DNS specimen.

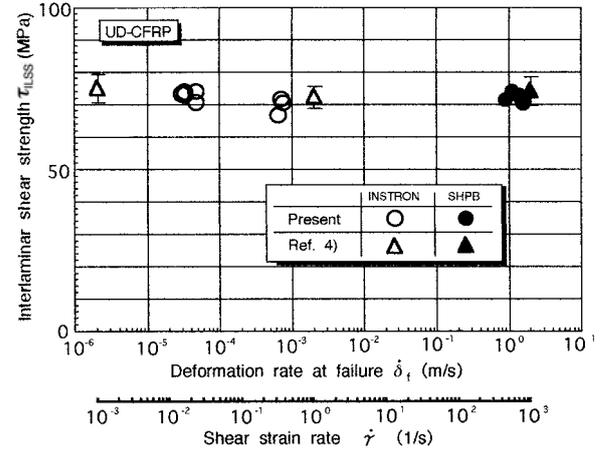


Fig. 10 Effect of deformation rate at failure on interlaminar shear strength.

(T300/5208) の層間せん断強度のひずみ速度依存性の傾向とよく一致している。

#### 4.3 試験片破面の観察

試験後の2つに分離した DNS 試験片の上下面の写真を Fig. 11 に示す。破壊モードに及ぼす変形速度の影響を微視的立場から調べるために、DNS 試験片の静的破面と衝撃破面を SEM によって観察した。Fig. 11 の○印を付けた部分の両破面の SEM 写真を Fig. 12 に示す。こ

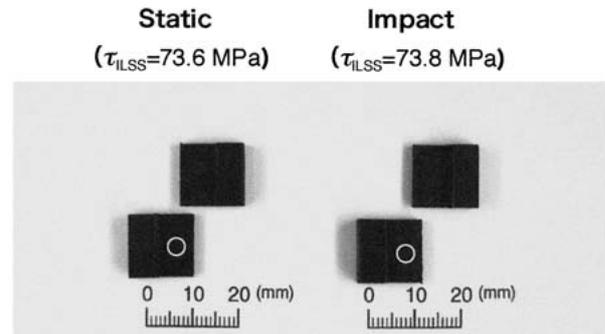


Fig. 11 Macrographs of failed DNS specimens (open circles denote areas observed by SEM).

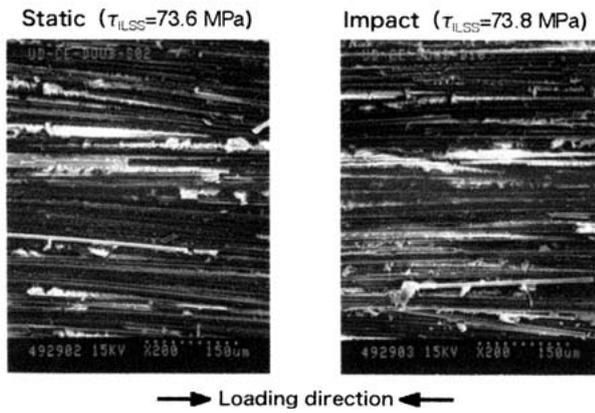


Fig. 12 Scanning electron micrographs of static and impact failure surfaces for DNS specimens.

の SEM 写真によれば、破面のカーボン繊維はほとんど損傷しておらず、繊維のまわりのマトリックス樹脂部には、多数の小さな毛羽立ち (hackle)<sup>4), 13)</sup>が見られる。これは、典型的なモード II のせん断破壊の特徴であり、せん断だけで層間はく離破壊したことを示唆している。試験片の 2 つの切欠き底 (左上と右下: Fig. 1 参照) 付近のどちらからき裂が発生して破壊したかは、破面から決定することはできなかった。

## 5 結 論

一方向強化カーボン/エポキシ複合材 (T700/2521) の衝撃層間せん断強度を、DNS 試験片を使用して圧縮型ホプキンソン棒法により決定する方法を開発した。変形速度依存性を検討するために、インストロン試験機による圧縮せん断試験から決定した静的層間せん断強度と比較した。また、SBS 試験片により測定した静的層間せん断強度とも比較した。その結果、次のような新しい知見を得た。

(1) DNS 試験片と SBS 試験片から決定された静的層間せん断強度はほぼ等しい。即ち、DNS 試験片の切欠き部での応力集中効果の影響は、ほぼ無視できる。

(2) 引張せん断試験と圧縮せん断試験から得られた静的層間せん断強度はほぼ等しい。即ち、DNS 試験片から決定した層間せん断強度は、低変形速度では荷重様式 (引張と圧縮) の影響を受けない。

(3) DNS 試験片により決定した層間せん断強度の変形速度依存性は、約 1.5m/s ( $\dot{\gamma} \approx 780/s$  に相当) 以下では小さい。これは、カーボン繊維自身のひずみ速度依存性が極めて小さいためである。

なお、本方法は一方向強化カーボン/エポキシ複合材の面内せん断強度の評価にも適用できる。現状の衝撃速度より大きくすると、DNS 試験片内に動的なつり合いが成立つ前にせん断破壊が生じるので、妥当な衝撃せん断強度が得られない。そのため、破壊時の変形速度は最大 1.5m/s 程度に限定される。また、積層順序や強化形態が異なる複合材では、DNS 試験片の切欠き間の層間面におけるせん断応力分布の一様性を数値解析により確認しなければ、本手法は適用できない。

## 参 考 文 献

- 1) ASTM D2344-84, "Standard test method for apparent interlaminar shear strength of parallel fiber composites by short-beam method", ASTM Standards and Literature References for Composite Materials, 2nd Ed. (1990) ASTM, Philadelphia.
- 2) ASTM D3846-79, "Standard test method for in-plane shear strength of reinforced plastics", ASTM Standards and Literature References for Composite Materials, 2nd Ed. (1990) ASTM, Philadelphia.
- 3) J. Harding and Y. L. Li, "Determination of interlaminar shear strength for glass/epoxy and carbon/epoxy laminates at impact rates of strain", *Composites Science and Technology*, Vol.45, pp.161-171 (1992).
- 4) B. Bouette, C. Cazeneuve and C. Oytana, "Effect of strain rate on interlaminar shear properties of carbon/epoxy composites", *Composites Science and Technology*, Vol.45, pp.313-321 (1992).
- 5) L. Dong and J. Harding, "A single-lap shear specimen for determining the effect of strain rate on the interlaminar shear strength of carbon fibre-reinforced laminates", *Composites*, Vol.25, No.2, pp.129-138 (1994).
- 6) J. Harding and L. Dong, "Effect of strain rate on the interlaminar shear strength of carbon-fibre-reinforced laminates", *Composites Science and Technology*, Vol.51, pp.347-358 (1994).
- 7) F. Sugiyama, K. Ogawa and T. Nishida, "Evaluations of the shear strength of advanced ceramic composite materials", *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol.14, Nos. 2/3/4, pp.272-290 (1999).
- 8) H. Kolsky, "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading", *Proceedings of the Physical Society, Section B*, Vol.B62, pp.676-700 (1949).
- 9) C. Zhang, S. V. Hoa and R. Ganesan, "Experimental characterization of interlaminar shear strengths of graphite/epoxy laminated composites", *Journal of Composite Materials*, Vol.36, No.13, pp.1615-1652 (2002).
- 10) T. Yokoyama, "High strain-rate compressive characteristics of carbon/epoxy laminated composites in through-thickness direction", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 1/2, pp.11-16 (2004).
- 11) T. Yokoyama and K. Nakai, "Determination of interlaminar shear strength of a unidirectional carbon/epoxy laminated composite under impact loading", *Proceedings of the 2nd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing 2005*, CD-ROM, Seattle, USA (2005).
- 12) K. F. Graff, "Wave motion in elastic solids", pp.130-133 (1975) Clarendon Press, Oxford.
- 13) M. J. Hiley, L. Dong and J. Harding, "Effect of strain rate on the fracture process in interlaminar shear specimens of carbon fibre-reinforced laminates", *Composites, Part A*, Vol.28A, pp.171-180 (1997).