CF-GF/ポリエステル複合材の貫通衝撃特性に関する一考察[†]

宮 入 裕 夫* W. Goldsmith**

Study on Impact and Perforation Properties
of CF-GF/Polyester Composites

by

Hiroo MIYAIRI* and W. GOLDSMITH**

There have been many studies on the impact properties of carbon-fiber reinforced plastics composite materials (CFRP). Most of them are concerned with the evaluation and improvement of impact properties of CFRP, because the fracture strain of carbon-fiber (CF) is very small and its brittle nature is a matter of inquiry.

In this paper, high speed impact tests using foreign projectile were performed on CF/GF hybrid composites and CFRP materials, which are composed of laminate plates, and the impact properties and fracture patterns of these materials were investigated.

The results obtained showed the hybrid effectiveness of CF/GF composites, that is, the increase of impact fracture energy and the change of fracture pattern of these materials. Especially the mixing of GF materials into CF laminated plates was found to cause the enlargement of whitening area damaged by foreign projectile and thus the increase of impact fracture energy of these materials.

キー・ワード：衝撃破壊エネルギー，高速衝撃，CF/GFハイブリッド，貫通破壊，破壊パターン

1 緒 言

軽量かつ優れた剛性と強度を有する炭素繊維複合材料 (CFRP) は広い領域にその応用範囲が考えられている¹⁾。しかし、炭素繊維 (CF) の破壊ひずみはガラス繊維 (GF) に比べ小さいので、CFRP の衝撃特性はガラス繊維複合材料 (GFRP) のそれより低く、GF とのハイブリッド化はこのような問題を解決する一つの手段として考えられている^{2)~5)}。

一方、衝撃試験には簡便な方法として Charpy や Izod などの振り型衝撃試験法 (FRP のような積層板では通常切欠きのないフラットワイズの衝撃試験方法) がある。しかし、板幅 (通常 10 mm) の狭い試験体を用いる振り型衝撃試験では FRP のような異方性を有する材料の衝撃特性を得ることは大変難しい。そのため、FRP の実用的な衝撃試験として平板の落錘試験方法が採用されている^{6)~9)}。

この方法は重錘を自由落下させ、材料の衝撃破壊エネルギーを求めるものであるが、FRP の衝撃破壊の基準によりその特性値は異なる。しかもこれらの試験の衝撃速度は高々 5 m/sec 以下と低い負荷速度である。

複合材料の貫通衝撃破壊に関する研究としては河田らがガラス繊維複合材 (GFRP) の衝撃破壊挙動を調

べている⁹⁾。それは、ガラスロービング・クロス/不飽和ポリエステル積層板の衝撃破壊エネルギーと破壊の様相との関係を検討したものである。しかし、CFRP や CF/GF ハイブリッド材に関する衝撃挙動とその特性について検討した研究は見られない。

本報では、衝撃試験の一つの方法として飛翔体の衝突による FRP の衝撃破壊について検討を加えたものである。ここでは、CF・GF で構成されるハイブリッド材をはじめ、CFRP および GFRP などの5種類の複合材を対象にその破壊の様相を観察し、衝撃挙動に及ぼすハイブリッド効果と積層材の構成の影響について基礎的な研究を行った。貫通試験は円板状試験体の周辺を固定し、飛翔体が試験体に垂直に衝突するように行った。また、飛翔体の発射装置には窒素ガスを用い、貫通試験の様子を高速カメラで撮影し、FRP 板の変形および破壊の進展などについて検討した。

2 供 試 試 験 体

2・1 試験体の構成

FRP を構成する CF と GF および CF-GF 強化材の詳細を Table I に示す。FRP マトリックスには不飽和ポリエステル [ポリライト FH-123N, 大日本インキ工業 (株)] を使用し、常温重合によるハンド

[†] 原稿受理 昭和60年7月6日 Received July 6, 1985

* 正 会 員 東京医科歯科大学医工用器研究所 千代田区神田駿河台, Institute for Medical and Dental Engineering, Tokyo Medical and Dental University, Surugadai, Kanda, Chiyoda-ku Tokyo

** カリフォルニア大学バークレイ校, University of California, Berkeley, 6129 Etcheverry Hall, Berkeley, CA

Table I. Constitution of CF, CF-GF, GF reinforcement.

Constitution of reinforcing fiber		CF cloth (6641B)	CF・GF/CF cloth (5642)	CF/GF cloth	GF roving cloth (R 570)	GF mat (M 450)
Fiber density (rod/cm)	Vertical	CF: 6 000 f -6 rods	CF: 6 000 f -2.5 rods GF: 575 Tex -2.5 rods	CF: 6 000 f -5 rods	GF: roving -2.24 rods	GF: chopped strand mat
	Horizontal	CF: 6 000 f -6 rods	CF: 6 000 f -2.5 rods	GF: 575 Tex -5 rods	GF: roving -2.24 rods	
Constitution		8 ply satin weave	Plain satin	Plain satin	Plain satin	Plain satin
Weight	N/m ² (g/m ²)	4.70 (480)	3.38 (345)	4.80 (490)	5.59 (570)	4.41 (450)

Table II. Fiber contents and the mechanical properties of CF-GF/polyester composites.

Constitution of test specimen				CF cloth (6641 B)	CF・GF/CF cloth (5642)	CF/GF cloth	GF roving cloth (R 570)	GF mat (M 450)
Number of phys. (ply)				3	3	3	3	3
Thickness (mm)				2.07	1.45	1.57	1.83	2.20
Volume contents V_f (%)	Vertical	CF	20	12	22	—	—	—
		GF	—	12	—	19	—	—
	Horizontal	CF	20	12	—	—	—	—
		GF	—	—	22	19	—	—
	Total		40	36	44	38	24	
Tension	Vertical	Strength	(MPa)	492.3	334.4	360.9	394.2	154.9
		Elastic modulus	(GPa)	45.70	33.25	44.92	21.67	10.98
	Horizontal	Strength	(MPa)	473.7	284.4	359.9	—	—
		Elastic modulus	(GPa)	45.90	30.99	19.81	—	—

CF: Carbon fiber, GF: Glass fiber

レイアップ法により成形し、成形板のアフターキュアは80℃、2時間恒温槽にて行った。強化材の構成は平織、朱子織の他ロービング・クロス材、マット材（全繊維含有率 V_f で24~44%）として、GFRPのマット材を除きすべて直交異方性の積層複合材とした。

2・2 試験体の加工および寸法形状

試験体は150×150 mmの平板から旋盤加工により所定の寸法〔直径140 mm (5.5 in.)〕に作成した。また試験体の板厚は基材構成により多少異なるが、1.45~2.20 mmとした。

2・3 試験体の力学的特性

Table IIはCF, GFおよびCF-GF強化材で構成された各種試験体の積層数、板厚、繊維含有率およびその力学的特性を示したものである。ここに示した力学的特性は衝撃特性の基礎データとして求めたもので、直交異方性材については直交する弾性主軸方向の引張強さと引張弾性率について求めたものである。

3 供試試験体の支持方法および試験装置

3・1 試験体の支持方法

試験体の支持は、まず中心角が90度となるように作成した2枚の円弧状の鋼製ブロックで試験体を挟み、上・下面で平行となるよう各々7本ずつのボルト、ナットでこの円弧状ブロックを試験体に取り付けた。その後、鋼製ブロックを介し試験体を試験体支持枠に固定

した。本実験ではすべて弾丸の方向と試験体とは垂直になるように固定し、弾丸は試験体中心に衝突するようにした。また弾丸飛散の防止装置は支持台の周辺を厚さ10 mmの鉄板で囲み、弾丸の貫通する方向には厚さ30 mmの木製の板を張り付け衝撃音のでないようにした。

3・2 試験装置

実験に用いた衝撃試験装置は弾丸発射装置、弾丸速度測定装置、試験体支持および弾丸飛散の防止装置とから構成されており、さらに破壊の状況を観測するための高速度カメラによる撮影用のflashsystemとを装備している。Fig. 1は衝撃貫通試験装置を示したもので弾丸の発射には窒素ガスを用い、ガスコントロールで弾丸の速度を設定し、time interval meterを用い

Fig. 1. Apparatus of perforation impact test.

Fig. 2. Schematic of the experimental arrangement for perforation impact test.

Table III. Results of impact test.

Type of Specimen	Thickness t (m)	Velocity v (m/s)	Fracture E (Nm)	Fracture energy/ thickness E/t (N)	Fracture Pattern	Note
CF cloth (6641 B)	2.07×10^{-3}	26.6	1.03	498	Hole	No penetration
		33.4	1.62	783		Lodged
		42.9	2.67	1290		Penetration
CF·GF/CF cloth (5642)	1.45×10^{-3}	35.3	1.82	1255	Belt	No penetration
		44.6	2.90	2000		Penetration
		48.3	3.39	2338		Penetration
CF/GF Cloth	1.57×10^{-3}	42.0	2.56	1631	Belt	No penetration
		48.0	3.35	2134		No penetration
		62.4	5.66	3605		Penetration
GF roving cloth (R 570)	1.83×10^{-3}	54.6	4.33	2366	Hole	No penetration
		97.6	13.58	7568		Penetration
GF mat (M450)	2.20×10^{-3}	41.2	2.47	1123	Hole	No penetration
		62.8	5.73	2605		Penetration
		77.0	8.62	3918		Penetration

正確な速度測定を行った。Fig. 2 はその弾速測定装置を示したものである。¹⁰⁾ また、試験体の取付け装置の真横からは高速度カメラ (Beckman Whitley WB-2 Camera) を用い破壊の様子を撮影した。撮影開始時間の設定はレーザー光源で弾丸の到達を感知し、photo detector を介しカメラと xenon flash とを作動させることにより行った。

3.3 試験方法

通常平板の貫通試験に用いる弾丸の形状は先端が半球状のもの、円すい状のもの、平面状のものなどがある。本実験では、この装置に用いられる弾丸の直径が 12.3 mm ($\approx 1/2$ in.) であること、また試験体の板厚が 1.45~2.20 mm の FRP 材であることなどを考慮して最も一般的な先端が半球状の弾丸を用いた。したがって、弾丸の大きさは直径が 12.3 mm、全長 33 mm の円筒状で、その重量は $W = 2.79 \times 10^{-1}$ N であ

る。そして、FRP 試験体に加えられる衝撃破壊エネルギーは弾丸の衝撃速度の調整により行った。

4 貫通衝撃による破壊特性

4.1 材料構成と衝撃破壊エネルギー

本実験では弾丸の重量を一定にしたため、衝撃速度を変えて実験し、試験体に弾丸が lodge したときを試験体が貫通衝撃破壊したと定義し、各種複合試験体の貫通衝撃破壊エネルギーを調べた。Table III は得られた衝撃エネルギーを弾丸の運動エネルギーで表示したものである。また、試験片の構成により板厚が異なるので、試験片の破壊エネルギー E を単位板厚についても表示し、表中の備考欄には試験片の破壊の状況を示した。

4.2 CF-GF 材のハイブリッド効果

FRP 板の貫通衝撃破壊エネルギーは基材の構成により異なり、CF 材 (以後 CFRP 材を CF 材, GFRP 材を GF 材と記す。) の貫通衝撃破壊エネルギーは最も

低い値となっている。しかし、CF 材と GF 材をハイブリッド化すると CF-GF ハイブリッド材の衝撃破壊エネルギーは増大し、GF マット材とほぼ同等程度の特徴値となる。一方、GF ロービング・クロス材は試験を行った衝撃速度の範囲が広いが、GF マット材に比べその破壊エネルギーは大きく、ここで取扱った CF/GF ハイブリッド材よりさらに優れた特性を有する。すなわち、CF 材は GF 材に比べ許容ひずみは小さく、弾性率は高い。このような特性が貫通衝撃試験においては特に顕著に現れる。それは、負荷速度の増加に伴い、CF 材は変形の少ない、より剛体に近い挙動をするため、CF 材の衝撃破壊エネルギーは GF 材に比べ一層低くなる。そして、許容ひずみの大きい GF とのハイブリッド化により CF 材の貫通衝撃抵抗は増大する。また、GF ロービング・クロス材では長繊維の特性が耐衝撃性に活かされ、マット材に比べ優れた貫通衝撃破壊抵抗となって現れる。

4.3 基材の構成と破壊の様相

(1) CF 板の破壊 カーボン繊維を $V_f=40\%$ 含有する CF (6641B) 板の破壊は Fig. 3 (a)に見られるように局部的で、破面周辺には白化現象も現れない。また、試験体は円孔状にくり抜いたように破壊し、き裂の発生も見られない。

これは CF の許容ひずみが小さいために弾丸の衝突によって、まず CF がぜい性的に破壊するために試験体の層間での界面の破壊は現れず、弾丸が貫通するからである。

(a) Penetration test specimen ($V_i=42.9$ m/s)

(b) Lodged test specimen ($V_i=33.4$ m/s)

Fig. 3. Impact fracture pattern of CF cloth (6641B) composites.

そして、その様子は試験片中に弾丸が lodge した状態で停止した Fig. 3 (b)でも確認される。とくに、CF 板の周辺への破壊が広がらないことが衝撃エネルギーを小さくしている原因となっている。

(2) GF 板の破壊 GF マット (M450) 材の貫通試験体にはほぼ弾丸の直径の 2 倍程の白化面を生じ、弾丸の貫通した破面にははっきりとした円孔の輪郭が残っている (Fig. 4)。一方、GF ロービング・クロス (R 570) 材は弾丸直径の 3~4 倍の白化面を生じ、白化面はだ円状を呈する (Fig. 5)。

Fig. 4. Impact fracture pattern of GF mat (M450) composites (projectile velocity $V_i=77.0$ m/s).

Fig. 5. Impact fracture pattern of GF roving cloth (R570) composites (projectile velocity $V_i=97.6$ m/s).

このときの衝撃力を弾丸速度 $V=97.6$ m/s の場合について貫通後の弾丸の速度 (高速度写真によって得られた平板の変形速度 $V=65.1$ m/s) より求めると 3876N となる。すなわち、このときの衝撃力は弾丸の重量に比べ 1.39×10^4 倍となっている。

また、ロービング・クロス材の衝撃破壊エネルギーはマット材のそれに比べ低い値を示している。これはクロス材のガラス含有率がマット材の $V_f=24\%$ に比べ 50%程度高く、またクロス材は連続繊維であるためと考えられる。そして、GF は許容ひずみが大きいために衝撃荷重に対して、クロス材が白化現象を拡大させ、衝撃破壊エネルギーの増大に大きな効果を付与している。

(3) CF-GF ハイブリッド板の破壊 CF-GF ハイブリッド板は CF・GF/CF 材と CF/GF 材との 2

種類である。CF・GF/CF ハイブリッド材は直交する2軸方向に等量のCFが混入されている。しかしCF/GF材は直交する1軸方向にのみCFが混入され、全体のCF含有率はCF・GF/CF材、CF/GF材とも、それぞれ $V_f=24, 22 \text{ vol } \%$ とほぼ同じ量になっている。したがってCF/GF材の方が異方性の強い材料となっている。CF・GF/CF材はCF/GF材に比べ極端な異方性ではないために、弾丸の衝突によって試験体の破壊はまず衝撃面近傍のCFの破断によってCF・GFの繊維方向に進展する。そして白化現象はCF・GFの繊維方向に沿って帯状に現れる。したがって、このような試験体では弾丸の貫通した裏側でGFは伸びて破壊し、Fig. 6のような破面となる。これは、GF方向にCFが混入しているため、弾性率の高いCFが応力の大部分を分担し、破壊ひずみの小さいCFが破壊するまで、GFには破壊に至るような過大な応力は加わらず、CF・GFハイブリッド化によるGFの特性が有効に活かされていることを示している。しかし、

Fig. 6. Impact fracture pattern of CF/GF cloth composites (projectile velocity $V_i=48.0 \text{ m/s}$).

CF・GF/CF材のGFの含有率はCF/GF材のそれに比べ1/2と少なく、またCF方向のCFの含有率も1/2となっているため、CF/GF材の衝撃破壊エネルギーはCF・GF/CF材に比べ低い。そして、CF・GF/CF材の破面はCFの破断によりCF・GF方向に帯状となって拡大する。CF/GFハイブリッド板の破壊は、破壊ひずみの小さいCFの局所的な破断に伴いGF方向に拡大し、白化現象もそれに伴い衝撃点を中心に帯状となって現れる(Fig. 7)。したがって、CF/GF材ではまずCFが破断するが白化現象はCF方向には拡大せず、その破壊はGF方向に進展する。その結果、最後に破断伸びの大きいGFが破壊するといった破壊過程をとる。したがって、破面はGFの繊維方向に帯状に拡大し、白化現象の幅も狭くなっている。またCFとGFとで構成されているハイブリッド材が曲げをうけるときの荷重分担比は両基材の弾性率比として、弾性率の高いCFはGFのそれに比べ、2.27倍(44.92/19.81)となる。したがって、このようにCF/

Fig. 7. Impact fracture pattern of CF・GF/CF cloth (5642) composites (projectile velocity $V_i=44.6 \text{ m/s}$).

GFハイブリッド材ではまず衝撃力はCFで受け止められるが、弾性率の低いGF方向の拘束が少ないため、試験体はGF方向に沿って裂けるように折り曲げられ破壊する。そのため白化現象もCF・GF/CF材に比べ狭く、GFの大きな破壊ひずみも有効に活用されない。したがって、異方性の顕著なCF/GFハイブリッド材ではCF/GFのハイブリッド効果は現れない。

4.4 FRPの衝撃変形

(1) FRP板の変形挙動 Fig. 8は弾丸によるFRP衝撃面のたわみを高速カメラに撮り、その結果を用い、FRP板のたわみ-時間線図を求めたものである。高速カメラは35mmのフィルムを用い、 10×10^4 コマ/secで撮影したものである。そして、測定点は○印で図中に示されている。いずれの試験体も貫通衝撃破壊をした試験体であるが、Fig. 8(a)はCF・GF/CFハイブリッド材、Fig. 8(b)はGFロービング・クロス材について求めたものである。そして、CF・GF/CFハイブリッド材は帯状に破壊し、一方、GFロービング・クロス材は円孔状の破面を形成した試験体である。また、後者の弾丸の速度は前者の2.0倍程度である。円孔状に破壊する場合の変形は、帯状に破壊する場合のそれに比べ2.0倍程度大きく変形して破壊に至ることがわかる。FRP板のたわみ-時間線図はCF・GF/CF-ポリエステル材ではほぼ直線的に変化し、試験板は7.5mmほど変形して破壊する。一方、GF(R570)-ポリエステルのたわみ-時間線はハイブリッド材のように直線的にならず、試験体は14.5mmほど変形して破壊に至る。また、両材料の衝撃破壊に要する時間は、GFロービング・クロス材ではCF・GF/CFハイブリッド材のそれに比べ4.0倍(240/60)と大きいことが分る。したがって貫通破壊による試験板の破壊時間は、GFロービング・クロスのような円孔状の破壊では帯状の破壊となるCF・GF/CFハイブリッド材の破壊に比べ長い時間を要し、破壊時の変形量も大きいことが示される。つぎにこの平板の変形を弾丸速度(衝突によって弾丸の速度低下

Fig. 8. FRP plate deformation and time diagram.

はないと仮定し) から求めると, CF・GF/CF 材では $60\mu\text{s}$ に 2.9 mm, GF 材では $240\mu\text{s}$ に 23.4 mm 変形したことになる. すなわち, このようなことは両 FRP 材の貫通破壊がただ破面の相違ばかりでなく, 破面形成の速度にも違いのあることを示している.

(2) 弾丸速度と破壊の進展

(a) CF・GF/CF 材の破壊 衝撃の際生じる平板の衝撃挙動について弾丸の速度と平板の変形, 破壊に要する時間などについて調べる. CF・GF/CF ハイブリッド材の破壊に要する時間は $60\mu\text{s}$ と GF 材に比べ短い. しかも, CF・GF/CF 材の破壊に至るまでの試験体のたわみの変形速度は弾丸速度 (衝突によって弾丸の速度低下がないとし) から求めるたわみの $2.6(7.5/2.9)$ 倍程度となっている. すなわち CF・GF/CF ハイブリッド材に見られる帯状の破壊では弾丸が試験体の破壊たわみに到達する前に試験体は曲げ変形により破壊する. したがって, 貫通破壊では CF・GF/CF 材の衝撃抵抗は小さく, 破壊も帯状でぜい性的である. このようなことは, CF・GF/CF 材が弾丸によって貫通されるのではなく, 試験体は弾丸によってむしろ折り曲げられるように瞬時に破壊すると考えられる.

(b) GF 材の破壊 GF 材の衝撃速度は 97.6 m/s と CF・GF/CF ハイブリッド材の 2.0 倍となっている. しかし, GF 材の破壊に要する時間は $240\mu\text{s}$ と CF・GF/CF ハイブリッド材の $60\mu\text{s}$ に比べ衝撃速度が速いにもかかわらずその値は大きくなっている.

しかし, この場合平板の変形速度は衝突によって弾丸速度が低下しないと考えた場合の弾丸速度より遅く, この速度 (衝突によって弾丸の速度低下がないとしたとき) の 62% ($14.5/23.4$) 程度と低い.

すなわち, GF 材では弾丸の速度は試験体に衝突後, かなり低下する. そして, 衝突後の弾丸の速度は試験

体の変形速度と同じ程度となっているものと思われる. これは GF 材の貫通抵抗が大きいために生じたもので, 試験体は曲げ変形の後, セン断破壊により円孔状の破壊を呈する. このように試験体構成の相違により, GF 材と CF・GF/CF ハイブリッド材との破壊の様相は異なる. とくに GF 材の円孔状の破壊では破壊時の変形量は少ないにもかかわらず, 破壊に要する時間は長く, 衝撃抵抗は大きく, CF・GF/CF ハイブリッド材とはかなり異なった破壊挙動を示すことが分る.

5 結 言

ガラス繊維 (GF) およびカーボン繊維 (CF) 単体で構成される強化プラスチック (FRP) のほか, CF-GF ハイブリッド材など 5 種類の FRP 材の貫通衝撃試験を行った. マトリックスは最もはん用性のある不飽和ポリエステルを用いハンドレイアップ成形によって作成した. なお貫通衝撃試験では弾丸形状を半球状とし, 実験はすべて弾丸重量を一定 (2.79×10^{-1} N) とし, 衝突速度を変え衝撃破壊エネルギー, 破壊の様相, 衝突時の試験板の変形などについて検討した. ここにその結果を要約すると下記のとおりである.

(1) 衝撃破壊エネルギーは GF ロービング・クロス材, CF-GF ハイブリッド材, CF クロキ材の順に小さくなる.

(2) また CF, GF で構成される試験体では直交する両軸方向に CF が入っている CF・GF/CF ハイブリッド材より, 一方向のみ GF となっている CF/GF ハイブリッド材の方が衝撃破壊エネルギーは大きい.

(3) GF マット材は当然のこと GF ロービング・クロス材に比べ衝撃破壊エネルギーは小さく, また CF 単体 (CF クロス材で CF 含有率 40% V_f) のものより GF マット材 (GF 含有率 40% V_f) の方が衝撃破壊

エネルギーは大きい。

(4) 貫通衝撃試験では CF, GF 単体の試験体はすべて円孔状の破壊となり, CF-GF ハイブリッド材の破壊は直交異方性のためすべて帯状の破壊となる。

(5) また帯状に破壊したハイブリッド材の試験片はすべてガラス繊維の方向に破壊は進展し, CF はぜい性的に破壊し CF 方向への破壊の進展は見られない。

(6) 貫通衝撃破壊での破壊に用する時間は, GF ロービング材は CF・GF/CF ハイブリッド材に比べ4.0倍以上の破壊時間となる。また, 破壊時のたわみは GF ロービング材の方が CF・GF/CF ハイブリッド材の2.0倍と大きい。

なお, 本研究の試料に関しては東レ(株) ACM 技術部上村信則氏にご協力を頂いたもので, ここに厚くお礼を申し上げます。

(昭和60年3月20日 第14回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば, 炭素繊維懇話会技術委員会, 機能材料, **3**, 544 (1983).
- 2) W. Cantwell, P. Curtis and J. Morton, Composites, **14**, 301 (1983).
- 3) R. H. Toland, ASTM STP 568, 133 (1973).
- 4) J. H. Staines, M. D. Rhodes and J. G. Williams, ASTM STP 696, 145 (1976).
- 5) J. Summerscales and D. Short, Composites, **9**, 157 (1978).
- 6) 宮入裕夫, 若林 正, 田中 実, 材料, **32**, 1089(1983).
- 7) A. Golovoy and H. Van Oene, 40th Annual Conference, Reinforced Plastics Ins., SPI 7-D, 1 (1985).
- 8) S. Fischer, I. Roman, H. Harel, *et al.*, J. Testing and Evaluation, **9**, 303 (1981).
- 9) 河田幸三, 武田展雄, 日本複合材料学会誌, **5**, 27 (1979).
- 10) J. Liss, W. Goldsmith and J. M. Kelly, Int. J. Impact Engineering, **1**, 32 (1983).