CFRP 積層板の貫通強度評価*

松 本 浩 之^{*1}, 荒 井 政 大^{*2}
足 立 忠 晴^{*1}, 宇治橋 貞 幸^{*1}

Evaluation of Perforation Strength for CFRP Laminates

Hiroyuki MATSUMOTO, Masahiro ARAI,
Tadaharu ADACHI and Sadayuki UJIHASHI

The perforation fracture of CFRP (carbon-fiber-reinforced-plastic) laminates is investigated in the present paper. A steel ball launched from the air gun perforates CFRP laminates having different laminate structures. The velocities of the ball before and after impact are measured to evaluate the absorbed energy by high-speed camera. The fracture patterns of the laminates are observed by the optical microscope and the ultrasonic microscope. As results, it is found that the absorbed energy and delamination area of carbon/epoxy are less in the case of higher impact velocity. In comparison with carbon/epoxy, the carbon/PEEK laminates could absorb larger energy.

Key Words: Composite Material, Impact Strength, Delamination, Ultrasonic Inspection, CFRP Laminate, Perforation, Air Gun, High-Speed Camera

1. 結 言

近年注目されている新素材の中でも、炭素繊維強化複合材料(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)は比強度が高いことから、航空宇宙分野をはじめ種々の分野への応用が試みられている。

しかし CFRP は静的負荷に対して優れた力学的特性を示す反面、衝撃負荷に対しては、必ずしも優れた特性を発揮できない場合のあることが知られている。これらの要因としては、CFRP が非常に強い脆性を示すことによる衝撃吸収能の低さが挙げられる。

航空機エンジンにおける CFRP 製タービンブレードのバードショックによる衝撃破損⁽¹⁾が問題になったことは良く知られているが、耐衝撃設計の最低限の条件は、損傷が生じた場合でも、完全に破壊することなく基本的には原型に近い形状を期待することである。

CFRP 積層板の高衝撃エネルギー吸収能については従来から重要視されてきた⁽²⁾ものの、現在適用されている多くの試験方法が、シャルピー、アイゾット試験等のように質量の比較的大きな衝撃体を使用し、衝

撃速度が比較的小さく応力波の影響が少ない範囲での衝撃試験である場合が多い。小質量衝撃体による高速衝撃試験は、GFRP 直交積層板を用いての研究成果が報告されている^{(3)~(6)}が、CFRP 積層板による研究報告例は少なく、その損傷機構には未知な部分が依然として多い。

本研究では、衝撃体が CFRP 積層板を貫通する高速な衝撃試験を行い、損傷機構の実験的解析を行った。

試験片の内部損傷に関しては、おもに層間剥離に着目し、超音波顕微鏡による非破壊検査によってその観察を行った。

試験片の内部損傷および外部損傷と鋼球の衝撃エネルギー、貫通前後のエネルギー損失との関係を明らかにするとともに、損傷機構に及ぼす繊維配向の影響、積層数の影響、およびマトリックス樹脂の影響について考察する。

2. 実 験 方 法

2.1 空気圧式高速衝撃試験機および測定システム
図 1 に衝撃試験機および測定システムを示す。

CFRP 積層板に飛翔体を高速で衝突させるための衝撃試験機を試作した。最高圧力 1.5 MPa でチューブ

* 原稿受付 平成 2 年 7 月 20 日。

^{*1} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。^{*2} 学生員、東京工業大学大学院。

内 2 m の距離で直径 5 mm あるいは 10 mm の弾丸を加速した後、発射するものである。加速チューブの発射口に 200 mm の間隔で置かれた 2 本の He-Ne ガスレーザ光（竹中オプトニクス、MRC-200）を弾丸が横切る時間をユニバーサルカウンタ（岩通、SC-7201）で計測し発射速度を算出する。直径 5 mm の鋼球および長さ 20 mm の鋼製円柱を最高約 1.5 MPa まで試射し試験機の性能を調べた。図 2 は発射圧力とそれぞれの弾丸の発射速度との関係を示したものである。なお本装置では発射速度を±3%の精度で制御できた。

試験片は一辺 180 mm の正方形であり、直径 150 mm の円形に厚さ 3 mm のゴムを介して 2 枚の厚さ 10 mm の鋼板ではさむことにより固定される。

高速度カメラにより試験片を貫通した後の速度の計測および貫通破壊の現象の観察を行った。使用した高速度カメラは Dynafax Model 350（Cordin 社製）である。衝突直前に弾丸が He-Ne ガスレーザ光を横切るときにトリガ信号を発生させ、ストロボを発光させ撮影した。本研究では 5 000 コマ/s から 15 000 コマ/s の撮影速度が適当であった。なお使用したフィルムはトライ X（コダック、ISO 400、4 倍から 8 倍の増感現像）である。なお本研究では弾丸として直径 10 mm の鋼球を使用した。

2.2 CFRP 試験片 CFRP 積層板作成には以下に示す 3 種のプリプレグシートを使用した。プリプレグの形式および製作した試験片の仕様は以下に示すとおりである。

- (a) Carbon/Epoxy 一方向プリプレグ（東レ）
 一方向プリプレグ：P 3051-15
 織物プリプレグ：# 6343
 （炭素繊維：T 300-3000, Epoxy 樹脂：# 2500）

図 1 実験装置

繊維配向	板厚(mm)
A $[0^{\circ}_6/90^{\circ}_6]_{\text{sym}}$	3.75
C $[0^{\circ}_2/90^{\circ}_2]_{\text{sym}}$	1.25
D $[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]_{\text{sym}}$	2.50
G $[0^{\circ}_2/90^{\circ}_4/0^{\circ}_2]_{\text{sym}}$	2.50
I $[0^{\circ}_2/45^{\circ}_2/90^{\circ}_2/-45^{\circ}_2]_{\text{sym}}$	2.50
N $[0^{\circ}_4/90^{\circ}_8/0^{\circ}_3/(0^{\circ}, 90^{\circ})]$	2.50

(b) carbon/PEEK 一方向プリプレグ
 （化成ファイバライト）
 一方向プリプレグ：APC-2/AS 4
 P $[0^{\circ}_8/90^{\circ}_8]_{\text{sym}}$ 板厚：2.50 mm

3. 実験結果

3.1 貫通破壊現象の観察 高速度カメラを用いて、貫通破壊の進行状況の観察を行った。図 3 は直径 10 mm の鋼球を、衝撃速度 134.0 m/s で試験片 I $[0^{\circ}_2/45^{\circ}_2/90^{\circ}_2/-45^{\circ}_2]_{\text{sym}}$ に衝突させたときの貫通破壊の進行状態を衝撃面裏側から撮影したものである。それぞれの写真は 0.66 ms の時間間隔である。中央部が局部的に破断し鋼球が貫通した後、試験片裏面の繊維方向にき裂が進展し、その部分から引きはがされるように破壊が進行するのが観察できる。

3.2 写真による試験片の損傷観察 衝撃試験後の試験片表面の衝突痕、裏面の破壊状態を写真撮影した。図 4 は貫通破壊が起こった、試験片 D $[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]_{\text{sym}}$ の衝撃面表側から写真撮影したものである。鋼球直径に外接する正方形にほぼ近い形で割れているのは直交した繊維配向の影響である。衝撃速度が増加しても損

図 2 空気圧と弾丸の発射速度の関係

傷パターンの大きな変化は見られない。

図5は、試験片C $[0_2/90_2]_{\text{sym}}$ の衝撃面裏側の損傷写真である。衝撃面裏側の損傷状況がよく観察できる

よう試験片をやや傾けて撮影した。比較的衝撃速度が小さい場合、衝撃面裏側の繊維方向、および繊維に直交する方向にそれぞれき裂が延び、菱形にはく離する

図3 衝撃面裏側における破壊の連続写真
：積層板I； $(0_2/45_2/90_2/-45_2)_{\text{sym}}$
：衝撃速度 136.0 m/s

図4 衝撃面表側の典型的な損傷例：積層板D； $[0_2/90_2]_{\text{sym}}$

図5 衝撃面裏側の典型的な損傷例：積層板C； $[0_2/90_2]_{\text{sym}}$

損傷パターンを示す。衝撃速度の増加に伴い損傷領域は繊維方向に長くなり、裏面の繊維方向き裂が固定支持部にまで及び、そのき裂の内側が帯状に剥離するパターンへと変化する。

このように、試験片の損傷に及ぼす衝撃速度の影響は衝撃面裏側において顕著であり、試験片のプリプレグ層数、積層配向、マトリックス樹脂などの違いにより、損傷パターンも微妙に異なる。

3.3 超音波顕微鏡による内部損傷の非破壊検査

衝撃試験後の試験片の内部界面剥離を超音波顕微鏡（オリンパス；UH-Pulse、走査周波数：30 MHz）により観察した。

図6は2種の衝撃速度による試験片C[0°/90°]_{sym}の層間剥離の観察写真で、衝撃速度の大小による剥離形状の変化を見たものである。なお紙面の左右方向を繊維方向の0°方向になるように撮影した。

(a)は低速の場合であり、下側の界面に生じた層間剥離は、裏面に生じたき裂の影響で菱形の剥離となっている。上側の界面Aの層間剥離、および下側の界面Bの層間剥離はともに剥離界面の下側の繊維方向に長い形状となっており、これは貫通を伴わない層間剥離と同様の傾向を示すものであ⁽⁷⁾。

下側の界面Bに生じた層間剥離は上側の界面Aに生じた層間剥離の90°方向長さに対応した幅で生じている。これらは Generator Strip と呼ばれ、直交積層

板（繊維配向が0°と90°のみ）に特有の逐次的な層間剥離メカニズムである⁽³⁾⁽⁵⁾。今回、衝撃試験を行った直交積層板では一様に同じ傾向が見られた。

衝撃速度が増大した場合、層間剥離の総面積が減少し、損傷領域が局所化する傾向は他の試験片でも同様に見られた。

4. 考 察

4.1 損傷形態に及ぼす衝撃エネルギーの影響

試験片の衝撃面裏側の損傷パターンは衝撃エネルギーの大小、および試験片の種別で変化する。

衝撃面裏側の損傷パターンは大きく二つに分けられる。一つは繊維方向に試験片支持部にまで及ぶき裂が数本走り、その内側が帯状に剥離するパターン（帯状剥離）であり、もう一つは試験片中央部に十字のき裂が生ずることにより、菱形に剥離するパターン（菱形剥離）である。そこで各試験片の衝撃面裏側の損傷を「帯状剥離」、「菱形剥離」、そして両者の混合のパターン3種に分類し、各試験片の衝撃エネルギーと損傷パターンの関係を図7にまとめた。

試験片別の傾向を整理すれば全域で帯状剥離が生ずるもの（試験片A、D、I、P）と、衝撃速度の増加に伴い菱形から帯状の剥離への移行するもの（試験片C、G、N）に大別できるが、高速域では概して帯状剥離が支配的である。

図6 層間剥離の観察写真：積層板C；[0°/90°]_{sym}

	Impact Energy (J)	0.....20.....40.....60.....80.....100									
●; Band-shaped Pattern ○; Lozenge-shaped Pattern ⦿; Mixed Pattern	Type A			●	●		●				
	Type C	○	○	⦿	●		●				
	Type D		●	●	●		●			●	
	Type G		⦿	⦿	⦿⦿	●	●				
	Type I		●	●			●				
	Type N	○	○	⦿			●			●	
	Type P			●	●		●				

図 7 衝撃面裏側における衝撃エネルギーと損傷パターンの関係

図 7 からわかるように、菱形の剝離が生じた試験片は、最も裏面側の界面における繊維の交差角が 90° (例えば $[0_2/90_2]_{\text{sym}}$) のものであることがわかる。また繊維配向が同じである試験片 A, C, D の比較から、裏面側の 0° 層のプリプレグ数が少ない場合に、菱形の剝離が生ずる傾向があると考えられる。

Carbon/PEEK の試験片 P は本実験の速度範囲においては、衝撃速度によらずほぼ同じ損傷パターンを示し、損傷領域の大きさもほとんど変化がなかった。

4.2 層間剝離とトランスバースクラック 層間剝離の形状は衝撃エネルギーを増大させた場合、その大きさとともに形状も変化する。ここでは内部層間剝離の形状とトランスバースクラックの関係について、試験片 C の層間剝離を例にとり、考察を行う。

図 8 は Carbon/Epoxy の試験片 C の界面 A に生じた層間剝離であり、衝撃速度の大小による変化をみたものである。

図 8 (a) の B-B において試験片を切断し断面観察を行うと界面 A の剝離幅は、界面下側の中間層に生じた 2 本の台形状のトランスバースクラックの上側の幅に対応しており、2 本のトランスバースクラックにはさまれた領域の内側に剝離が限定されているのがわかる。一方、断面 A-A ではクラックの外側にも剝離が存在している。すなわちトランスバースクラックと層間剝離の発生順序を考えれば、①貫通孔周辺に比較的幅の広い層間剝離が発生、②、①の層間剝離より間隔の狭い 2 本のトランスバースクラックが発生、③ 2 本のクラックと同じ幅で中間層の繊維方向に剝離が進展、の順になると考えられる。

衝撃速度が低い場合は 2 本のトランスバースクラック

図 8 層間剝離とトランスバースクラックの関係：積層板 C; $[0_2/90_2]_{\text{sym}}$

ク間において進展する層間剝離の面積は減少し、剝離の大部分がトランスバースクラックの外側で観察される。一方、衝撃速度を増大させた場合、剝離のほぼ全域

が2本の台形状のトランスバースクラック間でのみ生ずるようになる。

結果として、界面 A における層間剝離は2本のトランスバースクラックに先行して発生し、クラック発生後はその内側において層間剝離が進展する。また剝離形状は、下側の層におけるトランスバースクラックの発生時期と層間剝離の進展速度との関係に影響されると考えられる。

4.3 試験片の貫通抵抗の評価 高速度カメラによる写真撮影により、鋼球が試験片を貫通した後の速度が得られた。この値と衝突直前の鋼球の速度から貫通前後での鋼球の運動エネルギー変化が算出できる。この貫通前後で鋼球が失ったエネルギーには、試験片の損傷のために吸収されるエネルギーや飛散した破片の運動エネルギー、試験片の運動エネルギーなどさまざまなものが含まれ定量的に分離することはできないが、大まかに貫通破壊過程で試験片が吸収したエネルギー量であると考え、貫通抵抗の程度を表す評価パラメータとして用いることとする。言い替えれば、衝突物体が貫通後に他の部材に二次的衝撃破壊を起こさないようにするための目安としてとられることができよ

う。

ここでは貫通前後の運動エネルギー変化を「エネルギー損失」と呼ぶことにし、衝撃エネルギーとの関係から試験片の貫通特性の定量的な評価を試みる。

(a) 層数が等しく配向が異なる場合 層数がともに16層で、配向が異なる Carbon/Epoxy 積層板について、鋼球の衝撃エネルギーと貫通前後のエネルギー損失の関係を図9, 10, 11に示す。

それぞれの図中の点線、貫通後の速度が零すなわち運動エネルギーが零の状態を示している。点線の左側の領域は、(衝突前の速度) < (貫通後の速度) となる領域であり実在しない。この点線を貫通臨界線と呼ぶことにする。各図の実線は、実測点を滑らかに結んだ曲線である。

図9, 10, 11を比較すると、比較的低速度の貫通限界速度付近では配向のシンプルな試験片 D が最も高い貫通抵抗を示しているのがわかる。すなわち、グラフから各試験片の貫通臨界速度（試験片を貫通するための最低衝撃速度）を推定すれば、繊維配向の最もシンプルな試験片 D ($[0_4^{\circ}/90_4^{\circ}]_{\text{sym}}$) が最も貫通限界が高いと考えられる。

裏面に織物のプリプレグを使用した試験片 N は衝撃エネルギーによらず一定の貫通抵抗値を示し、高速域では逆に他の試験片よりも貫通抵抗が高くなっている。

(b) 配向が等しく層数が異なる場合 図12は、配向が等しく、層数を変化させた場合の衝撃エネルギーとエネルギー損失との関係を示している。層数が多ければ、試験片が吸収するエネルギー量も大きくなる。

図のように衝撃エネルギーの増大とともに鋼球エネルギー損失が減少する傾向は、配向が等しければほぼ類似となるようである。

図9 衝撃エネルギーとエネルギー損失の関係(試験片 D)

図10 衝撃エネルギーとエネルギー損失の関係(試験片 N)

図11 衝撃エネルギーとエネルギー損失の関係(試験片 G)

図 12 衝撃エネルギーとエネルギー損失の関係(試験片 A, C, D)

(c) 配向, 板厚が等しくマトリックス樹脂が異なる場合 図 13 は, 貫通特性におけるマトリックス樹脂の影響を見るために, Carbon/Epoxy と Carbon/PEEK の積層板について, 衝撃エネルギーと貫通前後エネルギー損失の関係を示したものである。Carbon/Epoxy 積層板では, 衝撃エネルギーの増加につれてエネルギー損失が減少するのに対して, Carbon/PEEK 積層板では, 逆に増大している。すなわち Carbon/PEEK 積層板は Carbon/Epoxy 積層板に比べ, エネルギー吸収能が高いといえる。これらのことから, Carbon/Epoxy と Carbon/PEEK とでは破壊に伴うエネルギー吸収のメカニズムに違いがあることが想像できる。

Carbon/Epoxy では衝撃エネルギーを増大させると損傷領域が減少し損傷パターンに大きな変化が見られ, 貫通抵抗が低下した。これに対して Carbon/PEEK では衝撃エネルギーの増加に伴う損傷パターンの変化がほとんどなく, 貫通抵抗が増加する傾向が認められた。

5. 結 論

以下に本論文の研究結果を示す。

(1) 試験片の衝撃面裏側の損傷パターンは帯状剥離と菱形剥離に大きく分けられ, 試験片の種類および衝撃速度により損傷パターンが異なることがわかった。低衝撃エネルギーの場合, 試験片裏面の損傷パターンが帯状を呈する試験片では, 菱形剥離を呈するものより界面剥離面積が大きい傾向がみられた。

(2) 層間剥離は貫通が生じない程度の低速衝撃の場合と同様, 界面の下側の繊維方向に広がっていることがわかった。

図 13 衝撃エネルギーとエネルギー損失の関係(試験片 D, P)

(3) 貫通を伴う衝撃の場合, Carbon/Epoxy 積層板では衝撃エネルギーが大きくなるほど損傷領域が局所化されて剥離面積が小さくなる。

(4) 直交積層板の層間剥離観察において, 上側の界面の層間剥離長さと同側の層間剥離幅が等しい逐次的な層間剥離発生メカニズム (Generator Strip) が確認できた。

(5) 試験片断面の観察結果から, 層間剥離領域の幅と複数のトランスバースクラック間の最大幅との間に明確な相関があることが明らかになった。

(6) 鋼球の衝撃エネルギーと貫通前後のエネルギー損失の関係から, 各試験片の貫通特性の違いが明らかになった。Carbon/Epoxy 積層板の試験では, 貫通臨界速度付近が最も貫通抵抗 (貫通前後の鋼球エネルギー損失) が高く, 衝撃速度が増加するに従い低下する傾向がみられた。衝撃面の裏側に繊維ブリブを付加した試験 N では, 貫通抵抗は衝撃エネルギーによらずほぼ一定となった。

(7) Carbon/PEEK では, 本実験の衝撃速度範囲内において, 衝撃速度の増加に伴い貫通抵抗も増大し, 試験片の損傷パターンとの間に明確な相関関係が見出された。

なお本研究は文部省科学研究費補助金, 試験研究

(2) [課題番号 63850023] の援助を受けて行われた。

文 献

- (1) 武田, 複合材料の衝撃応答と破壊 I, 日本複合材料学会誌, 11-4, (1985), 25-35.
- (2) 武田, 複合材料の衝撃応答と破壊 IV, 日本複合材料学会誌, 12-2 (1986), 32-42.
- (3) Cristescu, N., Malvern, L. E. and Sierakowski, R. L., Failure Mechanisms in Composite Plates Impacted by Bulund-Ended Penetrators, Foreign Object Impact Damage to Composite, ASTM STP 568 (1973), 159-

- 172.
- (4) Takeda, N., Sierakowski, R. L., Ross, C. A. and Malvern, L. E., Delamination-crack Propagation in Ballistically Impacted Glass/Epoxy Composite Laminates, *Exp. Mech.* **22**-1 (1982), 19-25.
- (5) Kurokawa, T., Tanaka, K., Fujinaga, S. and Taki, M. (Homma, H. and Kanto, Y.編), Damage of Graphite/Epoxy Laminates Composite Plates Subjected to a Transverse Impact, *Dynamic Fracture* (1989), 183-182.
- Chuo Technical Drawing Co. Ltd.
- (6) Takeda, N., Sierakowski, R. L. and Malvern, L. E., Microscopic Observations of Cross Sections of Impacted Composite Laminates, *Composite Technology Review*, **4**-2 (1982), 40-44.
- (7) Matsumoto, H., Adachi, T. and Ujihashi, S. (Homma, H. and Kanto, Y.編), Static and impact Induced Damage to CFRP Laminates, 文献(5)の174-182ページ.
-