

衝撃後のCFRP積層板の超音波による内部観察

見尾田征幸 傅 恩波 高村 巧 加賀 寿

Detection of Damage in Impacted CFRP laminate by Acoustic Microscopy

Motoyuki Miota, En-Bo Fu, Takumi Takamura,
and Hisashi Kaga

要 旨

CFRP積層板に落球（未貫通）、落錘（貫通）によって衝撃を与え、その後超音波映像装置によって内部観察を試みた。その結果、落球により貫通に至らない衝撃を受けた積層板には複数の層間に異なる形状の層間剥離が発生した。層間剥離は打撃点直下の層には発生せず、より下層で発生した。また、(0/90)、(+45/-45)といった直交積層間に大きな剥離が発生した。落錘による貫通衝撃を受けた場合でも剥離発生の様相は未貫通の場合と同様の傾向を示した。

1. 緒 言

CFRPは優れた力学的特性を有することにより航空・宇宙産業をはじめ、スポーツ・レジャー分野への適用が進んでいる。しかし、CFRP構造体では製作工程や修理時の工具の落下、あるいは輸送中や使用中の衝突などの低速度衝撃により容易に剥離が生じる。また、衝撃を受けた場合、損傷や破壊の挙動は衝撃エネルギー、衝撃速度などによって異なり、非常に複雑である¹⁾。衝撃による損傷の度合を調べるために種々の検査法が研究されている²⁾。本研究では損傷の深さ方向の情報を得ることが可能な超音波探査映像装置を用い、衝撃を受けた後のCFRP積層板について内部観察を行った。

2. 材料および実験方法

CFRP積層板は、東邦レーヨンのベسفアイト Q-1111のCF/エポキシUDプリプレグ材を用い、

(0/45/90)₃に積層し、ホットプレス法によって成形した。成形条件は130℃、4 kgf/cm²である。積層板の寸法は、250mm×250mm、板厚は2.2±0.1mmで、この積層板より、精密切断機によって70mm×70mmの正方形を切り出し衝撃試験片とした。なお、繊維含有率は約63%であった。この材料に異なる度合の損傷を与えるため、落球と落錘の2種類の方法を用いて衝撃を与えた。落球による損傷は未貫通で、落錘による損傷は貫通である。

未貫通衝撃に用いた装置の模式図を図1(a)に示す。重量132g、球径31.5mmの鋼球を用い、2 mの位置より落下させ衝撃を与えた。試験片の支持は、径40mmの支持台を用いて行った。

貫通衝撃には計装化落錘式衝撃試験機を用い、損傷を与えた。試験機の概要を図1(b)に示す。この装置はストライカの直径が20mm、試験片支持台の直径は40mmで、最大1000Jまでの衝撃エネルギーを与えることが可能である。

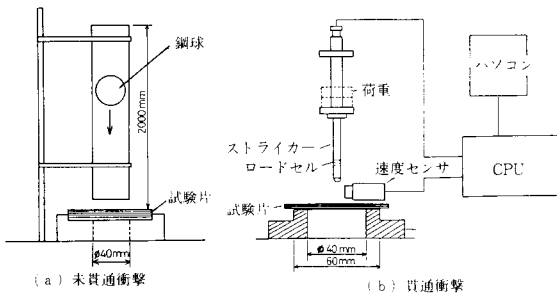


図1. 衝撃試験機模式図

2.2 実験方法

衝撃後の試験片観察を、日立建機製の超音波探査映像装置(AT7000型)により行った。本研究では周波数10MHzの水浸式で、収束型の高分解能探触子を使用し、図2に示すような電気的なゲートによって信号を選択することにより試料の任意深さからの映像を得ることが可能である。

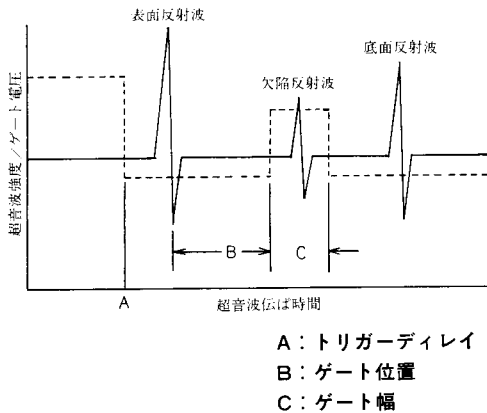


図2. 探傷波形とゲート電圧模式図³⁾

図2でA点まではトリガディレイをかけてノイズを除去し、表面反射波からBだけ離れた位置に幅Cのゲートをかけ、ゲート内に輝度変調をかけるとゲートの位置と幅に対応する深さからの像が得られる。試験片の音速を v (km/s) とし、B、Cの単位を μs とすると、得られる像の深さと厚さは、それぞれ $B \times v / 2$, $C \times v / 2$ (mm) となる³⁾。このような条件

をあらかじめ計算によって求め、さらに焦点距離の調整を行うことにより、目的とする深さの良好な超音波映像を得ることができる。また、衝撃後、超音波探傷を行った試験片を切断し、断面のSEM観察も併せて行った。

3. 結果および考察

3.1 未貫通衝撃後の内部観察

未貫通衝撃後、試験片には小さな圧痕が見られる他は外部損傷は認められなかった。図3に超音波探査映像装置による未貫通衝撃後の内部損傷の観察結果を示す。

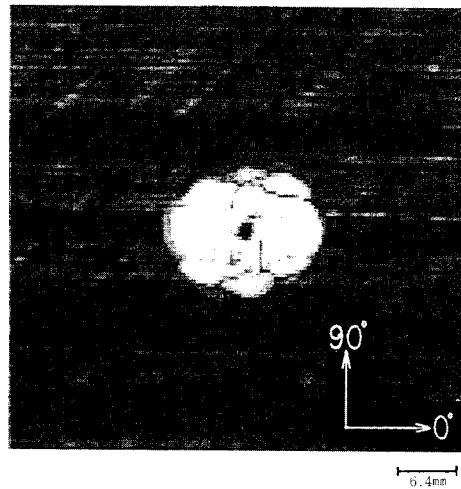


図3. 落球による衝撃を受けたCFRP積層板の超音波映像(全体像)

この映像は表面から最終層までゲートをかけ探傷を行った全体像である。図中の白い部分が層間剥離に相当する。この映像より打撃点を中心に楕円状の剥離が発生していることが知られた。また、剥離部分のコントラストの違いより、同一層間に剥離が発生しているのではなく、複数の層間に発生していることが観察できた。

次に異なった層間の映像を図4に示す。

打撃面から1-2層間(0/+45)の図4(a)では剥離の存在は認められない。同様に2-3層間(+45/-45)にも剥離は発生していなかった。3-4層間(-45/90)になると、図4(b)のように下層の90°方向に小さな剥離が確認できた。4-5層間(90/0)の図4(c)では0°方向に打撃点を中心に左右に大きな剥離が発生し

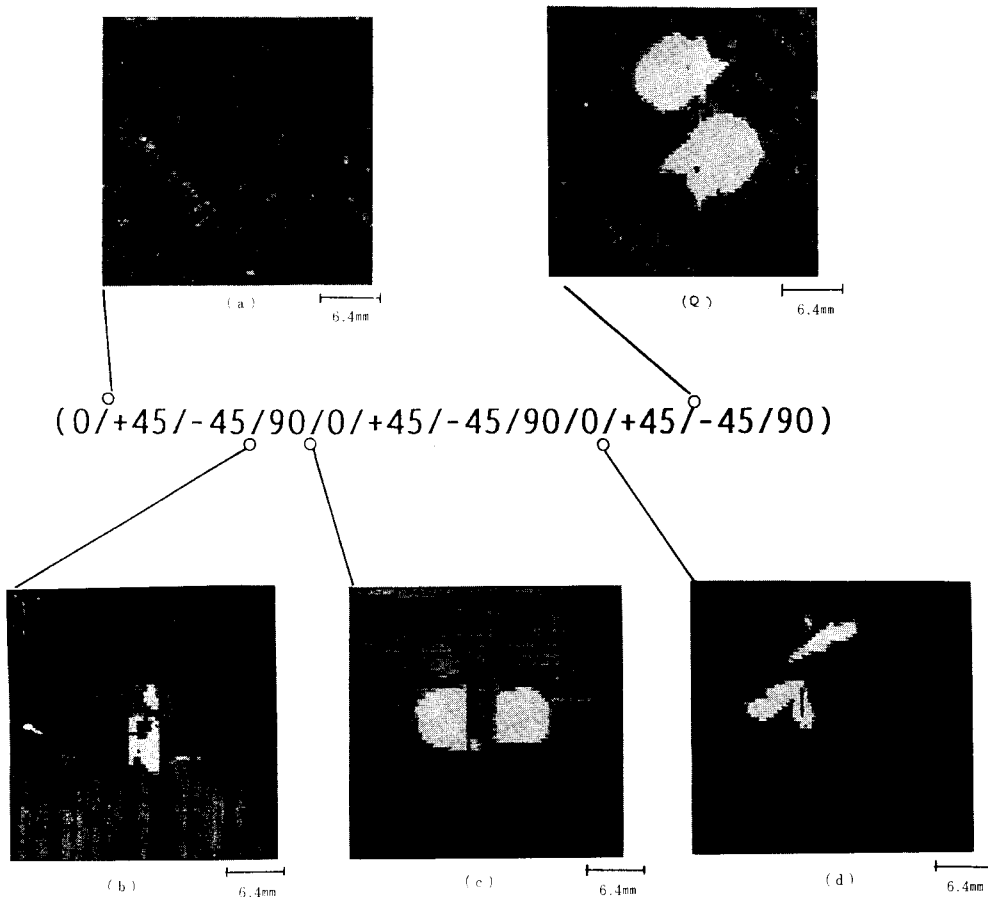


図4. 落球による衝撃を受けたCFRP積層板の各層間の超音波映像

ていた。図4の(d)、(e)は、9-10層間(0/+45)、10-11層間(+45/-45)の映像であるが、この2つは試験片を裏側から探傷したものである。9-10層間には+45°方向に細長い剥離が発生し、10-11層間では-45°方向に大きな剥離が認められた。

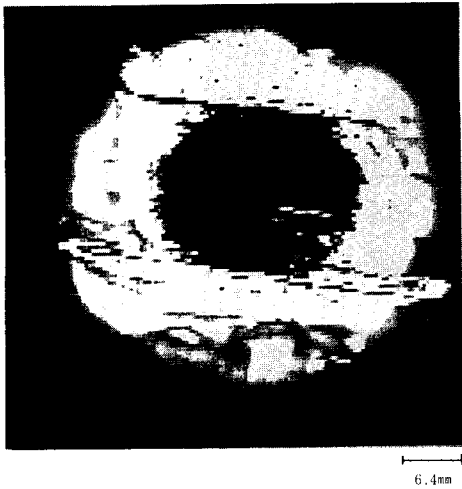
これらのことより、未貫通衝撃を受けた場合、層間剥離は打撃面直下の層には発生せず、それより下方の層に発生する。また、層間剥離は直交積層間(0/90, +45/-45)に大きく発生することがわかった。この理由としてD. Liuら⁴⁾はこの層間が最も曲げ剛性が大きいためであると報告しているが、詳細については今後、検討する必要がある。また、剥離の成長方向は層間の下側の層の影響を受けていることが知られた。

3. 2 貫通衝撃試験後の内部観察

次に貫通衝撃後の超音波映像の全体像を図5に示す。

この図より貫通衝撃を与えた場合、貫通孔周辺に広がる剥離は前述の未貫通の場合と比較するとかなり大きい。また、剥離は貫通孔を中心に円を描くように発生していることが知られた。図6に異なった層間の映像を示す。

打撃面から1-2層間(0/+45)の図6(a)で0°方向に見られる白い損傷領域は、この層間の剥離ではなく貫通による試験片表面の損傷の影響である。この図より、落球衝撃の場合と同様に1-2層間には大きな層間剥離は発生していない。次に直交積層間となる2-3層間(+45/-45)の映像が図6(b)である。この図より下側の層である-45°方向に延びる剥離が



発生していることが知られた。3-4層間 (90/0)の図6 (c)では、貫通した孔を囲むように剥離が発生しているが特に0°方向への剥離が大きい。この層間もまた直交積層間となる。図6の (d), (e) は試験片を裏側から探傷した映像である。(d)は9-10層間 (0/+45), (e)は10-11層間 (+45/-45)であり9-10層間では剥離の領域は小さい。また10-11層間には-45°方向に貫通孔を中心に対称的な剥離が大きく発生し、さらに貫通孔を囲むような剥離も見られた。これらの結果から落錘により貫通衝撃を与えた場合

図5. 落錘による貫通衝撃を受けたCFRP積層板の超音波映像

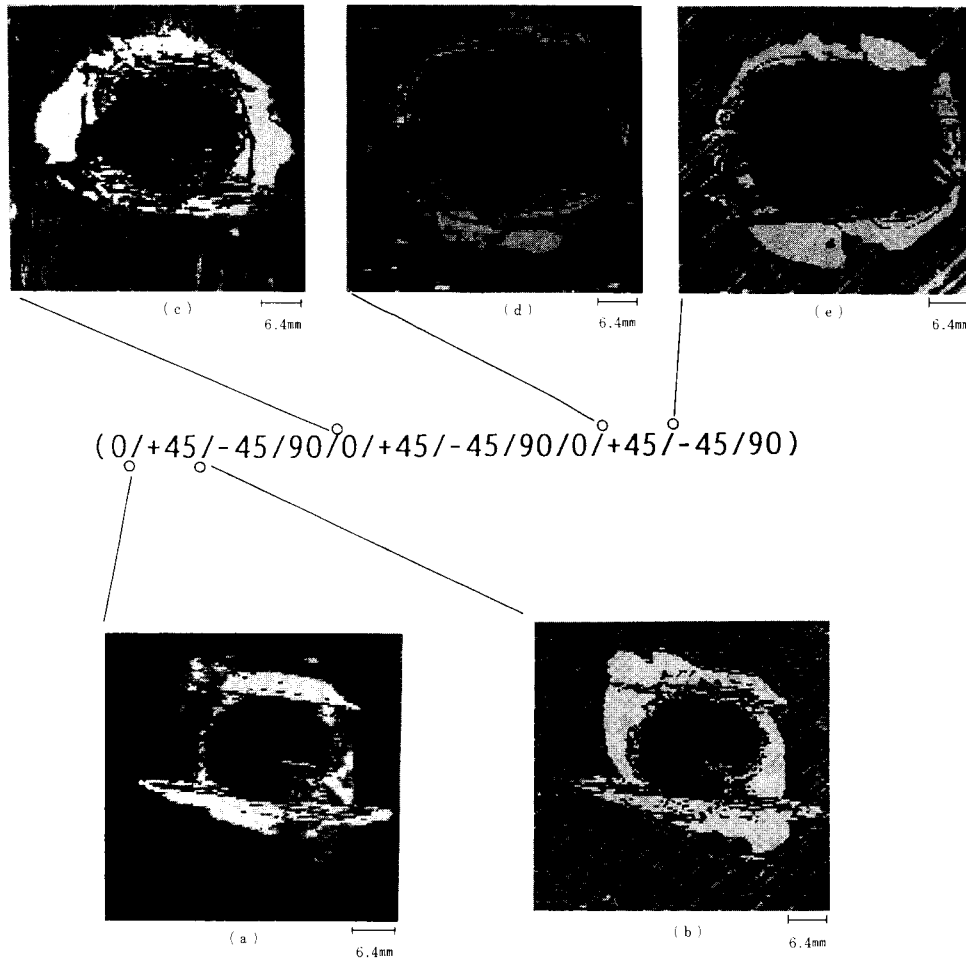


図6. 落錘による貫通衝撃を受けたCFRP積層板の各層間の超音波映像

でも、前述の場合の未貫通衝撃と同様に、打撃点直下の層にはほとんど層間剥離が発生しない。さらに層間剥離は直交積層間に大きく発生し、その成長方向は層間の下側の層の影響を受けることが知られた。

3.3 SEM観察結果

未貫通および貫通衝撃を与え、超音波探傷を行った後、試験片を衝撃点を中心に切断し、断面のSEM観察を行った。試験片の観察位置と断面写真を図7、図8に示す。

図7は未貫通衝撃後で、図8は貫通衝撃後である。

図7より、未貫通衝撃を受けた場合1-2層間(0/+45)、

2-3層間(+45/-45)には層間剥離は発生していないことが知られた。また、(+45/-45)、(90/0)の直交積層間に大きな剥離が発生していた。これらのことは超音波映像と良く一致している。さらに、中立層より下層ほどトランスバースクラックが数多く発生していることがわかる。中立層以下の層では、このトランスバースクラックから誘発され発生する層間剥離もあるものと考えられる。次に図8より、貫通衝撃を受けた場合その断面の様相は未貫通に比べ複雑である。層間剥離も多く発生している。この剥離は貫通による剪断破壊に起因して発生したものと考えられる。図中のB-B'から左側は超音波映像

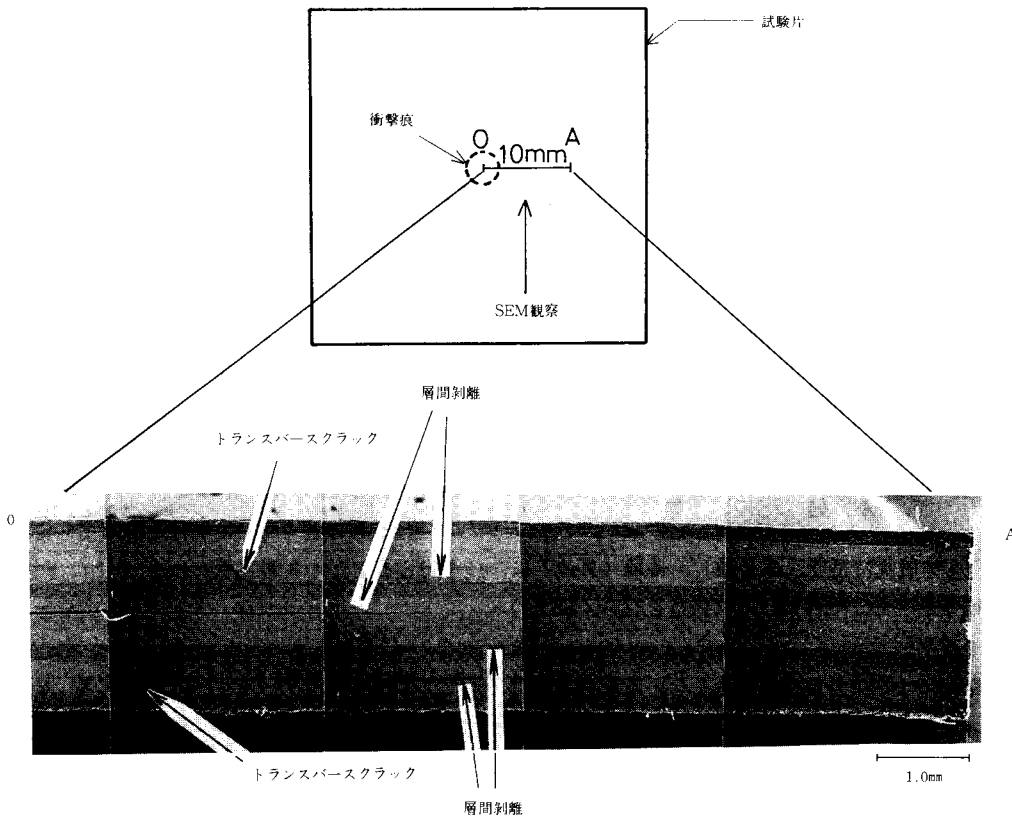


図7. 未貫通衝撃後の試験片の断面観察位置とSEM写真

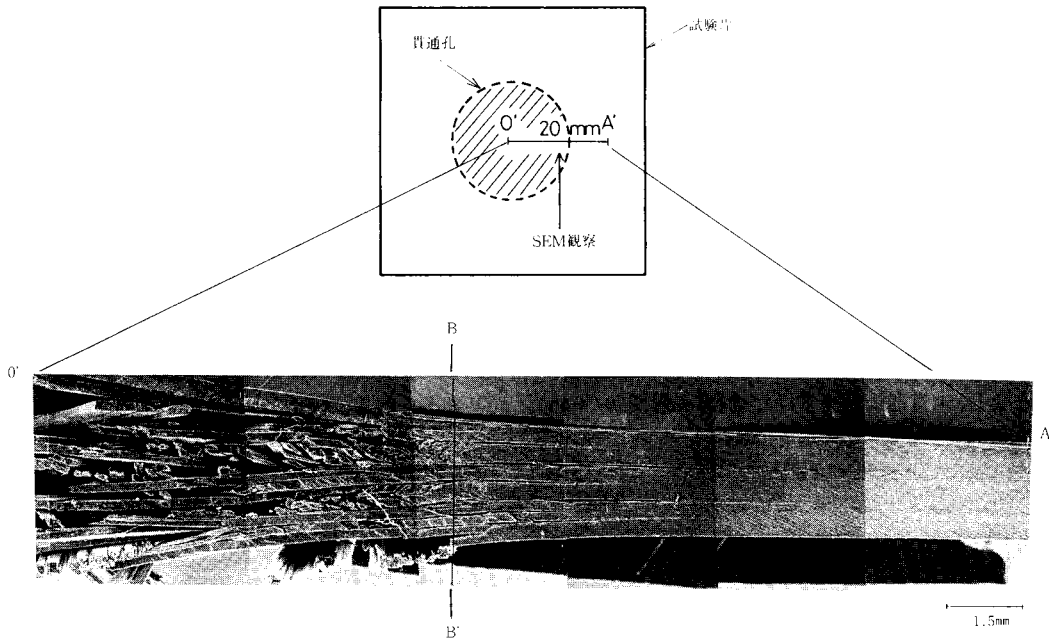


図8. 貫通衝撃後の試験片の断面観察位置とSEM写真

では検出不可能な領域（図3の剥離に囲まれた貫通痕の黒い部分）であり、B-B'より右側の剥離を見ると、未貫通同様に直交積層間で剥離が進展している。

4. 結 言

CFRP積層板に落球（未貫通）、落錘（貫通）により衝撃を与え、その後、内部観察を行い、以下の知見を得た。

- (1) 落球によって外部損傷の生じない衝撃を与えた場合、CFRP積層板内部には層間剥離が発生した。剥離は打撃面直下の層には発生せず、より下層に発生した。
- (2) 層間剥離は直交積層間、すなわち(0/90)、(+45/-45)の層間に大きく発生した。
- (3) 落錘によって貫通衝撃を与えた場合、発生する層間剥離は未貫通に比べかなり大きい。発生のパ

ターンはほぼ同様の傾向を示すことが知られた。

- (4) 超音波映像による内部観察は層間剥離の検出には非常に適しており、試験片の表面状態が良好であれば明瞭な映像が得られる。しかし、層内の縦方向の損傷であるトランスバースクラックなどの検出は困難であるため、CFRP積層板の内部損傷の観察にはSEM観察などを併せて行うことにより正確な情報を得ることができると思われる。

5. お わ り に

本研究の実施にあたり、御指導、御助言をたまわった工業技術院東北工業試験所 阿部利彦課長に深く感謝の意を表す。

6. 参 考 方 献

- 1) 見尾田征幸, 傅 恩波, 高村 巧, 加賀 寿:

- 日本複合材料学会研究発表講演会予稿集, 38 (1990) .
41 (1992) .
- 2) 金原 勲: 強化プラスチック, 35 (12) , 457 (1990) .
- 3) 阿部利彦, 栗山 卓: 超音波テクノ, 2 (2) ,
- 4) D. Liu, L. S. Lillycrop, L. E. Malvern and C. T. Sun : Experimental Technics, 11, 20 (1987).