衝撃後の CFRP 積層板の残留疲労強度評価* (四点曲げ試験の場合)

松本 浩之^{*1}, 岡崎 光宏^{*2}
足立 忠晴^{*1}, 宇治橋 貞幸^{*1}

Evaluation of Residual Fatigue Strength for Impacted CFRP Laminates (Case of the Four-Point Bending Test)

Hiroyuki MATSUMOTO, Mitsuhiro OKAZAKI,
Tadaharu ADACHI and Sadayuki UJIHASHI

Residual fatigue strength for CFRP (carbon-fiber-reinforced plastic) laminates having impact damage is evaluated with the four-point bending test. A steel ball launched by an air gun collides against CFRP laminates to generate impact damage. The static and fatigue tests are performed to evaluate the residual strength of impacted laminates. After the experiments, the laminates are observed by optical and ultrasonic microscopes. As a result, the static and fatigue residual strengths are reduced compared with virgin laminates, particularly when the impacted side of the laminates is compressed. It is found that the cracks from the impact impression and the delaminations following the cracks influence the fracture of the laminates.

Key Words: Composite Material, Material Testing, Low-Cycle Fatigue, Delamination, Ultrasonic Inspection, CFRP Laminate, Residual Strength, Four-Point Bending, Impact Damage, Air Gun

1. 緒 言

炭素繊維強化樹脂 (CFRP) は、比強度と比剛性が高いため航空宇宙分野で幅広く使われている。CFRP は炭素繊維と樹脂とを複合した材料のため不均質性かつ異方性を持っており、破壊現象は複雑である。また CFRP は優れた静的強度を持っている反面、衝撃荷重に対して難点があり、さらに損傷のある CFRP は圧縮強度が著しく低下することが指摘されている。そのため衝撃損傷による圧縮強度の低下は大きな問題であり、多くの研究^{(1)~(5)}が行われている。しかし、損傷による強度低下の原因はまだ解明されていない部分が多い。したがって衝撃損傷が強度低下に及ぼす影響や損傷の進展メカニズムを解明することは重要な課題である。

本研究は衝撃損傷のある CFRP の残留強度を評価することを目的とする。その際に用いる強度試験として、まず強度低下が大きい圧縮試験が考えられるが、圧縮試験は試験片の座屈が起こりやすく正確な圧縮強度を測定するのが難しい。そこで座屈を起こさずに容

易に試験片の片面に圧縮応力をかけられる曲げ試験が考えられる。

これまでも CFRP 積層板の強度試験として曲げ試験を実施している例がいくつかある。Murri ら⁽⁶⁾は表面に切欠きのある積層板を静的に三点曲げ、四点曲げおよび両端固定での曲げ試験を行い、はく離のひずみエネルギー解放率を調べている。また、Carlsson ら⁽⁷⁾は積層板の製造過程で端部にはく離部分を作った試験片を静的三点曲げ試験し、モード II での破壊靱性を調べている。さらに、本研究と同じように、衝撃損傷のある積層板を曲げ試験することにより残留強度評価を行った研究もある。例えば、黒川ら⁽⁸⁾は積層板に鋼球を衝突させて損傷を生じさせ、その積層板の静的四点曲げ試験を行っている。また、栗山ら⁽⁹⁾は落錘衝撃試験で積層板に損傷を生じさせ、その積層板の静的三点曲げ試験を行っている。三点曲げでは、軸方向のモーメント分布により層間せん断応力が生じ、四点曲げでは軸方向にモーメント分布が一様になる。本研究では基本的試験法として、まず四点曲げ試験を採用した。

上記の例はすべて静的強度試験であるが、他の研究では疲労試験も行われている。Bakis ら⁽¹⁰⁾は中央に円孔のある積層板を引張りおよび圧縮で疲労試験を行

* 原稿受付 平成 2 年 7 月 3 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。

い、損傷過程をX線撮影で観察している。また、駒井ら⁽¹¹⁾は両端に切欠きのある積層板の疲労引張試験を行い、損傷過程を超音波顕微鏡を用いて観察している。このように切欠きのある積層板を用いた疲労試験の例はあるが、実際に衝撃を与えて損傷を生じさせた積層板を用いて疲労試験を行った例はあまりない。そこで、衝撃損傷のある積層板の残留疲労強度や疲労破壊するときのメカニズムを解明するために、実際に衝撃によって損傷が生じた積層板を用いて疲労試験を行う必要がある。

本研究では、まず衝撃試験を行ってCFRP積層板に衝撃損傷を生じさせた。そして、衝撃損傷のある試験片を静的および疲労四点曲げ試験して、衝撃損傷による強度低下を調べ、さらに、疲労破壊の様子を超音波顕微鏡と光学顕微鏡を用いて観察し、衝撃損傷のある試験片の破壊メカニズムについて調べた。

2. 試験片の形状

本研究で用いたCFRP積層板は、一方向プリプレグ(東レ製のトレカ P3051-15、炭素繊維は T300-3000、マトリックスのエポキシ樹脂は#2500)で作製された。CFRP試験片は2種類ありそれぞれの積層順序は、試験片A: $[0^\circ_6/90^\circ_{12}/0^\circ_6]$ および試験片J: $[0^\circ_2/90^\circ_3/45^\circ_3/-45^\circ_4]_5$ ともに24 Plyである。形状はいずれも長さ180 mm、幅40 mm、厚さ3.75 mmの帯板であり、繊維の0°方向と試験片の長手方向を一致するようにした。この試験片幅は衝撃損傷幅より広く、試験片の縁の効果が試験結果に影響しないように配慮された。四点曲げ試験はタブなしで行い、比較のために実施した静的引張りおよび圧縮試験では試験片の両端から50 mmの範囲にサンドペーパー(#180)を接着してタブとした。

図1 衝撃実験装置

3. 衝撃試験の方法と試験片の損傷

3.1 衝撃試験方法 試験片に初期損傷を与えるために図1に示した空気圧式衝撃試験装置で直径5 mm (0.5 g) の鋼球を試験片に衝突させた。直径150 mmの穴をあけた厚さ10 mmの鋼板2枚に同じく直径150 mmの穴をあけた厚さ3 mmのゴム板を貼ったものの中央部に試験片を支持し、衝撃試験装置で試験片の中心に鋼球を衝突させた。また、以下で用いる衝撃エネルギー(単位[J])は、衝突直前の衝突体の運動エネルギーを表す。

3.2 衝撃試験によって生じた損傷例 衝撃試験で試験片Aに生じた損傷例を図2に示す。図2(a)、(b)は試験片内部に生じた界面はく離を超音波顕微鏡(オリンパス UH Pulse 100, 超音波周波数30 MHz)で撮影した写真である。図2(a)は衝撃面に近い0°/90°界面のはく離を衝撃面側から観察したもので、図2(b)は衝撃面から離れている90°/0°界面のはく離を衝撃面裏側から観察したものである。この写真から、衝撃面に近い界面のはく離より衝撃面から離れた界面のはく離のほうが大きいことがわかる。また図2(c)は衝撃痕を表面から撮影した光学顕微鏡写真で、衝撃痕は円形にくぼんでいることがわかる。ただし、この衝撃痕(Impact impression)とは、衝撃試験で鋼球が試験片に衝突した際に試験片表面にできたくぼみである。

3.3 衝撃試験における試験片形状の影響 本研究では帯板の試験片を用いるため、この試験片の形状が衝撃試験結果に与える影響について調べた。まず180 mm×40 mm および180 mm×180 mmの試験片にほぼ同じ衝撃を与えた。ここで、180 mm×40 mmの試験片は本研究で用いるものである。また、180 mm×180 mmの試験片は図1の固定治具に取付けると円形支持となる。そして、この2種類の試験片に衝撃により生じた界面はく離を超音波顕微鏡で観察したところ、はく離の形状や大きさはほぼ同じだった。

4. 静的四点曲げ試験

4.1 試験方法 まず試験片に3.1節で述べた衝撃試験で衝撃損傷を生じさせた後、残留強度を調べるために静的四点曲げ試験を行った。また比較のために静的引張りおよび圧縮試験を行った。

静的四点曲げ試験は図3(a)に示す治具を材料試験機インストロン 8501 に取付けて行った。四点曲げ試験では、衝撃面が図3(b)のように圧縮を受ける場合と図3(c)のように引張りを受ける場合を区別して試験

を行った。

なお、荷重 P [N] を加えたときの曲げモーメント M [N・m] は次のように算出される。

$$M = P(W_1 - W_2)/4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 W_1 および W_2 は支持点および荷重点間距離を示し、本研究では、 $W_1 = 0.120$ m, $W_2 = 0.060$ m である。

(a) 衝撃面に近い界面 0°/90°におけるはく離(A側から観察)

(b) 衝撃面に遠い界面 90°/0°におけるはく離(B側から観察)

比較のために実施した静的引張りおよび圧縮試験は、試験片を材料試験機のグリップにはさみ引張りおよび圧縮荷重を負荷して行った。ただし、この圧縮試験では試験片の座屈を防ぐ措置は行っておらず、圧縮

(c) 衝撃痕

図 2 試験片 A に生じた衝撃損傷例

衝撃エネルギー (a), (b) : 1.65 J (81.3 m/s),

(c) : 1.68 J (82.0 m/s)

(a) 四点曲げ試験治具

(b) 衝撃面が圧縮を受ける場合

(c) 衝撃面が引張りを受ける場合

図 3

時には座屈が起っていた。

4・2 静的四点曲げ試験結果 静的四点曲げ試験での衝撃エネルギーと破壊曲げモーメントとの関係を図4(a), (b)に示す。

試験片Aの場合は、図4(a)のように衝撃面が圧縮を受ける試験では衝撃エネルギーが大きくなるほど破壊曲げモーメントが低下しているが、衝撃面が引張りを受ける試験ではほとんど低下していない。このことから、試験片Aの静的四点曲げ試験では、衝撃面が圧縮を受ける場合に衝撃損傷による強度低下が大きいことがわかる。

試験片Jの場合は、図4(b)に示すように衝撃面が圧縮、引張りを受ける場合とも破壊曲げモーメントが同程度低下しており、試験片Aのような顕著な違いは見られない。

4・3 静的引張りおよび圧縮試験結果 静的引張りおよび圧縮試験での衝撃エネルギーと破壊応力の関係を図5(a), (b)に示す。ただし試験片Aについては破断荷重が材料試験機の容量を超えたので引張試験は行わなかった。この結果から衝撃エネルギーが大きくなるほど静的引張りおよび圧縮試験での破壊応力が低下していることがわかる。

5. 疲労四点曲げ試験

5・1 試験方法 疲労四点曲げ試験は、4・1節で述べた治具を用いてsin波形で曲げモーメントを負荷した。試験条件はモーメント比 $R=0.1$ 、周波数3Hzとした。ただしモーメント比とはsin波形の曲げモーメントの最大値 M_{max} と最小値 M_{min} の比である。このよ

うに一定の振幅の曲げモーメントを最低 10^4 サイクル以上負荷して試験片が破壊するまでのサイクルを調べた。

5・2 試験結果 疲労四点曲げ試験を行った試験片Aおよび試験片Jの曲げモーメントの最大値 M_{max} と破壊までのサイクルの関係を図6(a), (b)に示す。ただし、図中の矢印のついた記号はそのときのサイクル数で破壊しなかったことを示す。

試験片Aの場合は、図6(a)のように衝撃面に圧縮を受ける疲労四点曲げ試験では衝撃損傷による強度低下が見られ、衝撃エネルギーが大きいかほど強度の低下が大きい。しかし、衝撃面に引張りを受ける試験ではほとんど強度低下が見られず、静的四点曲げ試験結果と類似の傾向を示している。

試験片Jの場合は、図6(b)のように衝撃面に圧縮を受ける試験では衝撃損傷による強度低下が見られ、衝撃エネルギーが大きいかほど強度の低下が大きい。しかし、衝撃面に引張りを受ける試験ではあまり強度低下が見られない。また衝撃面に引張りを受ける場合は疲労試験の M_{max} が静的試験の破壊曲げモーメントに近い値でないと疲労破壊しないことから、疲労しにくいことがわかる。

5・3 疲労破壊の観察 図7に示すのは、衝撃試験後に衝撃面に圧縮を受ける疲労四点曲げ試験を行った試験片Aの破壊までの様子である。図7(a)は試験片表面の衝撃痕き裂(Impact impression crack)の進展である。この衝撃痕き裂とは、衝撃試験後の四点曲げ試験で3・2節で述べた衝撃痕から生じた試験片表面のき裂を示す。このき裂は丸い衝撃痕に接する90°方向の接線上に発生し、試験片表面の繊維を切断しながら

図4 静的四点曲げ試験結果

図5 静的引張りおよび圧縮試験結果

ら繊維方向に対して垂直に進展している。図7(b)は衝撃面に近い0°/90°界面のはく離が進展している様子を超音波顕微鏡で撮影した写真である。ここで、図7(b)の(3')、(4')は図7(a)の(3)、(4)に対応している。図7(a)の(1)、(2)に対応する界面はく離は撮影していないので不明であるが、図7の衝撃試験の条件は図2とほぼ同じなので、図2(a)の界面はく離は図7の疲労試験前の界面はく離と考えてよい。したがって、図7と図2(a)から、疲労四点曲げ試験によって衝撃痕の縁に生じたき裂が進展し、それに伴って衝撃試験時に生じた界面はく離が進展し破壊に至ったことがわかる。

図8は、衝撃試験後に衝撃面に圧縮を受ける疲労四点曲げ試験を行い衝撃痕き裂が発生した試験片Aの断面の光学顕微鏡写真である。これは衝撃痕を通り0°方向に切断した断面である。この写真から、疲労四点曲げ試験で衝撃痕に負荷される圧縮応力のために繊維が折れ曲がって衝撃痕き裂が発生し、さらに折れ曲がった部分が持ち上げられ0°層内ではく離が生じてい

ることがわかる。衝撃試験で生じた衝撃痕は局部的な変形や繊維の破断があるため、圧縮応力が負荷されることにより繊維の折れ曲がりが起こり衝撃痕き裂が発生したと考えられる。

(a) 衝撃痕き裂の進展(L_c : き裂長さ)

(a) 試験片 A

(b) 試験片 J

図6 疲労四点曲げ試験結果

(b) 衝撃面に近い界面におけるはく離の進展

図7 衝撃痕き裂と衝撃面に近い界面におけるはく離の進展

試験片 A, 衝撃エネルギー 1.71 J (82.6 m/s).
疲労四点曲げ試験 (衝撃面が圧縮を受ける場合), $M_{max} = 60$ [N·m]

6. 破壊メカニズム

四点曲げ試験では試験片表面に負荷される応力が大きく、中立面に近づくほど応力が小さくなる。したがって、引張試験や圧縮試験と比べると、試験片表面の損傷に対して敏感な試験法であると考えられる。以下では、衝撃痕付近の疲労破壊について述べる。

衝撃を受けた試験片 A を疲労四点曲げ試験すると、衝撃面が圧縮を受ける場合は衝撃痕き裂の進展および圧縮側の $0^\circ/90^\circ$ 界面全体のはく離によって破壊していることが多い。また、衝撃面が引張りを受ける場合はほとんど衝撃痕き裂が生じることはなく圧縮側にある $90^\circ/0^\circ$ 界面全体のはく離のみで破壊することが多い。一方、試験片 J では衝撃面が圧縮、引張りのどちらの場合も衝撃痕き裂が生じ、また複数の界面ではく離が生じている。

そこで、この 2 種類の試験片について衝撃試験直後

図 8 衝撃痕き裂付近の断面
試験片 A, 衝撃エネルギー 1.68 J (82.0 m/s)
疲労四点曲げ試験 (衝撃面が圧縮を受ける
場合) $M_{max} = 63$ [N·m], 50000 サイクル時

の衝撃痕の様子を比較してみる。試験片 A は図 2(c) に示したように円形にくぼんでおり、断面を光学顕微鏡で観察すると表面の繊維が破断していることがわかった。それに対して試験片 J は衝撃による損傷が激しく、衝撃痕付近の 0° 層が破断しており、表面からその下の 90° 層が見えている。これは試験片 J の表面の 0° 層が 2 Ply で、試験片 A の 6 Ply と比べて薄いためだと考えられる。

試験片 A および試験片 J の疲労四点曲げ試験において、衝撃痕き裂の発生状況と図 6 の疲労試験結果を比較すると以下のように考えられる。試験片 A に生じた衝撃痕き裂は圧縮応力に対して弱く、そのため衝撃面に圧縮を受ける場合の強度低下が大きい。一方、試験片 J は衝撃痕の損傷が激しいため衝撃痕き裂が生じやすく、そのため衝撃面に受ける応力が圧縮、引張りにかかわらず衝撃痕き裂が生じるので、衝撃面に引張りを受けても圧縮を受けても強度低下の差があまりないものと考えられる。

衝撃試験によって生じる損傷には、(ア)界面はく離、(イ)トランスバースクラック、(ウ)衝撃面裏側のき裂、(エ)衝撃痕がある。

それぞれの損傷を見てみると、(ア)の界面はく離は繊維方向が変わる界面で起こるはく離であり繊維を破断していない。(イ)のトランスバースクラックと(ウ)の衝撃面裏側のき裂は繊維方向と平行に生じ、これらも繊維を破断していない。しかし、(エ)の衝撃痕は表面の繊維を破断している。本研究では特にこの衝撃痕について破壊の観察を行った。

(ア)の界面はく離については、栗山ら⁽⁹⁾は、衝撃面裏側を圧縮側にする三点曲げ試験で圧縮側の界面はく離部分に座屈変形が起こり強度が低下したと報告している。また、試験片の製造過程で試験片内にだ円の界面はく離を作製し疲労三点曲げ試験で進展させた Chatterjee ら⁽¹²⁾の研究がある。

CFRP 積層板は強度の多くを炭素繊維が受け持っているため、炭素繊維が破断するとその部分では引張りおよび圧縮に対して強度が低下すると考えられる。本研究では、炭素繊維が変形、破断している衝撃痕の部分に圧縮応力が負荷されることによって、衝撃痕き裂が発生、進展し、それに伴って界面はく離が進展する様子が観察できた。このことから、積層板表面のわずかな繊維の変形、破断が重大な損傷へ進展していくことが考えられる。

7. 結 言

静的および疲労による四点曲げ試験と静的引張りお

よび圧縮試験によって衝撃損傷のある CFRP 積層板の残留強度を評価した。

静的引張りおよび圧縮試験では、試験片 A : $[0^\circ_6/90^\circ_{12}/0^\circ_6]$, 試験片 J : $[0^\circ_2/90^\circ_3/45^\circ_3/-45^\circ_4]_s$ とも衝撃損傷によって強度が低下した。

四点曲げ試験では、試験片 J : $[0^\circ_2/90^\circ_3/45^\circ_3/-45^\circ_4]_s$ の場合、静的試験では衝撃面圧縮および引張りで同程度強度が低下した。しかし、疲労試験では衝撃面に圧縮を受ける場合は強度の低下が見られたが、衝撃面に引張りを受ける場合はあまり強度の低下は見られなかった。

試験片 A : $[0^\circ_6/90^\circ_{12}/0^\circ_6]$ の四点曲げ試験では、静的および疲労試験とも衝撃面に引張りを受ける場合は衝撃損傷による強度低下はほとんど見られなかった。しかし、衝撃面に圧縮を受ける場合は衝撃痕き裂を生じて破壊し、強度低下が見られた。特に疲労試験では、衝撃痕き裂の進展に伴う界面はく離の進展が観察され、衝撃痕き裂が強度低下の原因となっていることがわかった。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金（一般研究 A 63420027）によるものであることを付記し謝意を表する。

文 献

- (1) Challenger, K. D., The Damage Tolerance of Carbon Fiber Reinforced Composites—A Workshop Summary, *Composites Struct.*, 6 (1986), 295-318.
- (2) Sharma, Avva, V., Effect of Specimen Size on the Buckling Behavior of Laminated Composites Subjected to Low-Velocity Impact, *Compression Testing of*

Homogeneous Materials and Composites, ASTM STP, 808 (1982), 140-154.

- (3) Cantwell, W. J., Curtis, P. T. and Morton, J., An Assessment of the Impact Performance of CFRP Reinforced with High-strain Carbon Fibers, *Composites Sci. Technol.*, 25 (1986), 133-148.
- (4) Rhodes, M. D., Williams, J. G. and Starnes, Jr. J. H., Low-Velocity Impact Damage in Graphite-Fiber Reinforced Epoxy Laminates, *Polymer Composites*, 2-1 (1981), 36-44.
- (5) Ishai, O. and Shragai, A., Effect of Impact Loading on Damage and Residual Compressive Strength of CFRP Laminated Beams, *Composites Struct.*, 14-4 (1990), 319-337.
- (6) Murri, G. B. and Guynn, E. G. (Whitecomb, J. D. 編), Analysis of Delamination Growth from Matrix Cracks in Laminates Subjected to Bending Loads, *Composite Materials: Testing and Design (Eighth Conference)*, ASTM STP, 972 (1988), 322-339, ASTM.
- (7) Carlsson, L. A., Gillespie, J. W. and Trethewey, B. R., Mode II Interlaminar Fracture of Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK, *J. Reinforce Plastics and Composites*, 5 (1986), 170-187, Technomic Publishing Co., Inc.
- (8) 黒川, CFRP 板の耐横衝撃強度 (課題番号 59550047), 昭和 59, 60 年度科学研究費補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書, (1986), 1-27.
- (9) 栗山・成澤・佐藤・阿部, 衝撃を受けた CFRP 積層板の超音波映像および残存強度, 材料, 39-43 (1990), 247-253.
- (10) Bakis, C. E. and Stinchcomb, W. W. (Hahn, H. T. 編), Response of Thick, Notched Laminates Subjected to Tension-Compression Cyclic Loads, *Composite Materials: Fatigue and Fracture, ASTM STP*, 907 (1986), 314-334, ASTM.
- (11) 駒井・箕島・木下・小川・黒田, CFRP の疲労損傷の超音波顕微鏡フラクトグラフィと層間はく離進展抵抗, 材料, 39-438 (1990), 271-276.
- (12) Chatterjee, S. N., Ramnath, V., Dick, W. A. and Chen, Y., Growth of Elliptic Delaminations in Laminates Under Cyclic Transverse Shear stresses, 文献(6)の 281-297 ページ.