201

CFRP積層板の落錘衝撃時の損傷過程

大阪工業技術試験所

〇永井 功,田中利光,松川真美

1. はじめに

繊維強化複合材料(FRP)の構造部材への適用に際 し、その優れた静的力学特性に反して耐衝撃性において は必ずしも優れた特性を示さないことが指摘されている. これはFRPが衝撃負荷を受ける場合、外部に現れるき 裂などの損傷以外に材料内部で大きな損傷が生じ、残留 強度が著しく低下するためである.

筆者らは先に報告した平織ガラス/エポキシ(GFR P)積層板の落錘衝撃特性評価において,貫通衝撃と低 エネルギ衝撃を用いて極めて内部損傷が小さい場合の損 傷過程および衝撃損傷と衝撃吸収エネルギの関係を示し た.本研究では,同様の手法を数種類のカーボン/エポ キシ(CFRP)積層板に対して用い,衝撃損傷過程を 考察した.また,損傷量として目視による外部損傷と超 音波C-Scanによる内部損傷をとりあげ,衝撃損傷 と吸収エネルギとの関係を調べた.

表1 各種CFRP積層板の仕様

試験片名	プリプレグ	構成	厚さ(mm)
J 1	一方向材 東邦 Q-1113-1450	[(45/0/-45/90) ₂] s	2.30
J 2 1 3	平縦材 事し F16343C-05F	[((0/90)(90/0)) ₂] s [((0/90)(45/-45))s]	1.59

表2 各種CFRP積層板の貫通衝撃特性

	Th i ckness	At Maximum	Force	Total Energy
Specimen	h(mm)	Fmax(kN)	Emax(j)	E tot(J)
J 1	2.30(0.54)	4.73(3.54)	8.93(6.61)	23.2(2.30)
J 2	1.59(0.94)	2.36(6.09)	4.76(10.3)	12.0(2.35)
j3	1.57(0.74)	2.37(5.92)	4.24(6.73)	12.5(3.47)

Impact Face Tension Face (a) J1 (b) J2 (c) J3

図1 各種CFRP積層板の貫通破壊時の損傷状態

2. 試験方法

本研究で用いたCFRP積層板は3種類で、その仕様 は表1に示す通りである.試験片形状は100x100mmとした.

試験装置本体はDynatup GRC8250で, 落錘先端の形状は ストライカー直径 d str=12.7mmの半球, 支持方法は支持 台内径 d sup=76.2mm, 周辺固定とした. 荷重較正値は静 的較正によって求めた. 変位については非接触変位計(Zimmer model200X)を使用し, ターゲットをロードセル に貼付して測定した. また, この変位の実測値を用いて 最小二乗法から落錘の打撃速度を求めた. 試験は落錘重 量 m=2.68~11.9kg, 打撃速度 V o=1.07~4.48m/sec, 落 錘の初期運動エネルギE o=1.54~116Jの範囲内で行った. 試験温度は23±1℃とした. 衝撃吸収エネルギE は

E=∫F(t)dx(t) (x:変位 F:荷重)

から計算した.貫通,未貫通にかかわらず試験の最終時 点までの吸収エネルギ値をEtotと表示する.

内部損傷の観察は超音波探傷機(日立 AT5000)を使 用し、中心周波数10MHzの焦点型探触子で水浸・反射法 によって行った。

3. 試験結果および考察

1. 貫通衝撃特性

3種類のCFRP積層板の貫通破壊時の特性は表2の 通りである。図1に貫通時の各々の損傷状態を示す。3 種類の積層板はともに打撃面ではストライカー直径と同 程度の穴が開き,その裏面にあたる引張面では最外層の 種類によって損傷の形が異なる。これらの損傷状態は平 織GFRPの場合に比べて極めて局部的であり,損傷過 程において内部損傷が大きく成長し未損傷部への応力伝 違を阻害するためと考えられる。

<u>2. 損傷過程</u>

貫通時の荷重-変位曲線の特徴と損傷過程との対応を調 べるため、低エネルギ衝撃試験を行った。図2にその代 表例をあげる。3種類のCFRP積層板はともに負荷過 程において荷重-変位曲線が貫通時の曲線とほぼ一致して



荷重-変位曲線(J1材)

NII-Electronic Library Service



図6 損傷量と衝撃吸収エネルギの関係および外部損傷と内部損傷との関係(J1材)

おり,各レベルでの低エネルギ衝撃時の損傷は貫通まで の損傷成長過程を示していると考えられる。そこで,低 エネルギ衝撃試験による損傷状態を調べて,図3のよう に損傷過程を2段階に大別した。

第1段階は最初の荷重変動から最大荷重近傍までで, この段階では引張面にマクロなき裂が生じ成長するが, 打撃面では圧痕が見られるもののマクロなき裂は観測で きない.第2段階は打撃面,引張面でのき裂が成長する 段階であるとともに,落錘先端が貫通するために必要な 空間が作られる段階で,平織GFRPの場合のようにこ れらの段階の明瞭な区別はできなかった.

3. 衝撃損傷と衝撃吸収エネルギ

損傷量と衝撃吸収エネルギとの関係を調べるため、外 部損傷としては図4に示す引張面での損傷の長さを用い た.一方向性材によって構成されるJ1材の場合、引張 面でのき裂は繊維方向のマトリックスのき裂であり、繊 維破断は極めて少ない、一方、平織材によって構成され るJ2材、J3材は主に繊維破断を伴う十字形のき裂で あるが、繊維東内でのマトリックスのき裂や繊維の剥離 などのために明瞭でなく、長さとしては繊維方向である 0°,90°方向の最大幅を用いた、内部損傷では、超 音波C-Scan法によって図5のような損傷の広がり を求め、損傷の投影面積を損傷量として用いた。

これらの損傷量と衝撃吸収エネルギの関係および外部 損傷と内部損傷の関係を図6,図7に示す.J1材の場 合,第1段階において吸収エネルギとの関係は外部損傷 で2次曲線的な関係にあり,内部損傷ではその初期段階 でほぼ正比例関係にあることが認められた.また,内部 損傷が第1段階の初期で外部損傷を直径とする円の面積 でほぼ近似できることが分かった.J2材,J3材の場 合は,第1段階で外部損傷,内部損傷ともに吸収エネル ギと2次曲線的な関係にあり,外部損傷ともに吸収エネル ギと2次曲線的な関係にあった.このことから,平織材 によって構成される積層板では外部損傷である繊維破断 が支配的であり,それに伴って一定の割合で内部損傷が 生じていると考えられる.

また,超音波探傷の路程データによってJ1材の内部 損傷である層間剥離の位置が求められることから,各層



図10 モデルに基づく損傷体積Vおよび損傷断面積Aと衝撃吸収エネルギとの関係

間での剥離の広がりを調べた。その結果を図8に示す。 層間剥離は打撃方向に対して下側の層の繊維方向を長手 方向とする楕円あるいはプロペラ状に広がっており、図 中の横軸はその繊維方向の剥離長さである。これから、 損傷の第1段階の初めからほとんどすべての層間におい て剥離が生じており、第1段階の後半で対称面から数層 下の層間で剥離が著しく成長することが分かった。特定 の層間で剥離が異常に成長するため、内部損傷と吸収エ ネルギが第1段階の初期でのみ正比例関係にあったと考 えられる。

以上の結果から、一方向材または平織材によって構成 される薄板のCFRP積層板に対し、損傷過程の第1段 階において図9に示すような損傷進展の簡単なモデルを 考えた。図中のモデルは以下の事柄を含んでいる。一方 向材の場合、第1段階の初めまたはそれ以前に厚さにわ たって内部損傷が生じ、これが初期段階では安定に成長 する。この段階では繊維破断はほとんどない。また、平 織材の場合、損傷は繊維破断を伴わずに厚さ方向へは進 展できないと考えられるため、引張面での繊維破断の成 長に関係して厚さ方向へも繊維破断が進み、それによっ て一定割合の内部損傷が生じる。 これらのモデルを基に,外部および内部損傷を囲む体 積 V と平織材においては十字形のき裂による繊維破断の 断面積 A を近似的に計算した.

- <一方向材(J1)>
 - hd = h, $V = \alpha \cdot Ac \cdot hd$
- <平織材(J2,J3)>
- hd=max (a, b) \cdot h/ao, V = α \cdot Ac \cdot hd A = β \cdot h \cdot (a² + b²) / ao
- hd:損傷の奥行き h:試験片厚さ

Ac:損傷の投影面積

ao: き裂が打撃面に達する時の引張面上でのき裂長さ

α:体積の形状係数(錐状:=1/3 球状:=2/3)

β:き裂の形状係数(三角形:=1/2 楕円:=π/4)
これらの値と衝撃吸収エネルギとの関係を図10に示す.損傷量に対応する体積Vおよび断面積Aは吸収エネルギとほぼ正比例の関係となり,損傷のメカニズムが第
1段階でほぼ一定していると考えられ,予想したモデルの妥当性を示していると思われる.

4	、まとめ	省略
. (参考文献)	省略