平織ガラスロービングクロス積層材の破壊機構†

孫 峰* 岩 本 正 治**
自 念 榮 一*** 鈴 木 恵**

Fracture Mechanisms of Plain Woven Fabric Laminated Composites

by

Feng SUN*, Masaharu IWAMOTO**, Eiichi JINEN***
and Megumu SUZUKI**

The fracture mechanisms of plain woven fabric laminated composites were studied by load-displacement curves, AE behavior, and macro- and micro-observations in tensile tests. The results obtained are as follows:

(1) The failure processes which are accumulative can be divided into three stages on the load-displacement curves of the composites. The stage I is elastic. In the stage II, the debonding in weft takes place. The stage III mainly corresponds to the matrix cracking and the separation between wefts and warps. They depend on the weave structure strongly but are related little with the ply number of laminates.

(2) The boundaries of the stages I to II and II to III have some relations to the point where the AE event count rate can be detected first and the point where the rate increases rapidly, and thus the dominant failure mode can be well traced from the patterns of the AE event count rate and the AE energy curve.

Key words: Plain woven fabric laminated composites, Fracture mechanisms, AE method, Ink stain method, Failure behavior, Microfractography

1 緒 言

繊維強化複合材料のなかで、織布強化複合材料は、早い時期から舟艇、航空機、建築などの構造材として使用され、最近では、かなり広く採用されるようになっていっている。これに関する研究を列挙すれば、M. B. Desai と F. J. McGarry¹⁾、I. Kimpara^{2),3)}、平井ら^{4),5)}、T. Isikawa と T. W. Chou^{6),7)}、吉野らによる研究があるが、織布強化複合材料の破壊機構の体系的研究はまだ行われていないようである。

織布の織り構造に着目すると、引張荷重下の損傷挙動は一般のクロスプライ材と異なると予想される。特に、はくり、樹脂割れ、繊維破断などの損傷モードが最終破壊までにどの順序で起こるか、織り構造との関係で興味深い。

それゆえ、本報では、織布強化複合材料の破壊機構の体系的解明の一環として、平織ロービングクロス 1 ply 材および多層材を使用し、それらの材料の破壊機構を、特に AE 法による AE パラメータと損傷の

進行過程の関係、およびインク着色法を用いて損傷モードと織り構造の関係に着目し、巨視的および微視的に研究する。

2 実 験

2・1 実験試料

市販のガラス平織ロービングクロス材は 1, 6 ply の厚さがそれぞれ約 0.8, 4.0 mm の積層材で負荷方向に対して繊維束が 0°/90° になるように切り出した試料をそれぞれ R-1, R-6 材と称する。なお、これらの試料の切り出しは試料が損傷しないようにダイヤモンド・ホイール・カットおよび複合材料切断機を用いて注意深く行った。

これらの試料の機械的性質を Table I に示す。実験に使用した試験片の形状および寸法を Fig. 1 に示す。

チャック部の破壊を避けるために試験片のチャック部にアルミニウム製の厚さ 1 および 2 mm の補強タブを貼り付けた。また、全ての試験片は温度と湿度の影響を受けないように恒温恒湿室においた。

† 原稿受理 昭和63年6月13日 Received June 13, 1988

* 京都工芸繊維大学大学院 (現在東京大学大学院) 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, Graduate Student, Kyoto Institute of Technology, Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto

** 正会員 京都工芸繊維大学工学部 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology, Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto

*** 正会員 京都工芸繊維大学工業短期大学部 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, Technical College, Kyoto Institute of Technology, Goshokaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto

Table I. Mechanical properties of specimens.

Specimen	Fiber volume fraction (vol %)	Fiber orientation (deg.)	Elastic modulus E (GPa)	Tensile strength σ (MPa)	Poisson's ratio ν	Elongation φ (%)
R-1	28	0, 90	17.5	250	0.25	5.3
R-6	34	0, 90	23.6	371	0.16	8.6

Strain rate: 5.0 %/min, Temp.: $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\%$ RH

Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

2・2 実験方法

実験は約 20°C の室温中で島津オートグラフ IS-10T 型試験機を用いて、クロスヘッド速度 0.5 mm/min で引張試験を行った。試験中の AE 計測には島津 AE 計測装置 SAE-1000A を使用した。AE 信号は試験片中央部から長手方向端部へそれぞれ 30 mm 離れた表面に取り付けた 2 ch センサによりピックアップし、これをトータルゲイン 60 dB に増幅した。なお、しきい値電圧はセンサ出力で 0.3 mV に設定し、センサは共振域が約 $200\sim 400\text{ kHz}$ である共振型のもので高真空シリコングリースを介してビニルテープで試験片に圧着した。

損傷の検出法としては、簡単で効果的であるインク着色法を用いた。インク着色法とは負荷中にインクを切欠き部、または試験片の表面に注入および含浸させ、表面損傷および表面から内部にいたる損傷を検出する方法である。この方法によると、除荷後、全体および局部的損傷の三次元的な寸法の測定と損傷の進行挙動の観察も可能となった。

また、試験片の表面損傷、内部損傷および破面の観察には、必要に応じて光学顕微鏡、走査型顕微鏡を併せ用いた。

3 実験結果および考察

まず、平織の 1 ply 材の破壊機構について述べ、次に 6 ply の多層材について同様に検討する。

3・1 1 ply 材の破壊機構と AE 特性

3・1・1 巨視的破壊の様相と AE 挙動 Fig. 2 は R-1 材の荷重～変位曲線と AE との関係を示す。Fig. 3 は Fig. 2 中の A から F 点付近までの試験片表面の写真で、巨視的損傷過程を示す。Fig. 2 より、 $P\sim\delta$ 曲線は二つの knee 点 K_1 , K_2 で、領域 I, II, III の三つ

(1) P , (2) Total AE energy and (3) AE event count rate. $K_1: 9\% P_{MAX}$, $K_2: 60\% P_{MAX}$ Fig. 2. Load (P)～displacement (δ) curve and AE characteristics of R-1 specimen.

の部分に分けられる。

Fig. 2 において、領域 I の原点から K_1 までは、 $P\sim\delta$ 曲線はほぼ直線であり、着色法によりき裂は検出されなかった。この領域では強化材と母材とも弾性的に変化しているためと考えられる。領域 II の K_1 から K_2 までは、 $P\sim\delta$ 曲線は K_1 点の付近で、一般材料と異なる下に凸状の硬化型曲線となっている。この現象について石川らは CFRP により研究しているが、本節の 3・1・3 項で全損傷過程を考慮した上でこの現象を説明する。また、 K_2 に近づくにつれ、 $P\sim\delta$ 曲線は徐々に直線的になる。領域 III の K_2 から最大荷重点 F までは、 $P\sim\delta$ 曲線は直線から徐々に離れ、わずかな荷重降下が現れ、F 点で急に低下する。

一方、AE の事象率および総エネルギー曲線からわかるように、AE は領域 I においては全く計測されず、 K_1 点に達すると発生し始める。領域 II においては、AE 事象率は全体的に低く、不連続であるが、 K_2 になると、急に高くなり、領域 III においては、F 点までさらに高くなり続ける。AE 総エネルギー曲線も事象率と同様な傾向を示す。

Fig. 3 (a), (b) および (c) はそれぞれ領域 II の前半、後半および K_2 点の損傷を示す。図 (a) から、緯糸上のき裂がランダム発生するのがわかる。図 (b) から、そのき裂は数および長さが増加し、試験片全体の交差点の緯糸上にきわめて多くなり、さらに、M で示す複数のき裂および N で示す長いき裂が観察される。これらの緯糸上のき裂は緯糸内の界面はくりの発生により生じ、さらに K_2 点では、図 (c) の矢印で示す鎖状の規則的なき裂も二本の緯糸の間の樹脂部に現れたが、この現象は樹脂割れと考えられる。また、その樹脂割れの発生する K_2 点が AE の急増点とほぼ一致することを確認している。つぎに、図 (d) と (e) はそれぞ

Fig. 3. Failure behaviors of R-1 specimen observed from surface.

れ領域Ⅲの中間および最終破壊直前のものであり、それらより樹脂割れの数が試験片全体に密になるまで増加し、また、樹脂割れと経糸の交差上で糸間^{*1}はくりが樹脂割れに伴って生じていることがわかる。図(f)は破断部のもので、破断が図の左から右へ広がっているのが観察される。また、実験中の試験片の側面観察より、 K_1 点近傍から経糸の直線化による面外変形も見られた。

それで、領域Ⅱにおいては、緯糸内の界面はくりが支配的な損傷モードで、領域Ⅲにおいては、樹脂割れおよび糸間^{*1}はくりが支配的な損傷モードであることがわかる。

以上のことから、 P - δ 曲線の K_1 および K_2 点はそれぞれ AE の開始および変化に関係し、AE の事象率や総エネルギー曲線の様相は損傷の開始、各荷重段階の支配的な損傷モードの変化をよく反映していることがわかった。

3・1・2 微視的破壊機構 R-1 材の緯糸の界面は

*1 経糸と緯糸の間の局所的はくりをいい、英語では Separation を使用する。

くり、樹脂割れおよびそれらによる糸間^{*1}はくり、最終破壊について微視的な考察を行う。

緯糸の界面はくりの様相は Fig. 4 の電子顕微鏡写真および Fig. 2 中の A, B, D 点での試験片の側面写真 (Fig. 5) で示す。Fig. 5 の左図は観察図、右図は説明のための模式図である。Fig. 4 はき裂が緯糸内の繊維と樹脂の界面を走っており、Fig. 5(a) はき裂が表面と

Fig. 4. Microfractograph of the debonding in weft for R-1 specimen.

Left: photographs, right: schematic of photographs.

(a) $P=P_A$, (b) $P=P_B$, (c) $P=P_D$.

Fig. 5. Failure behaviors related with the debonding in weft observed from side for R-1 specimen.

交差点の内部の経糸に達してから、図 (b) のように経糸に沿って交差点の外へ向く糸間はくりを引き起こしている様相を示している。図 (c) から Fig. 3 (b) の M で示すような同一の交差点で複数の緯糸の界面はくりがある場合も同様な挙動を示すことがわかる。また、隣接する同一緯糸上の二つのき裂（紙面に対して垂直方向に表き裂と裏き裂と名付ける）がそれぞれの交差点の中心より緯糸に沿って両側に進展し、互いに合体すれば Fig. 3 (b) 中の N で示す長い界面はくりになると考えられる。

樹脂割れの表面の様相および模式図はそれぞれ Fig. 6 (a), (b) で示す。図 (b) 中の実線は表き裂（界面はくり、樹脂割れ）に、破線は裏き裂に対応し、矢印はそれらの進展方向を示す。図 (b) では樹脂割れが交差点の経糸が緯糸下にくぐる手前の樹脂リッチ部では正弦波のように生じ、ほぼ両側の経糸との境界部まで広がり、幅方向に同様な位置のこのような樹脂割れが互いに合体すれば、全体的に一つの正弦波の様なき裂になる。Fig. 3 (c), (d), (e) 中の鎖状き裂はすべてこのような部分的な樹脂割れが合体したものと考えられる。正

(a) Formation of matrix cracking ($P=P_D$).

(b) Schematic of (a).

Fig. 6. Surface observation of the matrix cracking for R-1 specimen.

Fig. 7. Separation pattern observed from side for R-1 specimen.

弦波ではなく、鎖状に見えるのは図(b)からわかるように試料の裏面に同様な樹脂割れが起きているからである。したがって、隣接する経糸境界部が表面と裏面の樹脂割れの連結により、表面と裏面を貫通するもう一つの経路であると考えられる。そこで、 K_2 点手前から、表面に入れたインクが裏面からもでてくる現象はインクが図(b)中の円Aで囲む二つの経路を通じて浸透したと考えられる。

糸間はくりの表面の様相を Fig. 6(a) に示したが、側面の様相および模式図はそれぞれ Fig. 7(a), (b) で示す。図(b)から、樹脂割れに伴う糸間はくりは樹脂割れと経糸の交差上から交差点の内部に向き、Fig. 5(b) に示す界面はくりによる糸間はくりと合体する方向に進展することがわかり、糸間はくりは緯糸の界面はくりと樹脂割れに起因することが明らかである。

Fig. 8 は破断部近傍の様相とその模式図で、図(a)より破断後でなければ見られない隣接する経糸の境界部に、荷重方向に対しほぼ 45° 方向(右上方向)に樹脂のき裂が多く観察される。これは最終破壊時に繊維の一部の破断による応力の再分布が経糸間の樹脂部を通じて行われるためと考えられ、図(b)に示す隣接の経糸の応力の不均一により引き起こされた樹脂のせん断破壊によるものと考えられる¹²⁾。また、これらのき裂方向から、Fig. 3(f) および Fig. 8(a) 中の主き裂が左から右へと進展していると考えられる。

以上のことから、各損傷モードとその累積過程が平織の織り構造に強く依存することがわかった。

3・1・3 負荷過程での剛性変化 ここで、以上の損傷挙動に基づき、 $P \sim \delta$ 曲線の傾きの変化について定性的に検討する。

Fig. 8. A pattern of final fracture for R-1 specimen.

P- δ 曲線の傾きは二つの背反因子が寄与し、それらの相対的な強弱により、P- δ 曲線の形が決められると考えられる。すなわち、 K_1 点から経糸の直線化による傾きの増加と損傷による傾きの低下による。損傷は領域Ⅱの K_1 点付近から緯糸のき裂として生じ、 K_2 点に近づくにつれて多くなり、 K_2 点から破断まで樹脂割れと糸間はくりも多くなる。両方を考え合わせると、 K_1 点付近では繊維の直線化の寄与が大きく、P- δ 曲線が下に凸状になり、 K_2 点前までは繊維の直線化に損傷が加わりほぼ直線になると考えられる。しかし、 K_2 点からは損傷の方が主となり、領域Ⅲにおいて P- δ 曲線は直線から離れる傾向を示すと考えられる。また、小さな荷重降下は樹脂割れおよびそれに伴う糸間はくりの瞬間的な発生に対応すると観察された。

なお、AE とき裂の進行状況についての定量的な評価は興味があり、今後の課題と考えている。

3・2 多層材の破壊機構と AE 特性

3・2・1 巨視的破壊の様相と AE 挙動 Fig. 9 は R-6 材の P- δ 曲線と AE との関係を示す。Fig. 10 は P- δ 曲線の A から D 点までの試験片表面の写真で、巨視的損傷過程を示す。これらの図より、多層材の P- δ 曲線の形状、AE 挙動および損傷過程は R-1 材のものとはよく似ている。すなわち、P- δ 曲線上に二つの knee 点 K_1 、 K_2 点があり、それぞれ AE の開始および急増点となる。領域Ⅱおよび領域Ⅲにおける支配的な損傷モードはそれぞれ緯糸の界面はくり、樹脂割れおよび糸間はくりであり、Fig. 10 (d) の主き裂が左から右へと進展していることがわかる。

3・2・2 微視的破壊機構 R-6 材においては、AE の急増点となる K_2 点では樹脂割れの発生だけではなく、Fig. 10 (b) 中の矢印 A で示すような模様が先に生ずる場合もあることが観察された。その後、領域Ⅲにおいては、その模様の数がある程度増加した後、図 (c) 中の矢印 B 点に示すような模様が生じ、ほとん

(1) P, (2) Total AE Energy and (3) AE event count rate.
 K_1 : 10 % P_{MAX} , K_2 : 65 % P_{MAX} .

Fig. 9. Load (P)-displacement (δ) curve and AE characteristics of R-6 specimen.

どの交差点の上にきわめて多くなってから最終破壊に至る。それらの表面模様について観察を行ったところ、それらは糸間はくりで、二つの場合があることがわかった。一つの場合は R-1 材の Fig. 5 (b) に似ており、 K_2 点前からみられた緯糸上のき裂で、Fig. 11 (a) に示すように、緯糸の界面はくりによる糸間はくりが交差点の内部から経糸および緯糸に沿って、交差点の外まで樹脂割れより先に進行すれば、表面から Fig. 10 中の矢印 A で示すような模様がみられる。他の場合は R-1 材の Fig. 7 に相当し、 K_2 点後にみられた緯糸の端から発するき裂で、Fig. 11 (b) に示すように、積層材の内部の樹脂割れによる糸間はくりが交差点内部まで進行すれば、Fig. 10 中の矢印 B で示す表面から前者よりやや大きな模様が見られる。

1 ply 材と多層材の比較は、巨視的考察のように P- δ 曲線の形状、AE 挙動および損傷過程の比較で述べたが、微視的考察の結果も総合すると、多層材の内部層は 1 ply 材とよく似ている挙動を示す。しかし、多層材の糸間はくりの進展および表面の模様は 1 ply 材と少し異なる場合があるようである。

Fig. 10. Failure behaviors of R-6 specimen observed from surface.

Fig. 11. Schematic of surface patterns for R-6 specimen.

4 結 言

平織ガラスロービングクロス積層材の破壊機構を、特に AE 法による AE パラメータと損傷過程の関係およびインク着色法を用いて損傷モードと織り構造の關係に着目して研究し、次の結論を得た。

(1) 平織ガラスロービングクロス積層材の荷重～変位曲線は弾性過程、緯糸の界面はくりとその累積過程、樹脂割れおよび糸間はくりとその累積過程の三つの領域に分けられる。なお、これらの損傷モードおよび累積過程は平織の織り構造に強く依存し、積層板の ply 数には余り関係がないようである。

(2) その三つの領域の境界は AE の初生点と急増点に関係し、各領域の支配的な損傷モードの変化は、AE 事象率や総エネルギー曲線の様相により見出される。

おわりに、本研究に対し供試材を提供していただいた日本硝子繊維(株)、そして、実験に協力して下さいった京都工芸繊維大学 4 回生の森本政幸、田野俊昭の両君に感謝致します。また、貴重な文献を御送付下さった東京大学工学部金原勲教授ならびに同志社大学工学部平井恒夫教授に併せて厚くお礼申し上げます。

(昭和63年 3 月 23 日 第17回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) M. B. Desai & F. J. McGarry, ASTM Bulletin, 238, 76 (1959).
- 2) I. Kimpara, A. Hamamoto and M. Takehana, Trans. JSCM, 3, 21 (1977).
- 3) 金原 勲, 強化プラスチック, 18, 7 (1972).
- 4) 平井恒夫, 藤原庄一, 大槻茂寿, 日本機械学会論文集 (第1部), 37, 1828 (1971).
- 5) 藤原庄一, 平井恒夫, 大槻茂寿, 日本機械学会論文集 (第1部), 39, 2667 (1973).
- 6) T. Isikawa and T. W. Chou, "Progress in Science and Engineering of Composites", ICCM-IV, p. 489 (1982) Tokyo.
- 7) T. Isikawa and T. W. Chou, J. Comp. Mat., 17, 399 (1983).
- 8) 吉野利男, 大塚年久, 日本機械学会論文集, A-51, 611 (1975).
- 9) 鈴木 恵, 中西 博, 岩本正治, 自念榮一, 前川善一郎, 森 旭, 孫 峰, 日本機械学会論文集, 53, 1459 (1987).
- 10) 孫 峰, 鈴木 恵, 中西 博, 岩本正治, 自念榮一, 材料, 37, 21 (1988).
- 11) 石川隆司, 松嶋正道, 林 洋一, 第27回構造強度に関する講演会前刷, 320 (1985).
- 12) D. Purslow, Composites, 17, 289 (1986).