ガラス/エポキシ積層板の破壊じん性に及ぼす 板厚・試験片寸法の影響について†

川 田 宏 之* 大 塚 敏 弘*
梶 谷 正** 林 郁 彦***

Effects of Thickness and Specimen Size on Fracture Toughness of Glass/Epoxy Laminates

by

Hiroyuki KAWADA*, Toshihiro OTSUKA*, Tadashi KAJITANI**
and Ikuhiko HAYASHI***

Three points bending tests were conducted on specimens of plain woven glass cloth/epoxy laminates (fiber volume fraction ≈ 0.4) with notch and R curves were obtained. The effects of the thickness and the size of the specimens on the fracture toughness were investigated. The crack propagation was experimentally observed with the ink method. The electric potential method and the acoustic emission method were carried out to detect the initiation of the crack. In this study, the validity of these nondestructive inspection method was examined corresponding to the load-displacement curves.

The following results were obtained: (1) the effect of the thickness on the fracture toughness was less than that of the specimen size, (2) the outputs in the electric potential method were correlatable with the initiation of the damage and the propagation of macroscopic crack, and classified into three distinct patterns and (3) AE counts gave so much information for the fracture behavior in such a way that the initiation of the damage and the proportional limit corresponded to the initiation and the rapid increase of the AE event counts, respectively.

キー・ワード：複合材料，破壊じん性，き裂進展抵抗曲線，電位差法，AE 法

1 緒 言

切欠きを有するガラス/エポキシ複合材料の破壊は切欠き近傍の損傷が複雑であり，不安定破壊に至るまでに相当量の安定き裂成長があることが知られている。近年，破壊力学の体系化にともない複合材料に対する適用が試みられ，安定き裂の発生点に着目した研究や，不安定き裂が伝ばするときの破壊じん性値を対象とした研究がなされている。B. D. Agarwal¹⁾らはコンプライアンスの変化からき裂の進展量を算出し，鈴木らは着色法によりき裂進展量を求め，それぞれき裂進展抵抗曲線（ R 曲線）を得ている。

一方， R 曲線を求めるのには多数本の試験片を必要とするのに対し，電位差法，AE 法は一本の試験片により破壊開始点を決定できる非破壊検査法であり，金属材料を中心にその適用が議論されている。複合材料では導電材である CFRP において電位差法の適用例

があるが²⁾，不導電材である GFRP にはその例がない。AE 法においては，その原理から複合材料に用いられる場合が多く，破壊開始点を得ることがなされているが³⁾，界面はく離と強化材の破壊が混在する複合材料のき裂発生に関する研究への適用について，その可能性が検討され始めたばかりである。

損傷の発生後も相当量の載荷能力がある複合材料において，損傷の発生点におけるじん性値と複合材料の強化部材である繊維の破壊開始点におけるじん性値はそれぞれ最大荷重点におけるじん性値に対する安全率を示唆するものと考えられ，材料の信頼性を明らかにする意味で重要である。また，その検出方法はまちまちでそれぞれの値はどのような意味をもつのか不明な点が多い。本研究では，き裂の進展量を着色法により求め，積層枚数，試験片寸法が破壊じん性に及ぼす影響について検討し，き裂の発生および破壊開始点をと

† 原稿受理 昭和59年6月11日 Received June 11, 1984

* 学生会員 早稲田大学大学院 東京都新宿区大久保, Graduate School, Waseda University, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo

** 早稲田大学理工学部 (現在, (株)日立製作所), Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo

*** 正会員 早稲田大学理工学部 東京都新宿区大久保, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo

らえるのに電位差法, AE 法で調査する. 各手法についてそれぞれ荷重-荷重点変位曲線と対応させ, その有効性を吟味する.

2 実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材は母材にエポキシ樹脂, 強化材として目抜き平織ガラスクロスである. 板厚が破壊じん性に及ぼす影響を調べる目的で2種類の板厚を設定し, 繊維体積含有率をほぼ一定 ($V_f \approx 0.4$) にした. その機械的性質を Table I に示す. また, スパン長さの影響を調べるために2種類の3点曲げ試験片 (3PB 試験片と略記) を用いた. Fig. 1 に試験片形状と Table II に寸法の組合せを示す. 積層板から切り出す際に強化材のたて糸方向が試験片長手方向になるようにした. 試験片はすべて EW 試験片とし, 予き裂は刃幅 0.38 mm のダイヤモンドカッターを使用し, 切欠き深さは $a/W = 0.5$ 一定とした.

Table I. Mechanical properties of specimens.

Young's modulus E (GPa)	Knee point stress σ_{knee} (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation ϕ (%)
20.0	68.4	247	1.47

Fig. 1. Dimension of specimen.

Table II. Variation of specimen size (three points bending).

3PB	S	L	B	W
3 PB (30 ply, $S=40$)	40	60	6	10
3 PB (50 ply, $S=40$)	40	60	10	10
3 PB (50 ply, $S=80$)	80	120	10	20

2.2 実験方法

試験機は島津 オートグラフ IS-5000 を使用し, 負荷速度 0.5 mm/min 一定の条件下で荷重-荷重点変位曲線を求めた. 3点曲げ試験の圧子点の直径は 10 mm とし, スパン長さは 40 mm, 80 mm の2種類である. 実験は恒温室にて行い, 雰囲気は温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度 $50 \pm 5\%$ 一定とした. 樹脂の透明度を利用して透過光による写真撮影を実験の各段階で行って, 損傷領域を観察した. J 値の計算は次式を用いた.

$$J = 2A/Bb \quad (\text{Rice の簡便式})$$

ここで, A は荷重-荷重点変位曲線が囲む面積, B

は試験片厚さ, b はリガメント長さである. R 曲線⁵⁾は鈴木らの手法を参考にして行った. あらかじめ試験片を多数本 (10本以上) 用意しておき, 所定の荷重まで負荷し荷重を20%除荷する. インクを予き裂底より注入し約1分間浸透させる. 荷重を下げ充分乾燥した後, 着色された部分のスケッチを行う. 画像処理装置により面積を求め, 板厚で除すことにより平均き裂長さ Δa を算出した. それぞれの荷重-荷重点変位曲線と Δa より R 曲線を得た.

2.3 非破壊検査法によるき裂の計測法

着色法によりき裂長さを求める方法は正確な R 曲線を求められるが, 多数本の試験片が必要である. したがって, 1本の試験片でそのじん性値が得られる簡便法の開発は重要な課題であろう.

電位差法を不導電材に適用するにあたって, 試験片表面に金を蒸着 (厚さ $1.0 \sim 1.5 \times 10^3 \text{ \AA}$) し, 試験片表面におけるき裂の計測法を考案した. 電流, 電圧端子の取付け位置を Fig. 1 に示し, 計測システムのブロック図を Fig. 2 に示す. 付加する電流は約 10 mA 一定であり, 直流増幅器により出力を増幅し X-Y レコーダにて記録した. 本研究において, 蒸着された金の厚さが比較的薄いために抵抗値は約 2Ω と大きく, 安定した出力が得られた. 電流を流すことによる発熱の影響, 金の蒸着による強度への影響は無視しうる.

AE 法は Physical Acoustic Corporation 社のモデル 3400 を使用した. 計測システムを Fig. 3 に示す. センサは PZT 素子からなる低周波用の 150 kHz 共

Fig. 2. Block diagram of electric potential difference method.

Fig. 3. Block diagram of acoustic emission method.

振型のものを2個使用した。センサを試験片に取付けるのに真空用グリースを使用し、負荷治具と試験片との摩擦を防ぐためにテフロンテープを使用した。本研究では、検知したAE信号は前置増幅器、帯域ろ過器、主増幅器により40 dBの利得を得た。計測するAEパラメータはイベント、エネルギー計数を測定項目とした。

3 実験結果および検討

3・1 破壊様相

Fig. 4に3点曲げ試験における荷重-荷重点変位曲線（以降、荷重-変位曲線と略す）および透過光による

Fig. 4. Load-load point displacement curve and photographs showing damage at notch root.

る予き裂近傍の損傷領域の写真とその顕微鏡写真を示す。図中の各点は写真撮影を行った点と対応している。図より最大荷重の約25%のところで微視き裂が発生している。この微視き裂はたて繊維あるいはよこ繊維に沿う母材との界面はく離である（a点）。荷重-変位曲線は界面はく離の発生後も最大荷重の約67%まで線形性を保つ。その線形性を保つb点はその比例限界である。顕微鏡写真よりたて繊維の一部は破断しているが、繊維束単位の引抜きをともなった破断は生じていない。c点は最大荷重の直前に一時的に荷重が低下する点である。たて繊維束内を安定に伝ばしていたき裂が不安定に繊維束内を進展するために生じた現象であり、顕微鏡写真では明りょうな繊維束の引抜きが観察される。d点は最大荷重点であり不安定き裂伝ばの開始点である。

3・2 き裂進展抵抗曲線

着色法によって平均き裂長さを求め、それを基盤としたR曲線をFig. 5に示す。本実験に入る前にき裂のいろいろな着色方法を吟味した。除荷後、破面を露出させスケッチを行う際に比較的着色された部分の輪郭が明りょうであった製図用の赤色インクを着色剤として使用した。図より板厚、試験片寸法によらず、R曲線はほぼ直線として近似できることが分る。本実験の範囲内で、スパン長がR曲線の折れ曲り点の存在に及ぼす影響は認められなかった。R曲線の傾きに注目すると3点曲げ試験片では、ほぼ等しくなっていることが分る。

3・3 積層枚数、試験片寸法の影響

積層枚数、試験片寸法の破壊じん性値に及ぼす影響について検討するために、荷重-変位曲線の比例限、不安定き裂の発生点である最大荷重点におけるじん性値をそれぞれ $J_{p.l.}$ 、 J_c としてTable IIIに示す。本研究では、主き裂の発生を支配するものとして強化部材であるたて繊維の破断を考えた。すなわち、供試材のような $0^\circ/90^\circ$ クロス積層材の場合、試験片長手方向に配列されたたて繊維が荷重の大部分を支え、その破断が破壊へ導くと考えるのが合理的であろう。 $J_{p.l.}$ は界面はく離もしくは母材の破壊から繊維破断へと進んだ遷移点であると考えられよう。

Table IIIより、同じ試験片寸法 ($S=40$ mm) について積層枚数によるじん性値への影響を比較すると、比例限におけるJ値 ($J_{p.l.}$) は積層枚数の少ない試験片の方がやや低い値を示しているが、最大荷重点におけるJ値 (J_c) はほぼ等しい。比例限におけるじん性値は最大荷重点のそれと比べてばらつきが大きいことが表より分る。これは荷重-変位曲線上において比例限は判別しにくく、また予き裂の繊維束配置に影響されたためにばらついたものと思われる。本研究の複合

Fig. 5. R curves for three points bending specimens.

材料のように繊維と母材との界面強度が著しく低い材料において、比較的低い荷重で局所的な積層板の層間にはく離が生じるため、本研究の積層枚数の範囲内では、積層枚数の影響は少ないと考えられる。さらに、同じ積層枚数を有する試験片に対して試験片寸法が破壊じん性値に及ぼす影響について調べると、試験片寸法の小きな方が最大荷重点における J 値はやや高い値を示していることが表より分る。これは、試験片寸法の増

Table III. Fracture toughness values of three points bending specimens.

Type of specimen	$J_{p.L.}$ (kJ/m)	J_c (kJ/m)
3 PB (S=40, 30 plies)	6.27	30.0
	6.37	27.6
	7.45	27.8
	8.92	29.8
	6.17	30.0
	8.13	25.7
	8.33	28.5
Average	7.38	28.5
3 PB (S=40, 50 plies)	9.02	26.6
	9.53	28.4
	7.64	27.9
	8.04	30.9
	8.72	29.5
	6.37	28.5
	9.51	26.3
Average	8.40	28.3
3 PB (S=80, 50 plies)	9.80	28.7
	7.45	26.0
	7.74	27.3
	9.60	26.9
	9.80	27.2
	11.6	27.0
	10.0	25.6
Average	9.43	27.0

大にともない損傷領域が、試験片寸法に比べて小規模になるためであると考えられる。一方、比例限における J 値は、積層効果を議論したときと同様にばらつきを示していることが分る。本研究では、表に示したような実験結果になったが、比例限におけるじん性値に関する寸法効果の厳密な議論はできない。前述の R 曲線による結果では、これらの違いはき裂長さの平均値を測定しているため、反映されなかったと考えられる。

3・4 非破壊検査法によるき裂の計測

本研究では、単一試験片による複合材料のき裂検出法を吟味し、たて繊維の破断をとまう主き裂の発生、あるいは巨視き裂の発生を非破壊的に検出する合理的な手法について検討する。

3・4・1 電位差法による検討 電位差法を3点曲げ試験において適用した。荷重治具と蒸着面との接触による短絡を防ぐために、Fig.1の斜線の領域に限定して金を蒸着した。Fig.6はFig.1に示した入出力端子位置によるき裂長さ¹⁰⁾と電位差の変化を較正曲線として示したものである。次式は等角写像法による片側き裂付平板における解析解であり、図中に実線でその結果を示した。

$$V(a)/V(a_0)$$

$$= \cosh^{-1} \left(\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a/2W)} \right) / \cosh^{-1} \left(\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a_0/2W)} \right)$$

ここで、 $V(a)$ はき裂長さ a のときの電位差、 $V(a_0)$ はき裂長さ a_0 のときの電位差、 W は板幅として y は

Fig. 6. Calibration curve for electric potential difference method.

き裂中央から電圧端子までの距離である。Fig. 6 に示した較正曲線を得るために、き裂は予き裂からカッターナイフにより表面をけがくことで進展させた。図より本研究で設定した入力端子の位置でほぼ理論値と実験値が一致していることが分る。表面におけるき裂の計測を行うにあたり、内部と表面のき裂進展の様相の対応関係は重要である。そこで、き裂前縁の様子を先の着色法により着色された領域として Fig. 7 に示す。これより、き裂前縁の形状は複雑であり凸凹を示しているが、板厚方向の最弱部で発生したき裂が連結すれば、板幅方向に一樣に進展しており、積層材における表面でのき裂計測は傾向として内部のき裂と対応している。

Fig. 7. Fracture surface.

Fig. 8~10 にスパン長さ 80 mm, 積層枚数 50 層の代表的な荷重-変位曲線, 電位差変化を示す。初期の電位差の変化に着目してみると、肉眼で観察された損傷の発生時期とほぼ対応して電位差の増加が生じていることが分る。切欠き先端の樹脂部の変形に対応して電位差がほとんど増加しない理由として、蒸着された金の厚さが薄くなおかつ母材はぜい性材であるために、変形による電位差の変化は、微視き裂の発生によるそれに比べて無視できるほど小さいことによるためであると考えられる。Table IV に損傷の発生に対応する J 値を J_{in} として示す。着色法によって得られた R 曲

Fig. 8. Load and electric potential difference ratio vs. load point displacement.

Fig. 9. Load and electric potential difference ratio vs. load point displacement.

Fig. 10. Load and electric potential difference ratio vs. load point displacement.

Table IV. Comparison of J values.

Type of specimen	$J_{in}(EP)$ kN/m	J_{in} kN/m	dJ/da MN/m ²
3 PB (30 ply, S=40)	1.5	1.1	47
3 PB (50 ply, S=40)	1.8	1.3	46
3 PB (50 ply, S=80)	1.9	1.3	46

線から $\Delta a \rightarrow 0$ として求められる J_{in} と電位差法によって測定される $J_{in}(EP)$ の値を比較すると、後者の方が高めの値を示していることが分る。これは、R 曲線が平均き裂長さを採用していることと、損傷の発生点として $\Delta a \rightarrow 0$ を仮定しているためであり、結果として低めの値を示したのと考えられる。

損傷の発生点 (図中, initiation) から不安定き裂の発生点 (図中, u. f.) までは安定き裂の発生点もしくはそれに伴うサブクラックの発生とみなせる電位差のジャンプする点を各図に矢印で示した。同じ種類の試験片形状に対して少なくとも15本の試験片に対して実験を行ったが、電位差の変化は試験片寸法、積層枚数が変わっても本研究の範囲内ですべて3種類のタイプに分類された。

電位差法によって得られた出力結果の分類を考える。(i) 損傷の発生点における挙動である。三つのタイプの中で、タイプⅡだけが顕著な立ち上がりを示しており、他の二つと区別される。(ii) 比例限あたりの電位差のジャンプする点の頻度の高いものとそうでないものの区別である。その結果、タイプⅢとⅠが区別される。図に破線で示したように、比例限を過ぎたあたりに電位差の巨視的な増加率が変化する点 (図中, P) が存在するが、その増加の割合の大きなものとそうでないものの違いは、先の電位差のジャンプ点の頻度と逆の対応を示した。以上の手順でもって、電位差法によって得られた結果をすべて3種類のタイプに分類することができた。予き裂近傍の試験片表面における繊維束配置と電位差の出力パターンとの対応関係を調べる。実体顕微鏡にてあらかじめ予き裂が最初に位置する繊維束配置の状況をスケッチしておき、実験を行った。その結果、予き裂が位置する繊維束配置と電位差の出力パターンは相関があることが分った。すなわち、タイプⅠは樹脂部、Ⅱはよこ繊維束、Ⅲはたて繊維束にそれぞれ予き裂の先端が位置して、予き裂から発生した界面はく離が、よこ繊維に沿う (タイプⅡ) か、たて繊維に沿う (タイプⅢ) かで電位差の出力パターンが特徴づけられる。タイプⅠは両者の混合型となっている。

さらに、得られた対応関係と電位差の出力パターンの特徴を吟味する。タイプⅡのように、よこ繊維に沿う界面はく離はモードⅠの開口型であり、その発生に伴う電位差の変化は、たて繊維に沿う界面はく離に比べてより顕著であると思われる。また、電位差のジャンプする点の頻度がタイプⅢにおいて多くなる理由は、予き裂から発生するサブクラックとたて繊維を破断する回数がすべてのタイプの中で最も多いことによるためであると考えられる。図より明かなように、すべてのタイプで比例限前後で電位差のジャンプ点が集中

し、比例限を少し過ぎたあたりに電位差の増加率が変化する実験結果は先の顕微鏡観察と良い対応を示している。

3・4・2 AE 法による検討 本研究で用いた電位差法では、試験片表面におけるき裂の発生を検出しているため、予き裂底の繊維束配置の影響を受けてしまい、試験片内部の微視的破壊様相を直接にとらえられない。そこで、金属材料の破壊じん性試験において、非破壊検査法の一つとして成果を上げている AE 法を用いて、荷重-変位曲線と微視的破壊様相との対応関係を調べる。本研究で使った AE センサは直径が $\phi 17.4 \text{ mm}$ のものである。センサが取り付け可能な試験片はスパン長 80 mm (50 層) のものであるために1種類の試験片を実験の対象とした。しきい値の設定は白色雑音が感知されない値とした。本研究では、AE 出力が突発型 AE 波形となることが予備実験において確認されたため、AE 事象計数と AE エネルギー計数の変化をとり上げた。

Fig. 11 に荷重-変位曲線とそれに対応する AE 事象計数、AE エネルギー計数の変化を示す。事象計数の変化に着目すると先に見られた電位差の変化と良い対応を示していることが分る。すなわち、損傷の発生と同時に事象計数が発生し、荷重-変位曲線の比例限あたりに急増する傾向を示している。電位差の変化が表面におけるき裂を計測したため予き裂底の繊維束配置の影響を受けたのに対し、AE 法から得られた事象計数の変化は、試験片全体の微視的破壊を検知するために試験片の違いによる明らかな差異がなく、また、電位差法で得られたような三つの出力パターンは AE 法では得られなかった。一方、エネルギー計数の変化に着目してみると、最大荷重の直前に一時的な荷重の低下が生じる。いわゆる繊維束単位の引抜きを伴った巨視き裂の進展時期から急激な立ち上がりを示していることが分る。

Fig. 11. Load-displacement curve and AE parameters.

4. 結 言

予き裂を有するガラス/エポキシ積層板の破壊じん性試験を行い、き裂の進展量を着色法により求め、 R 曲線を得た。破壊じん性に及ぼす積層枚数、試験片寸法の影響について検討し、さらに、非破壊検査法である電位差法、AE 法にてき裂の発生、進展の計測を行い吟味し、以下の結論を得た。

(1) 着色法により求めたき裂長さから R 曲線が得られ、損傷の発生点を $\Delta a \rightarrow 0$ のときの値として定義すると、そのときの J 値は積層枚数、試験片寸法によらずほぼ等しい。 R 曲線の傾きは、本研究の範囲内ではほぼ同じとなったが、個々の破壊じん性試験の結果、本研究の範囲内では積層枚数の影響は少なく、試験片寸法の影響をうけていることが分った。

(2) 電位差法を積層板の破壊じん性試験に応用し、試験片表面でのき裂計測を行った。表面においてき裂を計測しているため、損傷の発生は R 曲線のそれより高めの値を示した。また、損傷の発生、巨視き裂の進展に伴い電位差の変化が得られ、3 種類のタイプに分類され、予き裂底の繊維束配置との対応が得られた。

(3) AE 法により損傷の発生点、荷重-変位曲線の比例限に対応して事象計数の発生、急増が生じ、最大荷重点の直前にエネルギー計数の急増点が観察された。

(4) 電位差および AE 法はそれぞれ試験片表面、内部の微視的破壊様相を反映した出力結果を得た。それらの結果は、微視的観察との対応ができ、破壊の様相がより明らかとなった。

終りに、本研究の遂行にあたり、電位差法によるき裂計測について有益なご教示をいただいた東京衡機製造所(株)の藤井勉博士、AE 法でお世話になった伊

藤忠データシステム(株)、材料を提供して下さった旭ファイバーグラス(株)、油化シェルエポキシ(株)、日立化成(株)に心から謝意を表する。

(昭和59年3月23日 第13回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 座古 勝, 森 孝男, 三好俊郎, 日本機械学会論文集, **45**, 726 (1979).
- 2) 鈴木 恵, 岩本正治, 村田泰清, 桐村和行, 日本機械学会論文集, **47**, 603 (1981).
- 3) 鈴木 恵, 岩本正治, 前岡 正, 日本機械学会論文集, **47**, 10 (1981).
- 4) S. Gaggar and L. J. Broutman, Journal of Composite Material, **9**, 216 (1975).
- 5) 鈴木 恵, 岩本正治, 桐村和行, 田中信和, 日本機械学会論文集, **49**, 480 (1983).
- 6) B. D. Agarwal and G. S. Giare, Fibre Science and Technology, **15**, 283 (1981).
- 7) 影山和郎, 野中勝信, 日本機械学会講演論文集, No. 840-2, p.155 (1984).
- 8) H. Sekine, K. Shimomura, H. Takahashi and K. Fujino, First International Symposium on Acoustic Emission from Reinforced Composite, Session 3 (1983).
- 9) 日本機械学会編, “弾塑性破壊靱性 J_{Ic} 試験方法”, p. 80 (1981) 日本機械学会.
- 10) 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄, “数値破壊力学”, p. 239 (1980) 実教出版.
- 11) H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin, “The Stress Analysis of Cracks Handbook” (1973) Del Research Corporation.