研究論文

積層板のモード I 層間破壊靱性試験

影山 和郎*, 小林 孝行**

(1986年8月8日受付)

An Interlaminar Fracture Toughness Test in Mode I
for Composite Laminates

K. Kageyama* and T. Kobayashi**

(Received August 8, 1986)

Linear elastic fracture mechanics is applied to estimation of interlaminar fracture toughness of carbon fiber reinforced composite laminates. Energy release rate approach to double cantilever beam (DCB) specimen is investigated analytically and experimentally. Configurations of specimen and loading system are considered and a new DCB specimen is proposed. Deformation and energy release rate of the DCB specimen is analyzed numerically by using finite element method, and polynomial expressions of compliance and energy release rate, as the functions of crack length, are obtained. Compliance method based on the analysis is successfully applied to mode I interlaminar fracture toughness test. Unidirectionally reinforced carbon/epoxy laminates used for the test. Initial interlaminar crack is introduced mechanically and effect of crack width is examined. The applicability of analytical equations of compliance is examined experimentally. Agreement of the analytical and the experimental results are excellent. The critical energy release rate in mode I crack propagation is measured automatically by using the compliance method. The results are compared with those of the conventional method. The accuracy is improved remarkably.

1. 緒 言

積層板の層間剝離強度の評価には、従来ショートビーム三点曲げ試験法あるいは段違い切欠き圧縮／引張り試験法が一般的に用いられている。しかし近年破壊力学の立場から、亀裂進展抵抗値としてのエネルギー解放率の限界値 G_{Ic} を用いて層間剝離強度を評価する方法が試みられるようになってきた¹⁻⁶⁾。本研究では積層板のモード I 層間引張り亀裂進展抵抗（本報では混乱を生じない範囲で以後モード I 層間破壊靱性と呼ぶことにする）を、DCB (double cantilever beam) 試験片を用いて評価す

る方法について実験と解析の両面から検討した。

G_{Ic} の整理方法としては、実験的に求めた荷重、コンプライアンス対亀裂長さの関係を用いる方法²⁾、荷重-変位曲線の面積を用いる方法⁶⁾などが提案されている。前者は亀裂進展中 G_{Ic} が一定であることを仮定し、その平均値を求める方法で、亀裂進展過程における G_{Ic} の変化を測定するのにはむいていない。また両方法では進展中の亀裂長さを実測するが、その読取誤差と亀裂前縁の彎曲に起因する亀裂長さの測定誤差が G_{Ic} の結果に大きく影響する。

本報ではこれらの問題点を解決しうる方法として、解析的コンプライアンス法を提案する。本方法は解析的に求めたコンプライアンス（開口変位／荷重）と亀裂長さの関係式を用い、実験で測定したコンプライアンスから亀裂長さ a と G_{Ic} を計算で求める方法である。亀裂長さを実測する必要がなく、亀裂前縁の彎曲に対してはその平均的亀裂長さが測定できる可能性がある。

本方法に適した DCB 試験片を新たに開発するとともにその試験片を有限要素法を用いて詳細に解析し、コンプライアンスと亀裂長さの精度の高い関係式を得てい

* 機械技術研究所主任研究官 (305 茨城県新治郡桜村並木 1-2)

Senior Research Officer, Mechanical Engineering Laboratory, 1-2, Namiki, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305, Japan

** 東京理科大学大学院生 (278 野田市市崎東亀山 2641)

Graduate Student, Science University of Tokyo, 2641, Yamazaki, Higashi-Kameyama, Noda 278, Japan

Fig.1 DCB specimen (L type).

Fig.2 DCB specimen (Z type).

る。カーボン/エポキシ積層板に本方法を適用してその有効性を明らかにするとともに G_{IC} の結果を得ている。

2. 供試材および試験片

2.1 試験板

試験には東レ P 305/25 プリブレグを一方に積層したカーボン/エポキシ積層板を用いた。公称板厚および公称繊維体積含有率はそれぞれ 10 mm と 60% である。実測した弾性特性は以下のとおりである。

$$E_L = 102 \text{ GPa}, E_T = 7.8 \text{ GPa}$$

$$G_{LT} = 4.1 \text{ GPa}, \nu_{LT} = 0.34$$

ただし、DCB 試験片では曲げ変形が支配的であると考え、 E_L としては四点曲げ試験で求めた値を用いている。

2.2 試験片の形状

解析のコンプライアンス法を適用するためには荷重線上の亀裂開口変位 (COD) を高精度で測定する必要がある。従来の研究では試験機のクロスヘッドの移動量を COD の代用として用いているのが大部分であるが、精度的に不十分である。本報では荷重線上の COD が直接測定できる試験片として、Fig.1 に示すような L 形アルミ板を貼付けた L 形試験片のほかに、新たに Fig.2 に示すようなピン負荷方式の Z 形試験片を開発した。Z 形試験片は L 形試験片と比較して剛性が高く、より安定した亀裂進展が期待できる。L 形タブおよび Z 形ブロックは接着剤により所定の寸法に切り出した積層板に貼り付けている。接着面の剝離を防ぐため、L 形試験片ではタブの端面に GFRP を貼り付け、Z 形試験片ではブロックの先の部分を折り曲げる工夫をしている。

2.3 初期亀裂の導入

層間破壊靱性試験では試験片にあらかじめ層間剝離亀裂を導入する必要がある。初期亀裂の導入方法としては、テフロン、アルミ箔等を用いて積層板の成形時に準備するのが一般的である。しかしこの方法はすでにある

構造物の一部から切り出した試験片に適用することはできない。この場合は何らかの方法で後から初期亀裂を導入する必要がある。より適用範囲の広い初期亀裂導入方法として、本報では砥石の厚さが約 0.8 mm の精密切断機およびナイフを用いる方法を用いている。試験片長さに対する初期亀裂長さの比 a_0/W は 0.2 を目安とした。それより短いとタブやブロックの影響が無視できなくなり、あまり長いと亀裂進展の測定可能範囲が狭くなる。

3. DCB 試験片の解析

DCB 試験片を用いた従来の研究では、初等はり理論に基づく片持ちはりの解を利用して G_{IC} を整理している。この場合、剪断変形、亀裂先端における応力集中、負荷用ブロック等の影響を考慮しておらず、コンプライアンスから直接亀裂長さと G_{IC} を求めるには、解の精度が不十分であり、実際従来の研究では本報でいう解析的コンプライアンス法を適用するにはいたっていない。均質材料からなる DCB 試験片では剪断変形と有効亀裂長さを考慮した解があるが⁷⁾、異方性の著しい複合材料積層板には適用できない。そこで本報では DCB 試験片の変形解析を異方性を考慮した有限要素法を用いて行ない、亀裂長さとコンプライアンスの間の精度の良い関係式を得るとともに、コンプライアンスからエネルギー解放率を計算する式を提案している。

3.1 有限要素解析

平面歪み状態を仮定して二次元有限要素解析を行なう。三角形定歪み要素では面内曲げ変形の解析精度が悪いので、本報では 8 節点アイソパラメトリック四角形要素を用いている。試験片の解析に先立ち、有限要素法の精度を検討するため、理論解のわかっている片持ちはりの解析を行なった。縦軸に数値誤差を、横軸に要素数の逆数を取って Fig.3 に示す。要素数 256 において誤差が 0.01% と非常に小さくなっている。本報ではこの要

Fig.3 Accuracy of numerical analysis of the cantilever beam.

素数を目安に以下の解析を行なっている。

本報で用いた Z 形 DCB 試験片のメッシュ分割を Fig. 4 に示す。L 形の場合も積層板の部分の分割は同じとした。Z 形試験片の要素数は 380、総節点数は 1,296、L 形試験片の要素数は 359、総節点数は 1,228 である。単位荷重に対する標点間 (Fig.1, 2 参照) 変位 (COD) を亀裂長 a と試験片高さ H の比 a/H が 4~16 の範囲で 0.4 刻みで計算した。積層板の部分には前述した弾性係数の実測値を、タブとブロックの部分にはアルミの弾性係数を与えた。接着層の影響は無視した。初期亀裂のスリット幅がコンプライアンスに少なからず影響を与えることがわかったので、スリット幅 0.0 mm と 0.8 mm の両方について計算した。

無次元化亀裂長さ (a/H) と無次元化コンプライアンス ($BE_L\delta/P$) の関係の計算結果を Fig.5 に示す。ここに Fig.1, 2 に示すように、 a : 亀裂長さ、 H : 試験片高さ、 B : 試験片幅、また δ : 荷重線上開口変位、 P : 荷重であり、コンプライアンス λ は δ/P である。Z 形と L 形の違い、亀裂スリット幅の影響が図より読み取れる。

3.2 多項式による表式とエネルギー解放率の計算

Fig.5 の結果より、コンプライアンスが亀裂長さに関する 3 次多項式によって精度よく近似できることがわかった。すなわち、

$$BE_L\lambda = BE_L\delta/P = A_3(a/H)^3 + A_2(a/H)^2 + A_1(a/H) + A_0 \quad (1)$$

有限要素法の結果をもとに最小二乗法によって求めた多項式の係数 $A_0 \sim A_3$ を Table 1 に示す。

Fig.4 Breakdown of the DCB specimen (Z type).

Fig.5 Results of compliance of the DCB specimens.

コンプライアンスから亀裂長さを求める場合には式 (1) を解くことによって求められるが、計算が複雑となるので、本報では亀裂長さに対しても多項式表示を用いることにする。その際無次元コンプライアンスの三乗根 $r = (BE_L\delta/P)^{1/3}$ を用いると計算結果を単純な多項式で精度よく表わせることを見いだしている。すなわち、

$$a/H = C_3 r^3 + C_2 r^2 + C_1 r + C_0 \quad (2)$$

多項式の係数 $C_0 \sim C_3$ を A_i と同様に最小二乗法を用いて求めた結果を Table 2 に示す。

コンプライアンス λ とエネルギー解放率 G の間には次式の関係がある。

$$G = (P^2/2B)(\partial\lambda/\partial a) \quad (3)$$

したがって式 (2)、(3) よりエネルギー解放率がコンプライアンスの関数として次式で与えられる。

$$G = \frac{3}{2ELH} \left(\frac{P}{B} \right)^2 \frac{r^2}{3C_3 r^2 + 2C_2 r + C_1} \quad (4)$$

すなわち、式 (4) を用いることにより、亀裂長さを実測することなく、荷重とコンプライアンスからエネルギー解放率を評価できる。本報において提案する解析的コンプライアンス法はこの式 (4) に基づいて行なわれる。

Table 1 Coefficients A_i in Eq. (1) which give compliance.

Type	Notch width	A_0	A_1	A_2	A_3
Z	0.0	-66.69	167.8	45.67	8.194
Z	0.8	-290.2	319.3	28.92	8.777
L	0.0	-66.80	116.5	36.19	8.097
L	0.8	-311.0	257.5	20.58	8.641

Table 2 Coefficients C_i in Eq. (2) which give crack length.

Type	Notch width	C_0	C_1	C_2	C_3
Z	0.0	-2.167	0.5003	0	0
Z	0.8	-2.680	0.5341	-7.162×10^{-4}	3.928×10^{-6}
L	0.0	-1.661	0.4879	7.037×10^{-4}	-1.092×10^{-5}
L	0.8	-2.206	0.5351	-7.723×10^{-4}	5.029×10^{-6}

4. 実験方法

試験片に引張り速度 0.3 mm/分の負荷を加えながら、荷重と開口変位を測定した。荷重の測定には容量 100 kg のロードセルを用いた。開口変位の測定法として ASTM E399 規格ではクリップゲージ式の開口変位計による方法を採用しているが、この変位計はクリップの取付力が強く、その影響が無視できない。そこで本研究では標点間距離 25 mm の歪みゲージ式伸び計を Fig.1, 2 に示す位置に取り付けて開口変位を測定した。

試験片側面に白色塗料を塗布し、亀裂長さを読み取り顕微鏡によって測定しながら、所定の亀裂長さまで亀裂が進展したところで Fig.6 に示すように除荷・再負荷を行ないコンプライアンスを測定した。試験には MTS 製コンピュータ制御式電気油圧サーボ材料試験機を用いており、A/D 変換された荷重と開口変位のデータから最小二乗法によって直線のあてはめを行ないコンプライアンスを求めている。得られたコンプライアンスの実験値から式(2)、(4)を用いて亀裂長さとして G_{IC} を計算している。このようにして得られる解析的コンプライアンス法の結果と比較するため、実測した亀裂長さとして荷重-開口変位曲線を用いた面積法による G_{IC} も同時に測定している。

5. 実験結果

実験で得られたコンプライアンスと亀裂長さの実測値を、横軸に無次元化コンプライアンスの三乗根、縦軸に

Fig.6 An example of load vs crack opening displacement curve.

無次元化亀裂長さを取って Fig.7 に示す。結果は Z 形試験片の場合である。図中の実線は式(2)で与えられる解析結果である。従来の面積法と本報で提案する解析的コンプライアンス法の結果を比較するため、それぞれの方法で求めた亀裂長さとして G_{IC} の関係を Fig.8, 9 に示す。両者は亀裂スリット幅 0.8 mm の Z 形試験片の結果である。

Fig.10 にナイフで初期亀裂を導入した Z 形試験片の場合の解析的コンプライアンス法の結果を示す。以上が Z 形試験片の結果である。亀裂スリット幅 0.8 mm の L 形試験片についても面積法と解析的コンプライアンス法を比較すると Fig.8, 9 と同様な結果が得られた。ここ

Fig.7 Relation between crack length and compliance.

Fig.8 Results of interlaminar fracture toughness obtained by the optical measurement of crack length. Specimens are Z type and crack width is 0.8 mm.

では Fig.11 に解析的コンプライアンス法による亀裂長さと G_{IC} の結果を示す。

6. 考 察

亀裂長さを実測して G_{IC} を求めた Fig.8 のばらつきがかなり大きい。それは亀裂前縁の形状が直線的ではなく、表面で測定した亀裂長さが亀裂長さの平均値と異なるためと思われる。一方、解析的コンプライアンス法で求めた結果のばらつきはかなり小さい。それはこの方法では平均的亀裂長さを測定することになるためと考える。解析的コンプライアンス法と従来の面積法について亀裂進展過程で平均化した G_{IC} を比較すると両者にはほとんど差がなく、Fig.7 より式(2)の妥当性も確認でき

Fig.9 Results of interlaminar fracture toughness by the analytical compliance method. Specimens are Z type and crack width is 0.8 mm.

Fig.10 Results of interlaminar fracture toughness by the analytical compliance method. Specimen are Z type and initial crack is introduced by knife.

Fig.11 Results of interlaminar fracture toughness by the analytical compliance method. Specimen are L type and crack width is 0.8 mm.

たことより、解析的コンプライアンス法がモード I 層間破壊靱性試験においてきわめて有効な手法であると考えられる。

ナイフで初期亀裂を導入した試験片は亀裂が進展すると強化繊維のブリッジングが生じる。その結果、Fig. 10 に示すように G_{Ic} が亀裂進展とともに増加し、その値もかなり高くなる。このようにナイフによる初期亀裂導入は非安全側の評価を与えるので推奨できない。一方、スリット幅が3プライ程度に相当する 0.8 mm の場合は破面は平坦となり、亀裂長さによらずほぼ一定値の G_{Ic} が得られた。

Z 形と L 形の試験片形状の違いが G_{Ic} の結果におよぼす影響は小さい。本研究では試験片形状と負荷条件の違いを考慮した解析を行っており、また実験データの収集に際しては、ブロックやタブ等負荷部分の影響が無視できる亀裂開口変位を測定するなど、試験片形状によらない評価方法を採用しており、当然の結果といえる。しかし亀裂の安定成長という点では外力系の剛性の小さい L 形試験片には問題がある。とくにスリット幅が 0.8 mm の場合は、初期亀裂先端の応力集中があまり大きくないため、亀裂進展開始荷重が安定的な亀裂進展に必要な荷重よりもかなり大きくなる。このことは亀裂進展開始後不安定な亀裂進展が存在することを意味し、短い亀裂長さの範囲での測定が、とくに外力系の剛性の小さい L 形試験片では困難になるからである。

7. 結 言

解析的コンプライアンス法に基づく積層板のモード I 層間破壊靱性試験方法を提案した。L 形試験片の他に新

たに本方法に適した Z 形試験片を開発し、それらの試験片の変形解析を有限要素法を用いて行なった。その数値解をもとに、コンプライアンスから亀裂長さおよびエネルギー解放率を求める精度の高い計算式を提案した。解析的コンプライアンス法では亀裂長さを実測する必要がなく、荷重-開口変位曲線から提案した計算式を行ない亀裂長さ破壊靱性 G_{Ic} を求めることができる。

本方法を一方向カーボン/エポキシ積層板のモード I 層間破壊靱性試験に適用し、その有効性を実験的に明らかにした。本方法を用いれば亀裂長さの測定精度が向上し、信頼性の高い実験データを得ることができる。またコンピュータ制御材料試験装置と組み合わせることによって試験の自動化も可能となる⁸⁾。

参 考 文 献

- 1) A.J. Russell & K.N. Street : *Proc. ICCM-IV* (1982), p.279.
- 2) D.J. Wilkins, J.R. Eisenmann, R.A. Camin, W.S. Margolis & R.A. Benson : *ASTM STP* 775 (1982), 168.
- 3) R.A. Riddle & S.W. Beckwith : 29 th Natl. SAMPE Symp. (1984), p.304.
- 4) K.B. Su : *Proc. ICCM-V* (1985), p.995.
- 5) P.E. Keary and L.B. Ilcewicz : *J. Compos. Mater.*, 19 (1985), 154.
- 6) J.M. Whitney, C.E. Browning & W. Hoogsteden : *J. Reinforced Plast. Compos.*, 1 (1982), 297.
- 7) 岡村弘之 : 線形破壊力学入門, 培風館, 東京 (1976).
- 8) 影山和郎, 小林孝行, 野中勝信 : 日本機械学会第 23 回シンポジウム・破壊および破壊力学講演論文集, No. 860-3 (1986), p.79.