研究論文

亀裂開口変位 (COD) 制御による
モードⅡ形層間破壊靱性試験

影山 和郎*, 柳澤 昇**

(1988年8月13日受理)

Mode II Interlaminar Fracture Toughness Test under
Crack Opening Displacement (COD) Control

Kazuro KAGEYAMA* and Noboru YANAGISAWA**

(Received August 13, 1988)

End-notched flexure (ENF) test is commonly accepted to determine the mode II interlaminar fracture toughness of composite laminates. As the crack propagation in the ENF specimen is unstable under displacement-control, the critical energy release rate, G_{IIC} , is determined at the onset of crack initiation but not during the crack propagation. In order to estimate the mode II fracture toughness from the initiation to the stable crack propagation, a new test method has been proposed in the present paper. A special COD gauge has been developed for the measurement of the crack opening displacement (COD) of ENF specimen and applied to the mode II interlaminar fracture toughness test. The crack initiation in the ENF specimen can be detected with higher accuracy from the load-COD diagram than the load-displacement diagram. Moreover, the crack propagates in the stable manner under the COD-control test, though it is unstable when the conventional displacement-control test is applied. Analytical compliance method has been successfully applied to the ENF test and the relation between fracture toughness, G_{IIC} , and crack length, a , can be obtained automatically by using a computer aided testing system. Applicabilities of the COD-control test and the analytical compliance method to the ENF test are confirmed in the present paper.

1. 緒 言

繊維強化積層板は層間強度が低く、複合材料構造の破損はその多くが層間剝離に起因している。積層板の層間

破壊靱性を明らかにするためには、亀裂成長開始から定常的亀裂伝播までの亀裂進展抵抗を知る必要がある。そのような観点から、著者らは解析的コンプライアンス法にもとづくモードⅡ形層間破壊靱性試験法を提案し¹⁾、コンピュータ制御自動評価システムを開発している^{2,3)}。

モードⅡ形層間破壊靱性試験には Fig. 1 に模式的に示す ENF (end-notched flexure) 試験片が広く用いられ、この試験片に荷重点撓み速度が一定の三点曲げ荷重を負荷して試験が行なわれる。ただしこの試験における亀裂進展挙動は一般に不安定であり、モードⅠ形の DCB 試験で得られるような定常的亀裂進展過程の破壊靱性が求められない。さらに最大荷重をもって破壊点とするのが一般的であるが、それ以前にすでに亀裂は進展している場合がある。しかし ENF 試験片の荷重-撓み曲線は亀裂進展に対してあまり敏感でなく、その曲線の変化から亀裂成長開始点を精度よく検出することは困難である。すなわち従来の方は亀裂成長開始点から定常的亀裂進展過程までの破壊靱性を求めるという観点からは優れた方

* 工業技術院機械技術研究所主任研究官 (305 茨城県つくば市並木 1-2)

Senior Research Official, Mechanical Engineering Laboratory, 1-2 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

** 東京理科大学理工学部大学院生 (278 千葉県野田市山崎 2641)

Graduate Student, Faculty of Science and Technology, Science University of Tokyo, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278, Japan

* 現在：東京大学工学部船舶工学科助教授 (113 文京区本郷 7-3-1)

Present address: Associate Professor, Department of Naval Architecture, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

法とはいいがたい。

これらの従来の試験方法の問題点を解決する方法として、本報では亀裂開口変位 (COD) 制御による試験方法を提案する。COD を測定することによって亀裂成長開始点を高精度で検出できるばかりでなく、COD 制御とすることで亀裂成長を安定化させることも可能となる。さらに解析的コンプライアンス法の適用により従来の方法では不可能であった亀裂長さと破壊靱性の関係を求めることも可能となる。本報では COD 制御と解析的コンプライアンス法を適用したモードⅡ形層間破壊靱性試験を実施し、その有効性を解析と実験の両面から検討した。

2. 試験片および供試材

2.1 供試材

本研究で用いた試験板は、東レ P3051-25 プリブレグを 12 プレイ積層してオートクレーブ中にて加圧成形した、一方向カーボン/エポキシ積層板である。公称板厚および公称繊維体積含有率は、それぞれ 3mm, 60% である。その弾性特性の測定値は以下に示すとおりである。

$$E_L = 113 \text{ (GPa)}, E_T = 7.8 \text{ (GPa)}$$

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

添え字の L と T は繊維方向および繊維と直角方向を表わしている。ただし、板厚方向を Z 軸とすると、一方向強化材の場合の T 方向と Z 方向の特性は等しいと考えて、

$$E_Z = E_T, G_{LZ} = G_{LT}, \nu_{LZ} = \nu_{LT}$$

とする。また ENF 試験片では曲げ変形が支配的であることを考慮して、 E_L には四点曲げ試験によって求めた弾性率を用いている。

初期亀裂としては、板厚中央部に PTFE フィルムを挿入する方法をとった。ただし、フィルムからモードⅠ形の予亀裂を約 5mm 導入した後に試験を行なうこととした。

2.2 試験片

Fig.1 に ENF 試験片の変形模式図を示す。板厚中央部に亀裂を有する帯板に Fig.1 に示すような 3 点曲げ荷重を負荷することにより、亀裂先端においてはほぼ純粋なモードⅡ形の変形状態を得ることができる。試験片寸法は Fig.1 中の記号を用いて、スパン長さ $2L=100$ mm, 板厚 $2H=3$ mm, 板幅 $B=25$ mm である。初期亀裂として挿入したフィルムの長さは 20 mm である。

Fig.1 ENF specimen.

3. ENF 試験片の変形とエネルギー解放率

3.1 解析的コンプライアンス法

ENF 試験片を用いた試験では亀裂面が閉じたまま亀裂が進展するため、試験中に亀裂長さを直接測定することは困難である。従来の試験方法では、亀裂が不安定に進展するということもあり、試験後の破面から試験開始時の初期亀裂長さを測定する方法がとられている。しかし亀裂進展中の層間破壊靱性値を評価するためには、進展中の亀裂の長さを荷重、変位と対応づけながら測定することが必要である。そこで本報では、モードⅠ形層間破壊靱性試験の際に著者らが提案した解析的コンプライアンス法¹⁻³⁾を応用し、ENF 試験片の変形解析結果を用いて、COD コンプライアンス λ から亀裂長さ a とエネルギー解放率 G_{II} を測定する方法を検討した。

3.2 初等はり理論による計算

試験片のコンプライアンス C は荷重点変位 v と荷重 P の比で定義され、初等はり理論から式(1)のように計算することができる⁴⁾。ここで $2H$ は板厚、 B は板幅、 a は亀裂長さ、 E_L は試験片の曲げ弾性率、 L は半スパン長さである。

$$C = \frac{v}{P} = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_L B H^3} \quad (1)$$

また本報では Fig.1 のように亀裂端面のずれ、すなわち裂開口変位 (COD) δ に注目し、COD に関するコンプライアンス λ を定義する。COD コンプライアンス λ は Timoshenko⁵⁾ の初等はり理論から式(2)のように表される。

$$\lambda = \frac{\delta}{P} = \frac{3a^2}{2E_L B H^2} \quad (2)$$

荷重点コンプライアンスおよびモードⅡ形エネルギー解放率 G_{II} の間には次式の関係がある。

$$G_{II} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} \quad (3)$$

式(1)、(3)より G_{II} を求めると次式のようになる⁴⁾。

$$G_{II} = \frac{9a^2 P^2 C}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (4)$$

3.3 有限要素法による計算

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 ENF 試験片の応力解析を行った。要素分割図を Fig.2 に示す。平面歪み状態を仮定し、単位荷重に対する COD および荷重点変位を亀裂長さを変えながら計算した。

ENF 試験片は支持点の上で上下の亀裂面が接触するため、解析に際しては接触問題を解く必要がある。ここではまず、Fig.3 に示すように接触反力の分布を余弦波形状とし、その合力が支持点反力の半分に等しいと仮定して、接触域寸法を変えて計算を行なった。その結果、接触域寸法を H の 3 倍としたとき亀裂上下面の重なり合いおよび支持点直上のすきまが最も少ない解を得ることができた。以後この値を接触域として計算を行なった。

亀裂長さ a と COD コンプライアンスの関係を求めるため、有限要素解に対して最小二乗法を適用し、両者の関係を次の三次多項式で近似した。

$$\frac{a}{H} = A_0 + A_1 \gamma_{COD} + A_2 \gamma_{COD}^2 + A_3 \gamma_{COD}^3$$

$$\gamma_{COD} = \left[\frac{B E_L \delta}{P} \right]^{1/2} \quad (5)$$

同様に COD コンプライアンスから荷重点変位コンプライアンスを求める式を、次の 4 次多項式で近似した。

$$\gamma_v = B_0 + B_1 \gamma_{COD} + B_2 \gamma_{COD}^2 + B_3 \gamma_{COD}^3 + B_4 \gamma_{COD}^4$$

$$\gamma_v = \left\{ \frac{B E_L v}{P} - \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{L}{H} \right]^3 \right\}^{1/3} \quad (6)$$

こうして得られた式(5)および式(6)における係数 A_i および B_i の値の結果をそれぞれ Table 1 および Table 2 に示す。エネルギー解放率 G_{II} は式(5)および式(6)より無次元化 COD コンプライアンス γ_{COD} の関数として次式で与えられる。

$$G_{II(FEM)} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{d\gamma_{COD}} \cdot \frac{d\gamma_{COD}}{da}$$

$$= \frac{3}{2E_L H} \cdot \left[\frac{P}{B} \right]^2 \cdot (B_0 + B_1 \gamma_{COD} + B_2 \gamma_{COD}^2 + B_3 \gamma_{COD}^3 + B_4 \gamma_{COD}^4)^2$$

$$\cdot \left[\frac{B_1 + 2B_2 \gamma_{COD} + 3B_3 \gamma_{COD}^2 + 4B_4 \gamma_{COD}^3}{A_1 + 2A_2 \gamma_{COD} + 3A_3 \gamma_{COD}^2} \right] \quad (7)$$

解析的コンプライアンス法では式(5)-(7)を用いて、荷重、COD コンプライアンスより亀裂長さ a とエネルギー

Fig.2 Mesh patterns for FEM analysis.

Fig.3 Assumption of contacting area.

Table 1 Coefficients A_i in Eq. (5).

A_0	-0.520
A_1	0.802
A_2	0.711×10^{-3}
A_3	-0.889×10^{-5}

Table 2 Coefficients B_i in Eq. (6).

B_0	3.564
B_1	0.269
B_2	1.169×10^{-2}
B_3	-1.930×10^{-4}
B_4	1.167×10^{-6}

一解放率を求める。はりの理論の式(4)と有限要素法による式(7)および Carlsson らの計算式⁶⁾を比較して Fig.4 に示す。ただし、式(4)の C には有限要素法の値を用いている。

3.4 亀裂成長の安定性

亀裂進展の安定性を 3.2 初等はり理論による近似計算にもとづいて考察する。ただし亀裂進展中 G_{IIc} は一定であると仮定する。このときの亀裂の安定成長条件

$$\frac{dG_{II}}{da} \leq 0 \quad (8)$$

Fig.4 Comparison of the energy release rate.

従来行なわれてきた荷重点変位制御の場合、 dG_{II}/da は式(9)のように表わされる。

$$\frac{dG_{II}}{da} = \frac{9v^2a}{8E_L B^2 H^3 C^2} \left[1 - \frac{9a^3}{2L^3 + 3a^3} \right] \quad (9)$$

式(8)、(9)より亀裂が安定成長するための条件は、

$$a \geq L/\sqrt[3]{3} \approx 0.7L$$

したがって変位制御のもとで亀裂が安定成長するためには、初期亀裂長さ a が半スパン長さ L の7割以上必要となる。しかし通常は荷重点、支持点の影響を避けるために半スパン長さの約半分の亀裂長さで試験されており、亀裂の不安定成長が生じる。

一方、COD 制御の場合、エネルギー解放率 G_{II} は式(2)、(3)、より式(10)のように表わせる。

$$G_{II} = \frac{\delta^2}{2B\lambda^2} \cdot \frac{dC}{da} \quad (10)$$

式(10)を COD 一定のもとで a で微分すると、

$$\frac{dG_{II}}{da} = \frac{\delta^2}{2B\lambda^2} \cdot \left[\frac{d^2C}{da^2} - \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{da} \cdot \frac{dC}{da} \right] \quad (11)$$

式(1)および式(2)を式(11)に代入すると、

$$\frac{dG_{II}}{da} = -\frac{9\delta^2 a}{8E_L B^2 H^3 \lambda^2} \quad (12)$$

となり、常に式(8)が満たされる。したがって COD 制御のもとでは、亀裂は安定成長する。

4. 実験方法

4.1 COD ゲージ

ENF 試験片の亀裂開口変位を精密に測定するため、Fig.5 に示すような COD ゲージを開発した。亀裂を有する部分の一方のはりにゲージを固定し、もう一方のはりの端面に板ばねの先についたピンを押し当て、板ばね

Fig.5 COD gauge for mode II test.

の撓み量の変化で COD を測定する。測定範囲は 0~1 mm である。

4.2 破壊開始点評価

本報では荷重-COD 曲線を用いて破壊開始荷重を求めている。前述のようにこれまでの変位制御による試験では、エポキシ樹脂などの脆性材料をマトリックスとした場合、ほとんど線形に変形した後不安定に破壊を起こす (Fig.6(a))。また PEEK など靱性の高い樹脂をマトリックスとした場合では、最大荷重に達する前にかんりの亀裂進展を生じた後不安定に破壊する (Fig.6(b))。また破壊開始点の評価としては、最大荷重の点で評価する方法と、荷重-荷重点変位曲線が弾性域から外れる点で評価する方法とが考えられている。しかし後者の場合、荷重点変位が亀裂の進展に対しそれほど敏感ではないためその評価には困難をともない、また亀裂成長開始点の検出能力が向上するにたがって限界荷重が下がり得るという問題点を指摘できる。

亀裂の成長に対してより敏感な COD を導入することにより、亀裂成長開始点の検出感度の向上が期待できる。さらに本報では ASTM-E399 規格に準拠し、COD コンプライアンスが弾性域内から 5% 増加した点をもって亀裂成長開始点とする方法をとった (Fig.6(c))。

4.3 実験手順の概要

実験には電気・油圧サーボ材料試験機を用いた。試験片の端部に COD ゲージを取り付け、COD ゲージの出力をフィードバックして試験機を制御した。その結果 COD 増加速度一定の試験が可能となった。COD の増加速度は 0.03 mm/min に設定した。所定の亀裂長さまで亀裂が進展したところで除荷、再負荷を行ない COD コンプライアンスを測定し、前述の解析的コンプライアンス法により亀裂進展過程の亀裂長さともエネルギー解放率を計算した。さらに解析的コンプライアンス法の有効

Fig.6 Determination of critical load.

性、とくに亀裂長さの測定精度を調べるため、適当な長さまで亀裂を進展させた後除荷し、その後モードⅠ形負荷により破断させた試験片の破面から亀裂長さを実測した。

4.4 コンピュータ援用試験システム

式(5)-(7)を利用することにより、破壊靱性試験の自動化が可能となる。本報では前報^{2,3)}で用いたのと同様なコンピュータ制御自動試験システムを開発し、本試験に適用した。荷重、COD および荷重点変位は A/D 変換され、コンプライアンスを最小自乗法によって求めることにより G_{IIC} を計算した。このシステムにより得られた荷重-COD 曲線、および亀裂長さに対する破壊靱性の変化の出力結果の例をそれぞれ Fig.7, 8 に示す。Fig. 8 に示した亀裂長さおよび破壊靱性値は、除荷-再負荷時のコンプライアンスから求められる値 (Δ , ∇) だけでなく、COD の零点の移動を補正することにより、亀裂進展過程についても計算できようになっている。

Fig.7 An example of load-COD curve.

 Fig.8 A result of G_{IIC} versus crack length.

5. 実験結果

Fig.9 に実測した亀裂長さ と COD コンプライアンスの実測値の関係を、Fig.10 には荷重点変位コンプライアンスと COD コンプライアンスの実測値の関係を、それぞれ式(5)および式(6)で与えられる解析結果とともに無次元化して示す。ただし図中 ●, ○ は除荷および再負荷時における実測値をそれぞれ示している。どちらの図も実験結果と解析結果がよく一致することを示しており、この方法の有効性が確認できる。

Table 3 に亀裂成長開始点で評価したモードⅡ形破壊靱性 G_{IIC} の結果を示す。計算式としては式(7)と式(4)、破壊開始点としては ASTM-E399 規格に準拠した場合と最大荷重点について比較した。破壊開始点の評価方法で比較した場合、最大荷重を用いると ASTM-E399 規格に準拠した場合よりも破壊荷重を高く評価するため G_{IIC} も約 5% 高い値を示している。このことは、本

Fig. 9 Experimental and analytical relations between crack length and COD compliance.

Fig. 10 Experimental and analytical relations between load line compliance and COD compliance.

Table 3 G_{IIC} at crack initiation.

Equation of G_{II}	Proposed method, Eq. (7)	Elementary beam theory, Eq. (4)	
Evaluation of critical Load	ASTM-E399		Max. Load
Ave. G_{IIC} ($n=5$) (N/m)	558	554	585
Standard deviation	23.3	24.7	38.8

試験で用いているエポキシを母材とする脆性的な複合材料でも最大荷重に達する以前に安定的な亀裂進展があったことを示しており、亀裂成長開始点に関する合理的な判定基準の必要性が指摘できる。また計算式に式(7)を用いたものと式(4)を用いたものとはほぼ同じ値が得られていることがわかる。

Fig. 11 に亀裂の進展に伴う G_{IIC} の変化を示す。モードⅡ形の場合も定常的亀裂進展領域が存在し、ほぼ一定の G_{IIC} で亀裂が進展することがわかった。しかしその

Fig. 11 Change of critical energy release rate during the stable crack growth.

Fig. 12 A load-COD curve of the single-cycle test.

Fig. 13 Result of energy release rate obtained by the single-cycle test.

値は亀裂成長開始時の靱性値よりも 15-20% 高い値を示している。これはモードⅠ形の予亀裂からモードⅡ形の

亀裂が進展を開始するとき、モードⅡ形の亀裂が安定成長するときの微視的破壊メカニズムの差異によるものと考える。

試験中の除荷-再負荷が破壊靱性値に影響を与えることも考えられるため、亀裂成長開始から試験終了まで永久変形分 (COD の零点の移動) が亀裂長さの増加量に比例すると仮定し、除荷-再負荷を試験中に行なわないで解析的コンプライアンス法を適用した。その場合の荷重-COD 曲線の例を Fig.12 に、エネルギー解放率の変化の様子を Fig.13 に示す。除荷-再負荷を繰り返す方法と比較して定常的亀裂進展領域における値の変動幅が減少している。

6. 結 言

ENF 試験片の亀裂開口変位 (COD) を測定するための COD ゲージを開発し、COD 制御によるモードⅡ形層間破壊靱性試験を実施した。解析的コンプライアンス法を亀裂長さと破壊靱性の評価に適用し、コンピュータを用いた自動評価システムも開発した。本報で得られた知見は以下のとおりである。

亀裂開口変位 (COD) を測定することによって、亀裂成長開始点を正確に検出できるばかりでなく、COD 制御とすることによって亀裂成長を安定化させることができる。

有限要素解析にもとづく解析的コンプライアンス法によって、亀裂長さと破壊靱性を荷重-COD 曲線から計算

によって求めることが可能となる。

コンピュータ制御による自動評価システムを利用することによって、測定精度が向上するばかりでなく、亀裂成長開始から定常的亀裂進展過程に至るまでの破壊靱性の変化を連続的に測定することが可能となる。その結果脆性なエポキシ樹脂を母材とする本供試材の場合にも、最大荷重に達する前の安定亀裂成長を認めることができた。

なお本研究は通商産業省次世代産業基盤技術研究開発、複合材料の研究開発の一環として行なわれたものである。

参 考 文 献

- 1) 影山和郎, 小林孝行: 日本複合材料学会誌, 13, 6 (1987), 265.
- 2) 影山和郎, 小林孝行, 野中勝信: 日本機械学会論文集 (A編), 53, 494 (1987), 1898.
- 3) K. Kageyama, T. Kobayashi & T.W. Chou: *Composites*, 18, 5 (1987), 393.
- 4) A.J. Russell & K.N. Street: *Proc. ICCM-IV* (1982), p. 279.
- 5) S.P. Timoshenko & J.N. Goodier: *Theory of Elasticity*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York (1982).
- 6) L.A. Carlsson, J.W. Gillespie, Jr. & R.B. Pipes: *J. Compos. Mater.*, 20 (1986), 594.