FRP 直交積層板におけるマトリックスき裂損傷の発達*
(第2報, エネルギー解放率の測定)元 木 信 弥^{*1}, 安 田 哲^{*2}, 福 田 武 人^{*1}Evolution of Matrix Cracking Damage in FRP Crossply Laminates
(2nd Report, Measurement of Energy-Release Rate)

Shinya MOTOGI, Satoshi YASUDA and Takehito FUKUDA

In part I, the energy-release rates (ERRs) of the whole laminate and of the 90° and 0° layers were theoretically obtained. Part II discusses an experimental determination of the ERRs. Real-time measurements of cracking stress and positions of all cracks are conducted via making use of GFRP crossply laminates in which the transverse matrix cracks are visible to the naked eye. Then the ERR can be calculated using the theoretical results obtained in part I and the experimental data of cracking stress and positions of cracks. It is found that the ERR of the whole laminate is not constant but increases with increasing crack density; therefore, the fundamental assumption made by Nairn is not appropriate. It is also found that the ERR of the 90° layer is constant during damage evolution, which will serve as a material parameter yielding an evolution law of the cracking damage in part III. The characteristics of the energy-release rate of the 0° layer are also discussed.

Key Words: Composite Material, Reinforced Plastics, Damage Mechanics, Inelasticity, Residual Stress, Matrix Cracking, Measurement of Energy-Release Rate, Composite Laminates

1. 緒 言

本研究の第I報⁽¹⁾では、積層板全体のエネルギー解放率、および90°, 0°各層のエネルギー解放率を理論的に求めた。この第II報では、それらを実験的に測定した結果について述べる。これまでに、マトリックスき裂によるエネルギー解放率を実験的に求めた例はYalvaçら⁽²⁾の研究があるのみである。しかし彼らもNairn⁽³⁾による平均き裂密度を使った近似式を用いて計算しており、次節で述べるように、すべてのき裂の正確な発生位置とき裂発生応力を測定してエネルギー解放率を決定した報告は、筆者らの知る限りでは本研究以外に例がない。

次節でGFRPの直交積層板のエネルギー解放率の測定結果を述べ、第3節ではエネルギー解放率の変化の特性や統計的性質について考察する。

2. エネルギー解放率の測定

第I報、図6(以下図I-6のように表す)の荷重-変位曲線の $P < 0$ の領域の三角形O'ABは初期に積層板に内在する熱残留ひずみエネルギーの解放量をあらわしている。き裂発生によるひずみエネルギーの解放量が

これを含んでいるため、荷重-変位曲線から直接実験的にエネルギー解放率を求めることはできない。またき裂発生による荷重緩和量 ΔP や変位増分 Δu はともに極めて微小でありこれも荷重-変位曲線から直接測定することは不可能である。

一方、第I報では積層板全体のエネルギー解放率として、変位制御、荷重制御それぞれの場合について次式を得た。

$$G_m = \left(\frac{E_T}{E_C} \alpha_0 - \frac{\Delta \alpha \Delta \theta}{C_1} \right)^2 t_1 C_3 \frac{S}{S'} Y(\rho, \delta) \quad \text{..... (I-48)}$$

$$G_m = \left(\frac{E_T}{E_C} \alpha_0 - \frac{\Delta \alpha \Delta \theta}{C_1} \right)^2 t_1 C_3 Y(\rho, \delta) \quad \text{..... (I-52)}$$

(以下式(I-48)などのように表す)これらの理論式の右辺には、き裂発生時の平均応力 σ_0 、新しいき裂が発生するセグメントの間隔 ρ 、その発生位置 δ 、および式(I-48)の右辺のコンプライアンスの比 S/S' には、新しいき裂が発生するまでにすでに存在している全てのき裂の間隔 ρ_i が含まれている(詳細は第I報参照)。従って、すべてのき裂についてのき裂発生時の荷重とその発生位置がわかれば、式(I-48)ないしは(I-52)によってエネルギー解放率が計算できることになる。CFRPやAFRPでは、X線や超音波等の手段を用いなければき裂の位置を測定することは困難であるので、このようなリアルタイムのき裂発生位置の測定は困難である。そこで

* 原稿受付 1996年3月12日。

*¹ 正員, 大阪市立大学工学部 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)。*² 学生員, 大阪市立大学大学院 [現: 松下電子工業(株)]。

本研究では、き裂が肉眼でも確認できるGFRPの直交積層板を用いて測定を行う。

2. 1 積層板全体のエネルギー解放率の測定

GFRPプリプレグ (3 M製スコッチブライ1009) をオートクレーブ成形し、 $[0/90_4/0]_T$, $[0/90_3/0]_T$ の2種類の直交積層板を製作した。(成形後の積層板は、それぞれ厚さ $2h = 1.19\text{mm}$, 1.38mm である。) これを幅 15mm , ゲージ長 (タブ間距離) $L = 200\text{mm}$ の試験片に切断し端面をサンドペーパー (#2000) で研磨した。試験片の数はそれぞれの積層構成について3本ずつである。適切な照明によって 90° 層に発生したマトリックスき裂は肉眼で観察できるので、ビデオカメラで試験片全体を撮影しながら準静的な変位制御の引張試験を行い、荷重-変位曲線を測定した。(ただし、この場合の変位は試験機のクロスヘッド移動量である。) 引張試験はき裂発生が飽和する⁽⁴⁾前に中止し、試験片を試験機から取り外した。負荷した平均応力の最大値は、 $[0/90_4/0]_T$ では約 100MPa , $[0/90_3/0]_T$ では約 90MPa である。これは、層間はく離などの二次損傷の影響をなくするためである。このような二次的な損傷が現れる高い応力レベルでは本論文の基本的な仮定が成り立たない。しかし、直交積層板では他の一般の斜交積層板に比べて層間はく離は発生しにくく、比較的広い応力範囲で適用可能である。実際、本実験で負荷した最大応力でも $0^\circ/90^\circ$ 層間での層間はく離は認められなかった。

試験終了後、試験片の端面に現れている全てのき裂の位置を読みとり顕微鏡を用いて測定し、片方のタブを起点として、発生したすべてのき裂の位置を得た。(引張試験の途中では、幅方向に貫通しないマトリックスき裂も数個あったがその数は全き裂数、百数十個に比べればわずかであり、最終的には全てのき裂が板の幅および厚み方向に貫通した。) 読みとり顕微鏡の精度は 0.01mm 程度である。次に、除荷後の試験片には約 $1 \sim 2\text{mm}$ 間隔でき裂が発生しており試験片上のき裂に直接番号を付けることは困難であるので、読みとり顕微鏡によるき裂の位置を、方眼紙上に拡大してプロットする。このようにしてから、ビデオテープを再生しながら方眼紙上のき裂位置に番号を付すことによってすべてのき裂の発生順序を決定した。このようにして、全てのき裂についての ρ_i, ρ, δ を得ることができる。これらの位置に関する測定は試験片除荷後に行ったので第I報で明らかにした残留変位による誤差を含んでいるが、これはひずみのオーダーであり無視できる。また、 90° 層が比較的厚い場合には板厚方向から傾いた斜めき裂が発生する場合があるが⁽⁵⁾、本研究で

Table 1 Material constants used in calculation of the energy-release rate. G_T and v_T are calculated values. Curing temperature of laminates is 180°C maximum, and testing temperature is 20°C ; therefore, $\Delta\theta = -160^\circ\text{C}$.

E_L		E_T	G_L	G_T
45.0 GPa		18.0 GPa	6.13 GPa	6.52 GPa
v_L	v_T	α_L	α_T	$\Delta\theta$
0.30	0.38	$8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	$22.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	-160°C

使用した積層板では斜めき裂は発生しなかった。

次に、き裂発生時の応力に関してであるが、実験に用いたGFRPでは表1からわかるように繊維垂直方向のヤング率 E_T が一般のCFRPに比べて2倍程度の値である。一方、 E_L はCFRPよりはるかに低い。従ってこの材料では 90° 層の荷重分担能力が比較的大きく、き裂発生による荷重緩和が荷重-変位曲線上に明瞭に現れ、(ただし荷重緩和量そのものは測定できない。) き裂発生時の荷重を同定できる。これによってき裂発生時の平均応力 σ_0 を得た。(き裂が肉眼で確認できることの他に、このことが本研究でGFRPを用いた理由の一つである。) これらの実験値を変位制御の場合の式 (I-48) に代入してエネルギー解放率を求めた。表1に一方向材を用いて測定した材料定数を示す。(添字L,Tは第I報と同様に繊維方向およびその垂直方向を表す。)

図1(a,b)に2種類の積層構成について試験片1本ずつの実験結果を示す。横軸は各き裂が発生したときのセグメント間隔の半分 ρ の逆数 $1/\rho$ をき裂密度としてプロットしたものである。以後この $1/\rho$ を真のき裂密度と呼ぶ。(これは図I-1(b)の、2つのき裂に囲まれた 90° 層領域のアスペクト比 t_1/a に等しい。) 図1から、バラツキは大きい、エネルギー解放率 G_m はき裂密度とともに増加する傾向が明らかである。他の試験片についても全く同様の傾向が見られた。

新たなき裂が発生する既存き裂の間隔はき裂の発生ごとに小さくなっていくわけではなく、ランダムネスが大きい (第III報参照)。従ってエネルギー解放率の値のバラツキも大きい、平均き裂密度を横軸としてエネルギー解放率をプロットしてみると様子は異なってくる。図2(a,b)は各積層構成について全ての試験片 (3本ずつ) の実験結果を、平均き裂密度 $1/\bar{\rho} (=2t_1N/L)$ を横軸として描いたものである。この平均き裂密度は既存き裂が等間隔に並んでいると仮定した場合の、2つのき裂に囲まれた 90° 層領域のアスペクト比である。従ってこの横軸はスケールを変えれば、き裂の個数 N

Fig. 1 Change in energy-release rate G_m with true crack density $1/\rho$.

Fig. 2 Change in energy-release rate G_m with averaged crack density $1/\bar{\rho}$. (Results of 3 specimens in each of (a) and (b) are shown by marks.)

と見なすことができる。き裂密度が大きい領域ではバラツキが大きくなるが、この場合もき裂密度（き裂の

個数）の増加とともにエネルギー解放率は明らかに増大している（後半のデータのバラツキについては第3節で考察する）。

Nairnら^(3,6)は、この積層板全体のエネルギー解放率 G_m を一定であると仮定して、式(I-48)（実際には式(I-52)）を用いてき裂損傷の発達則を提案した。しかし、上で示したように G_m はき裂密度とともに増大する量であり、従ってNairnらの方法は正しくない結論づけられる。

2. 2 各層のエネルギー解放率の測定 第I報

では、 $90^\circ, 0^\circ$ 各層のエネルギー解放率として

$$G_m^{(1)} = \left(\frac{E_T}{E_C} \sigma_0 - \frac{\Delta \alpha \Delta \theta}{C_1} \right)^2 t_1 C_3 \times \left\{ 1 - \left(\frac{S}{S'} \right)^2 \left[\frac{1}{K} \frac{t_1 E_T}{h E_C} - 2 \frac{t_2 E_L}{h E_C} \sum \chi(\rho_i) + \frac{1}{2} \sum \chi^{(1)}(\rho_i) \right] - \left(\frac{S}{S'} \right)^2 \left[2 \frac{t_2 E_L}{h E_C} Y(\rho, \delta) + \frac{1}{2} Y^{(1)}(\rho, \delta) \right] \right\} \quad (I-71)$$

$$G_m^{(2)} = \left(\frac{E_T}{E_C} \sigma_0 - \frac{\Delta \alpha \Delta \theta}{C_1} \right)^2 t_1 C_3 \times \left\{ 1 - \left(\frac{S}{S'} \right)^2 \left[\frac{1}{K} \frac{t_2 E_L}{h E_C} + 2 \frac{t_2 E_L}{h E_C} \sum \chi(\rho_i) + \frac{1}{2} \sum \chi^{(2)}(\rho_i) \right] - \left(\frac{S}{S'} \right)^2 \left[2 \frac{t_2 E_L}{h E_C} Y(\rho, \delta) + \frac{1}{2} Y^{(2)}(\rho, \delta) \right] \right\} \quad (I-72)$$

を得た。これらの式の右辺は複雑であるが、積層板全体のエネルギー解放率と同様に $\sigma_0, \rho_i (i=1,2,\dots,N), \rho, \delta$ の関数となっていることがわかる。従って G_m の計算に用いた同じデータを式 (I-71,72) に代入すると各層のエネルギー解放率の値が求められる。図3(a,b)は1本の $[0/90_4/0]_T$ 試験片について、 $G_m^{(1)}$ および $G_m^{(2)}$ の実験結果を、真のき裂密度 $1/\rho$ を横軸として描いたものである。また図4(a,b)は、 $[0/90_5/0]_T$ の1本について、同様の結果を示したものである。特に $G_m^{(2)}$ にばらつきが大きいのが、 $G_m^{(1)}$ はほぼ一定、 $G_m^{(2)}$ はき裂密度とともに増加している傾向が明らかである。他の2本づつについても全く同様な結果であった。

図5は $[0/90_4/0]_T$ についての $G_m^{(1)}$ および $G_m^{(2)}$ の結果を、横軸に平均き裂密度 $1/\bar{\rho}$ をとって、3本の試験片に対する結果をまとめて図示したものである。また、図6は $[0/90_5/0]_T$ に対する同様の結果である。

これらの場合、 $G_m^{(1)}$ は各試験片間のバラツキはあるがやはりき裂密度によらず一定と考えてよいであろう。一方、 $G_m^{(2)}$ はき裂密度の高い領域で多少のバラツキはあるが、どの試験片についても非常によく一致しており、き裂密度とともに増加している特性が真のき

Fig. 3 Change in energy-release rate of 90° layer alone (a), and that of 0° layer alone (b) with true crack density in $[0/90_4/0]_T$ laminate.

Fig. 5 Change in energy-release rate of 90° layer alone (a), and that of 0° layer alone (b) with averaged crack density in $[0/90_4/0]_T$ laminate.

Fig. 4 Change in energy-release rate of 90° layer alone (a), and that of 0° layer alone (b) with true crack density in $[0/90_5/0]_T$ laminate.

Fig. 6 Change in energy-release rate of 90° layer alone (a), and that of 0° layer alone (b) with averaged crack density in $[0/90_5/0]_T$ laminate.

裂密度で整理した場合よりも明瞭に現れている。ちなみに、横軸を平均き裂密度で表した図はすべて、エネルギー解放率の値をき裂の発生順にプロットしているに過ぎないことに注意されたい。エネルギー解放率の値そのものは、そのき裂に関する σ_0 , ρ_i ($i = 1, 2, \dots, N$), ρ , δ の実験値を用いて計算している。

このように見てくると、前節で得られた積層板全体のエネルギー解放率 G_m のき裂密度にともなう変化は、主に 0° 層のエネルギー解放率の変化が担っており、 90° 層のエネルギー解放率は一定とみなしてよいことがわかる。

3. エネルギー解放率の変化の特性

前節の図5.6(b)を見ると、 0° 層のみのエネルギー解放率 $G_m^{(2)}$ は、き裂発達の初期段階では負となっている。このことは 90° 層のき裂発生によって 0° 層のひずみエネルギーは増加することを意味している。これは次のように説明される。

き裂数があまり多くないとき、 0° 層の単位幅あたりのひずみエネルギーは、積層板の長手方向に図7-(a)の実線のように分布している。 90° 層に存在しているき裂の付近には大きな応力集中があり、これによってひずみエネルギーも大きくなっている。このような状態で新たにA点にき裂が発生したとすると、この新き裂

Fig. 7 Change in strain energy of 0° layer by a cracking.

による応力集中によって 0° 層のひずみエネルギーが増加する。一方、き裂の発生によって式(I-51)によって表されるわずかな荷重緩和 ΔP がおこるので、 0° 層のひずみエネルギーの分布も全体的にわずかに低下する。この状態が図7-(a)の破線の状態である。き裂発達の初期段階では荷重は比較的小さいので、荷重緩和によるひずみエネルギーの低下量は小さい。一方、新き裂によるひずみエネルギーの増加は比較的大きい。従って実線の状態から破線の状態を差し引くとエネルギー解放率は負となり、 0° 層全体のひずみエネルギーは新き裂の発生によって増加することになる。さらに、図7-(b)のようにき裂数の多い後半段階では、荷重は比較的大きいので、荷重緩和によるひずみエネルギー減少量と応力集中によるひずみエネルギー増加量の関係が逆転し、結果的に 0° 層のひずみエネルギーは減少する。すなわち 0° 層のエネルギー解放率は正となる。

次にエネルギー解放率の統計的なバラツキについて考察する。図2.5.6を見ると $1/\bar{\rho}$ が小さい、き裂発達の初期段階では、いずれのエネルギー解放率も試験片間および一つの試験片でバラツキは比較的小さい。ところが $1/\bar{\rho}$ が大きくなってくると、データのバラツキが大きくなってくることがわかる。そこで例えば、積層板全体のエネルギー解放率(I-48)式を見ても、右辺の $Y(\rho, \delta)$ はき裂が1個発生することによる積層板全体のコンプライアンスの変化に比例する量であり、式(I-49)₂で与えられる。ここで、 ρ , δ の意味は図I-5で与えられる。図I-5と同様のセグメントの中央を原点とする座標系に変換し、式(I-12)で用いた無次元変数 ξ を導入して $Y(\rho, \delta)$ を表示すると図8のようになる。

Fig. 8 Distribution of $Y(\rho, \delta)$ with parameter ρ .

各曲線が横軸と交わる点は既存き裂位置に対応している。 ρ が大きい場合、き裂間の広い領域で $Y(\rho, \delta)$ の分布は平坦になっており、新しいき裂がランダムに発生したとしても、既存き裂のごく近傍に発生しない限り $Y(\rho, \delta)$ の値は変わらない。一方、 ρ が小さい、き裂発達の後期段階では、 $Y(\rho, \delta)$ の分布は大きく変化し、新き裂発生位置のわずかな違いが $Y(\rho, \delta)$ の値のバラツキ、すなわちエネルギー解放率のバラツキをもたらすことになる。各層のエネルギー解放率の表式に現れる $Y^{(1)}(\rho, \delta)$ 、 $Y^{(2)}(\rho, \delta)$ も $Y(\rho, \delta)$ とほぼ同様の分布を示すので、これらもデータのバラツキに関しては $Y(\rho, \delta)$ と同じ効果を持つことがわかる。なお、式(1-48, 71, 72)には $\Sigma \chi(\rho_i)$ などの因子が含まれているが、これらは全てのき裂間隔について和を取っているのでデータのバラツキの原因とはならない。き裂発生位置の統計的なバラツキに関しては、第III報で損傷の発達則を取り扱う際に詳しく検討する。

最後に、図5,6を見ると0°層のエネルギー解放率 $G_m^{(2)}$ は90°層のエネルギー解放率 $G_m^{(1)}$ に比べて、試験片間のデータのバラツキが極めて小さい。き裂発生（特にその発生位置）が確率的な性格を持つ現象であることを考えるとこの試験片間の0°層のエネルギー解放率の一致は特異な事象であるように見える。この原因は、次のように説明できる。試験片の端面を研磨するサンドペーパーの粗さを変えると、90°層のエネルギー解放率 $G_m^{(1)}$ の平均値は図5, 6(a)の試験片間の $G_m^{(1)}$ の変化よりも大きく変化する⁽⁷⁾。一方、0°層のエネルギー解放率は試験片の端面の粗さが変化しても、積層構成ごとに極めて良く一致する。さらに、き裂は試験片のどちらかの端面から発生するものがほとんどである。これらのことから、き裂の発生には90°層の端面の状態が大きく影響していると考えられる。従って、き裂発生の核となる端面の微小な欠陥の位置や大きさなどの統計的なバラツキの特性が90°層のエネルギー解放率に直接反映される。一方、0°層のエネルギー解放率は、90°層のき裂が発生する位置の関数であり、端面の状態には無関係である。従って、特にき裂密度の低い領

域では各試験片ともよく一致することになる。き裂密度の高い領域でのデータのバラツキは試験片間の値のバラツキではなく、 $Y(\rho, \delta)$ の分布特性の変化によるものである。このことはひるがえって、90°層のエネルギー解放率こそが、き裂損傷発達にとって重要な端面の微視的な欠陥の情報などを反映できる因子であることを示している。

4. 結 言

マトリックスき裂による積層板全体、および90°層、0°層のエネルギー解放率を実験的に求めて次の結論を得た。

- (1) 積層板全体のエネルギー解放率はき裂密度とともに増大することが明らかになった。従って、Nairnらによって展開された損傷の発達則の定式化における、エネルギー解放率が一定であるという基本的な仮定は正しくない。
- (2) 90°層と0°層にわけてそれぞれのエネルギー解放率を求めた結果、90°層のみのエネルギー解放率が一定と見なせることが明らかになった。一方、0°層のエネルギー解放率はき裂密度とともに単調に増大していく。従って、積層板全体のエネルギー解放率のき裂密度にともなう変化は0°層のエネルギー解放率によって担われている。
- (3) エネルギー解放率の種々の特性、特にその統計的なバラツキの原因を明らかにした。

文 献

- (1) 元木, 安田, 福田, "FRP直交積層板におけるマトリックスき裂損傷の発達-第1報, エネルギー解放率の理論解析" 機論A **63**-615, (1997), 2318-2325
- (2) Yalvaç, S. et al., *J. Comp. Mat.*, **25**, (1991), 1653-1667
- (3) Nairn, J. A., *J. Comp. Mat.*, **23**, (1989), 1106-1129
- (4) Highsmith, A. and Reifsneider, K., *ASTM STP*, **775**, (1982), 103-117
- (5) 元木, 福田, 田中, 材料, **41**, (1992), 694-699
- (6) Liu, S. and Nairn, J., *J. Reinforced Plastics Comp.*, **11**, (1992), 158-178
- (7) Motogi, S. and Fukuda, T., *Mat. Sci. Res. Int.*, **2**, (1996), 111-116