

繊維強化プラスチックにおける疲労き裂進展挙動と AE 信号の関係

Relationship between fatigue crack growth behavior and acoustic emission signals of fiber reinforced plastics

知能機械システム工学コース

機能性材料工学研究室 1205029 阿佐 建吾

1. 緒言

炭素強化繊維プラスチック(以下, CFRP)は強度に優れた炭素繊維と軽量性に優れたプラスチックを複合した材料である。両者の特徴を活かし, 自動車・航空宇宙材料機器からスポーツ用品に至るまで広く用いられている。CFRP 積層材における破壊, 損傷は層間はく離に起因するものが多いため, この破壊形態での強度特性を把握しておくことは高い信頼性を確保する上で不可欠である。近年, 層間はく離き裂を含む CFRP の強度に対して, 破壊力学的パラメーターによる評価が進められてきたが, その多くがモード I き裂を対象としていた。これに対しモード II き裂は航空機構造用材料における衝撃負荷後の圧縮強度と相関性を示すことなど, 重要な問題であるにも関わらずその研究は多くない。特に繰返し荷重下での疲労き裂進展挙動など不明な点も多い。

材料内部において, 微小なき裂の発生, 進展あるいは塑性変形などが生じた場合, そこに蓄積された弾性エネルギーが弾性波として外部に放出される。この現象をアコースティック・エミッション(以下, AE)と呼ぶ。CFRP などの複合材料には, 多数の繊維が異方的かつ不連続的に母材中に存在しているため, 材料内部で生ずる破壊現象そのものを捕らえることが出来る AE 法は, このような材料の力学特性, 疲労損傷, 層間はく離などを評価するのに適用性が高い。

本研究では母材のじん性値が異なる 3 種類の CFRP を用いて, 繰返し荷重によるモード II 層間はく離疲労き裂進展試験を行い, その時に発生する AE 信号との関係について調査を行った。

2. 試験片材料および実験方法

2.1 材料および試験片

実験に用いた材料は破壊じん性値の異なる 3 種類のエポキシ樹脂を母材とする CFRP 積層板である。材料特性を表 1 に示す。炭素繊維は東レ製(T700SC-12000)を用い, トウシートは CF 目付量 800 g/m², 樹脂付着量 40 wt%であった。積層条件は 9 層対称積層 [0/90/0/90/0/90/0/90/0] である。試験片は末端ノッチ曲げ試験片を採用し, 寸法は 140×25×6 mm である。5 層目と 6 層目の間に厚さ 12 μm のテフロンシートを端部より 30 mm まで挿入した状態で成形した。成形にはオートクレーブを用い, 150 °C/ 40 min で硬化させた。材料断面の顕微鏡写真を図 1 に示す。

Table1. Properties of Epoxy Resin

Properties	Specimen		
	A	B	C
Viscosity [Pa · S]	0.8	12	10
Fracture toughness [MPa · √m]	0.8	1.4	2.0
Tensile modulus [GPa]	3.1	2.0	2.2
Elongation at break [%]	3.0	6	10

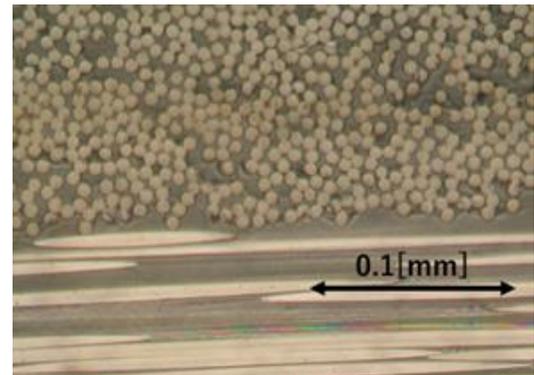


Fig.1 Micrograph of section area

2.2 実験方法

き裂進展試験には油圧サーボ式疲労試験機を使用した。支点間隔 100 mm, 繰返し速度 2.0 Hz, 変位比 0.1 の試験条件下で繰返し 3 点曲げ負荷を行った。き裂進展試験中の荷重-変位関係を 10 秒毎に測定しコンプライアンスよりエネルギー解放率範囲 ΔG_{II} を算出した。また試験片中央より 50 mm の位置に AE センサーを貼付しき裂進展時の AE 信号を計測した。実験装置, AE システムの概略を図 2 に示す。AE 信号の計測時間はき裂の進展量により適宜変更し 15 分間から 1 分間隔とした。記録した AE 信号についてウェーブレット解析を行った。

試験終了後, 試験片を強制破断させて, 走査型電子顕微鏡(以下, SEM)を使用し破面観察を行った。

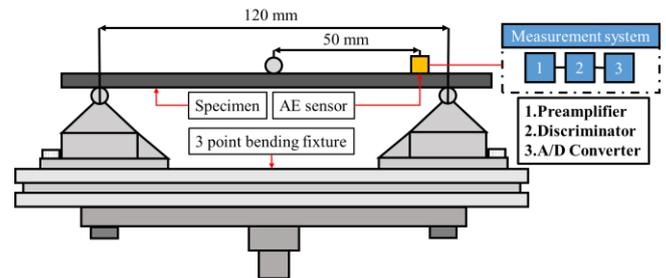


Fig.2 Experiment equipment and AE measurement system

3. 実験結果

3.1 き裂進展挙動

各材料 2 本ずつのき裂進展速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG_{II} の関係を対数表示で図 3 に示す。直線部分には指数則が成り立ち, 式(1)で表される。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta G_{II})^m \quad (1)$$

m 値は材質によって決まる定数であり, その部分の傾きを示している。 m 値は試験片 A, B, C 順に, 6.6, 2.2, 1.6 とな

り、A が最も傾きが大きい傾向があった。各材料について以下に示す。試験片 A ではばらつきは大きく、 da/dN も速い傾向が見られた。試験片 B はばらつきがあり、 $100\sim 300[\text{J}/\text{m}^2]$ の ΔG_{II} 帯であれば 3 種類の試験片で da/dN は最も速い。試験片 C ではばらつきが最も少なく、全体を通してき裂進展速度も緩やかであった。以上の点より、じん性値が低いものほど、き裂進展速度は速くなりやすく、 $da/dN-\Delta G_{II}$ の関係にばらつきが生じやすいと考えられる。

3. 2 AE 信号のウェーブレット解析

破壊機構の解明や損傷度の評価には種々の破壊形態に対応する周波数成分の発生時刻を捉える必要がある。そこで本研究では AE 信号の時間-周波数解析を行うことができるウェーブレット解析を用いた。図 4 は各試験片で検出された AE 信号をウェーブレット解析した結果を示す。縦軸に周波数成分、横軸に時間成分、周波数成分の強度分布を青～赤で色分けして表示した。き裂進展試験全体を通して、全試験片で 60 kHz 付近の成分を有する AE 信号がみられた。しかしながら試験片 A と C では比較的高周波な AE 信号が検出されるのが特徴的であった。FRP 積層板の破壊過程で検出される AE 信号の周波数成分と破壊メカニズムの関係についての報告があり、それでは 50~100 kHz は樹脂割れによる AE 信号であった。よって、60 kHz 付近の AE 信号は樹脂割れに対応したものと考えられる。

3. 3 破面観察

図 5 に各材料の破面を SEM で観察した例を示す。試験片 A は他の試験片と比較して脆性的な割れが支配的であり、下層の繊維が見られるほどの大きな割れが見られた。これはじん性値が $0.8 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ と他の試験片と比較して低いことが起因したと考えられる。試験片 C では da/dN が速くなることで、他の試験片との違いは見られなくなり厚さ方向に割れが生じたと考えられる。この 2 種類の試験片において、厚さ方向に対する割れが高周波な AE を計測したと考えられる。試験片 B は実験を通して不規則な割れが見られなかった。試験片 A よりもじん性値が大きく、試験片 C よりも da/dN が穏やかだったためと考えられる。

4. 結言

本研究では、母材のじん性値が異なる 3 種類の CFRP のモード II 層間疲労き裂進展試験を行い、AE 信号との関係について検討を行った。

- 1) 各材料で da/dN と ΔG_{II} の関係に指数則が成り立った。そのときの m 値は試験片 A が最も大きかった。
- 2) じん性値と $da/dN-\Delta G_{II}$ の関係には、低い値のものほど速く、ばらつきが生じやすい。それに対し、高いものは緩やかでばらつきが生じにくい。
- 3) ウェーブレット解析の結果より、各材料で 60 kHz 付近に成分を有する AE 信号が見られた。これは、FRP 積層板の破壊過程で検出される AE 信号の周波数成分と破壊メカニズムの関係についての報告を参考に、樹脂割れに対応する AE 信号であった。
- 4) 破面観察結果より、試験片 A と C には厚さ方向に対する大きな割れが見られた。A はじん性値の低さが起因し、C ではき裂進展速度が速い段階のものが対応している。それがウェーブレット解析の結果に見られた高周波な成分である。

(文献省略)

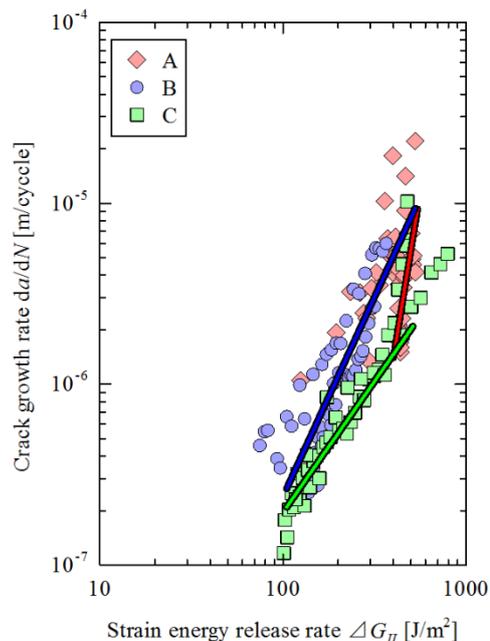


Fig.3 Relationship between da/dN and ΔG_{II}

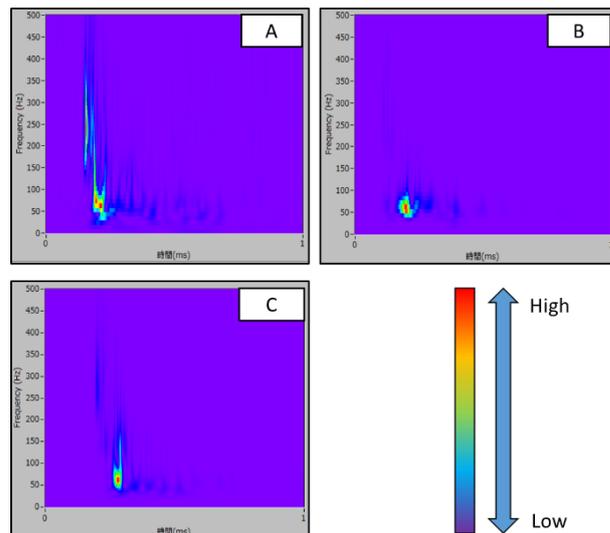


Fig.4 Results of wavelet analysis

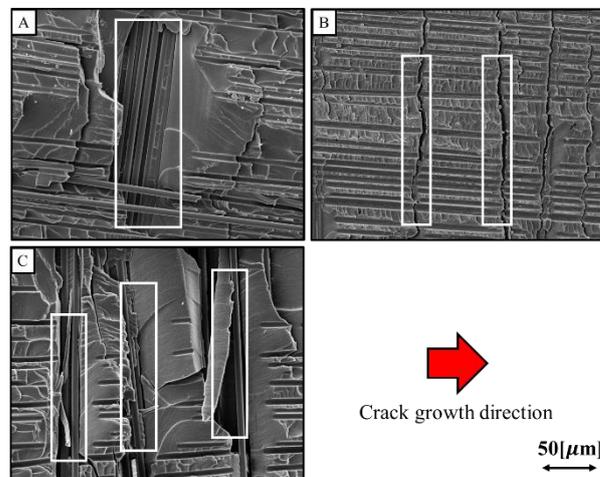


Fig.5 SEM observations of fracture surface