

CFRP 積層板の層間疲労き裂進展と AE 信号特性に関する研究

Study on delamination fatigue crack propagation of CFRP laminates and acoustic emission characteristics

知能機械工学コース

材料強度学研究室 1235087 程 和毅

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は軽量で高強度・高剛性であるため、航空機や自動車などの輸送機器から、スポーツ用品まで幅広く使われている。CFRP の成形方法として代表的なものに、プリプレグを積層し、これを加圧成形する方法がある。この方法で成形した CFRP 板は積層構造体となり、その破壊は層間はく離の発生・進展と経過をたどることが多い。従って、これら CFRP 積層板を使用した機器の長期使用に対する信頼性を確立するには、繰り返し荷重による層間はく離き裂進展挙動を明らかにしておくことが重要である。

AE (Acoustic Emission) は材料内部の微視的な変形や破壊現象に起因して発生する弾性波であるため、非破壊的に微視的な破壊機構を識別できるなど、機器稼働中における材料内部の破壊過程を知る上で有益な情報を得ることができる。本研究では、破壊メカニズムを制御した 2 種類の CFRP 対称積層板中の層間はく離き裂に対しモード I, モード II, および混合モード I+II の繰り返し荷重負荷による、層間はく離疲労き裂進展試験を行い、この時のき裂進展挙動を明らかにするとともに、き裂進展に伴い発生する AE 信号を解析した。これにより、CFRP の積層構成とき裂の変形モードの違いによるき裂進展挙動と AE 信号の関係に関する知見を得た。

2. 材料および実験方法

2.1 試験片

本研究では、150×150 mm に切り出した CFRP プリプレグを積層条件 [0₂₉/90₂/0₂₉] および [0₆₀] で 60 枚積層し加圧成形した CFRP 積層板を用いた。積層構成 [0₂₉/90₂/0₂₉] の試験片を樹脂割れ型試験片 (Matrix crack type, M-type), [0₆₀] の試験片を界面はく離型試験片 (Interfacial debonding type, D-type) とした。界面はく離型試験片は、繊維樹脂界面でのき裂進展を生じやすくさせることを目的として、き裂の上下面全体に一方向炭素繊維を導入した。予き裂として厚さ 20μm のカプトンシートを 30 枚目と 31 枚目の間に挿入した。ホットプレスを用いて 130°C, 40 MPa の条件で成形後、ファインカッターを用いて積層板を 120×25×4.5 mm の試験片寸法に切り出した。二重片持ちはり (DCB) によるモード I 試験, 端面切欠き曲げ (ENF) によるモード II 試験および混合モード曲げ (MMB) による試験全てにおいて試験片寸法は同一とした。ただし、ENF 以外ではアルミニウム合金製のピン負荷治具を接着した。また、初期き裂を 25mm 以上となるよう設定した。

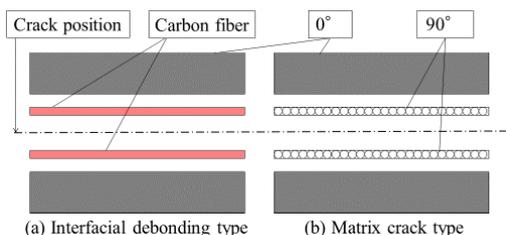


Fig. 1 Cross sections of specimens

2.2 実験方法

疲労き裂進展試験には油圧サーボ式疲労試験機を使用し、繰り返し速度を 2.0 Hz として変位制御でモード I, モード II および混合モード I+II の繰り返し荷重を負荷した。MMB 試験の概略図を図 2 に示す。ENF, MMB 試験の支点間距離は 100 mm とし、MMB 試験ではモード I とモード II によるエネルギー解放率範囲がほぼ等しくなるように ($\Delta G_I/\Delta G_{II} \approx 1$) ジグを設定した。き裂長さの測定は、読み取り顕微鏡を用いて光学的に行った。MMB 試験ではモード I 成分 G_I とモード II 成分 G_{II} を計算し、エネルギー解放率範囲の和 $\Delta G_{total} = \Delta G_I + \Delta G_{II}$ を用いた。

試験片中心からき裂と逆側の 40 mm の位置に AE センサー (NF 回路設計ブロック・AE-900M-WB) を取り付け、き裂進展による AE 信号を計測した。信号はプリアンプで 40 dB, メインアンプで 20 dB 増幅し、0.6 V をしきい値として AE 事象と定義した。

試験終了後、計測した AE 信号についてウェーブレット解析を行った。また、走査型電子顕微鏡 (以下 SEM) による破面観察を行った。

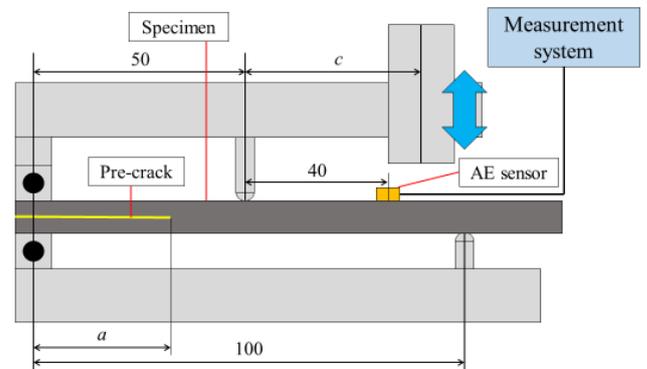


Fig. 2 Experiment equipment of MMB test

3. 実験結果

3.1 き裂進展挙動

各試験から得られたき裂進展速 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG の関係を図 3 に示す。

試験片ごとにばらつきはあるものの、モード I およびモード II の純粋モードにおいては da/dN と ΔG の関係は直線状に分布しており、指数則が成立することが分かった。両モードともに、D-type 試験片の方が M-type 試験片と比較して da/dN が低い結果となった。

一方、混合モード試験においてはばらつきが大きくなるとともに、 ΔG_{total} が大きい領域では da/dN が ΔG_{total} に依存しない結果となった。また、モード I およびモード II 試験で見られた試験片タイプに依存する da/dN の挙動と異なり、M-type 試験片の方が D-type 試験片より da/dN が低い結果となった。

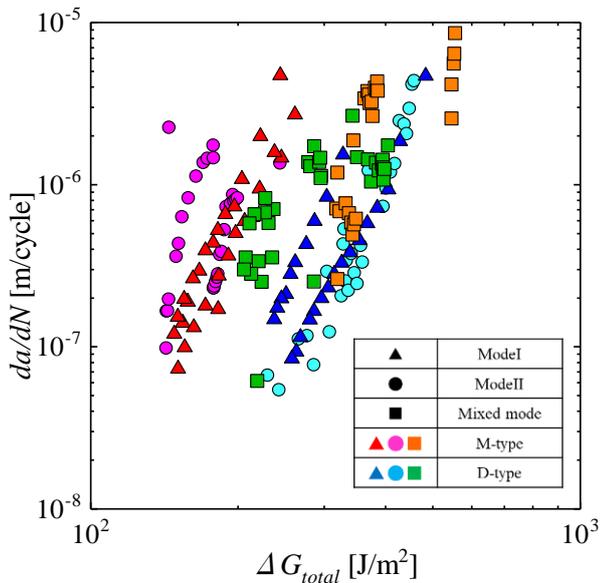


Fig. 3 Relationship between da/dN and ΔG

3.2 破面観察

モードIおよびモードIIき裂進展試験後の各試験片破面をSEMで観察した結果を図4に示す。矢印はき裂の進展方向を示す。

モードIのM-type試験片およびモードIIの両タイプ試験片において、試験片タイプで予想される破壊形態、すなわち樹脂割れおよび界面はく離破壊をそれぞれ得た。しかしながら、モードI試験を行ったD-type試験片では、繊維の露出が見られる界面はく離の様相に加えて、繊維に樹脂が付着した状態で割れる様相が見られた。すなわち、界面はく離と同時に樹脂割れが生じたことが分かった。このことから、試験片タイプのみならず、き裂の変形モードがCFRPの破壊形態に影響を与えることが考えられる。

混合モード試験においては、M-typeでは樹脂割れが生じたが、D-typeではき裂進展前半の ΔG が大きい領域で界面はく離と樹脂割れが同時に生じ、 ΔG が小さい領域では界面はく離が支配的に変化した。これは、き裂が進展することで、き裂先端が三点曲げ圧子に近づくと同時に開口部から離れることによりモードII成分の影響が大きくなることが原因だと考えられる。

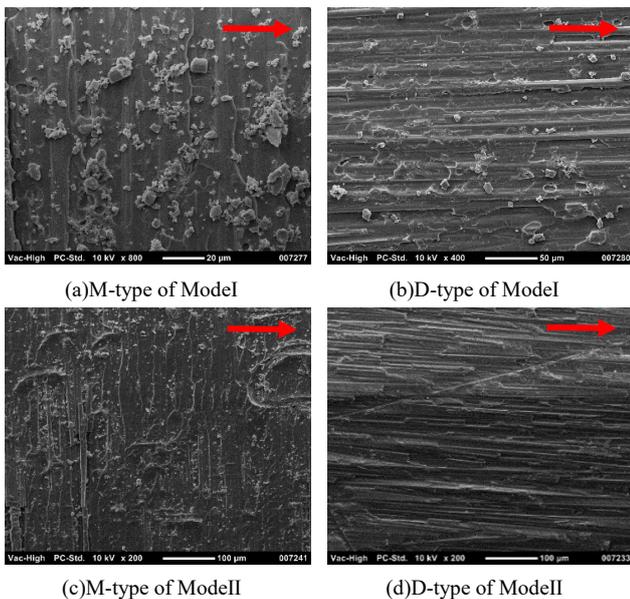


Fig. 4 Observations of fracture surface

3.3 AE信号解析

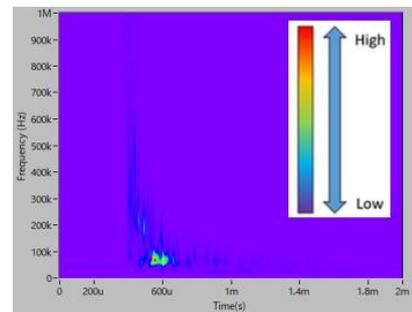
各試験条件において測定されたAE信号の基本特性として、平均周波数と持続時間を表1に示す。平均周波数はどちらの試験方法においても界面はく離型の方が高い値を示すことが分かった。持続時間はM-typeの方が長く、試験方法ではモードIの方が長くなることが分かった。したがって、AE信号の基本特性からCFRPが受ける荷重による変形モードや、内部の破壊形態を同定することが可能であると考えられる。

また、AE信号をウェーブレット解析した結果を図5に示す。材料内部で樹脂割れが生じた際には50~100kHz程度で、界面はく離が生じた際には150~250kHz程度の周波数成分が強く検出され、先行研究と同様の傾向が見られた。

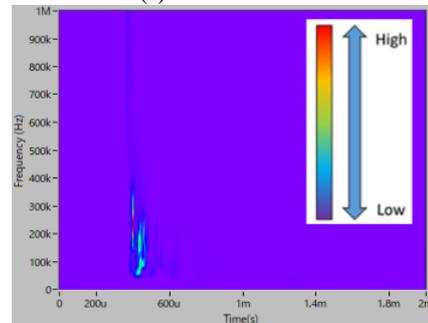
以上のように、AE信号はき裂進展メカニズムを反映したものであることが分かった。

Table. 1 Characteristic of AE signals

	M-type		D-type	
	ModeI	ModeII	ModeI	ModeII
Average frequency [kHz]	30~100	25~100	50~210	50~200
Duration [μs]	500~1400	200~1200	200~1100	200~500



(a) Matrix crack



(b) Interfacial debonding

Fig. 5 Results of wavelet analysis

4. 結言

- (1) 各試験条件におけるき裂進展速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG の関係には指数則が成り立つことが確認できた。しかし、混合モード試験では da/dN が ΔG に依存しない領域が存在した。
- (2) 破面観察の結果、試験片の積層条件だけではなく、き裂の変形モードの違いによって微視的な破壊形態が変化することが分かった。
- (3) AE信号の平均周波数および持続時間において、樹脂割れが生じる際には持続時間が長くなり、平均周波数が低くなる傾向が見られ、破壊形態と変形モードの特徴を反映するAE信号特性が確認できた。
- (4) AE信号をウェーブレット解析した結果、50~100kHz帯と150~250kHz帯で強い周波数成分を示し、それぞれ樹脂割れと繊維樹脂界面はく離を反映したものであった。(参考文献省略)