

炭素繊維強化プラスチックの混合モード荷重下における疲労き裂進展挙動

Fatigue crack propagation behavior of carbon fiber reinforced plastic under mixed-mode cyclic loading

知能機械システム工学コース

材料強度学研究室 1225001 青木 弓門

1. 緒言

炭素繊維とプラスチックの複合材料である炭素繊維強化プラスチック(以下 CFRP)は、プラスチックの軽量性と炭素繊維の高強度、高剛性を併せ持つ材料であり、近年、自動車や航空宇宙機器など広い分野で用いられている。CFRP は繊維に樹脂が含浸したプリプレグシートを積層して作製する方法が一般的であり、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⁽¹⁾。従って、このような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保つために重要である。また、CFRP の破壊では、微視的に見ると繊維 - 樹脂界面の破壊や樹脂部の破壊などメカニズムも多様となりこの観点からの検討も必要である。

一方、CFRP を用いた実構造での破壊は、複数の破壊モードが組み合わさって生じるにも関わらず、このような混合モード下での層間破壊特性を評価したものは単一のモードに比べ少ない。そのため、混合モード下での強度特性の把握が必要である。

アコースティックエミッション(AE)は、物体の内部で破壊現象が生じた際、蓄積されていたエネルギーの一部が弾性波として放出される現象であるため、微視的な破壊を検出することが可能である⁽²⁾。そこで本研究では、CFRP 積層材の、モード I およびモード II、またそれら 2 つの混合モード下の層間疲労き裂進展試験を行う。そして、モードの違いによる巨視的き裂進展挙動と、出力される AE 信号の解析を通じて、微視的破壊メカニズムについて調査する。

2. 実験手順

2.1 試験片

厚さ 83.0 μm の CFRP プリプレグ(TR350C100S, 三菱ケミカル(株))を 60 枚積層して試験片を作製した。積層構成は $[0^\circ_{20}/90^\circ_{10}]_s$ とし、予き裂導入源として片側の 0° 層と中央の 90° 層の端部の間に厚さ 12.5 μm のカプトンシートを挿入した。成形方法は、ホットプレスを用いた加圧成形である。成形条件は、1 時間かけて 130°C まで上昇させ、その後その温度で 2 時間保持した後に自然冷却させるものである。試験片寸法は $120 \times 25 \times 4.5 \text{ mm}$ とした。試験片の概略図を図 1 に示す。

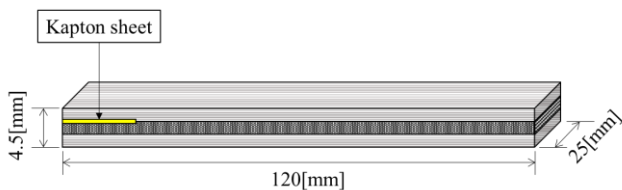


Fig.1 Dimension of specimen

2.2 実験方法

油圧サーボ式材料試験機を用いて疲労き裂伝ば試験を行った。予め試験片のカプトンシートの前方に予き裂を約 20 mm 導入した。AE センサを予き裂とは異なる試験片端より 10 mm の位置に貼付した。実験条件は、変位制御で繰り返し速度を 2.0 Hz とした。

実験はモード I (Double Cantilever Beam : DCB 試験), モード II (End Notched Flexure : ENF 試験), またそれら 2 つのモードが同時に負荷される混合モード (Mixed Mode Bending : MMB 試験) について行った。

図 2 に MMB 試験に用いた治具の模式図を示す。負荷荷重位置 c を任意に変更することでモード I, II のエネルギー解放率 G_I, G_{II} の比を変えることができる。本研究では、モード比 $G_I : G_{II}$ を 25 : 75, 50 : 50, 75 : 25 の 3 種類に変更して実験を行った。

き裂長さは読み取り顕微鏡を使用して測定した。各モードにおけるエネルギー開放率範囲 ΔG の算出には式(1)および式(2)を用いた。混合モードにおけるエネルギー開放率範囲 ΔG_T の算出は、 $\Delta G_T = \Delta G_I + \Delta G_{II}$ として計算した。ここで、 P_{\max}, P_{\min} は荷重の最大値、最小値で、 a はき裂長さ、 B は試験片幅である。 $(EI)_0, (EI)_{0+90}, (EI)_{0+90+0}$ はそれぞれ 0° 単層, $0^\circ+90^\circ$ 層, 3 層全体の曲げ剛性である。

記録した AE 信号についてウェーブレット解析を行った。また試験終了後、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破面の観察を行った。

$$\Delta G_I = \frac{(P_{\max}^2 - P_{\min}^2)a^2}{2B} \left\{ \frac{1}{(EI)_0} + \frac{1}{(EI)_{0+90}} \right\} \quad (1)$$
$$\Delta G_{II} = \frac{(P_{\max}^2 - P_{\min}^2)a^2}{8B} \left\{ \frac{1}{(EI)_{0+90+0}} + \frac{1}{(EI)_0 + (EI)_{0+90}} \right\} \quad (2)$$

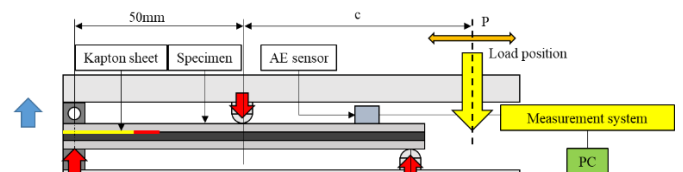


Fig.2 Schematic illustration of MMB test

3. 実験結果

3.1 き裂進展挙動

本実験で得た各モードにおけるき裂進展速度 da/dN とエネルギー開放率範囲 ΔG の関係を図 3 示す。

いずれのモードでも da/dN と ΔG の関係はばらつきが見られるものの、ほぼ指数則が成り立つことが確認できた。

モード II における da/dN と ΔG の関係は他のモードと比較して、傾きが若干小さくなった。また、単一のモード I に比べると混合モードの方が da/dN が高くなる傾向が見られた。本試験では、き裂が対称面を進展していないため、成形時の熱膨張などの影響で DCB 試験においても、モード II 成分がある程度含まれる⁽³⁾。今回の結果にはこの点を考慮できていないが、同一の ΔG で比較すると純粋なモード I からモード II の割合が増えるに従い da/dN が高くなりより危険側に推移することが分かった。

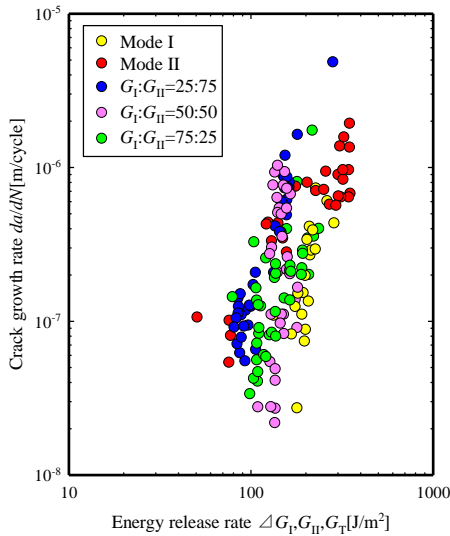


Fig.3 Relationship between da/dN and ΔG

3.2 AE 特性

測定した AE 信号をウェーブレット解析した結果の一例を図 4 に示す。縦軸に周波数成分、横軸は時間を表しており、周波数の相対的な強度分布を色相を変えて表示した。

また、CFRP 積層材の破壊では、AE 信号のピーク周波数と破壊形態の間に特定の関係性が見られることが報告されている⁽⁴⁾。

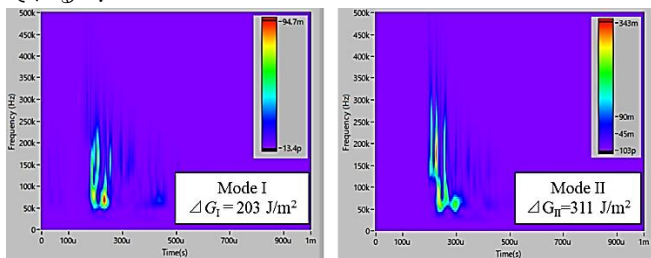


Fig.4 Wavelet analysis results for mode I and mode II cracks

図 4 に示すモード I の解析結果は、50~100 kHz 付近の成分が強く検出された。これは ΔG の全領域でほぼ同様の結果であった。すでに報告されている AE 信号と破壊形態の関係によると、樹脂割れでき裂が進展していることが考えられる。一方、モード II の解析結果は、2 種類の結果が得られた。き裂の短い領域ではモード I 同様 50~100 kHz 付近の成分が強く検出されたため樹脂割れによりき裂が進展していると考えられる。また、一定量き裂が進展すると図 4 に示すように 150~200 kHz 付近の成分も強く検出されたため、樹脂割れに加え、繊維間界面はく離によってもき裂が進展していると考えられる。

混合モード試験では、どの混合モード比でもモード II と同様 2 種類の解析結果が得られた。しかし、モード II 成分が増加することで、繊維間界面はく離による 150~200 kHz の信号も多く検出された。

3.3 破面観察

試験後の試験片の 90°側破面を SEM により観察した結果を図 5 に示す。矢印はき裂の進展方向を示す。

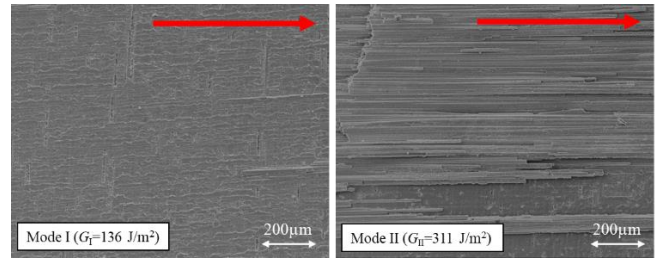


Fig.5 SEM observation of fracture surface

モード I の破面の様相は樹脂内でき裂が進展していることが確認できた。また ΔG の全領域でほぼ同じ様相であった。一方、モード II の破面の様相は、き裂の短い領域ではモード I 同様樹脂内でき裂が進展していることが確認できたが、一定量き裂が進展した領域では繊維が多く見られたことから、繊維と樹脂の界面でき裂が進展していることが確認できた。

混合モード試験では、どのモード比でもモード II と同様の破面様相が確認することができた。

破面観察より、AE 信号のウェーブレット解析を行った結果と破面の様相は相関があることが分かった。

4. 結言

本研究では、モード I、モード II およびそれら 2 つのモードが同時に負荷される混合モード下での層間き裂進展挙動について調査を行い以下の結論を得た。

- (1) 同一の ΔG で比較すると単一のモード I からモード II の割合が増えるに従い da/dN が高くなり、より危険側に推移することが分かった。
- (2) AE 信号のウェーブレット解析および SEM による破面観察の結果より、き裂の短い領域はいずれのモードでも樹脂割れによってき裂が進展していることが分かった。さらにモード II 成分が増加するに従い一定量き裂が進展すると、繊維間界面はく離によるき裂進展が多くなることが分かった。

これらの結果より、破面の微視的様相と、き裂進展速度とエネルギー開放率範囲の関係には相関があることが分かった。

文献

- (1) 仙北谷英貴, 北條正樹, 長澤長八郎, 劔持潔, 牧廣, “一方向 CF/エポキシ積層板の引張疲労およびモード I 層間はく離疲労き裂伝ばにおける破壊機構の比較”, 材料, Vol.42, No.472(1993), p. 52-58.
- (2) 大津政康, “アコースティック・エミッションの特性と理論”, 森北出版株式会社 2005 年出版
- (3) Makoto Imanaka, Kiyoshi Ishii, Keisuke Hara, Toru Ikeda, Yosuke Kouno, “Fatigue crack propagation rate of CFRP/aluminum adhesively bonded DCB joints with acrylic and epoxy adhesives”, International Journal of Adhesion and Adhesives 85 (2018) 149-156
- (4) 宅間正則, 新家昇, 鈴木健, 藤井俊行, “AE 信号のウェーブレット変換による FRP 積層板の曲げ疲労損傷評価”, 精密工学会誌 68 巻(2002)10 号 p.1309-1315