

モード I および混合モード I + II における CFRP 積層板の層間疲労き裂進展挙動と AE 特性 Delamination fatigue cracks and AE characteristics in CFRP laminates under mode I and mixed-mode I+II

知能機械工学コース
材料強度学研究室 1245020 日浅 優太郎

1. 緒言

母材にプラスチック、強化材は炭素繊維を用いた複合材である炭素繊維強化プラスチック(以下 CFRP)は比強度、比剛性に優れるため、身近なスポーツ用品から自動車やロボットなどの産業機器あるいは建設分野に至るまで幅広く使われている。一般的に、CFRP はプリプレグとよばれる炭素繊維に樹脂を含浸させたシート状の材料を積層し成形する。このような積層構造体では、層間はく離が主要な破壊モードになる。そのため、CFRP を用いた構造体の信頼性確保のためには、そのような破壊挙動の把握が不可欠である。特に複雑な繰り返し荷重下での疲労き裂進展挙動の解明も長期使用に対する信頼性という観点から重要な問題である。

本研究では、一方向積層と直交積層の CFRP 板を用いてモード I、モード II およびそれらを組み合わせた混合モード (I+II) で繰り返し負荷を与え、層間疲労き裂進展挙動を明らかにする。加えて、材料の破壊や変形の挙動を微視的に評価できるアコースティックミッション(AE)を用いて、巨視的なき裂進展挙動と微視的な破壊形態との関係を明らかにすることも目的とした。また、有限要素(FEM)を用いて、各モード試験での層間はく離試験における残留熱応力の影響についても調査した。

2. 材料および実験方法

2.1 試験片作成

本実験で使用した材料は厚さ 83 μm の CFRP プリプレグ (TR350C100S, 三菱ケミカル製) である。このプリプレグを 150 \times 150 mm に切断し、積層条件 [0₁₅/90₁₅]_s, [0₂₀/90₁₀]_s, [0₆₀] で積層した。この時、直交積層材では 0°層と 90°層の間に、一方向材では 15 枚目と 16 枚目の間に厚さ 12.5 μm のカプトンシートを端部に挿入し、予き裂導入源とした。

ホットプレス機を用いて、1 時間で 130°C まで上昇させ、2 時間保持した。ホットプレス機の温度が 90°C になったところで圧力 40MPa を加えた。その後、試験片として 120 \times 25 \times 4.5mm のサイズに切断した。図 1 に試験片の概略を示す。

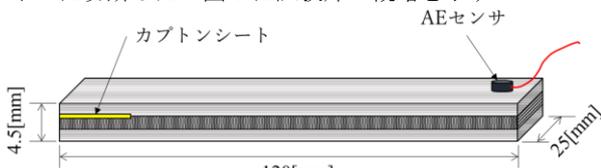


Fig.1 Schematic illustration of specimen

2.2 試験方法

疲労き裂進展試験には油圧サーボ式疲労試験機を用いた。試験に先立ち図 1 の左端部分にカッターナイフを挿入し、カプトンシートの先に予き裂を約 25mm 導入した。また、他方に AE センサを取り付け、繰り返し速度 2.0Hz の変位制御で試験を行った。

モード I およびモード II の単一モードき裂進展試験では、それぞれ DCB 試験片および ENF 試験片を用いた。混合モード

試験(MMB 試験)ではモード比(G_I/G_{II})を用いて、任意に変えることが可能な自作の治具において $G_I/G_{II}=1$ で試験を行った。

き裂の長さ a は読み取り顕微鏡で測定した。各き裂長さにおけるエネルギー解放率範囲 ΔG の計算は、それぞれのモードに対し式(1)および式(2)を用いた。ここで、 P_{max} , P_{min} はそれぞれ荷重の最大値と最小値、 a はき裂進展長さ、 B は試験片の幅である。 $(EI)_0$, $(EI)_2$, (EI) はそれぞれき裂進展部の 0°単層, 0°+90°層およびき裂のない試験片の曲げ剛性である。試験中、計測した AE 信号はパーソナルコンピュータ(PC)に記録し、適宜ウェーブレット解析を行った。破面観察には走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた。また、成形時に生じた残留熱応力を考慮して、エネルギー解放率範囲については機械的負荷を受けた場合と温度変化を与えた場合の重ね合わせで求めた。

$$\Delta G_I = \frac{(P_{max}^2 - P_{min}^2)a^2}{2B} \left\{ \frac{1}{(EI)_0} + \frac{1}{(EI)_2} \right\} \quad (1)$$

$$\Delta G_{II} = \frac{(P_{max}^2 - P_{min}^2)a^2}{8B} \left\{ -\frac{1}{(EI)} + \frac{1}{(EI)_0 + (EI)_2} \right\} \quad (2)$$

3. 実験結果

3.1 モード II き裂進展挙動

図 2 に各試験片におけるモード II のき裂進展速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG_{II} の関係を示す。すべての積層条件の試験片において、 da/dN - ΔG_{II} の間には指数則が成り立つと言えるが、直交積層材では da/dN のばらつきがかなり見られた。これは 0°+90°層の残留熱応力によるき裂進展部分のたわみが影響していると考えられる。また、同一 ΔG_{II} で比較すると、進展速度 da/dN は [0₁₅/90₁₅]_s, [0₂₀/90₁₀]_s, [0₆₀] の順に大きかった。これはき裂進展後の試験片の曲率の大きさの傾向と一致した。

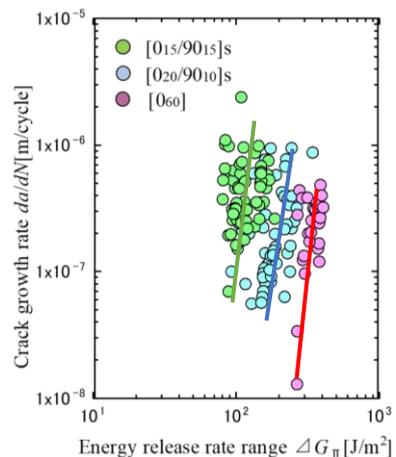
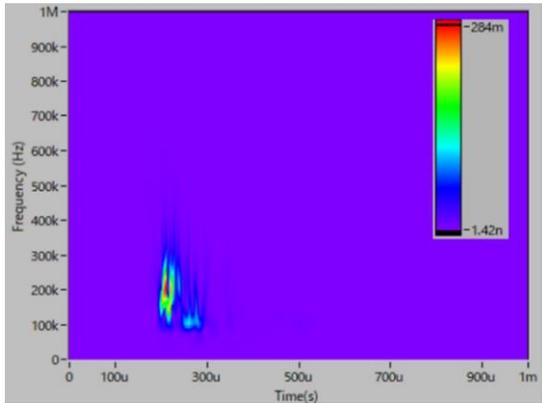


Fig.2 Relationship between da/dN and ΔG_{II}

3.2 AE 特性と破面

図3にモードII試験で測定されたAE信号をウェーブレット解析した結果の一例を示す。横軸に時間、縦軸に周波数を取り、信号の相対的強度を色相を変えて表している。



Mode II ($\Delta G_{II}=240.3J/m^2$)

Fig.3 Result of wavelet analysis of AE signals

図3では150~250kHz付近の周波数成分の強度が大きいことがわかる。このことは、樹脂と繊維の界面破壊の特徴であることが報告されている⁽¹⁾。すべての積層条件についてのモードII、混合モード試験でこの信号が見られた。一方、モードIでは50~100kHz付近の周波数成分の強度が大きい信号が現れた。

また、試験終了後の試験片の破面をSEMで観察した結果、モードI破面にはすべての積層条件で樹脂割れが主な破壊形態であることがわかった。モードIIでもき裂初期はモードIと同様の破面様相が見られたが、き裂が進展し、 ΔG_{II} が大きくなった90°側の破面には繊維が確認できたため、樹脂割れと、樹脂と繊維の界面はく離が混在していることがわかった。混合モードでもモードIIと同様の破面が観察された。以上のことより、AE信号のウェーブレット解析において50~100kHz帯での強い成分は樹脂での破壊と対応していることが分かった。また、150~200kHz帯での強い成分は樹脂と繊維の界面での破壊と対応していることが分かった。しかしながら、積層条件の違いによる微視的破壊形態の差異は見られなかった。

3.3 有限要素法によるGの評価

直交積層材非対称き裂進展のモードIIの場合、樹脂硬化の際に生じる熱収縮による残留応力がき裂進展挙動に影響を及ぼすと考えられる。そこでの積層条件[0₁₅/90₁₅]sについて、残留熱応力を考慮してVCCT(仮想き裂閉口法)をにより、Gを計算した。使用したFEM解析ソフトはANSYS2019R1である。モデルの作成には四角形八節点のPLANE183を用いた。また、温度変化として成形温度を考え、-110°Cを与えた。

残留熱応力を考慮せずに計算した ΔG_{II} (式(2)およびFEM)と解析的にこれを考慮した文献⁽²⁾に基づいて計算した修正 ΔG_{II} およびFEMによる修正 ΔG_{II} とき裂長さとの関係を図5に示す。

残留熱応力を考えない式(2)とFEMの解析解は近い値を示すが、若干FEMによる ΔG_{II} が大きい。しかし、残留熱応力を考慮すると実験値で約2.5倍、FEMでは約3倍 ΔG_{II} が大きくなること分かった。

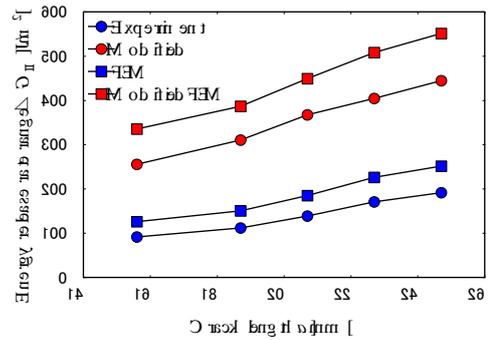


Fig.5 Relationship between a and ΔG_{II} of ENF model

3.4 残留熱応力を考慮したき裂進展挙動

図6にモードIIの da/dN と残留熱応力を考慮した修正 ΔG_{II} の関係を示した。図3と比較すると、非対称き裂進展の場合の da/dN - ΔG_{II} の関係のばらつきが小さくなり、進展速度 da/dN は積層条件によらず、ほぼ同じになった。

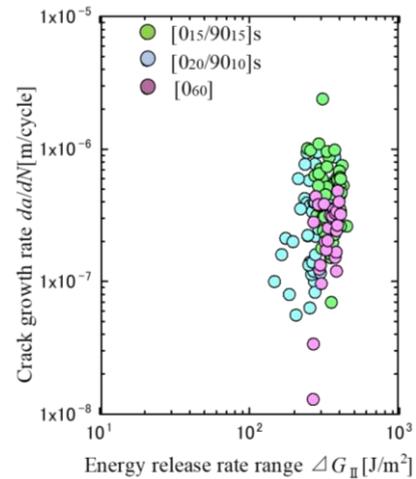


Fig.6 Relationship between da/dN and ΔG_{II}

5. 結言

本研究では一方向と2種類の直交CFRP積層板を用いて、モードI、モードIIおよび混合モード(I+II)の繰り返し荷重におけるき裂進展挙動とき裂進展におけるAE信号について調査した。それに加えて、有限要素解析を用いて、残留熱応力の疲労強度の評価への影響について調べた。得られた結論を以下に示す。

- (1) き裂進展後の破面観察の結果、モードIでは主に樹脂割れが、モードII及び混合モードでは ΔG_{II} の増加に従って、樹脂割れから樹脂-繊維界面割れと変化する微視的破壊メカニズムが明らかになった。このことはAE信号の特徴に反映されることが分かった。
- (2) モードIIき裂進展において da/dN - ΔG_{II} の関係は積層構成により大きく変化した。非対称き裂進展に対し、残留熱応力を考慮した ΔG_{II} を用いることで da/dN を表わすことができた。

参考文献

- (1) 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 Vol.68, No.10 (2002), PP.1309-1315
- (2) Tomohiro Yokozeki, Toshio Ogasawara, Takahira Aoki, ” Correction method for evaluation of interfacial fracture toughness of DCB, ENF and MMB specimens with residual thermal stresses”