

# 卒業論文要旨

## 混合モード(I+II)荷重下におけるCFRP層間はく離疲労き裂進展挙動

### Delamination fatigue crack propagation behavior of CFRP under mixed-mode cyclic loading

システム工学群

材料強度学研究室 1200125 日浅 優太郎

#### 1. 緒言

母材にプラスチック、強化材に炭素繊維を用いて複合化した炭素繊維強化プラスチック(以下 CFRP)は比強度、比剛性が高い。その特性を活かして、航空機、自動車、スポーツ用品、建築など広い分野で使われている<sup>(1)</sup>。CFRPはプリプレグとよばれる炭素繊維に樹脂が含浸したシート状の材料を積層して成形されることが一般的である。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ことから、CFRPを用いた構造体の信頼性確保には、その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は長期信頼性の観点から重要な問題であり、層間はく離疲労き裂進展においてどのような微視的破壊機構が支配的となるかを明らかにしておくことが必要である。

本研究では、直交積層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)で繰り返し荷重を与え、層間疲労き裂進展挙動を明らかにする。特にモードIとモードIIの割合を変えた場合の影響に注目した。併せて、材料の破壊や変形の様子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、き裂進展挙動とき裂進展に伴うAE信号との関係を明らかにすることを目的とする。

#### 2. 材料および実験方法

##### 2.1 試験片

本実験で使用した材料は厚さ 83 $\mu\text{m}$  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[0<sub>20</sub>/90<sub>20</sub>/0<sub>20</sub>]で積層した。この時、0°層と90°層の間に12.5 $\mu\text{m}$ のカプトンシートを端部に挿入した。このカプトンシートは予き裂導入源となる。次に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110°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にカットした。図1に試験片の概略を示す。

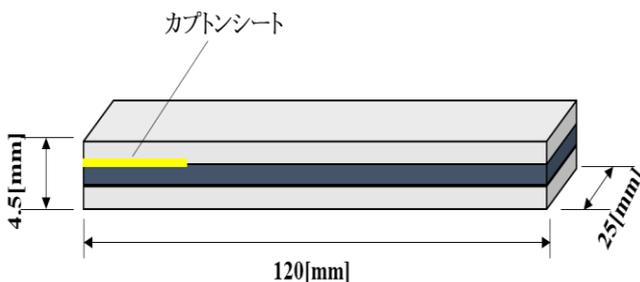


Fig.1 Schematic illustration of specimen.

##### 2.2 試験方法

疲労き裂進展試験は油圧サーボ式材料試験機を用いて行った。試験を行う前にカッターナイフを用いてカプトンシートの先に予き裂を約20mm導入した。予き裂とは逆の端部から10mmの位置にAEセンサを取り付けた。試験は繰り返し速度2.0Hzの変位制御で行った。

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。モードIIでは3点曲げ負荷した。混合モードき裂進展試験(MMB試験)の模式図を図2に示した。MMB試験では荷重負荷位置  $c$  を任意に変えることが可能な治具を作製し、これを調整することで混合モードにおけるモード比  $G_I:G_{II}$  を 75:25, 50:50 および 25:75 の 3 種類に変えて試験を行った。

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。なお、混合モードでは、 $\Delta G_{I+II} = \Delta G_I + \Delta G_{II}$  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。 $(EI)_0$ ,  $(EI)_l$ ,  $(EI)$  はそれぞれ0°単層、0°+90°層および試験片全体の曲げ剛性である。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。また破面観察には走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた。

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

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

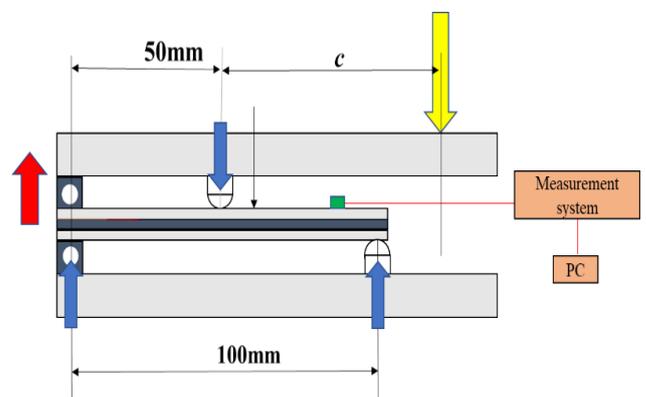


Fig.2 Schematic illustration of crack growth test

### 3. 実験結果

#### 3.1 き裂進展挙動

図3に疲労き裂進展試験において得られたき裂進展速度  $da/dN$  とエネルギー解放率範囲  $\Delta G$  の関係を示す。

各モード下での  $da/dN$ - $\Delta G$  の関係にはばらつきが見られたものの、ほぼ指数則が成り立つ。しかしながら、モードIIにおける  $da/dN$ - $\Delta G$  の関係は他の場合と比較して、指数(傾き)が若干小さくなった。モードII成分が重畳する混合モードでは、モードIの場合よりも  $da/dN$  が高くなる傾向が見られた。特に  $G_I:G_{II}=25:75$  では同一の  $\Delta G$  における  $da/dN$  が最も大きくなった。本試験では、き裂が対称面を進展しないため、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<sup>(2)</sup>。図3の結果ではこの点を考慮できていないが、モードII成分が大きくなる程、 $\Delta G$  の小さい領域ではこの影響が大きくなり、 $da/dN$  が加速側になったと思われる。

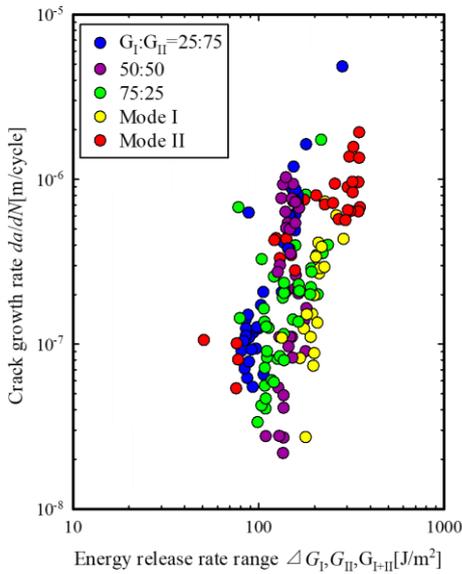


Fig.3 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta G$

#### 3.2 AE 特性

図4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、縦軸に周波数をとって、信号の相対的強度を色相を変えて表している。

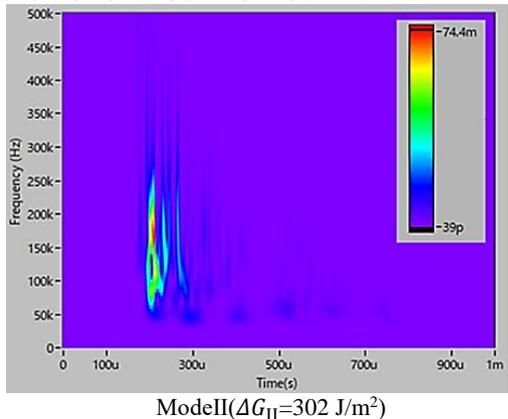


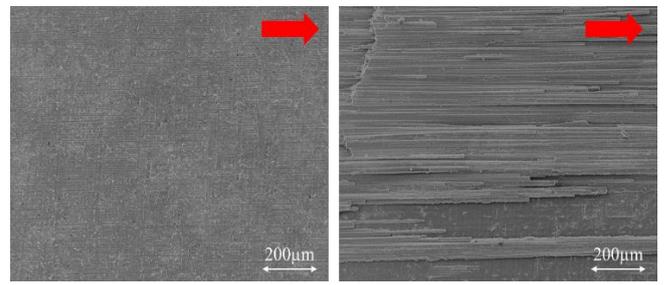
Fig.4 Result of wavelet analysis of AE signals

この図で赤く示された 150~200kHz 帯の信号成分の強度が大きいことがわかる。この周波数成分が強いのは、樹脂と繊維の界面破壊が生じている時の特徴であることが報告されている<sup>(3)</sup>。

混合モードの場合、モードIIの割合が大きいほど、この周波数帯の AE 信号が強くなる傾向が見られた。

#### 3.3 破面観察

図5に各モードでの試験終了後の試験片の 90°層側の破面を SEM で観察した結果を示す。赤い矢印がき裂の進展方向である。モードI破面には繊維が確認されず、樹脂割れが主な破壊形態であることがわかる。モードIIでもき裂初期 ( $\Delta G_{II}=50.6 \text{ J/m}^2$ ) はモードIと同様の破面様相が見られたが、 $\Delta G_{II}$  の大きい領域では破面に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。混合モードではすべてのモード比でモードIIと同様の破面観察結果が得られた。以上の破面観察より、AE 信号のウェーブレット解析から得られた 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。



(a) Mode I ( $\Delta G_I=136 \text{ J/m}^2$ ) (b) Mode II ( $\Delta G_{II}=311 \text{ J/m}^2$ )  
Fig.5 SEM observations of fracture surface

### 4. 結言

本実験では 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よる AE 信号について調査した。得られた結論を以下に示す。

- (1) すべてのモードで、き裂進展速度とエネルギー解放率範囲の間に指数則が成り立つ領域が確認された。モードII成分が大きくなる程、 $da/dN$  が大きくなることが分かった。このことは、特に  $\Delta G$  の小さい領域で顕著であった。
- (2) 検出された AE 信号をウェーブレット解析した結果、モードIでは 50~100kHz での周波数成分の信号が強く、モードIIではこれに加え、150~200kHz の信号も強くなっていることが分かった。破面観察の結果、モードIおよびモードIIのき裂初期では樹脂割れが支配的であり、 $\Delta G_{II}$  の大きい領域では樹脂と繊維の界面はく離と樹脂割れが混在していた。また、これら AE 信号の特徴と破面様相は対応していることが分かった。

### 文献

- (1) 三木光範, 福田武人, 元木信弥, 北條正樹著, “複合材料”
- (2) 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, vol.85, (2018), pp. 149-156.
- (3) 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