

CFRP 積層板の層間はく離疲労き裂進展時の AE 信号特性

Characteristics of acoustic emission generated by fatigue crack propagation in CFRP laminates

システム工学群

材料強度学研究室 1200111 夏井 心平

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) は高強度、高剛性でかつ軽量である。これらの特徴を有し、構造部材として幅広く使用されるようになってきた⁽¹⁾。本材料の成形方法の一つとして、繊維に樹脂を含浸された半硬化状のプリプレグシートを積層するのが一般的ではあるが、こうした場合、層間はく離による破壊が生じやすくなる。この破壊を微視的に捉えると、繊維-樹脂間のはく離、樹脂割れおよび繊維破断など、その形態は複雑である。従って、CFRP を用いた構造物の長期信頼性を得るためには層間はく離疲労き裂進展における微視的破壊形態を把握することが重要である。

破壊形態を非破壊検査する方法として AE 法 (Acoustic Emission) がある。この方法では、稼働中の検査が可能であるため、非常に有効な非破壊検査法といえる⁽²⁾。そこで、本実験では、破壊形態が異なるように作製した 2 種類の試験片に対して、CFRP の繰り返し荷重におけるモード I およびモード II 層間はく離疲労き裂進展試験を行い、き裂進展によって発生する AE 信号を調査した。この AE 信号をウェーブレット解析し、微視的なき裂進展挙動と AE 特性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

本実験では、異なる破壊形態を観察するために 2 種類の試験片を用意した。一方の材料では、150×150mm に切り出したプリプレグシート (TR350C100S, 三菱ケミカル製) を同一方向に 30 枚積層し、その上に予き裂導入源としてカプトンシート (厚さ 12.5μm) を端部より約 30mm と繊維-樹脂界面はく離を起こさせるために炭素繊維を配置し、さらに上から同じ方向のプリプレグシートを 30 枚積層した (以下、TypeA)。

他方の材料は、中央部にプリプレグシートを直角方向に 2 枚配置して [0₂₉/90₂/0₂₉] で積層した (以下、TypeB)。TypeB においても TypeA と同様に板厚中央にカプトンシートを約 30mm 挿入している。いずれの材料もホットプレス機を用いて、圧力 40MPa 下で 1 時間 130°C まで熱し、2 時間保持した後、自然冷却をする条件で、加圧成形を行った。その後、図 1 に示す寸法に切断し、試験片とした。TypeA および TypeB の中央断面図を模式的に図 2 に示す。

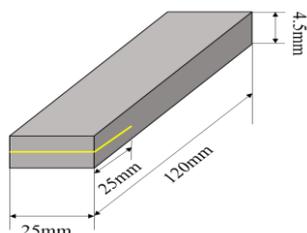


Fig1 Dimensions of specimens

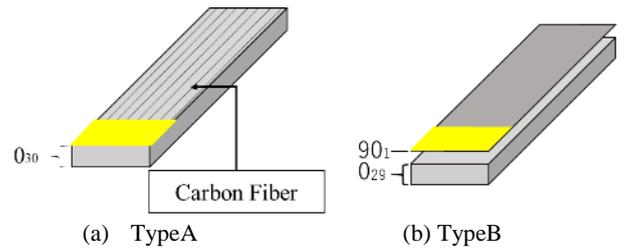


Fig.2 1/2section of specimens

2.2 実験方法

本実験では、モード I およびモード II 疲労き裂進展試験を行った。試験の概要図を図 3 に模式的に示す。図に示すような条件において、モード I では DCB タイプ、モード II では ENF タイプで負荷した⁽³⁾。支点間距離 100mm、繰り返し速度を 2Hz とし、変位制御で試験を行った。き裂長さの測定は、読み取り顕微鏡を用いた。試験終了後、走査型電子顕微鏡 (以下 SEM) を用いて破面観察を行った。

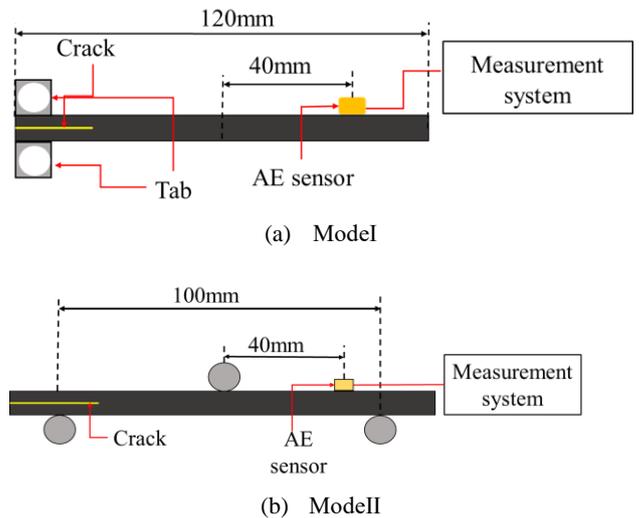


Fig.3 Loading condition

また、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。P_{max}, P_{min} は、それぞれ荷重の最大値と最小値、a はき裂長さ、B は試験片の幅である。EI は試験片全体の曲げ剛性である⁽⁴⁾。

$$\Delta G_I = \frac{(P_{max}^2 - P_{min}^2) a^2}{BEI} \quad (1)$$

$$\Delta G_{II} = \frac{(P_{min}^2 - P_{min}^2) \cdot a^2}{16BEI} \quad (2)$$

3. 結果と考察

3.1 き裂進展挙動

図4に本実験で得られたき裂進展速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG の関係を示す。

測定データは少ないものの、モードIでは TypeA および TypeB 間で da/dN - ΔG 関係に大きな差異はなく、モードIIでは TypeB より TypeA の da/dN が大きくなることが分かった。

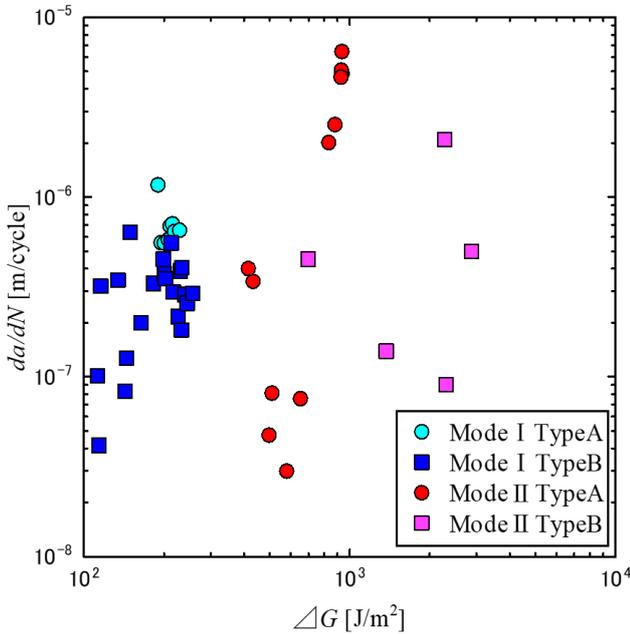


Fig.4 Relationship between da/dN and ΔG_I , ΔG_{II}

3.2 AE 特性

図5にモードIのき裂進展試験によって得られた AE 信号をウェーブレット解析した結果を示す。図の縦軸は周波数、横軸は時間をとり、AE 信号の相対的強度を色相の違いで表している。また、FRP 積層板における破壊過程で発生する AE 信号の周波数成分と破壊形態の関係については既に報告されており、50~100 kHz は樹脂割れによる AE 信号、150~250 kHz が繊維樹脂界面破壊による AE 信号であるとされている⁽⁵⁾。

TypeA, および TypeB で得られた信号は、両者に共通して、130kHz 付近の信号が強くなっている。しかし、続いて TypeA では 100kHz 付近、TypeB では 50kHz 付近でも強い信号が検出されている。また、モードIIにおいては、TypeA で 110kHz 付近、TypeB で 130kHz 付近の信号が強くなっていた。その後、TypeA では反応は出なかったが、TypeB では直前と同様に 130kHz 付近に信号が観察された。

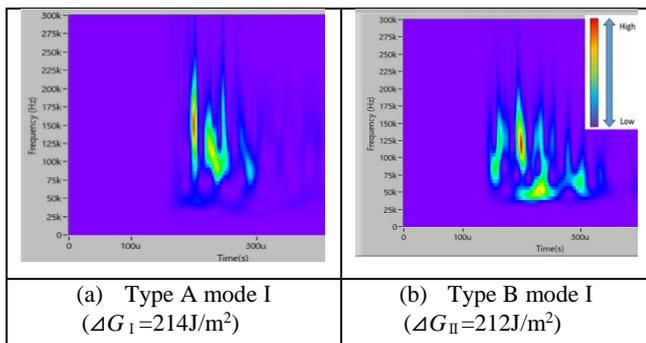


Fig.5 Results of wavelet analysis

3.3 破面観察

図6に SEM で破面を観察した結果を示す。き裂の進展方向は矢印に示すとおり図の下から上となっている。図6(a)に示す TypeA のモードI 試験の破面では樹脂割れと繊維-樹脂界面はく離の両者を観察することができる。一方、図6(b)に示す TypeB の試験片では、ほぼ全面が樹脂割れであることがわかる。これに対し、モードII試験の各試験片の破面を観察したところ、TypeA の試験片ではモードIの破面と同様に樹脂割れと繊維-樹脂界面はく離の両者が見られた。TypeB においても樹脂割れを観察することができたが、モードIの破面との比較において繊維界面が進行方向に見られたことから、90°層を貫通し、0°層の界面で一部、き裂が進展したことがわかった。

AE 信号と対応して考えると、最初の共通した周波数域に続いて見られる強度の高い信号の周波数成分の差異が樹脂部の破壊様相の差となって現れたと考えられる。すなわち、繊維の間にある樹脂が割れる TypeA では AE 信号の周波数が、全面が樹脂割れとなる TypeB のそれに比べ高くなる。

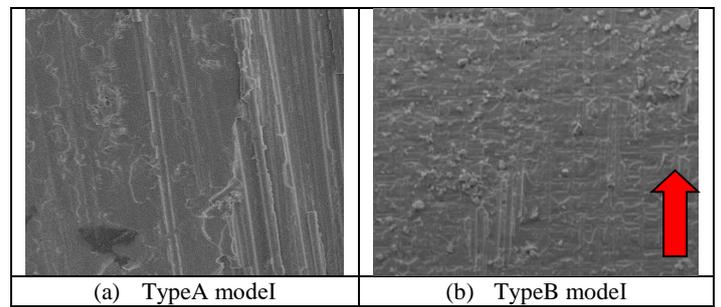


Fig.6 Observations of fracture surface

4. 結言

本実験では、破壊形態の異なる2つの試験片について、繰り返し荷重における層間はく離疲労き裂進展試験を行い、モードIおよびモードIIのき裂挙動によって発生する AE 信号と破面様相を比較し、以下の結言を得た。

- (1) モードIでは TypeA および TypeB 間の da/dN - ΔG 関係に差はなく、モードIIでは TypeB より TypeA の da/dN が大きくなる。
- (2) AE 信号と破面観察を比較した結果、AE 信号の最初に見られた周波数域に続いて見られた強度の高い周波数の大きさが、樹脂割れの種類に影響する。

文献

- (1) 藤井太一, 座古勝(1978) “複合材料の破壊と力学” 実教出版株式会社
- (2) 成澤郁夫 “アコースティック・エミッション(AE)法の原理と応用” マテリアルライフ学会 Materials Life Vol.3 No.1
- (3) 影山和郎 “複合材料の破壊力学(II)” 日本複合材料学会誌 (1992), 158-165
- (4) 影山和郎 “複合材料の破壊力学(I)” 日本複合材料学会誌 (1992), 83-89
- (5) 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(2002) No.10.