研究論文

疲労負荷下における切欠きを有する 一方向炭素繊維強化プラスチック積層板の スプリッティング進展挙動評価

工藤 暉大^{*1}, 小林 訓史^{*2}, 長田 稔子^{*3}

(2019年7月12日受付)

Characterization of Splitting Growth Behavior in Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates with a Notch Subjected to Fatigue Load

Akihiro KUDOU,^{*1} Satoshi KOBAYASHI^{*2} and Toshiko OSADA^{*3}

(Received July 12, 2019)

Abstract: Tensile fatigue tests using acoustic emission (AE) measurements were performed on unidirectional carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates with a notch to investigate the relationship between the fatigue damage behavior and the associated AE behavior. Immediately subsequent to the initiation of the tests, splitting occurred along the direction of the fiber from the tip of a notch, and rapidly progressed for all investigated stress levels. Thereafter, the rate of development was almost constant after 3×10^4 cycles and the AE behavior also changed. These results indicate that the AE behavior is indicative of the splitting behavior. We discussed the AE behavior based on the experimental results for the splitting behavior and the relationship between the AE, and the fatigue damage behavior of the unidirectional CFRP laminate was obtained. From this relationship, it is possible to predict the damage type, size, and quantity by comprehensively evaluating the frequency characteristics, and each parameter of the AE waves.

Key words: CFRP, Fatigue, Notch, Splitting, Acoustic Emission

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (carbon fiber reinforced plastics: CFRP) は軽量かつ高い強度、剛性を有しており、耐疲労性や耐食性にも優れている。また、積層板を設計する際に、強化繊維の種類や積層方向を変更することで、任意の機械的特性を付与させることが可能である。そのため、輸送機械や社会インフラなどの構造部材に適用が拡大している。このような構造部材は常に動

的荷重を受けているため、構造部材の安全性や信頼性を向上させる上で、疲労損傷の早期検出および疲労損傷挙動の評価が必要不可欠である。

そこで注目されている方法として、アコースティックエミッション (acoustic emission: AE) 法が挙げられる^{1~3)}。AE とは、部材に変形またはき裂が発生する際、蓄えられていたひずみエネルギーが解放され、弾性波が発生する現象である。AE 法では、生じた弾性波をリアルタイムにセンサーで検出しその波形を分析することで、検査対象に発生した損傷の規模や位置、モードを評価する。そのため、検査対象が稼働中であっても微視的レベルの損傷挙動の評価や損傷モードの識別が可能である。また、損傷の発生から進展を中断することなく評価できるため、検査対象に対して最終破壊する前に早期警告が可能であり、構造部材の安全性や耐久性の向上が期待できる。さらに、AE 法では小さな圧電センサーを検査対象

^{*1~*3} 首都大学東京大学院システムデザイン研究科システムデザイン専攻機械システム工学域 (192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

^{*1} 大学院生 Graduate Student, ^{*2} 教授 Professor,

^{*3} 特任助教 Assistant Professor

Fig. 1 Schematic of specimen for interim stopping tensile fatigue test.

Fig. 2 Picture of specimen rectangle notch.

に接着することで損傷を評価するため、他の検査法と比較して簡便で、コストの低減が期待できる。以上のことから、AE法は疲労損傷挙動を低コストでリアルタイムに評価するのに有効な検査方法といえる。

しかしながら、CFRPは不均質材であることに加え、成形時に生じる先在欠陥が原因で、様々な損傷モードが同時に至るところで発生する^{4,5)}ため、AE挙動と損傷挙動の関連付けが困難となっている。そこで、試験片に切欠き加工を施す方法に着目した。切欠きを付与し応力集中させることで、損傷の種類および位置を限定化させることが期待できる。そのため、AE挙動と疲労損傷挙動の関係からAE法の適用可能性を評価することが可能といえる。

したがって、本研究では切欠きを有する一方向CFRP積層板に対して途中止め引張疲労試験およびAE測定を実施し、AE挙動から疲労損傷挙動を評価した。

2. 実験方法

2.1 試験片作製

試験片は母材がエポキシ樹脂、強化材がPAN系炭素繊維(T700S, 東レ製)のプリプレグ(UDP-3251S-30, 一方向材, 東レ製)を用い積層構成を $[0]_2$ とした。これをオープン(強制循環式恒温器, 東京硝子器機製)中にて 130°C 、真空条件下で90分保持して一方向PAN系CFRP積層板を作製した。この積層板から、ダイヤモンドブレードキンバレー(マルトー製)を用いてFig. 1に

Fig. 3 Definition of AE wave parameters.

示すような寸法に切り出し、中央部片側にFig. 2に示すような矩形切欠き加工を施した。また、厚さ1 mmでテーパー加工を施したガラス繊維強化プラスチック製のタブを接着した。

2.2 途中止め引張疲労試験

引張疲労過程において発生した損傷挙動とAE挙動の関係を調査するため、途中止め引張疲労試験を実施した。試験には油圧サーボ式疲労試験機(EHF-FB10 kN-4LA, 島津製作所製)を用いた。負荷条件はJIS K 7083に基づき、応力比($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)を0.1、周波数を5 Hzの正弦波、サイクルリミット値を 1×10^5 回とし室温で実施した。応力レベル($\sigma_{\max}$)はスプリットング強度を基準に50, 55, 60, 65, 70, 75, 80%とした。ここでスプリットング強度は、事前に実施した引張試験において切欠きを起点とするスプリットング損傷が発生した際の応力値: 325 MPaと定義する。試験本数は各応力レベルにおいて3本実施した。試験を中断する間隔は、 $0 \sim 1 \times 10^4$ サイクル間では 1×10^3 サイクル、 $1 \times 10^4 \sim 10^5$ サイクル間では 1×10^4 サイクルごととした。

2.3 AE (acoustic emission) 測定

引張疲労試験の際に生じた試験片の損傷挙動を調査するため、AE測定を実施した。AE波の各パラメータの定義をFig. 3に示し、Amplitude(振幅)はAE波の最大振幅、Rise Time(立ち上がり時間)はAE波がしきい値を超えてから最大振幅に達するまでの時間、Duration(持続時間)はAE波がしきい値を上回ってから下回るまでの時間、Hit(ヒット)はAE波の発生数であり、AE波がしきい値を上回ってから下回るまでを1ヒットと定義する。測定には、オシロスコープ(Pico Scope 4424, Pico Technology製)、100 kHz~2 MHzの周波数特性を持つAEセンサー(AE-900M, NF回路設計ブロック製)およびAEローノイズプリアンプ(9913, NF回路

Fig. 4 Schematic location of AE sensor for interim stopping tensile fatigue test.

設計ブロック製)を使用した。また、AE センサーは Fig. 4 に示すように切欠きに接しないように注意しながら試験片中央部に接着した。試験条件はプリアンプの Gain を 40 dB、しきい値を 300 mV、フィルターを 20~1,200 kHz のバンドパスとした。さらに、引張疲労試験中に得られた各 AE 波の周波数特性を調査するため、高速フーリエ変換を実施した。ただし、周波数 100 kHz 以下、持続時間 15 μ s 以下、立ち上がり時間 5 μ s 以下の AE 波はノイズまたはセンサーの検出範囲外と判断し除去した。

2.4 スプリットング長さ測定

試験中切欠きを起点としたスプリットングが発生したため、試験中断時にスプリットング長さを測定した。ここでスプリットング長さは、切欠きを起点に発生した長手方向のスプリットング損傷の和と定義し、最大値は試験部の距離 (50 mm) である。また、試験片表面のスプリットングの観察を容易にするため、蛍光ペンを用いて試験片表面に蛍光塗料を塗布し、スプリットングに浸透させた後、表面の蛍光塗料をふき取りブラックライトを照射した。スプリットングの観察にはデジタル実体顕微鏡 (UM06, MicroLinks Technology Corporation 製)、長さの測定には顕微鏡のステージに取り付けたマイクロメータを用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 スプリットング進展挙動

Fig. 5 にそれぞれの応力レベルで得られたサイクル数に対するスプリットングの進展挙動を示す。なお、スプリットング長さは全試験片 3 本の平均値を算出している。すべての応力レベルにおいて、試験開始直後からスプリットングが切欠きを起点に急激に進展したが、 3×10^4 サイクル以降はほぼ一定値となった。このようなスプリットング進展速度の変化は、試験片に生じる応力分布が変化するためと考えられる。つまり、初期サイクルでは切欠きを起点とする応力集中の影響が支配的になるが、スプリットングの進展に伴い、切欠きを起点とする応力集中が緩和され、スプリットング先端付近を起点とする応力集中の影響が支配的になると考えられ

Fig. 5 Relationship of split length and cycle for each stress level.

Fig. 6 Split length at 1×10^5 cycle for each stress level.

る。また、応力レベルの増加に伴い初期サイクルにおけるスプリットングの進展速度は大きくなる傾向を示した。これは、応力レベルの増加に伴い、切欠き近傍における応力集中の影響が強くなったためである。

Fig. 6 に各応力レベルの 1×10^5 サイクルにおけるスプリットング長さを示す。なお、エラーバーは試験片 3 本の標準偏差を示している。 1×10^5 サイクルにおけるスプリットング長さは、 $50 < 55 < 70 < 60 < 65 < 75 < 80\%$ となったため、スプリットングの進展量は応力レベルとおおむね線形関係にあると考えられる。しかしながら、応力レベル 60, 65, 75% については、試験片ごとで進展量にばらつきが見られ、応力レベル 60, 65% の一部試験片では、測定された進展量が 70% の時よりも非常に大きくなった。このため、スプリットングの進展量は試験片内に点在する先在欠陥の数や規模によっても影響されることが考えられる。

3.2 AE 挙動

Gutkin ら⁶⁾ は CFRP で生じた AE 波の周波数特性と損傷挙動の関係について、0~50 kHz: マトリックスクラック、250~350 kHz: 繊維/マトリックス間のはく離、450~500 kHz: 繊維損傷に分類可能であると報告している。本研究では、この結果と Fig. 5 に示したスプリットング進展挙動に基づき、得られた AE 挙動について考察する。

Fig. 7 に各応力レベルにおけるサイクル数と AE 波の

(a) Stress level 50%

(b) Stress level 55%

(c) Stress level 60%

(d) Stress level 65%

(e) Stress level 70%

(f) Stress level 75%

(g) Stress level 80%

Fig. 7 Relationship of cycle number and AE behavior about each parameter of AE waves detected during interim stopping tensile fatigue test under each stress level.

周波数特性,各パラメータのAE挙動の関係を示す。すべての応力レベルにおいて初期サイクル ($0 \sim 3 \times 10^4$ サイクル) で検出されたAE波は,周波数帯域 300 kHz 付近に集中しており,累積ヒット数は増加傾向を示した。これらのAE波の多くは,振幅が低く,持続時間および立ち上がり時間が短いまたは中程度の傾向を示したが,一部振幅が高く,持続時間および立ち上がり時間が長いものも存在した。このことから,初期サイクルでは切欠き付近を起点として繊維/マトリックス間にはく離が多数発生し,それらが連なることで巨視的なスプリッティング

に発展し,急速に進展したと考えられる。初期サイクル以降に検出されたAE波の周波数特性や各パラメータは,初期サイクルと同様の傾向を示し,累積ヒット数の変化は小さかった。このことから,初期サイクル以降も繊維/マトリックス間にはく離は発生するが,その発生頻度は初期サイクルと比較して少ないため,スプリッティングの進展速度が小さくなったと考えられる。しかしながら,中盤 ($3 \sim 7 \times 10^4$ サイクル) または終盤サイクル ($7 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ サイクル) において,同一周波数帯域およびパラメータを有するAE波が連続して検出されたた

Table 1 Relation of feature of AE wave and fatigue damage behavior for unidirectional CFRP laminates.

Damage Behavior	Matrix Crack	Fiber/Matrix Debonding	Fiber Break	Splitting
Rise Time [μ s]	5~10	5~10	5~10	10~
Duration [μ s]	10~50	10~50	10~30	50~
Peak Frequency [kHz]	100~150	250~350	400~500	50~350

め、累積ヒット数が急増している箇所が見られた。これらの AE 波の各パラメータについては、立ち上がり時間が比較的短い傾向を示したが、その他のパラメータに傾向は見られなかった。スプリッティングの進展挙動を考慮すると、これらの AE 波は損傷由来のものではなくスプリッティング間の摩擦や接触に由来すると考えられる。スプリッティング間における摩擦や接触は、スプリッティングの厚さ方向への進展度に影響されると考えられる。つまり、スプリッティングが厚さ方向へ完全に進展していない場合、スプリッティング間において摩擦が発生していると考えられ、発生する AE 波の持続時間は比較的長くなる。また、スプリッティングが厚さ方向へ完全に進展量した場合、スプリッティング間において接触が発生していると考えられ、発生する AE 波の持続時間は短くなる。

次に応力レベルごとで比較した際の傾向を記す。応力レベルの増加に伴い、周波数帯域 100~150、400~500 kHz の AE 波が検出される傾向を示し、特に 400~500 kHz の AE 波は初期サイクルにおいて多く検出された。各パラメータについては、周波数帯域 100~150 kHz の AE 波の多くは振幅が低く、立ち上がり時間および持続時間は短いまたは中程度、400~500 kHz の AE 波の多くは振幅が低く、立ち上がり時間および時間が短い傾向を示した。これらの AE 波はマトリックスクラックや繊維破断に由来すると考えられる。また、いずれの周波数帯域においても、一部振幅が高く、持続時間および立ち上がり時間が長いものも存在した。これらの AE 波は切欠き付近に集中して発生したマトリックスクラックの結合や繊維束間で発生したスプリッティングに伴う摩擦に由来すると考えられる。これらのことから、応力レベルの増加に伴い、切欠き近傍の応力集中が大きくなり、マトリックスや繊維への影響が強まることがいえる。

3.3 疲労損傷挙動と AE 挙動の関係

一方向 CFRP 積層板に生じる疲労損傷挙動と AE 挙動について Table 1 に示すような関係が得られた。AE 波の周波数帯域は微小損傷、持続時間および立ち上がり時間は巨視的なスプリッティングを識別するのに有効なパラメータであるといえる。したがって、これらのパラ

メータを複合的に評価することで引張疲労損傷を識別することが可能であると考えられる。また、累積ヒット数はスプリッティング進展量と線形関係であると考えられ、発生した損傷の数量や進展量に強く依存することがいえる。

4. 結 言

切欠きを有する一方向 CFRP 積層板に対して途中止め引張疲労試験および AE 測定を実施し、疲労損傷挙動と AE 挙動の関係を調査した。

スプリッティングの進展挙動から、スプリッティングの進展速度は試験片に生じる応力状況に依存することがわかった。また、スプリッティングの進展量は応力レベルにおおよそ依存する傾向を示したが、応力レベル 60、65、75%については、ばらつきが大きく見られ、スプリッティングの進展量が試験片内の先在欠陥数やその規模によっても変化する可能性が示唆された。

初期サイクルで検出された AE 波は、周波数帯域 300 kHz 付近に集中しており、一部 AE 波は高振幅かつ長い立ち上がり時間および持続時間を有する傾向を示し、累積ヒット数は増加していた。初期サイクル以降に検出された AE 波の周波数特性や各パラメータは、初期サイクルと同様の傾向を示したが、累積ヒット数の変化は比較的小さかった。しかしながら、中盤または終盤サイクルにおいて、スプリッティング間の摩擦や接触に由来すると考えられる AE 波が検出され、累積ヒット数が急増する箇所も見られた。また、応力レベルの増加に伴い、周波数帯域 100~150、400~500 kHz の AE 波が検出される傾向を示した。

得られた AE 挙動と一方向 CFRP 積層板の疲労損傷挙動の関係から、AE 波の周波数特性や各パラメータを複合的に評価することで、損傷の種類、数量、進展量が予測可能であるとわかった。今回得られた関係を構造部材に適用することで、構造部材の破壊に対して早期警告することが可能となる。しかしながら、AE 挙動は CFRP の材料、積層構成、成形方法によって異なる。そのため、構造部材の疲労損傷挙動に対する一般的な評価方法として AE 法を適用させるうえで、様々な CFRP についての

AE 挙動と疲労損傷挙動の関係を調査することは必要不可欠といえる。

AE 測定および解析のプログラムは埼玉大学の坂井建宣准教授にご提供いただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) R. de Oliveira & A.T. Marques : *Comput. Struct.*, **86** (2008), 367-373.
- 2) D. Li, Q. Hu & J. Ou : *Int. J. Distrib. Sens. N.*, **2012** (2012), 1-7.
- 3) W. Roundi, A. El Mahi, A. El Gharad & J.-L. Rebiere : *Appl. Acoust.*, **132** (2018), 124-134.
- 4) B. Aidi, M.K. Philen & S.W. Case : *Composites Part A*, **74** (2015), 47-59.
- 5) S. Venkatachalam & H. Murthy : *Compos. Struct.*, **202** (2018), 1069-1077.
- 6) R. Gutkin, C.J. Green, S. Vangrattanachai, S.T. Pinho, P. Robinson & P.T. Curtis : *Mech. Syst. Signal Pr.*, **25** (2011), 1393-1407.