

CFRP疑似等方積層材の引張り負荷過程で 放出されるAEの周波数特性

Frequency Characteristics of AE Emitted from Quasi-isotropic CFRP Laminates Subjected to Tensile Load

○影山 和郎 (東大工)、松尾 剛 (東大[院])、明松 圭昭 (東大工)
村山 英晶 (東大工)、大澤 勇 (東大工)、金井 誠 (東大工)、鶴沢 潔 (東大工)

Kazuro KAGEYAMA, Tsuyoshi MATSUO, Yoshiaki AKEMATSU,
Hideaki MURAYAMA, Isamu OHSAWA, Makoto KANAI and Kiyoshi UZAWA
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

1 はじめに

損傷により発生する AE(Acoustic Emission) を計測することにより、材料損傷のメカニズムを解明しようとする研究が数多く行われているが、その計測には圧電素子センサが広く用いられていた。著者ら[1-3]は、湾曲した導波路で生じるドップラ効果を利用した、高感度かつ広帯域の新型光ファイバ振動センサを開発した。この光ファイバ振動センサを、CFRP 積層板の破壊試験に適用して、その損傷プロセスや微視的な破壊挙動を、周波数特性に着目して検討したので報告する。

2 光ファイバ振動センサの計測原理

本報で用いる光ファイバ振動センサは、湾曲部を有する光ファイバで構成されるセンシング部 (Fig. 1) と周波数シフトを電圧に変換する計測器 (ヘテロダイン干渉計) から構成される。

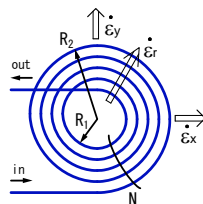


Fig. 1 Circular loop fiber-optic sensor

一様ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_x$ 、 $\dot{\epsilon}_y$ により、センサ部で生じる光の周波数変化量 Δf は次式で与えられる [1]。

$$\Delta f = -\frac{\pi a N n_{eq}}{\lambda_0} (\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y) \quad (1)$$

ここで、 a はループセンサの平均半径、 λ_0 は真空中の光の波長、 n_{eq} は光ファイバの等価屈折率を表す。巻き数 (N) を増加することで感度の向上が可能となる。また、ループセンサの中心で損傷が起こり、同心円上に弾性波が伝わっていく場合、その中心を極として平均的な半径方向ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_r = \dot{u}_r / a$ と定義すると、光の周波数変化量 Δf は、式(1)と類似な次式で表される [2]。

$$\Delta f = -\frac{2\pi a N n_{eq}}{\lambda_0} \dot{\epsilon}_r \quad (2)$$

3 CFRP 積層板の引張り試験と AE 計測

3.1 実験方法

積層構成が [45₂/-45₂/0₂/90₂]_s と [45₂/0₂/-45₂/90₂]_s の疑似等方積層板 (東レ T800H/3631) から、平板引張り試験片を切り出した。表裏にそれぞれ 2 個ずつ光ファイバ振動センサと圧電素子 AE センサ (PAC 社製、150kHz 共振型) を Fig. 2 のように貼り付けた。クロスヘッドスピード 0.5mm/min で引張り荷重を負荷した。

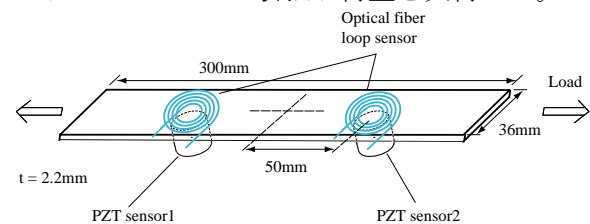


Fig. 2 Specimen and sensor arrangement

3.2 解析方法

本報では、周波数特性の代表値をとって、周波数スペクトルの重心である中心周波数に注目した。また、求められた周波数分布を損傷段階別に分類し、段階別にひずみ速度波形を抽出して、前報同様 [2] 短時間フーリエ (STFT) 解析によるスペクトログラムと、時間積分により変換されるひずみ波形を比較・検討した。

4 結果と考察

Fig. 3 に、最終破断後の写真を示す。複雑な破壊状況を示している。なお、センサ部は試験片破断後も機能していた。



Fig. 3 Photo of a broken specimen

4.1 中心周波数の履歴解析

積層構成[45₂/-45₂/0₂/90₂]sの試験片について、光ファイバ振動センサが検出した弾性波の周波数分布を Fig. 4 に示す。実線は、ひずみゲージによるひずみの計測値である。中心周波数は、初め 200kHz から 250kHz の周波数帯に多くの分布を示すが、損傷の進展に伴い、より低い周波数成分の波形が増加する傾向を示す。CFRP の損傷過程では、数 kHz から 350kHz まで非常に広帯域の AE が放出されていることがわかる。

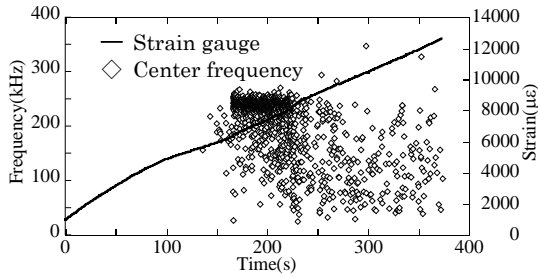


Fig. 4 Time history of AE frequency

4.2 損傷段階別の波形の分類

損傷初期、AE 多発過程、AE 減少過程、最終破断時の 4 つの段階に分け、それぞれ特徴的な波形を抽出し、時間積分(ひずみ変換)・STFT 解析による結果を比較した。紙面が限られていることから、損傷初期と最終破断時の 2 例について、結果を Fig. 5-8 に示す。損傷が進展するにつれ、波形の形状は複雑となる。損傷末期になると、高周波成分よりも低周波成分が相対的に強く現れるようになるが、最終破断時には低周波数から高周波数までいくつものピークを持つ波形となることが分かる。複数の破損様式が同時に発生していることを示唆している。

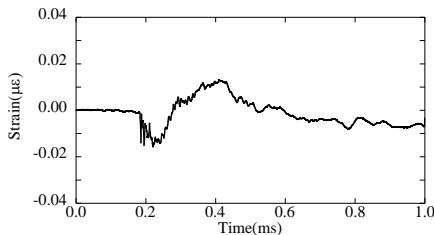


Fig. 5 Strain wave at initial stage of failure

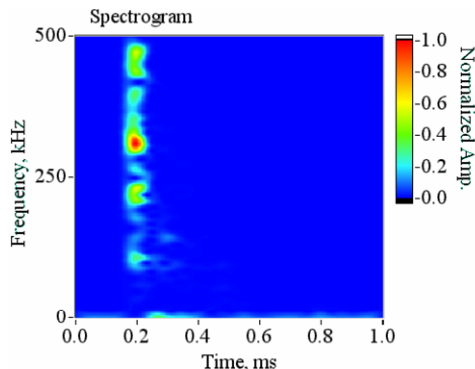


Fig. 6 STFT result of strain rate at initial stage of failure

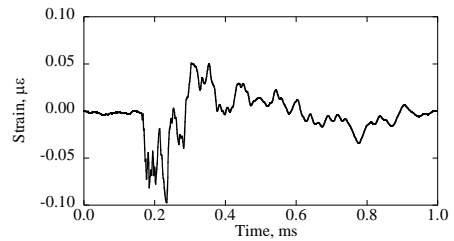


Fig. 7 Strain wave at final stage of failure

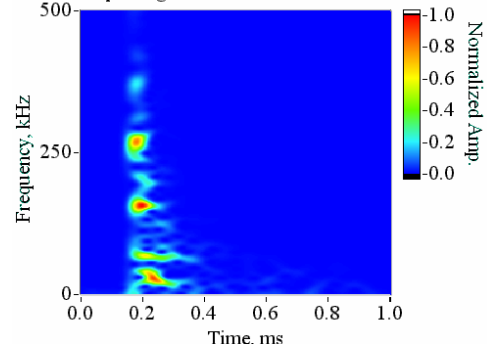


Fig. 8 STFT result of strain rate at final stage of failure

4.3 単一的な損傷挙動を示すひずみ波形の抽出

単一的な損傷挙動が生じていると推測できるひずみ波形がいくつか検出された。そのうちの 1 つを Fig. 9 に示す。樹脂埋め込み炭素繊維フィラメントの破断実験で得られたひずみ波形と、極めて類似の波形である。炭素繊維フィラメントの破断に対応すると推定される。AE をひずみ波形という物理的意味の明確な量として計測できることも本センサの特徴である。

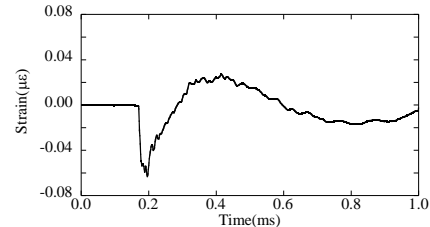


Fig. 9 Example of simple and common wave form

5 おわりに

積層板の引張り損傷が進むと、AE の周波数特性がより低周波数側にシフトしながら波形が複雑化することを示した。繊維破断によるものと推測できる共通のひずみ波形も検出できた。開発した光ファイバ振動センサは、CFRP の AE 評価のための十分な感度を有することを示した。その広帯域でフラットな周波数特性がもたらす計測結果は、従来の AE 計測技術では望めなかった、高度の周波数解析を可能としている。ひずみ速度という物理量を極めて高速に計測できる技術としての今後の展開が期待される。

参考文献

- [1] K. Kageyama et al., Proc. 4th Inter. Work. Struct. Health Monitor., Stanford, 2003, pp. 1150-1157.
- [2] 影山他 5 名、機講論、Vol. 6、2003、pp. 79-80.
- [3] 影山、非破壊検査、52-4、2003、pp.174-177.