

樹脂および繊維物性が強化繊維破断 AE の特性に与える影響に関する研究

Effect of Mechanical Properties of Resin and Fibers on AE Characteristics by fiber breakage

知能機械工学コース

先端機械・航空材料工学研究室 1275037 山本 一球

1. 緒言

高強度、軽量性などの優れた特性を持つ CFRP は、先端分野で利用されている。一方で、破壊プロセスは複雑であり、内部損傷が生じるため一般的な目視検査では損傷進展を発見するのが困難である。そのため、CFRP の信頼性向上を目的とした様々な非破壊検査法が開発されてきた。

破壊形態は主に繊維破断や界面剥離、マトリクスクラック、層間剥離などがある。損傷時に生じる弾性波の特性が破壊形態によって異なるため、破壊形態を非破壊で検出できる AE (Acoustic Emission) 法が用いられている。CFRP の損傷形態の違いにより AE の周波数などの特性が異なることはよく知られており⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、また近年では Wavelet 変換による時間一周波数解析が行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、繊維破断のみに起因する損傷モードに着目した研究はそれほど多くはなく、また繊維の種類によらず AE 周波数は繊維特性に依存しないという報告が多い。

本研究では、繊維破断による AE 周波数に与える物性の影響を詳細に調べるために、異なる樹脂で成形した Single Fiber CFRP 試験片を用いて引張破断時における AE を 2 つのセンサで測定し、Wavelet 解析によって周波数および持続時間を求めた。また、偏光観察と到達時間差によって AE の繊維破断位置を特定し、目視確認された繊維破断 AE について、その AE 特性を調査した。

2. 実験方法

2.1 試験片

本研究では PAN 系 T700SC (東レ) と Pitch 系 YSH-50A-20S (日本グラファイトファイバー) の単繊維強化 FRP (SFC, Single fiber composite) を作成した。繊維表面は、アセトンで繊維のサイジング剤を除去したものを使用した。エポキシ樹脂は主剤 ARALDITE LY5052 と硬化剤 ARADUR5052CH (配合比 100:38) を使用し、試験片を作成した。この試験片は 5mm の平行部を持つダンベル型試験片である。樹脂の硬化時間は、常温で 24 時間、80℃で 2 時間とした。また、ポリウレタンを使用し試験片を作成した。この試験片は 25mm の平行部を持つダンベル型試験片である。樹脂の硬化時間は常温で 24 時間とした。

2.2 実験方法

本研究では、エポキシ樹脂試験片の場合、両端にそれぞれ 1 個のセンサを 15mm 間隔で取り付け、引張試験を行った。クロスヘッド速度 0.2mm/min で、マイクロスコープカメラを用いた偏光観察により、目視による繊維破断の発生と進展のモニタリングを行った。ポリウレタン試験片の場合、両端にそれぞれ 1 個のセンサを 35mm 間隔で取り付け、引張試験を行った。また、当研究室で構成した AE 計測システムを用いて、AE 波形を時間分解能 0.1μs、時間幅 1ms で記録した。試験片および AE センサ配置を図 1, 2 に示す。

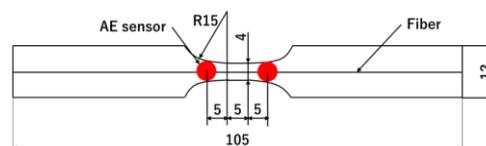


Fig.1 Sensor position for specimen with parallel region length of 5mm

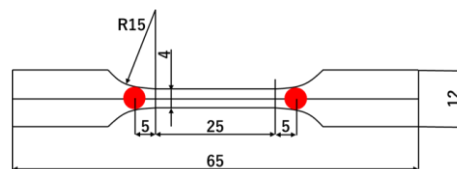


Fig.2 Sensor position for specimen with parallel region length of 25mm

2.3 測定された AE の繊維破断位置の計算方法

図 3 に測定された Pitch 系についての AE(count13)の波形を示す。破断位置の計算には立ち上がり時間を用い、樹脂の音速として 1600m/sを用いた。なお、AE センサを接着した影響により偏光観察の確認可能な範囲は 1ch から約 2~12mm であった。

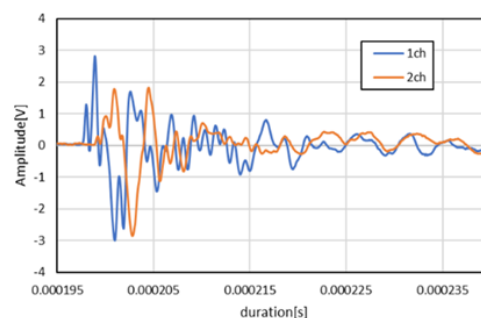


Fig.3 AE waveform measured by AE sensors (count 13)

3. 実験結果

3.1 繊維破断位置と中心周波数

図 4, 5 に PAN 系と Pitch 系それぞれの目視観察により確認された繊維破断に関して、その位置と中心周波数の関係を示す。図 4, 5 から、繊維破断による AE 周波数は、どちらの試験片についても低周波は 300-400kHz、高周波は 700-1000kHz に分布しており、周波数の大きさについては強化繊維の種類による明確な違いは見られなかった。このことから、繊維の弾性率が AE 特性にあまり影響を与えないということが分かった。

実験結果から、破断時には高周波成分が 1ch または 2ch のどちらかのセンサによる取得波形に現れることが分かった。図 4, 5 では、1ch に近い位置が青、2ch に近い側に橙の点が明らかに多く、これはセンサから離れると高周波成分の取得が難しいことを示している。これは、高周波 AE の減衰が大きいためであると考えられる。以上のことから、繊維破断時には同時に高周波成分が生じるが、繊維配置によっては捉えることが出来ないことが分かった。過去の研究より、高周波成分は繊維／樹脂界面剥離後の引き抜きによるものと考えられる。つまり、単繊維 FRP の引張破断では、繊維破断と界面剥離、引き抜きがほぼ同時に生じていることが分かった。

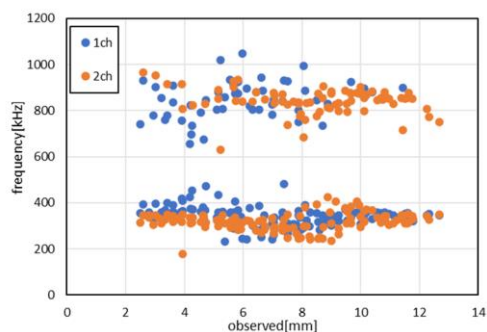


Fig.4 Relationship between fiber breakage position and frequency (T700SC)

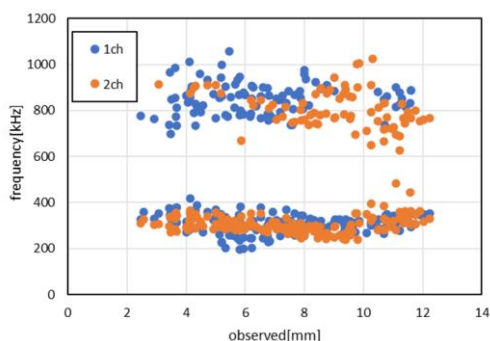


Fig.5 Relationship between fiber breakage position and frequency (YSH-50A-20S)

3.2 エポキシ樹脂とポリウレタンの周波数分布の違い

図 6, 7 にエポキシ樹脂とポリウレタンそれぞれのひずみに対する中心周波数の関係を示す。図 6, 7 を比較すると、エポキシ樹脂の周波数分布は 300-400kHz に多く分布している。一方でポリウレタンは 150-300kHz に多く分布している。このことから、ポリウレタンはエポキシ樹脂に比べて低い周波数の破断 AE が発生することが分かった。この理由としては、ポリウレタンの弾性率がエポキシ樹脂の弾性率よりも低いためではないかと考えられる。以上のことから、樹脂の弾性率は AE の周波数特性に影響を与えるということが分かった。

4. 結言

本研究では、カーボン単繊維強化エポキシ試験片とポリウレタン試験片における繊維破断 AE 信号の特性解析を行った。エポキシ試験片では、到達時間差から音源位置を推測し、実験で使用したすべての試験片について観測された繊維破断 AE を特定して、繊維破断位置に対する中心周波数のデータをまとめた。また、ポリウレタン試験片では、AE の周波数

分布についてエポキシ試験片との比較を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 単繊維強化 FRP では、300-400kHz の破断 AE とともに、引き抜きによる 700-1000kHz の高周波成分の AE も同時に発生する。しかし、減衰が大きいため高周波成分はセンサ近傍で発生しないと取得が難しい。
- (2) 繊維破断と界面剥離、繊維の引き抜きはほぼ同時に生じることが分かった。
- (3) 繊維の弾性率は AE の周波数特性にあまり影響を与えないことが分かった。
- (4) エポキシ試験片とポリウレタン試験片では AE の周波数分布に違いが見られることが分かった。これは、樹脂の弾性率が破断 AE 周波数に影響を与えるためだと考えられる。

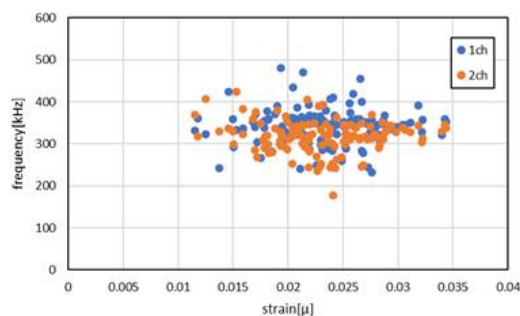


Fig.6 Relationship between strain and frequency (Epoxy resin)

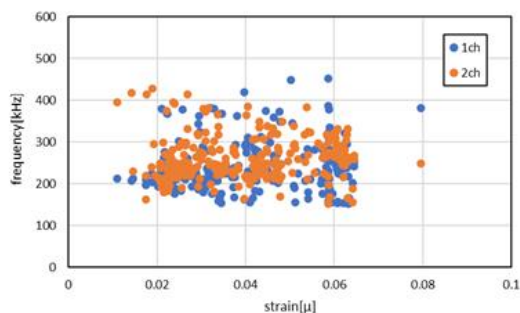


Fig.7 Relationship between strain and frequency (Polyurethane)

文献

- (1) Ono, K. and Gallego, A., "Research and applications of ae on advanced composites", J. Acoust. Emiss, vol.30 (2012), pp.180-220.
- (2) 鈴木恵, 中西博, 岩本正治, 自念栄一, 前川善一郎, 森旭, 孫峰, "AE 法による CFRP の破壊機構に関する研究", 日本機械学会論文集(A 編), Vol.53, No.492 (1987), pp.1459-1465.
- (3) 孫峰, 鈴木恵, 中西博, 岩本正治, 自念栄一, "モデル GFRP 材の破壊機構と AE 特性の関係", 材料, Vol.37, No.416 (1988), pp.517-522.
- (4) 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.
- (5) Li, L., Lomov, S., Yana, X. and Carvellic V., "Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites", Compo. Struct., Vol.116 (2014), pp.286-299