AFRP の破壊音の周波数分布特性と破壊機構の関連性*

杉 山 拓^{*1}, 宗 宮 詮^{*3}Relationship between the Frequency Distribution Characteristics
of Acoustic Emission and Fracture Mechanisms on AFRP

Taku SUGIYAMA and Satoshi SOMIYA

Studies by using an acoustic emission (AE) method have been undertaken to elucidate the fracture mechanisms of AFRP in the static tensile test. The materials used were a unidirectional $[0]_s$ aramid fiber and a quasi-isotropic elastic $[0/\pm 45/90]_s$ aramid fiber reinforced plastic in which fiber volume fraction (V_f) was 55%. In this paper, the frequency of the detected AE waves has been studied. On tensile loading, it was recognized that the fracture mechanisms of AFRP were characterized by some microfracture phenomena such as delamination, fiber debonding (debonding at the interfaces between fibers and resin), matrix cracking and fiber breaking. In a unidirectional material, much fiber debonding has been found. On the other hand, much delamination has been seen in a quasi-isotropic elastic material. To generate the fracture mode which causes these phenomena, six-specimens were tested and AE waves were detected. Using the results of the frequency analysis, it was found that the frequency distributions of AE waves corresponding to matrix cracking, delamination, fiber debonding and fiber breaking are 20-50, 50-135, 135-180, and over 180 kHz, respectively. It was confirmed that the fracture phenomena were related to characteristics of the frequency distribution.

Key Words: Acoustic Emission, Delamination, Laminated Construct, AFRP, Frequency Distribution Analysis

1. 結 言

近年, FRP は機械部品や構造物等, さまざまな分野で用いられてきており, その需要は確実に増している。しかし, FRP はその内部構造がミクロには不均一であるため, 従来の機械的な方法では破壊機構の解明が困難である。AE(アコースティック・エミッション)法は FRP の損傷評価・検査には有効である非破壊検査法であることが知られており⁽¹⁾, 損傷程度の評価や破壊場所の特定も可能である⁽²⁾。一般に AE 法では最大エネルギー分布, 最大ピーク値分布等が評価対象として用いられる⁽³⁾⁽⁴⁾が, 鈴木らは CFRP の引張破壊時の破壊音を周波数解析することにより, 各破壊様式をその周波数分布の形状から解明可能であることを明らかにしている⁽⁵⁾。

本研究では AE 法を用いた AFRP(アラミド繊維強化プラスチック)の引張変形下における破壊機構の解明を行った。引張変形下における主要な破壊様式を分類し, 各破壊様式に特徴的な AE 波を検出し, 周波数

解析を行うことにより, 周波数分布特性の解明を試みた。主要な破壊様式を特徴づける破壊モードを作為的に再現させるための加工を施した種々の試験片を用いてモデル実験を行った。その結果, 破壊様式と周波数分布の形状には強い関連性があり, 周波数分布の形状によりその破壊様式を特定できることを明らかにした。

2. 実 験

2.1 供試材料 本実験に用いた東レ(株)製 AFRP は強化材として Kevlar 49 繊維, 母材としてエポキシ樹脂# 2500 を使用してオートクレープで成形を行ったものである。図 1(a)に示すような積層構造の異なった 2 種類の試験片, すなわち一方向性強化材である U 試験片($[0]_s$)および疑似等方性強化材である Q 試験片($[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_s$)を準備した。また, 主要な破壊様式を再現するためのモデル実験を行うため図 1(b)に示すように U 試験片に平行段違い切欠きをいれた UP 試験片($[0]_s$), 図 1(c)に示すように Q 試験片に片側切欠きをいれた QS 試験片を用いた。

繊維破断による破壊音の周波数分布特性を解明するためにアラミド繊維束を直接引張り, 解析を行った。図 2 に示すように繊維の両端は埋め込み用樹脂で製作

* 原稿受付 平成 5 年 3 月 5 日。

*¹ 学生員, 慶應義塾大学大学院。*² 正員, 慶應義塾大学理工学部 (〒223 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

したタブ中に埋め込み固定した。また、樹脂割れによる破壊音の周波数分布特性を解明するため図3に示すようなエポキシ樹脂板材をチャックつかみ部にタブを張り付け引張試験を行った。

2・2 実験方法 本実験は室温中でインストロン形引張試験機：TMC-5000 C(NMB Co.)を用いてクロスヘッド速度 0.5 mm/min で静的引張試験を行った。AE の計測には AE 計測装置 AE-900 シリーズ(NF Co.)を使用した。AE の検出には共振形センサ(150 kHz)を用い、AFRP 材、エポキシ樹脂試験片に関しては試験片表面に、アラミド繊維束試験片に関しては繊維を埋め込んだタブ部にセンサをシリコングリースを用いて圧着し、ビニルテープで固定し計測を行

図1 AFRP 試験片の形状および寸法

図2 アラミド繊維束試験片の形状および寸法

図3 エポキシ樹脂試験板の形状および寸法

った。検出した AE 波はデータレコーダ：DM-100(ONO SOK-KI Co.)にサンプリング周波数 1 MHz として記録した。実験終了後に FFT プログラムによりパーソナルコンピュータを用いて周波数解析を行い、周波数分布特性を示すパワースペクトルを得た。AE 波の波形がばらついたため、周波数分布図には測定結果から無作為に約 30 の AE 波を選び解析し、その中で頻度の高い例を示す。

3. 実験結果および考察

3・1 AFRP の破壊機構の解明

3・1・1 応力および AE 事象率-ひずみ曲線 一方向性強化材である U 試験片の応力および AE 事象率-ひずみ曲線を図4に示す。U 試験片の応力-ひずみ曲線の特徴は変形量の増加に伴う弾性率の連続的な増加が挙げられる。これは、強化繊維の配向角が 0° 方向の AFRP 試料に共通して見られる特徴である。

疑似等方性強化材である Q 試験片の応力および AE 事象率-ひずみ曲線を図5に示す。同図より、Q 試験片の応力-ひずみ曲線は直線状の挙動を示すことが確認された。これは Q 試験片においては引張方向に配向された繊維の弾性率の増加以上に配向角の異なる層での

図4 U 試験片の荷重および AE 事象率-変位曲線

図5 Q 試験片の荷重および AE 事象率-変位曲線

はく離の影響が現れた結果だと考えることができる。また、両試験片とも脆性的な破断挙動を示し、破断に至る以前に、延性材料のような降伏は認められないことが確認された。

ここで、破断機構を解明するために、AE 事象率の経時変化について考察することにした。図 4 をみると、AE は U 試験片においては、破断の直前まではほぼ一定のレベルで検出されているが、破断時には多量の AE が検出される。つまり、破断の直前までは、ほぼ一定の頻度で破壊が起こっており、破断時には急激に破壊が進行していることがうかがえる。U 試験片においては応力の増加に伴い AE 事象率の変化が顕著に認められないのに対して図 5 をみると、Q 試験片では応力の増加に伴い AE 事象率が大きくなっている。そして、U 試験片と同様に破断時には多量の AE が検出されており、破断時には急激に破壊が進行していること

がうかがえる。

両試験片とも、脆性的な破壊挙動を示しており、AE 事象率は破断時に急激に増大している。この点に注目し、最終破断時の観察をすることにした。

3・1・2 破壊挙動の巨視的観察 両試験片の引張試験による代表的な破壊を図 6 に示す。一方向性強化材である U 試験片については巨視的な破壊挙動の特徴として、すでに指摘されているように図 6 (a) 矢印 A に示すように最終破断時に無数の巨視的な縦割れの発生が確認された⁽⁴⁾。この縦割れは微視的観察の結果、繊維と母材間に発生する繊維まわりのはく離(これを以後繊維はく離と呼ぶことにする)に起因していることがわかった。U 試験片においては層間のはく離の発生は確認されなかったが、疑似等方性強化材である Q 試験片においては図 6 (b) に示すように層間のはく離の発生が顕著に観察された。矢印 B に示すように、1 箇所破断が生じ、その付近では、矢印 C に示すように繊維も破断していることが確認された。U 試験片においては図 7 (a) に示すような縦割れ現象つまり繊維間のはく離による破壊が主にその破壊を支配しており、Q 試験片においては図 7 (b) に示すような層間のはく離がその破壊様式を特徴付けている破壊現象である。そこで、図 7 (a), (b) に示すようにこれらの破壊機構の様式に注目して、各破壊様式を作為的に起こすために切欠材を用いたモデル実験を行うことにした。それ

図 6 破断後の AFRP 試験片の破壊例

図 7 各破壊様式に対するモデル

図 8 AFRP におけるパワースペクトルの代表例

に加えてU試験片およびQ試験片に共通して観察される破壊現象として図7(c)に示すような母材であるエポキシ樹脂の割れ、図7(d)に示すような強化材であるアラミド繊維の破断があるが、この4種類の破壊様式を作為的に発生させるために各種の試験片を用いたモデル実験を行うことにした。

3.2 破壊様式の周波数分布特性の解明

3.2.1 AFRPの破壊音の周波数分布特性

AFRPの引張変形下において多数のAEが発生することが確認されたが、これらのAEの発生要因を調べるためAE検出波形の周波数分布解析を行うことにする。図8は、一方向性強化材であるU試験片および疑似等方性強化材であるQ試験片の両試験片について破断応力の約80%において検出された1個のAE波を周波数解析した結果得られたパワースペクトルである。図8(a)をみるとU試験片については顕著な最大ピークCが現れており、このピークCの発生の原因を調べることで破壊原因判別法になることを示している。図8(b)をみるとQ試験片においては顕著なピークA, B, C, Dが存在していることがわかる。図8(a), (b)におけるこの相違は破壊様式の違いによるものと思われるが、AE法によるこれらの破壊様式の判別は困難である。そこで、それらの破壊様式をモデル化することで破壊原因の周波数分布特性を検討することにした。

3.2.2 繊維間はく離現象の周波数分布特性 U試験片の特徴的な破壊現象である縦割れは繊維間はく離によるものである。この縦割れを図7(a)に示すモデル実験により作為的に発生させ、繊維間はく離現象の周波数分布特性を解明することにした。縦割れを起こさせるために図1(b)に示すように一方向性強化材であるU試験片に平行に段違いに切欠きをいれたUP試験片を用いて実験を行うことにした。UP試験片

における引張試験の結果得られた荷重およびAE事象率-変位曲線を図9に示す。荷重-変位曲線からUP試験片の破壊挙動はU試験片の場合と異なり、1本の直線とはならない。これは、切欠間に発生するモーメントによる試料の変形および自由継ぎ手の水平移動等により厳密な変位測定ができないためであるが、ここでは正確なせん断強さの測定を意図しておらず、せん断力による破壊と見られるステップIIIのみに注目した。このステップIIIではAEの検出と前後して各切欠先端からの荷重(繊維配向)方向のき裂の進展が認められ、これらのき裂が連結して二つに分断された。縦割れが発生するステップIIIで検出されたAE波を周波数解析し、繊維に沿った破壊である縦割れの周波数特性の特定を試みた。その結果、得られたパワースペクトルの代表例を図10に示す。

この図より135 kHz~180 kHzの周波数域にあるピークCが顕著に現れていることが確認された。このことよりUP試験片における引張変形下の破壊機構は主にこのピークCに対応する破壊様式に支配されていると言える。

3.2.3 層間はく離現象の周波数分布特性 積層材料において、その破壊現象は層間はく離現象によるものが多い。ここではその層間はく離現象における破壊音の周波数特性を解明することにした。疑似等方性強化材であるQ試験片に片側切欠きをいれた結果、図7(b)に示すように切欠先端近傍で微視的層間はく離現象が巨視的層間はく離現象に先立ち発生することを見出したので図1(c)に示すようなQS試験片を用いた。すなわち、斜交積層材の自由縁で発生する層間はく離を、切欠きによる応力集中で局所的に加速させた。図11にQS試験片の荷重およびAE事象率-変位曲線を示す。荷重-変位曲線はS字形をしておりQ試験片との間に相違がみられた。また、Q試験片の場合

図9 UP試験片の荷重およびAE事象率-変位曲線

図10 UP試験片のパワースペクトルの代表例

と同様に AE 事象率は破断時まで荷重の増加とともに増加する傾向をみせている。QS 試験片では切欠き先端から幅方向のき裂および層間はく離が生じ、成長することが観察された。層間はく離の生成に伴い、材料内部では層間の摩擦音が発生していると考えられるので、検出された AE にははく離音と摩擦音の両方が含まれているといえる。ここで、図 12 に QS 試験片において検出された AE 波の周波数解析の結果得られたパワースペクトルの代表例を示す。同図より 50~135 kHz の周波数域のピーク B および 135~180 kHz の周波数域のピーク C が顕著に現れていることが確認されたことから、これらのピークに対応している破壊様式が QS 試験片の破壊を特徴付けているといえる。

3・2・4 繊維破断現象の周波数分布特性 ここで AFRP におけるアラミド繊維破断時の破壊音の周波数分布特性を解明するために図 2 に示すような試験片を用い、図 7 (d) に示すモデル化を行って引張試験を行い、繊維破断時の破壊音を検出し、これを周波数解析した。図 13 にその結果得られたパワースペクトルの代表例を示す。同図より 50~135 kHz 付近に最大ピ

ークであるピーク B が現られ、135~180 kHz にピーク C、そして、高周波成分である 180 kHz 以上にピーク D が他に比べ顕著に現れていることが確認された。

3・2・5 樹脂割れ現象の周波数分布特性 ここでは、AFRP における母材の割れの破壊音の周波数分布特性の解明を行うために図 3 のようなエポキシ樹脂試験片を用い図 7 (c) に示すような引張試験を行った。その結果、その破面の大半は、複雑な微視的パラボラ模様で占められていた。ここで、引張変形下において検出された AE 波の周波数解析を行い特徴的なピークを探ってみることにする。図 14 はその結果得られたパワースペクトルの代表例である。これをみると 20~50 kHz に最大ピークであるピーク A が現れているほかに、90 kHz、140 kHz 付近の周波数域で顕著にピークが現れたことが確認された。

樹脂は単一の素材であるにもかかわらず、図 14 のように数多くのピークが現れるが、破面の比較的小さいときには高周波成分域にピークが現れ、逆に破面が複雑なときには比較的低周波成分域にピークが現れることが指摘されている⁽⁶⁾。このことより、90 kHz、

図 11 QS 試験片の荷重および AE 事象率-変位曲線

図 12 QS 試験片のパワースペクトルの代表例

図 13 アラミド繊維束試験片におけるパワースペクトルの代表例

図 14 エポキシ樹脂試験板におけるパワースペクトルの代表例

140 kHz 付近のピークはきれいな破面である箇所が発生したために現れたものであるといえる。また、AFRPの母材の割れは複雑な破面を示しているので、ここでは20~50 kHzについてのみに注目すべきであろう。

3.3 AFRPの破壊様式に対応する周波数分布特性

U, P 両試験片には図 8 に示すようにピーク A: 20~50 kHz, ピーク B: 50~135 kHz, ピーク C: 135~180 kHz, ピーク D: 180 kHz~の周波数域に代表的なピークがあることがわかった。そして、3.2 節において各破壊様式を作為的に起こさせたモデル実験を行うことにより各破壊様式に対する周波数分布特性を調べてきたが、ここではそれらの結果を用いて各ピークに対応する破壊様式の特定を行うことにする。

20 kHz~50 kHz の周波数域にあるピーク A はエポキシ樹脂単体の破壊音解析の結果、最大ピークを示していた。このことより、このピーク A は母材の割れに対応していることが確認された。

50 kHz~135 kHz の周波数域のピーク B は QS 試験片にのみ最大ピークとして認められた。また、層間には離現象が QS 試験片の破壊のみに観察されたものであることから、この周波数域のピークは層間には離に対応しているものといえる。また、ここで層間には離時には摩擦音が多量に発生していることからこの周波数域のピークは摩擦音にも対応していることがわかる。

135 kHz~180 kHz の周波数域のピーク C は UP 試験片および QS 試験片に共通して顕著に現れている。繊維間には離が発生しやすい $\pm 45^\circ$, 90° 層を含んでいる QS 試験片では顕著に、また、作為的に発生させた面内せん断力により繊維間には離現象を起こさせた UP 試験片においてピーク C は最大ピークとして現れていることから、このピーク C は繊維間には離に対応していることがわかる。180 kHz~の周波数域のピーク D はアラミド繊維束の引張試験においてのみに顕著に現れていることから、このピークは繊維破断に対応していることを確認した。

以上を総括し、引張変形下における AFRP の破壊様式と破壊音の周波数分布特性の関係をまとめ表 1 に示す。この表より破壊様式の特定が可能である。また、この表はモデル実験によって作成したものであるが、鈴木らの CFRP の試験結果⁽⁹⁾と同様な傾向を示していることが確認された。しかし、各破壊様式に相当しているピークがある程度、幅のある周波数帯域に存在していることから、周波数分布特性は複雑に重なり合っている可能性が高い。今後はこのことに留意して研

表 1 各破壊様式とその周波数分布特性

	FREQUENCY (kHz)
MATRIX CRACKING	20~50
DELAMINATION and FRICTION	50~135
FIBER DEBONDING	135~180
FIBER BREAKING	180~

究を進めていく必要があろう。

4. 結 論

本研究では引張変形下での AFRP の破壊音の周波数分布特性の解明を試み、以下の結果が得られた。

各種試験片を用いたモデル実験の結果より各破壊様式の周波数分布特性を明らかにした。

(1) UP 試験片を用いた引張試験時の破壊音の周波数解析の結果、その破壊は面内せん断力により繊維間には離現象と同様な破壊が発生することを見出し、その破壊音の特徴的な周波数分布帯は 135~180 kHz であることを確認した。

(2) QS 試験片を用いた引張試験の結果、層間には離現象の特徴的な周波数分布帯は 50~135 kHz であることを確認した。

(3) エポキシ樹脂板材の引張試験の結果より、引張変形下における AFRP の母材割れの特徴的な周波数分布帯は 20~50 kHz であることを確認した。

(4) アラミド繊維束の引張試験を行い、繊維破断時の破壊音の周波数分布特性を解明し、180 kHz~の高周波成分が特徴的な周波数分布帯であることを確認した。

(5) 各試験片を用いたモデル実験を行った結果、各破壊様式に対応する破壊音にはそれぞれ特徴的な周波数分布特性があることが明らかになり、その周波数分布特性を調べることによって破壊様式の特定が可能であることを明らかにした。

本研究を行うにあたり、協力、援助して下さった本塾理工学部の大村君、久慈君に感謝する。また、本研究は池谷科学技術振興財団の助成金の援助を受けて行ったことを記す。

文 献

- (1) 岸・志波, 日本複合材料学会誌, 12-6(1986), 241-250.
- (2) 中村・志波・諸橋, 強化プラスチック, 31-8(1986), 381-390.
- (3) 田中, 強化プラスチック, 35-12(1988), 497-503.
- (4) SOMIYA, S., Menges, G. and Effing, M., *The 6th International conference on Mechanical behaviour of*

- Materials*, (1991), 1180.
- (5) 鈴木・中西・岩本・自念・前川・森・孫, 機論, **53**-492, A (1987), 1459-1465.
- (6) 陳・宗宮, 日本機械学会東北支部第 28 期総会講演論文集 (1993-3), 138-140.
- (7) Faudree, M., Baer, E. and Hiltner, A., *J. Compos. Mater.*, **22**(1988-12), 1170-1195.
- (8) 高柳, 強化プラスチック, **31**-12(1985), 580-590.
- (9) Jahankhani, H. and Galiotis, C., *J. Compos. Mater.*, **25**(1991-5), 609-631.
- (10) 駒井・箕島・木下・中野・植松, 機論, **58**-546, A(1992), 206-211.
- (11) 杉山・宗宮, 日本機械学会第 69 期全国大会講演論文集, A (1991-10), 779-781.
-