2 軸組合せ負荷における CFRP の損傷面に関する検討†

田 中 行 平* 金 川 靖** 村 上 澄 男**

Investigation of Damage Surface in CFRP under Biaxial Loading

by

Kohhei TANAKA*, Yasushi KANAGAWA** and Sumio MURAKAMI**

Internal damage evolution of thin tubular specimens of CFRP was studied by means of AE (acoustic emission) measurement. The AE signals were detected first in the tension tests of CFRP tubular specimens of 0° , 90° and $\pm 45^\circ$ fiber orientation, and three damage modes induced by the tests, *i. e.*, matrix crack, delamination and fiber breakage were identified by the frequency analysis of AE signals. Then, tension-torsion tests of specimens of $\pm 45^\circ$ were performed, and the behavior of damage development in every damage stage was analyzed from the frequency analysis of AE signals. AE count rate was also measured in order to detect the onset and the development of material damage. The change in the elastic properties were related to the AE count rate. Then, by performing damage tests under biaxial loading, the initial and subsequent damage surfaces were identified by use of AE count rate.

Key words : CFRP, Damage, Damage surface, Acoustic emission, Biaxial stress, Loading condition, Matrix crack, Delamination

1 緒 言

積層構造を持つ複合材料の力学的挙動は強化繊維の特性に大きく支配され、その損傷特性は繊維配向角により変化する。^{1), 2)} 作用する荷重の主応力方向が繊維方向から偏るとき、強度と変形に対するマトリックスの寄与が増大する。このため複雑な組合せ応力状態で使用される構造材料としての複合材料の力学的特性と損傷挙動を理解するためには、最弱構成要素のマトリックスの挙動を考慮して検討する必要がある。

複合材料に生ずるマトリックスき裂、層間はく離、繊維破断などの損傷挙動の評価のため、これまでに単軸引張り試験における弾性特性の変化³⁾や、損傷発生の際のアコースティック・エミッション (AE) 計測の研究⁴⁾が多数行なわれている。著者らも既報⁵⁾において、一方方向積層材、斜向積層材の円管試験片に対する準静的引張り試験、疲労試験を行い、その AE 挙動と内部損傷の関連について検討し、損傷モードに対応する周波数帯の同定を行った。

一般に、損傷力学では応力空間において損傷の連続的發展が生じない領域が存在することを仮定し、この領域の境界を損傷面と呼ぶ。⁶⁾ この損傷ポテンシャル面は、塑性理論における塑性ポテンシャルと同じように、損傷発展式と構成式の統一的な取り扱いを可能にするものである。

本研究では、粘性-損傷挙動を示す炭素繊維強化複合材料の円管試験片を用いて、2 軸応力空間における損傷面の基本特性について検討する。はじめに、比例負荷に対して損傷の発生を規定する初期損傷応力を決めるため、単軸および組合せ応力状態における AE 信号の

発生と、縦弾性係数、横弾性係数を測定する。つぎに、引張り-ねじり組合せ応力空間における複数の負荷経路において、初期および後続損傷面を AE によって検出し、損傷面の存在、形状、大きさ、発展の様子等を実験的に明らかにする。さらに、損傷面に対する負荷、除荷、および一定応力に対する損傷挙動についても明らかにする。

2 実験および観察方法

2・1 試験片材料および形状

本実験では、組合せ応力負荷を行うため、Fig. 1 のような薄肉円管試験片を用いた。円管試験片は、材料の損傷・破壊過程に大きな影響を与えるエッジ部を起点とした損傷の発生を防ぐことができるため、材料本来の変形および損傷挙動の実験的な観察に適している。試験片材料は、プリプレグ東レ P3052 (炭素繊維 T300, 汎用エポキシ #2500, 厚さ 0.125mm, 繊維体積含有率 59%) で巻かれた内径 15mm, 外径 17mm, 標点間距離 40mm の $\pm 45^\circ$ 斜向対称積層材を主に使用した。また、繊維配向角が 0° , 90° の 1 方向積層材を、AE 信号の周波数解析における基準データを求めるために使用した。炭素繊維

Fig. 1. Thin tubular specimen.

† 原稿受理 平成 9 年 5 月 2 日 Received May 2, 1997

* 名古屋大学大学院 〒464-0814 名古屋市千種区不老町, Graduate student, Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-0814

** 正 会 員 名古屋大学工学部機械工学科 〒464-0814 名古屋市千種区不老町, Dept. of Mech. Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-0814

維とプリプレグの引張強度はそれぞれ3528MPa, 1911MPa, 積層材の引張強度は $[0^\circ]_4$ 単層材, $[90^\circ]_8$ 単層材, $[\pm 45^\circ]_4$ 積層材がそれぞれ 1878MPa, 52MPa, 244MPa である。

2・2 試験システムと荷重条件

試験機には、電気-油圧サーボ式軸力-ねじり複合負荷疲労試験機（島津製作所製、サーボパルサー EFH-EB-10/TQ1-20L 型）を用いた。実験は、A/D-D/A 変換ボード（National Instrument 社製、NB-MIO-16H-9）を搭載したパーソナルコンピュータ（Apple 社製、Machintosh Centris 650）で、軸およびねじり荷重を制御し、荷重出力と変位計の出力を動ひずみ計を介して、同パーソナルコンピュータに取り込んだ。変位計はクリップゲージ（MTS 社製、MODEL632.11C-20）を用いて、軸方向ひずみとねじり方向ひずみを同時に計測した。

Fig. 2. Loading path.

本研究では、斜向対称積層材の非弾性変形挙動を知るため、軸方向引張り応力 σ と、ねじりによるせん断応力 τ を組合せた複合比例負荷試験を行った。Fig. 2 のような引張り-ねじり組合せ応力空間における 0° (単軸引張り), 30° , 45° , 60° , 75° , 82.5° , 90° (単純ねじり) 方向への負荷経路で単調負荷試験および繰返し試験を行った。応力速度は引張り-ねじり組合せ応力空間上で $\sqrt{\dot{\sigma}^2 + \dot{\tau}^2} = 5 \text{ MPa/sec}$ とした。

2・3 アコースティック・エミッションによる損傷計測

AE 信号の発生は、材料内部の損傷の発生に対応していると考え、本実験では内部損傷の発生・進展挙動を評価するため、AE 計測システム（日鉄テクノス社製、N.A.I.S-5000A）を用い、単位時間あたりの損傷発生数に関連する AE 事象の発生率を測定した。同時に AE 波形データも測定し、実験後 FFT による周波数解析（sampling rate 0.1μsec）を行った。ここで、個々の AE 信号のパワースペクトラムにはばらつきがあるため、最大のパワースペクトラムを示す周波数成分を調べ、そのヒストグラムを求めた。

Fig. 3 に概要を示す AE 計測システムは、プリアンプ（MODEL5100）、AE 信号処理装置（MODEL5880A）、EPSON 社製 PC-286VS を改良した AE 信号解析装置（MODEL5800A）から構成される。波形収録システムは、波形収録装置（オートニクス社製、APC510）および制御コンピュータ（NEC 社製、PC-9801BA2）から構成される。円管試験片のテーパ部分を削った平面部分の 2ヶ所（センサ間隔 60mm）に広帯域型センサー（NAIS B-2302N, 周波数特性 100 ~ 1600kHz）を取付け、総利得を 70dB, しきい値をノイズレベルの約 5 倍の 160mV（メインアンプ出力電圧）に設定した。しきい値は高めに設定したが、80mV の時に比べて、後述する AE の発生挙動の傾向に大きな違いは見られない。なお、試験片のテーパ部分を削ることによる材料特性への影響は全く認

められなかった。

2・4 周波数解析による損傷同定

前報⁵⁾において、 $[0^\circ]_4$ 単層材, $[90^\circ]_8$ 単層材, $[\pm 45^\circ]_4$ 積層材の準静的引張り破壊試験で計測した AE 信号の周波数解析を行い、これらの複合材料の主要な損傷様式であるマトリックスき裂、繊維破断に対応する AE 信号を推定した。また、その結果を疲労過程における AE 計測に適用して、超音波顕微鏡観察結果、断面観察結果などと比較してその妥当性を確かめた。その結果、マト

Fig. 3. Setup for acoustic emission monitoring under biaxial loading.

Fig. 4. Stress-strain relation of $[\pm 45^\circ]_4$ CFRP under monotonic loading.

リックスき裂, 繊維破断に対応する周波数成分が, それぞれ 100 ~ 200kHz の低周波数成分, 500kHz 付近の成分であることを特定した. これらの結果は, 鈴木, 中西等の報告⁷⁾と比較的一致する.

3 引張り-ねじり組合せ応力空間における 損傷面の実験的検討

この節では, AE 信号の発生を損傷の発展と捉え, 応力空間における損傷発生の限界面を損傷面と考え, 引張り-ねじり組合せ負荷における損傷面の存在と, 基本特性について検討し, 同時に, AE の周波数解析に基づき各損傷の発生時期についても考察した.

3・1 非弾性変形挙動と縦弾性係数の変化

[$\pm 45^\circ$]₄ 斜向対称積層材は, 直交積層材の中で最も顕著な非弾性変形挙動を示す. Fig. 4 に, 応力経路 0° (単軸引張り), 45° , 90° (単純ねじり) での応力-ひずみ曲線を示す. $\pm 45^\circ$ 積層材では, せん断応力の割合が大きいほど主応力方向が繊維配向角に近づき, 繊維が荷重の多くを負担するため, 応力経路 90° の τ - γ 曲線は [0°]₄ 材の引張りのように線形でかつぜい性の性質を示し, 破断強度, 縦弾性係数が高い. また, 応力経路 0° の σ - ε 曲線は大きな非弾性ひずみを示す. これは層間のマトリックスのせん断変形と 2 方向の繊維の相対回転が生ずるためと考えられる.

また, 損傷の力学的効果を調べるため, 応力経路 0° , 60° , 90° について弾性係数の変化を測定した. 弾性係数の測定は, 一応力経路につき一本の試験片で求めたもので, 所定の荷重負荷後 3MPa まで除荷し, その後, 応力振幅 10MPa, 平均応力 13MPa の弾性試験を引張り側で 3 回行った結果を平均して求めている. Fig. 5 に応力経路 0° , 60° , 90° の弾性係数の変化を示す. 応力経

Fig. 5. Relation between elastic modulus and stress.

Fig. 6. AE evolution under proportional loading.

路 0° では, 縦弾性係数は負荷応力 140MPa 付近から緩やかに低下し, 破断直前には初期縦弾性係数の約 66% まで急激に低下している. これに対し, 応力経路 60° でも負荷応力 130MPa 付近から緩やかに低下し, 破断直前で 93% に低下する. 一方, 応力経路 90° の横弾性係数は, 試験片の破断までほとんど変化しない. これらの違いは, 繊維破断が支配的な応力経路 90° と, 初期損傷としてマトリックスき裂が多発する応力経路 0° , 両者の中間に位置する応力経路 60° のそれぞれの損傷様式の違いに起因するものと考えられる.

3・2 AE 発生率と初期損傷応力

応力の変化と AE 発生挙動との関連を調べるために, 準静的引張り試験における AE 信号を測定した. Fig. 6 (a) は応力経路 0° , Fig. 6 (b) は応力経路 60° における応力と AE 発生率の時間変化を示す. 応力レベルが低いときには AE 信号はほとんど計測されないが, Fig. 6 (a) では $\sigma = 135$ MPa 付近から, Fig. 6 (b) でも $\sigma = 115$ MPa 付近から AE 発生率は急増している. 各応力経路における AE 発生率の変化を整理して検討すると, 応力経路 30° , 45° は応力経路 0° と類似して $\sigma = 135$ MPa 付近から AE 発生率が急増している. これに対して, 応力経路 90° では破断強度の 40% 程度から散発的な AE 信号の発生が見られ, 破断直前に再び増加している. この散発的な AE 信号は, 周波数解析の結果, マトリックスき裂に対応する低周波数帯の信号で, また, 破壊前に発生する信号と比べてエネルギーが小さいことが確認できる. Fig. 6 (b) の $\sigma = 115$ MPa 以下の AE 信号も同様の傾向を示す.

本研究では, これらの AE 信号の急増は材料内部における損傷の多発に対応していると考えている. そのため,

Fig. 7. Initial damage surfaces.

AE 挙動をもとに、材料内部に最初に連続的に損傷が発生する時の応力である初期損傷応力を決定する。この初期損傷の発生を決定する AE 発生率のしきい値により初期損傷応力も変化し、後述する初期損傷面の形状も影響を受けるため、損傷発生率のしきい値の決定には注意が必要である。応力経路 $0^\circ - 75^\circ$ では、損傷の発生を規定する AE 発生率が 3events/sec から 6events/sec まで変化しても対応する応力はほとんど変化しない。これに対し、応力経路 $82.5^\circ, 90^\circ$ では、比較的低い応力で散発的な AE 信号が発生するため、しきい値の選択によって対応する応力値が 50MPa ほど変化する。応力経路 $82.5^\circ - 90^\circ$ では散発的なマトリックスき裂の発生が材料の剛性に影響を与えていないことを踏まえ、連続した AE 信号が発生する AE 発生率 6events/sec を初期損傷応力に対応するしきい値とし、応力経路 $0^\circ - 75^\circ$ では、AE 発生率 3events/sec をしきい値と定義する。

また、本報告では応力速度 5MPa/sec の結果のみを示しているが、応力速度 1MPa/sec でも初期損傷応力値はほとんど変化しない。

3・3 初期損傷面の形状

本研究では、各応力経路に対する初期損傷応力を応力空間にプロットして得られる曲面が初期損傷面に相当する。Fig. 7 に、以上の実験により得られたすべてのデータ点と初期損傷面、破壊面の形状を示す。図中の高エネルギー点は、 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mV}^2$ 以上の AE エネルギーを計測した点を表す。初期損傷面は後述のように損傷様式を考慮して 2 つの曲線で表した。破線で示される初期損傷面は、一点鎖線の破壊面の約 56 ~ 94% にあたる値をとり、アスペクト比 $\tau/\sigma = 2.3$ と縦長の形状をしている。応力経路 0° の初期損傷応力は破壊応力の約 56 ~ 64% に、応力経路 30° では約 60 ~ 70% に、応力経路 60° では約 71 ~ 81% に分布しており、組合せ応力におけるせん断応力の

Fig. 8. Relation between AE frequency and event count under proportional loading.

割合が大きくなるほど、破壊応力に対する初期損傷応力も大きくなっている。また、実線で表される初期損傷面は、破壊応力の約 85 ~ 95% に相当する。

前節で述べたように、 $[\pm 45^\circ]_4$ 積層材では、せん断応力の割合が大きいほど主応力方向が繊維配向方向に近づく、荷重に対する繊維の負担割合が増加する。その結果、応力経路 $0^\circ - 45^\circ$ の損傷挙動と、応力経路 $82.5^\circ - 90^\circ$ の損傷挙動、そして応力経路 $60^\circ - 75^\circ$ の損傷挙動は異なる傾向を示す。 $[\pm 45^\circ]_4$ 試験片に対する単調比例負荷試験を行い、応力経路 $0^\circ, 90^\circ$ における周波数解析結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a), (b) は応力経路 0° で負荷応力がそれぞれ $\sigma = 150 - 170 \text{ MPa}$, $210 - 230 \text{ MPa}$, Fig. 8 (c) は応力経路 90° で、負荷応力が $\tau = 340 - 360 \text{ MPa}$ における結果である。2・4 節における周波数解析結果より、応力経路 0° の初期損傷応力を越える $\sigma = 150 - 170 \text{ MPa}$ では、マトリックスき裂に対応する低周波数の信号が検出され、破断直前の $\sigma = 210 - 230 \text{ MPa}$ では低周波数の信号と、繊維破断に対応する高周波数帯

の信号が検出されており、損傷の発展がマトリックスき裂の発生から繊維破断へと進展していることがわかる。これに対して、応力経路 90° では若干のマトリックスき裂に対応する信号の発生が認められるが、高周波数帯の信号の多発とともに試験片が破壊しており、両者の損傷様式の違いが見られる。繊維破断のすべてが高い AE エネルギーを発生するわけではないという報告⁸⁾もあるが、Fig. 7 中の高エネルギー点は高周波数帯の信号に概ね対応しており、繊維破断に対応する初期損傷面は高エネルギー点の近傍にある。繊維破断に対応する損傷面を応力空間内の引張り軸方向に延長すると、応力経路 60° の高エネルギー点を通過すると考えられるが、応力経路 $60^\circ - 75^\circ$ では初期損傷面の後続面となるため、Fig. 7 中には描いていない。

本研究では、初期損傷面をマトリックスき裂と繊維破断という損傷様式の違いにより分離し、初期損傷としてマトリックスき裂の発生が顕著な応力経路 $0^\circ - 75^\circ$ と、繊維破断が支配的な応力経路 $82.5^\circ - 90^\circ$ を、引張り－ねじり組合せ応力空間上において分けて表現した。マトリックスき裂と繊維破断が発生する応力経路 $60^\circ - 75^\circ$ については、次節でさらに詳しい検討を行っている。

3・4 応力経路 $60^\circ - 75^\circ$ の損傷挙動

この節では、応力経路 $60^\circ - 75^\circ$ における損傷挙動について検討する。

応力経路 60° で、最大荷重を徐々に増やした繰返し負荷・除荷試験を行った。最大せん断負荷応力が 300MPa 以下の時は、応力経路 90° と類似して、散発的な AE 信号の発生が認められるものの、せん断応力－せん断ひずみは負荷－除荷曲線ともほぼ線形で、剛性の低

Fig. 10. AE evolution under proportional loading.

下も見られない。しかし、負荷応力がある応力に達すると、せん断ひずみの急激な増加が観察される。このときの応力－ひずみ曲線を Fig. 9 に、AE 発生挙動を Fig. 10 に示した。σ-ε 曲線は応力経路 $0^\circ - 45^\circ$ と同じように、材料の粘性により大きなヒステリシス・ループを描くが、τ-γ 曲線はせん断応力が図中 (1) の 310MPa まではほぼ線形で、図中 (1) - (2) の区間でせん断ひずみが急増している。この時期に AE 信号が多発していることから、内部損傷の発生に伴うひずみ増加と考えられ、除荷時の τ-γ 曲線の傾きが負荷時に比べ減少する損傷挙動が見られる。

次節で述べるように、応力経路 $0^\circ - 45^\circ$ においては、除荷時でも軸方向のひずみが増加する区間 (図中では (2) - (3) に対応) で AE 信号の発生が認められるのに対し、応力経路 60° では、図中 (2) - (3) の区間における AE 信号の発生が見られない。応力経路 60° では応力経路 $0^\circ - 45^\circ$ と比較して、損傷の発生が軸方向のひずみよりもせん断ひずみの変化に依存する。一方、応力経路 90° では、荷重負担の大きい繊維が破断すると、最弱層のマトリックスも破壊され、試験片全体が一挙に破壊に至る。しかし、応力経路 60° では、まとまった繊維が破断してもマトリックスが一時的に荷重を負担するため、非弾性ひずみの急増後に試験片は破壊する。また、応力経路 75° でも応力経路 60° と類似した顕著な粘性－損傷挙動を示す。

3・5 後続損傷面の検討

初期損傷面を超える後続比例負荷を加えたとき、初期損傷面から外側に向かう後続負荷経路で AE が多発し、繰返し負荷に対してこの AE が発生する応力が、初期損傷応力よりしだいに大きくなる。本研究では、このときの拡大する応力値を応力空間で結んだものが、後続損傷面であると定義する。

初期損傷面を超えて応力を作用させたときの後続損傷面の挙動を調べるため、最大応力を上げながら負荷・除荷を繰り返して AE の発生挙動を調べた。応力経路 0° の結果の一例を Fig. 11 に示す。最大応力の履歴は、初期損傷応力以下の 110MPa 、少し上回る 150MPa 、そして 200MPa 、 210MPa 、 220MPa とした。最大応力が初期損傷面内の 110MPa のとき、AE 信号はほとんど検出

Fig. 9. Stress-strain relation under 60° - loading path.

(a) $\sigma_{\text{MAX}} = 150 \text{ MPa}$ (b) $\sigma_{\text{MAX}} = 200 \text{ MPa}$ Fig. 11. AE evolution for different maximum stresses under 0° - loading path.

されない。最大応力が 150MPa の Fig. 11 (a) で、初期損傷応力の 130MPa より AE 信号が発生している。さらに最大応力 200MPa の Fig. 11 (b) では、AE 信号が発生するときの応力は 150MPa で、事前に負荷した最大応力と一致している。このように、初期損傷応力を越える後続負荷に対して後続損傷面が拡大することが観察された。しかし、最大応力を 210MPa, 220MPa とさらに増大させても、後続損傷面は拡大しなかった。特に応力経路 $0^\circ - 75^\circ$ における後続損傷面の拡大の限界応力は、ちょうど繊維破断に対応する高周波数帯の AE 信号が検出されるときに相当した。また Fig. 11 (b) では、除荷時にも多数の AE 信号が検出された。これらの AE には高い振幅を持つ信号が含まれており、周波数解析の結果、低周波数帯の信号が多いものの 500kHz 付近の高い信号も検出されており、損傷様式としては主としてマトリックスき裂が発生しているが、繊維破断も若干発生していると考えられる。したがって、既に存在するき裂の開閉などによる信号ではなく、除荷においても後続損傷域内で損傷が進展していると考えられる。この除荷時に発生するこの現象は弾塑性-損傷材料では見られない⁹⁾ため、材料の粘性的挙動の影響と考えられる。損傷に対する粘性的の影響については後の節と以下でさらに検討する。

さらに、応力経路 0° において初期損傷応力を越えて負荷した後、完全に除荷せずに繰り返し負荷を加えたときの損傷発生挙動を Fig. 12 に示す。再負荷時に AE 信号が検出されるときにの応力は、初めに検出された初期損傷

Fig. 12. AE evolution under proportional loading 0° - loading path.

Fig. 13. Felicity ratio for different loading conditions.

応力よりも大きく、発生量も若干低下している。しかし、再負荷において AE 信号が検出されることは後続損傷面の拡大が完全なものではないことを示している。

荷重条件と後続損傷面の関係を検討するため、繰返し荷重条件に対するフェリシティ比の値を Fig. 13 に示す。フェリシティ比とは、先行荷重の次の載荷過程で AE が多発し始めた荷重を先行荷重で除したときの比率である。荷重条件は、応力経路 0° , 60° で負荷後完全に除荷 (0 - 180MPa : Type A), 応力経路 0° で負荷後途中まで除荷し再負荷 (120 - 180MPa : Type B, 140 - 180MPa : Type C) を 5 サイクル行った。まず、応力経路 0° において比較すると、全体的に繰返しにともないフェリシティ比が上昇する傾向が見られる。完全に除荷する Type A では先行荷重の次の 2 サイクル目からフェリシティ比は 1 に近い値をとる。これに対し不完全除荷の Type B, Type C では、2 サイクル目のフェリシティ比が 0.8 前後の比較的低い値をとる。特に除荷量が小さい Type C のフェリシティ比が全般的に小さい。本実験で用いた試験片は、繰返し負荷に対して顕著に非線形なヒステリシス曲線を描く²⁾が、除荷過程の少ない Type B, Type C ほど 2 サイクル目以降の累積非弾性ひずみ (繰返し負荷後に完全除荷したときの残留ひずみ) の減少量が少ない。一方、除荷の途中に再負荷を行うと、累積非弾性ひずみは

Fig. 14. AE evolution under constant loading.

そのまま増加を続ける。同じような傾向が、軸方向の非線形性が強い応力経路 30° , 45° でも見られる。

Fig. 13 の応力経路 60° の完全除荷では、2 サイクル目からフェリシティ比が 0.85 前後の一定の値をとり、損傷面の拡大限界面が一定の値をとることがわかる。また、応力経路 90° では、単発的な AE の発生は繰返し後に出なくなるが、後続損傷面の拡大は小さく、せん断応力に対する (0–360MPa) フェリシティ比は 0.95 の高い一定の値をとる。このように、繊維破断の損傷モードが強い影響を与える応力経路 60° – 90° では、後続損傷面の挙動は、応力経路 0° – 45° と異なる挙動を示すことが確認された。

3・6 複合材料の粘性挙動

最後に、顕著な非弾性変形挙動を示す $[\pm 45^\circ]_4$ 斜向対称積層材の粘性挙動を調べるため、応力経路 0° で応力保持実験を行い、このときの時間変化に対する AE 発生率、応力、ひずみの挙動を Fig. 14 に示す。FRP のクリープ損傷については多数報告¹⁰⁾されているが、本実験で使用した $[\pm 45^\circ]_4$ 材でも、応力保持中にはひずみの増加と AE 信号の発生が観察され、応力一定下でも内部損傷が継続的に発生していることが確認された。

この応力保持状態で発生する AE 信号と、除荷中に発生する AE 信号を比較するため、Fig. 11 (b) の除荷中と、Fig. 14 の応力保持中に発生する AE の周波数解析を行った結果、ともにマトリックスき裂と繊維破断に対応する信号が計測され、両者は粘性に伴う非弾性ひずみの増加が損傷の発達を促していると推測される。

これに対し、応力経路 60° – 90° での応力保持実験では、AE 信号の発生はほとんど観察されなかった。このように、材料の粘性挙動も応力経路によって異なることが確認された。

4 結 言

本研究では、炭素繊維強化複合材料の薄肉円管試験片

を用いて、粘性一損傷材料における損傷面の存在とその力学的挙動に対する検討を行った。

初期および後続損傷面の存在、形状、基本的特性を明らかにするため、AE 計測法を用いて、材料内部の損傷を測定し、引張り–ねじり組合せ応力空間における損傷面に対する実験的検討を行った。また、各種応力状態における複合材料の損傷モードを知るため、AE 信号の周波数解析を行い、各損傷モードの発生挙動を調べた結果、以下の知見を得た。

(1) 非弾性変形挙動を示す $[\pm 45^\circ]_4$ 斜向対称積層材は、引張り負荷に伴って発生・成長する損傷により、縦弾性係数は減少するが、繊維の荷重負担が大きいねじり負荷に対する横弾性係数は試験片の破壊までほとんど変化しない。

(2) 応力空間内に、損傷発生の限界を規定する初期損傷面が存在する。初期損傷面の形状は、損傷モードの相違により異なる 2 つの初期損傷面に分離して表現できる。

(3) 後続損傷面の挙動は、応力経路、負荷・除荷条件により異なる挙動を示す。応力経路により、一定応力、除荷においても損傷の発生が確認された。

以上のような応力空間における損傷面を、損傷ポテンシャル面として取り扱うためには、さらに適切な実験的検討が必要である。

(平成 9 年 3 月 14 日 日本材料学会第 26 回 FRP シンポジウムにて一部講演)

参 考 文 献

- 1) R. M. Jones, "Mechanics of Composite Materials" (1975) Hemisphere Publishing Corporation.
- 2) 石田孝明, 金川 靖, 佐野村幸夫, 玉置一雄, 日本機械学会論文集, **60**, 105, (1994).
- 3) J. Lemaitre, J. Eng. Mat. Tech. Trans. ASME, **107**, 83 (1985).
- 4) P. T. Curtis, M. G. Bader and J. E. Bailey, J. Mat. Sci., **13**, 377 (1978).
- 5) 田中行平, 金川 靖, 村上澄男, 川崎敦司, 材料, **46**, 638 (1997).
- 6) C. L. Chow and J. Wang, Eng. Fract. Mech., **27**, 547 (1987).
- 7) 鈴木 恵, 中西 博, 岩本正治, 自念栄一, 前川善一郎, 森 旭, 孫 峰, 日本機械学会論文集, **A-53**, 1459 (1987).
- 8) 大平貴則, 岸 輝男, 金属学会誌, **48**, 248, (1984).
- 9) 神谷邦夫, 村上澄男, 材料, **45**, 667, (1996).
- 10) 上野谷敏之, 材料, **46**, 360 (1997).