繰返し荷重下における織物強化複合材料の疲労損傷進展* (初期損傷過程の熱弾性イメージ計測)

西 川 康 博^{*1}, 大 窪 和 也^{*2}
藤 井 透^{*2}, 上野谷 敏 之^{*3}

Fatigue Damage Progression of Woven Fabric Composites under Cyclic Loading (Observation of Initial Damage Process by Thermoelastic Image Technique)

Yasuhiro NISHIKAWA^{*4}, Kazuya OKUBO,
Toru FUJII and Toshiyuki UENOYA

^{*4} Dept. of Mech. Eng. & Systems, Doshisha University,
1-3 Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

Initial fatigue damage process of plain woven CF/epoxy composites was studied with thermoelastic image technique. Thermoelastic damage analysis was conducted to evaluate the fatigue damage in the specimen. The experimental results showed that the damage initiation points were widely scattered in the location of the material. The each area, where the damage initiated, had different damage level at any fatigue cycles. The thermoelastic damage response can be an indicator for the state of fatigue damage of the composites. The thermoelastic damage analysis also predicted that the initial fatigue damage process of plain woven fabric composites changed when the local damage area was distributed in lateral direction of the specimen.

Key Words: Fatigue, Composite Material, Probabilistic Method, Plain Woven Fabric, Initial Fatigue Damage Process, Thermoelastic Damage Analysis, Percolation Theory

1. 緒 論

織物強化材を用いた複合材料は、航空・宇宙機器をはじめ広範な分野で使用されている。しかし、織物複合材料は複雑な強化構造を有するため、その損傷過程は複雑となる。損傷過程の解明に関しては、各種さまざまな方法により検討が試みられている。例えば、光学顕微鏡⁽¹⁾やSEM⁽²⁾による損傷観察が報告されている。また、AE法⁽³⁾を用いることにより、振幅および事象数などから、種々の損傷モードの検出が可能であることが報告されている。近年では数値シミュレーションに基づく損傷過程に関する研究も数多く報告されている。例えば、番作ら⁽⁴⁾はShear-Lag解析により横糸の応力分布を求め、微視的な破壊挙動および損傷進展機構のモデル化を行っている。また、上辻ら⁽⁵⁾は繊維束に対して一方向繊維強化材の異方性損傷構成則を局所的に適用した三次元損傷進展解析手法を提案している。

しかし、これらの報告のほとんどが静的荷重下を対象としており、繰返し荷重下における損傷過程に関する報告は少ない。著者らは先の報告⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾において、繰返し荷重下における剛性低下傾向に着目し、縦繊維束と横繊維束の一つの交点を基本構造(以後、Unitと呼ぶ)とした損傷進展モデルを提案した。しかし、これら報告では、局所的な損傷過程の観察・評価にとどまり、その分布や広がりといった点には言及していない。構造信頼性を確保するため、また、寿命を解明するためにも、場所による疲労損傷の程度の違い(疲労損傷分布)を含めた損傷過程を明らかにする必要がある。そこで本報では、平織物炭素繊維強化複合材料を取り上げ、損傷分布を含めた疲労初期の損傷過程を明らかにする。

2. 試験片および試験方法

試験にはPAN系平織物炭素繊維布(PYROFIL TR 3110 M:三菱レイヨン)/ビスフェノール A 系エポキシ樹脂(エピコート 828:油化シェルエポキシ)の積層板を用いた。硬化剤には酸無水物(EC-100 FR-1(H):東都化成)を用いた。繊維布の厚さは約0.1 mm、布内の縦・横繊維束の密度はともに12.5本/25 mm(繊維束幅2 mm)である。1繊維束は約 3×10^3 本

* 原稿受付 2003年3月31日。

^{*1} 正員、同志社大学大学院(〒610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3)。

^{*2} 正員、同志社大学工学部。

^{*3} 正員、大阪府立産業技術総合研究所(〒597-1157 和泉市あゆみ野2-7-1)。

E-mail: etc1304@mail4.doshisha.ac.jp

の繊維で構成されている。硬化樹脂の T_g は約 130°C であった。繊維布5枚をハンドレイアップ法により積層し、ホットプレスにて 120°C で4時間加熱し、積層板を成形した。積層板の厚さは約1 mm であり、繊維体積含有率は約55%であった。この積層板より縦繊維方向と平行に幅25 mm、長さ200 mmの短冊形試験片を切り出した。また高靱性のエポキシ系接着剤でGFRP製タブを試験片の両端に接着した。図1に試験片形状および寸法を示す。また、表1に炭素繊維、エポキシ樹脂および積層板の強度、縦弾性係数を示す。本試験片の応力-ひずみ曲線は、破断に至るまでほぼ線形を保つことから、強度と比例限は同じである。

引張り-引張りの繰返し荷重で疲労試験を行った。繰返し最大応力 ($\sigma_{\max}$) を600 MPa、応力比 R を0.05、荷重波形は正弦波で、繰返し周波数を10 Hzとした。この負荷条件での寿命は、あらかじめ行われた疲労試験により約 2.27×10^5 回であることが確認された。疲労試験中、適当なタイミングで疲労負荷を中断し、 $\sigma_{\max} = 300$ MPa ($R = 0.05$, 10 Hz) 条件にて熱弾性イメージの計測を行った。計測装置には日本電子(株)製のJTG-8010を使用した。画像信号を高解像化するために拡大レンズによる詳細観察を行った。また、試験片表面には黒体塗料を薄く塗布し、熱弾性信号に重畳するノイズをできるだけ押さえるようにした。

ここで、熱弾性イメージ計測の基本原則について述べる。気体と同様に物体に圧縮・引張りの荷重を急激に加えると、変形が断熱的に行われ、発熱・吸熱が生じる(熱弾性効果)。熱弾性イメージ計測では、一定周

波数以上の繰返し荷重を受ける物体の発熱・吸熱(温度変化)の計測を行う。等方性材料であれば、弾性限界内では温度変化 ΔT と主応力の変化 $\Delta \sigma$ の間に比例関係が成立する⁽⁹⁾。一方、直交異方性材料、特にCFRPの場合、熱弾性効果による温度変化は次式で近似される⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

$$\Delta T = -K_T T \Delta \sigma_T, \quad K_T = \alpha_T / \rho C_\sigma \cdots \cdots (1)$$

ここで、 K_T ($K_T > 0$) は繊維方向と直角な方向の熱弾性定数、 T は試験片の絶対温度、 α_T は繊維方向と直角な方向の線膨張係数、 ρ は密度、 C_σ は応力一定のもとでの比熱である。つまり、熱弾性イメージ計測により繊維方向と直角方向の温度変化(応力変化)を正確に測定できる。

3. 試験結果および考察

3.1 未損傷材の熱弾性効果の観察 図2に疲労試験前に熱弾性イメージ計測のための繰返し荷重を負

Fig. 2 Typical result of thermoelastic effect for virgin woven fabric composites

Fig. 3 Photograph of surface and cross-section of virgin specimen

Table 1 Mechanical properties of materials

	Static strength	Elastic modulus
Carbon fiber	4.1 [GPa]	230 [GPa]
Epoxy resin	67.5 [MPa]	7.2 [GPa]
Composite	820 [MPa]	70 [GPa]

Fig. 1 Geometry and dimension of specimen

荷したときに観察された平織物強化複合材料の熱弾性イメージを示す。図3に試験片表面および断面の観察写真を示す。

図2より、熱弾性効果による温度変化の著しい部分と著しくない部分が周期的に観察できる。2章で示したとおり、温度変化が負の場合は引張りの応力変化が生じた状態を、正の場合は、圧縮の応力変化が生じた状態を、また零の場合は応力変化がない状態を示している。CFRPの場合、繊維方向の熱弾性係数 K_L ($K_L < 0$) は K_T に対して非常に小さく、文献(11)によれば

Fig. 4 Temperature difference $|\Delta T|$ of both transverse and longitudinal fiber bundles (normal distribution plots)

Fig. 5 Thermoelastic stress analysis images of woven fabric composites under cyclic loadings (load applied vertically)

絶対値で約 $1/75$ 程度である。このため、平織物強化複合材料においては、繊維方向が荷重と直角方向である横繊維束部分では、吸熱による大きな負の温度変化が観察される。一方、縦繊維束部分では発熱により正の温度変化を伴うが、縦繊維束の真下にある内層の横繊維束の影響⁽¹⁰⁾により、図2の熱弾性イメージでは小さな負の温度変化が観察される。以上の理由により、繰返し荷重が作用する平織物強化複合材料では、図2で示したような織り構造を反映した熱弾性イメージを得ることになる。

図4に縦・横繊維束の中央部(図2に示す測定点)において測定された温度変化 ΔT の結果(絶対値)を示す。温度変化の絶対値の平均および標準偏差は、縦繊維束では 0.051 K, 0.0072 K, 横繊維束では 0.213 K, 0.015 K であった。図4より、測定された温度変化は一樣ではないことがわかる。この原因として、製織時に生じた張力の違いや積層板の成形時に生じる繊維のゆがみなどが知られている。また織物強化複合材料では、微小部分における局所ひずみのばらつきが大きい⁽¹²⁾ことが知られており、温度変化のばらつきを生じさせる一因と考えられる。

3・2 疲労損傷のモニタリング結果 繰返し数が 5×10^3 , 1×10^4 , 2×10^4 および 5×10^4 回において観察された熱弾性イメージを図5に示す。図5より、図2に示した疲労損傷前に観察された熱弾性イメージ結果と比較して、縦繊維束部に変化は見られない。しかし、横繊維束部の中央に、荷重方向と垂直な方向に帯状の温度変化が見られる。ここで、図6に 5×10^4 回の繰返し荷重を受けた試験片の表面観察写真を示す。平織物強化複合材料では横繊維束部の樹脂または繊維/樹脂界面部分に損傷(横き裂)が容易に発生することが知られている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。横繊維束中に横き裂が生じると、それまでその部分に負荷されていた引張応力が解放され

Fig. 6 Surface of damaged specimen at $N=5 \times 10^4$ cycles (load applied vertically)

る。このため、温度変化が小さく測定される。その結果、横き裂に対応するような図5に示す帯状の温度変化が観察されたとと言える。

図7に繰返し負荷前後に得られる熱弾性イメージの差分情報(図2の値-図5の値)を求め、損傷のみに起因するイメージの変化を抽出した結果を示す。これは著者らの二人が提案した新しい損傷イメージ抽出手法(熱弾性損傷解析, thermoelastic damage analysis: TDA)⁽¹³⁾であり、得られたイメージをTDAイメージと呼ぶ。図8には損傷のみに起因する温度変化(以後区別のため、熱弾性損傷応答 ΔT_d と呼ぶ)の結果(絶対値)を示す。図7で熱弾性損傷応答が負を示すのは、横き裂発生により引張応力が解放された結果であり、その絶対値は応力の解放量の大きさに依存する。このように熱弾性損傷解析では、損傷の程度をその発生位置における応力解放への寄与として評価できる。

図7のTDAイメージには、損傷の発生位置がハイライト部として示されている。図7が示すように損傷の発生位置は試験片全体において不規則に分布することがわかる。また図8より、どの繰返し数においても熱弾性損傷応答、すなわち、損傷の程度にばらつきがあることがわかる。本試験の場合、熱弾性損傷応答の絶対値が0.06 K以上を示した部分では、目視でも横き裂の存在が確認された。

図9に平織物強化複合材料における横き裂の進展過

Fig. 7 Thermoelastic damage analysis images of woven fabric composites under cyclic loadings (load applied vertically)

程の模式図を示す。図9に示すように、平織物強化複合材料では横繊維束がうねっており、横き裂が試験片の片方の端面からもう片方の端面に横切ことは容易ではない。また図7より、繰返し数の増加とともに、損傷を示すハイライト部の幅寸法が大きくなることがわかる。ここで、図10に試験片側面の観察写真および損傷過程の模式図を示す。試験片側面から見ると、繰返し負荷により、横繊維束部の中央に最初の横き裂(第一横き裂)が発生する(Stage-I)。さらに繰返し数が増加すると、第一横き裂の周辺に第二、第三の横き裂が発生する(Stage-II)。縦繊維束に達した横き裂は、やがて縦繊維束界面に沿って成長し、局所的な層間にはく離が生じ、縦繊維の破断を経て試験片の破壊へ至る(Stage-III)。Stage-IおよびStage-IIの損傷状態で熱弾性損傷解析を行った場合、損傷は応力分布を介して間接的に観察されるため、実損傷(横き裂群)像に対して若干の広がりを持った損傷イメージが観察される⁽¹³⁾。この理由により、繰返し数の増加とともに、ハイライト部の幅寸法が大きくなる観察されとも言える。

試験片全体の損傷の程度を定量化するため、熱弾性損傷応答の単純平均を求め、これを平均熱弾性損傷応答と定義する。図11に平均熱弾性損傷応答と繰返し

Fig. 8 Thermoelastic damage response $[\Delta T_d]$ under cyclic loadings (normal distribution plots)

Fig. 9 Schematic of crack propagation in woven fabric composites

数の関係を示す。図 11 より、 1.5×10^4 回程度の繰返し数まで、平均熱弾性損傷応答の絶対値は急激に大きくなり、その後、緩やかな増加に転じることがわかる。この傾向は、疲労初期において平織物複合材料に見られる剛性低下の傾向⁽⁶⁾⁽⁷⁾とよく一致した。図 10 に示すように、疲労初期において繰返し数が増加すると、横繊維束に多数の横き裂が生じる。それに伴い平均熱弾性損傷応答の絶対値は急激に大きくなる。しかし、ある程度横き裂の数が増加すると、横き裂間の間隔が狭くなるため、横繊維束で未だき裂の入っていない部分に生じる荷重方向の引張応力が小さくなり、新たな横き裂は生じ難くなる。次の段階で局所的な層間はく離が生じれば、横繊維束の荷重分担量は低下する。これは剛性低下の一因となるが、横繊維束内に多数のき裂が入った後の横繊維束の剛性への寄与は少ない。こ

Fig. 10 Photograph and schematic of fatigue damage process in woven fabric composites (load applied vertically)

Fig. 11 Relationship between averaged thermoelastic damage response $|\Delta T_{dav}|$ and number of cycles

のため、局所的な層間はく離の増加による剛性の低下はわずかとなり、また、平均熱弾性損傷応答の絶対値は緩やかな増加を示すようになる。したがって熱弾性損傷応答は、疲労初期における試験片全体の損傷の程度を表す指標となる。

3.3 損傷分布の検討 図 12 に、図 8 に示した熱弾性損傷応答の測定点中、熱弾性損傷応答の絶対値が 0.06 K 以上を示した測定点の割合 (損傷率: R_d と定義) と繰返し数との関係を示す。3.2 節で示したとおり、0.06 K 以上を示した部分では、目視でも横き裂の存在が確認できる。図 12 より、 R_d が約 0.6 のときを境にして、こう配の変化が見られる。

ここで、0.06 K 以上を示した測定点を損傷の生じた Unit (損傷 Unit) とすると、損傷 Unit は試験片全

Fig. 12 Relationship between damage ratio R_d and number of cycles

Fig. 13 Schematic of damage unit distribution

Fig. 14 Relationship between damage ratio R_d and occurrence probability

体において不規則分布する。本論では、この分布を表現するために浸透理論⁽¹⁴⁾を応用した。浸透理論とは、不規則に分布した要素間につながりが生じるとき、つながり方の違いが系の性質にどのように反映するかを調べる模擬実験手法である。試験片全体を図5や図7での結果を基に縦横10×12個のUnitで構成した。各Unitには乱数を付与し、最小の乱数を有するUnitが、損傷Unitに変わるとする過程を繰返し、損傷Unitの分布を表現した。ここでは、Unitが損傷Unitに変わる確率は隣接するUnitのもつ値と独立であると仮定している。

図13に損傷Unitの分布の一例を示す。図13では全Unit数に対する損傷Unit数の割合(損傷率)による違いを示した。Unitに与える乱数系列により損傷Unitの分布も変化するので、不変量を導入する必要がある。そこで図14に、 10^3 回の試行において少なくとも1箇所、試験片の片方の端面からもう片方の端面に損傷Unitが連続する出現確率と損傷率 R_d の関係を示す。図14より、 R_d が約0.6になると損傷Unitが横方向に連続する確率が初めて生じることがわかる。これは図12においてこう配の変化が生じた損傷率の値とほぼ同じである。

これらの結果から、損傷が横方向に連続すると、試験片全体の損傷状態の遷移が生じることがTDAにより検証できた。

4. 結 論

繰返し荷重下における平繊維強化複合材料に関して、損傷分布を含めた疲労初期の損傷過程を検討した。熱弾性イメージ計測および熱弾性損傷解析を用いて、損傷を観察することにより、以下の結論が得られた。

- (1) 平繊維強化複合材料では、損傷が試験片全体に対して不規則に分布する。
- (2) どの繰返し数においても、個々の損傷の程度はばらつきを示す。
- (3) 熱弾性損傷応答は、疲労初期における試験片全体の損傷の程度を表す指標となる。
- (4) 損傷が横方向に連続すると、損傷状態の遷移が生じる。
- (5) TDAにより平繊維強化複合材料中の損傷の広がりが定量的に評価できる。

本研究で用いた平繊維炭素繊維布は、三菱レイヨン(株)よりご提供いただいた。また、本研究の一部は文部科学省の補助による同志社大学大学院 RCAST および 2000~2001 年度同志社大学大学院学術奨励研究(R 0307)の支援を受けた。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 森井亨・幾田信生・濱田泰以, 材料, **46**-3 (1997), 309-314.
- (2) 自念榮一・倪慶清・李紅衛, 機論, **62**-602, A (1996), 2207-2215.
- (3) 木田外明・鈴木恵・松本克洋・若松正俊・土方明躬, 機論, **61**-591, A (1995), 2368-2374.
- (4) 番作和弘・仲井朝美・武田展雄, 機論, **65**-630, A (1999), 287-292.
- (5) 上辻靖智・座古勝・西藪和明, 材料, **51**-10 (2002), 1147-1153.
- (6) 竹村兼一・藤井透, 機論, **59**-559, A (1993), 714-721.
- (7) Fujii, T., Amija, S. and Okubo, K., *Compos. Sci. Technol.*, **49** (1993), 327-333.
- (8) 森中泰章・藤井透, 機論, **59**-568, A (1993), 2809-2816.
- (9) 増喜彰久・酒井重保, 非破壊検査, **44**-3 (1995), 144-148.
- (10) 杉本直, 石川隆司, 非破壊検査, **46**-10 (1997), 736-741.
- (11) 影山和郎, 材料科学, **26**-1 (1989), 16-21.
- (12) 増田雄市郎, 機論, **47**-424, A (1981), 1266-1275.
- (13) 上野谷敏之・藤井透, 材料, **49**-8 (2000), 941-947.
- (14) Chandler, R., Koplik, J., Lerman, K. and Willemsen, J. F., *J. Fluid Mech.*, **119** (1982), 249-267.