熱弾性解析を用いた平織炭素繊維布強化複合材料の疲労損傷評価[†]

西川 康博* 大窪 和也**
藤井 透** 上野谷 敏之***

Fatigue Damage Evaluation of Plain-Woven Carbon/Epoxy Composites Using Thermo-Elastic Technique

by

Yasuhiro NISHIKAWA*, Kazuya OKUBO**, Toru FUJII** and Toshiyuki UENOYA***

In this paper, damage progression process of plain-woven carbon/epoxy composites was investigated under cyclic loading. Damage state, damage degree and its location were observed in the flat-wise direction of the specimen by using thermo-elastic stress analysis (TSA). The results of TSA showed that transverse cracks initiated and accumulated in the wefts at early fatigue stage. The each location, where the damage occurred, had different damage degree at any fatigue cycles. In order to obtain accurate damage information, thermo-elastic damage analysis (TDA) was conducted. A quantitative evaluation of damage accumulation level in plain-woven carbon/epoxy composites was proposed based on the concept of damage parameters (such as damage level, damage area ratio and damage value) given by TDA results.

Key words: Fatigue damage, Quantitative evaluation, Plain-woven, Carbon/epoxy composite, Thermo-elastic stress analysis, Thermo-elastic damage analysis

1 緒 言

比強度・比剛性に優れる炭素繊維強化複合材料 (CFRP) は、航空宇宙分野をはじめ、軽量化が求められる一般産業分野においても幅広く用いられている。中でも織布で強化された複合材料は取り扱いが容易であるため、その適用分野が今後ますます拡大する可能性が高い。しかし、織布強化複合材料は複雑な強化構造を有するため、その損傷進展過程を把握することは困難である。材料の信頼性向上や残存強度・寿命を把握するために、損傷の検出・評価を行い、進展過程を明らかにすることが望まれている。

損傷進展過程の解明に関して、光学顕微鏡¹⁾やSEM²⁾による損傷観察が報告されている。これらの方法では、損傷形態を直接的に観察することができるが、動的な観察、例えば、変動荷重下における損傷進展の観察は困難である。また、振幅および事象数などから種々の損傷形態の検出が可能なAE法を用いた研究³⁾も数多くなされている。しかし、広範囲で種々の損傷を検出し、損傷進展過程を識別するには豊富なデータが必要となる。また、CFRPのような材料異方性、不均質性の材料においては、損傷の分布状態を正確に検知することについて課題を残している。近年では数値シミュレーションを用いた損傷過程に関する研究⁴⁾が盛んに報告されている。しかし、これらの報告は静的荷重下を対象としている。

著者らはこれまでに、繰り返し荷重を受ける平織布強化複合材料において、損傷状態を観察し、剛性低下傾向と関連付けた疲労損傷進展モデルを提案した。^{5)~7)}しか

し、損傷状態の推移を定性的に示したのみで、損傷の定量的な評価には至っていなかった。本報では、繰り返し荷重を受ける平織炭素繊維布強化複合材料 (平織CFRP) について、さらに詳細な損傷状態の観察を行い、損傷の形態や大きさおよびその位置を含めた損傷進展過程を明らかにする。また、これらの結果に基づいた損傷の定量評価について検討する。

2 試験片および試験方法

2・1 試験片

強化材にはPAN系平織炭素繊維布 (PYROFIL TR 3110M:三菱レイヨン)を用いた。繊維布の厚さは約0.1mm、布内の経糸・緯糸の密度はともに12.5本/25mm (繊維束幅2mm)であった。1本の繊維束は約 3×10^3 本の単繊維で構成されている。母材にはビスフェノールA型エポキシ樹脂 (エピコート828:油化シェルエポキシ)、硬化剤には酸無水物 (EC-100FR-1 (H):東都化成)を用いた。

平織布5枚をハンドレイアップ法により積層した。ホットプレス内で120℃×4時間加熱し、積層板を成形した。積層板の厚さは約1mmであり、繊維の体積含有率は約55%であった。この積層板より縦繊維方向と平行に幅25mm、長さ200mmの短冊型試験片を切り出した。また、高じん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。Fig. 1に試験片形状および寸法を示す。Table I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。本試験片の静的荷重下

[†] 原稿受理 平成16年8月20日 Received Aug. 20, 2004

* 学生会員 同志社大学大学院 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷, Graduate Student, Doshisha Univ., Tataramiyakodani, Kyotanabe, 610-0394

** 正会員 同志社大学工学部機械系学科 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷, Dept. of Mech. Eng., Doshisha Univ., Tataramiyakodani, Kyotanabe, 610-0394

*** 正会員 大阪府立産業技術総合研究所 〒594-1157 和泉市あゆみ野, Tech. Res. Inst. of Osaka Pref., Ayumino, Izumi, 594-1157

Fig. 1. Geometry and dimensions of specimens.

Table I. Mechanical properties of materials.

	Tensile strength	Elastic modulus
Carbon fiber	4.1 [GPa]	230 [GPa]
Epoxy resin	37.5 [MPa]	3.6 [GPa]
Composite	820 [MPa]	70 [GPa]

おける応力-ひずみ曲線は、破断に至るまでほぼ線形を保つことが確認された。

2・2 試験方法

全ての試験は実験室環境下 ($23 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\%\text{RH}$) で行った。引張-引張の繰り返し負荷で疲労試験を行った。疲労試験には電気油圧式試験機 (MTS 製) を使用した。繰り返し最大応力 ($\sigma_{\max}$) を 600 MPa とした。また、応力比 R を 0.05、荷重波形を正弦波、繰り返し周波数を 10 Hz とした。また試験中、断続的に応力とひずみを測定し、得られた応力-ひずみ関係の勾配から、任意回の繰り返し負荷を受けた試験片の縦弾性係数を求めた。この負荷条件下での試験片の寿命は、予め行われた疲労試験により 10^6 回以上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繰り返し負荷を中断し、熱弾性応力解析 (thermo-elastic stress analysis ; TSA) を行った。TSA は材料や構造物を低レベルの負荷で加振することにより測定対象物に熱弾性効果 (温度変化) を発現させ、外力に同期した温度変化のみを赤外線検出器を用い非接触で精度良く測定し、応力情報 (TSA イメージ) を得る非破壊検査手法の 1 つである。計測装置には JTG-8010 (日本電子(株)製) を使用した。Table II に計測装置の基本仕様を示す。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抑ええるようにした。TSA は一定の負荷条件下 ($\sigma_{\max} = 300\text{MPa}$, $R = 0.05$, 10 Hz) で行った。予め行われた疲労試験により、上述の負荷条件下では試験片表面には損傷が発生しないことを確認している。

2・3 熱弾性効果の原理

気体と同様に物体においても圧縮・引張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。この現象は熱弾性効果と呼ばれる。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 (応力変化) $\Delta \sigma$ の間に比例関係が成立する。⁸⁾ 一方、直交

Table II. Main specification of thermo-elastic stress analyzer.

Temperature measurement range	-5 ~ 5 K
Temperature resolution	0.001 K
Measurable frequency	0.3 ~ 90 Hz
Horizontal resolution	Over 300 lines
Data memory	512 × 480 × 32 bit
Measure wavelength	8 ~ 13 μm

異方性材料における熱弾性効果は、

$$\Delta T = -T(\alpha_L d\sigma_L + \alpha_T d\sigma_T) / \rho C_\sigma \quad (1)$$

で表される。^{9)~10)} ここで、 T は測定環境温度 (絶対温度)、 σ_L , σ_T は繊維軸方向およびそれと直角な方向の線膨張係数、 $d\sigma_L$, $d\sigma_T$ は同じくそれぞれの方向に作用する応力変化、 ρ は密度、 C_σ は応力一定のもとでの比熱である。特に CFRP の場合、 $|\sigma_T| \gg |\sigma_L|$ の関係 (文献⁹⁾ によれば約 75 : 1) があるため、上式の第 1 項は無視でき、

$$\Delta T = -K_T T \Delta \sigma_T, \quad K_T = \alpha_T / \rho C_\sigma \quad (2)$$

と近似される。ここで、 K_T は繊維軸方向と直角な方向の熱弾性定数である。式 (2) には平織 CFRP が有する繊維束の屈曲 (クリンプ) については考慮されていない。しかし、TSA では試験片表面における熱弾性効果 (2 次元データ) が計測される。このことから、本研究ではクリンプの現れない平織 CFRP の表面 (経糸・緯糸の表面) に対して式 (2) を適用することにする。

3 試験結果および考察

3・1 未損傷材の TSA イメージ

Fig. 2 に疲労試験前に観察された平織 CFRP の TSA イメージおよび試験片表面の観察写真を示す。Fig. 3 に計測された温度変化 (Fig. 2(a) および (b) 中の A-B 間) の一例を示す。Fig. 2 (a) より、熱弾性効果による温度変化の著しい部位と著しくない部位が周期的に観察できる。また Fig. 3 より、どの部位においても負の温度変化が計測されることがわかる。

前節で示した通り、温度変化が負の場合は引張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示す。また、ゼロの場合は応力変化がない状態を示す。CFRP の場合、繊維軸方向と直角な方向の熱弾性係数 K_T ($K_T > 0$) は非常に大きい。このため平織 CFRP では、緯糸部において吸熱による大きな負の温度変化が計測される。一方、繊維軸方向の熱弾性係数 K_L が負であるため、経糸部では発熱により正の温度変化を伴うはずである。しかし、前述のように K_L は K_T に比べ非常に小さい。このため、経糸の真下にある内層の緯糸の影響¹⁰⁾ により、Fig. 3 に示すように、経糸部においても小さな負の温度変化が計測される。以上の理由により、Fig. 2 (b) のような織構造を示す平織 CFRP では、温度変化の著しい部位とそうでない部位が周期的に現れるような Fig. 2 (a) に示す TSA イメージを得ることになる。

(a) TSA image

(b) Photograph

Fig. 2. TSA image and photograph of virgin plain-woven CFRP.

Fig. 3. Typical temperature variation for virgin plain-woven CFRP.

3・2 損傷状態の観察結果

繰返し数が 5×10^3 , 2.5×10^4 および 5×10^4 回のときに観察された TSA イメージを Fig. 4 に示す。また Fig. 5 に、 5×10^3 回のときに計測された温度変化 (Fig. 4 (a) 中の A-B 間, Fig. 2 (a) 中と同一個所) の一例を示す。

Fig. 4 より、疲労試験前に観察された TSA イメージ (Fig. 2 (a)) と比較して、経糸部の温度変化は、ほぼ同じであった。一方、緯糸部には荷重方向と垂直な方向に帯状の温度変化が見られる部位が観察された。この部位における温度変化は、Fig. 5 に示すように未損傷材において計測された温度変化と比べて小さい。

(a) 5×10^3 cycles (b) 2.5×10^4 cycles (c) 5×10^4 cycles

Fig. 4. TSA images for plain-woven CFRP under cyclic loadings. (Load is applied vertically)

Fig. 5. Typical temperature variation for plain-woven CFRP at 5×10^3 cycles.

Fig. 6 に繰り返し荷重を受けた試験片の表面観察写真および模式図を示す。図を見ると、試験片表面にき裂が生じていることがわかる。平織 CFRP では緯糸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⁾ 緯糸部に横き裂が生じると、それまでその部位に負荷されていた引張応力が解放（緩和）される。このため、熱弾性効果による温度変化も小さく測定される。この結果、横き裂に対応するような Fig. 4 に示す帯状の温度変化が観察されたと言える。

帯状の温度変化部の長さは一織分（約 2mm）である。しかし、その幅は部位により異なる。また、繰り返し数の増加とともに、帯状部の幅は大きくなる。これは以下の理由による。Fig. 6 の観察写真が示すように、平織 CFRP では繰り返し負荷により緯糸部の中央に最初の横き裂（第 1 横き裂）が発生する。さらに繰り返し数が増加すると、第 1 横き裂の周辺に第 2、第 3 の横き裂が発生・蓄積する。横き裂の数が増加するに伴い、その部分に負荷されていた引張応力の緩和領域が広がる。TSA では応力変化を介して間接的に温度変化イメージを形成される。この結果、繰り返し数の増加とともに、帯状の温度変化部の幅が大きく観察される。以上の結果より、1 織単位の領域における損傷の程度（横き裂の発生・蓄積状態）は異なると言える。これは、平織 CFRP の損傷評価を行うには、各領域での損傷状態の把握・評価が重要であることを示す。

内部損傷の状態を確認するために、任意回の繰り返し負荷を受けた試験片の側面を研磨し、各層（全 5 層）におけるき裂の数を調べた。Fig. 7 に繰り返し負荷を 5×10^3 回を受けた試験片の側面観察写真を示す。また、Fig. 8 に各層における単位面積あたりのき裂数（き裂密度）を示す。試験結果は試験片 3 本の平均値である。Fig. 8 より、どの層においても同程度のき裂密度を示すことがわかる。

Fig. 6. Photographs of flat-wise surface of damaged plain-woven CFRP. (Load is applied vertically)

Fig. 7. Photograph of edge-wise surface of damaged plain-woven CFRP at 5×10^3 cycles. (Load is applied vertically)

Fig. 8. Result of measurement of crack density.

3・3 損傷情報の抽出と損傷の定量化

平織 CFRP のような不均質材料の場合、損傷に起因したイメージ上に材料の構造的不均一イメージ（例えば、Fig. 2 (a) に示した織構造イメージ）が重ね合わせられる。このため、Fig. 4 に示したような TSA イメージから損傷情報のみを抽出することは困難である。そこで、試験前の TSA イメージ $[T(0)]$ と負荷後のイメージ $[T(N)]$ について、

$$[\Delta T_d(N)] = [T(0)] - [T(N)] \quad (3)$$

という差分処理を行う。 $[\Delta T_d(N)]$ は負荷前後の温度変化イメージを表す。 $[\Delta T_d(N)]$ の正の温度変化は応力増加を、負の温度変化は応力緩和を表す。これは著者らの二人が提案した損傷イメージ抽出手法（熱弾性損傷解析, thermo-elastic damage analysis ; TDA）であり、以後、得られたイメージを TDA イメージと呼ぶ。^{11)~12)} TDA イメージにおける温度変化（以後、熱弾性損傷応答量： ΔT_d ）の大きさは応力緩和の大きさに対応する。つまり、TDA では損傷の程度をその発生位置における応力緩和への寄与として評価できる。

Fig. 9 に繰り返し数が 5×10^3 、 2.5×10^4 および 5×10^4 回のときに観察された TDA イメージを示す。また、 $5 \times$

Fig. 9. TDA images for plain-woven CFRP under cyclic loadings. (Load is applied vertically)

10^3 回のときに計測された熱弾性損傷応答量 (Fig. 9 (a) 中の A-B 間, Fig. 2 (a) 中と同一個所) の一例を Fig. 10 に示す. Fig. 9 の TDA イメージには, 損傷の発生位置がハイライト部 (他と比べて明るく見える部分; 例えば Fig. 9 (a) 中の実線で囲まれた部分) として示されている. また, Fig. 10 に示すようにハイライト部の熱弾性損傷応答量は負を示し, 横き裂発生による引張応力の緩和量が測定できることがわかる.

損傷の定量化を厳密に行うには, 各方向成分の応力緩和量を算定する必要がある. しかし, TDA により測定される応力緩和量は, 温度変化を介して得られる主応力の変化のみである. 測定データから各応力成分を算定する主応力分離法¹³⁾も提案されているが, 平織 CFRP のような不均質材に対して適用することは困難である. そこで本稿では, 簡便のために TDA により得られた熱弾性損傷応答量の分布に基づいた損傷の定量評価について検討する.

Fig. 10. Typical thermo-elastic damage response for plain-woven CFRP at 5×10^3 cycles.

前述のように, 熱弾性損傷応答量の大きさ $|\Delta T_d|$ は損傷の程度 (損傷度, damage level; D) を表す. 本装置の温度分解能が 0.001K であることから, 0.01K 以上の損傷度を対象とした. また, 損傷度を 0.01K ごとの範囲 ($i/100 < D_i < (i+1)/100\text{K}$) に分け, 同程度の損傷が生じる面積割合 (損傷領域率, damage area ratio; A_i = 各損傷度に対応する画素数/観察範囲の全画素数) を算出した.

Fig. 11 に各繰返し数における損傷領域率の変化を示す. 図を見ると, 繰返し数の増加とともに損傷領域率のピークが高損傷度側に遷移することがわかる. これは, 疲労の初期に低レベルの損傷が絶えず発生し, これら損傷が進展し, 高レベルの損傷が蓄積されることを表す. これは, 現在までに報告されている損傷過程と矛盾しない結果を示す.

損傷を巨視的に定量評価するために, 損傷度と損傷領域率の積の総和 ($\sum D_i \times A_i$) を損傷量 (damage value; V_d) として導入する. Fig. 12 に各繰返し数における損傷量の変化を示す. 図を見ると, 疲労初期では損傷量は急勾配で増加することがわかる. 以後, 繰返し数の増加とともに損傷量は緩やかな増加傾向を示すようになる.

Fig. 11. Relationship between damage area ratio and damage level.

Fig. 12. Relationship between damage value and number of cycles.

Fig. 13 に疲労試験中に得られた剛性低下率 $(1-E'/E_0)$ の変化を示す。ここで、 E_0 は初期縦弾性係数を、 E' は任意の繰り返し数における縦弾性係数を示す。剛性低下率は複合材料中の損傷状態の推移を示すパラメータとして知られている。¹⁴⁾ 図を見ると、例えば繰り返し数が 5×10^3 回の場合の剛性低下率と比較して、繰り返し数が 2.5×10^4 、 5×10^4 および 7.5×10^4 回の場合の剛性低下率は、それぞれ 3.0、4.2 および 4.9 倍となる。同様に、Fig. 12 に示した損傷量 V_d は 3.0、4.0 および 5.2 倍と変化し、剛性低下率の傾向と概ね一致する。

平織 CFRP では試験片表面およびその内部における損傷の形態は異なる可能性がある。しかし、Fig. 8 に示すように各層におけるき裂密度がほぼ同じであることから、試験片表面および内部層における損傷量は同程度であると見なすことができる。試験片表面における損傷量が内部を含めた試験片全体の損傷量を代表すると考えれば、

Fig. 13. Relationship between modulus reduction ratio and number of cycles.

本研究で示した V_d を用いて平織 CFRP の損傷状態を定量的に評価できる。但し、本研究の結果は、Fig. 12 に示すように平織 CFRP の全寿命に対して 10% 以下の範囲における初期損傷について検討した。

4 結 言

繰り返し荷重下における平織炭素繊維布強化複合材料（平織 CFRP）に関して、詳細な損傷状態の観察を行い、損傷の形態や大きさおよびその位置を含めた損傷進展過程を明らかにした。また、これらの結果に基づいた損傷の定量評価について検討した。以下に本研究により得られた結論を示す。

熱弾性応力解析を用いることにより、繊維束 1 繊維分の大きさの横き裂が発生・蓄積する様子を観察することができる。1 繊維単位の領域における損傷の程度（横き裂の発生・蓄積状態）が異なることから、領域ごとの損傷状態の把握・評価が平織 CFRP の損傷評価には重要である。熱弾性損傷解析の結果から、材料の異方性・不均一性などに依存しない損傷情報（損傷の程度、損傷領域）を取得できる。また、これらの情報を基に定義した損傷度、損傷領域率および損傷量を用いれば、平織 CFRP の疲労損傷の進展挙動、損傷蓄積が定量的に評価できる。

本研究で用いた平織炭素繊維布は、三菱レイヨン(株)よりご提供頂いた。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 の支援を受けた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 森井 亨, 幾田信生, 濱田泰以, 材料, **46**, 309 (1997).
- 2) 自念榮一, 倪 慶清, 李 紅衛, 日本機械学会論文集, **A-62**, 2207 (1996).
- 3) 木田外明, 鈴木 恵, 松本克洋, 若松正俊, 土方明躬, 日本機械学会論文集, **A-61**, 2368 (1995).
- 4) 上辻靖智, 座古 勝, 西藪和明, 材料, **51**, 1147 (2002).
- 5) K. Takemura and T. Fujii, JSME International Journal, Series A, **37**, 472 (1994).
- 6) T. Fujii, S. Amija and K. Okubo, Composites Science and Technology, **49**, 327 (1993).
- 7) 森中泰章, 藤井 透, 日本機械学会論文集, **A-59**, 2809 (1993).
- 8) 増喜彰久, 酒井重保, 非破壊検査, **44**, 144 (1995).
- 9) 影山和郎, 材料科学, **26**, 16 (1989).
- 10) 杉本 直, 石川隆司, 非破壊検査, **46**, 736 (1997).
- 11) 上野谷敏之, 藤井 透, 材料, **49**, 941 (2000).
- 12) T. Uenoya and T. Fujii, J. Reinforced Plastics and Composites, **19**, 83 (2000).
- 13) 岸本喜久雄, 井上祐嗣, 新保英男, 渋谷壽一, 日本機械学会論文集, **A-62**, 1204 (1996).
- 14) S. L. Ogin, P. A. Smith, P. W. R. Beaumont, Composites Science and Technology, **22**, 23 (1985).