518 複合材料の熱弾性損傷解析とその定量評価への検討

阪府産技総研 正〇上野谷 敏之 同志社大学 正 藤井 透

1. はじめに

近年,繊維強化複合材料 (FRP) が一次構造材と して実用化されつつある.使用中の構造安全性・ 信頼性を確保するため,ますます内部損傷の定量 化が求められいる.

複合材料に生じる内部損傷の発生に対し、アコー スティック・エミッション (AE) はきわめて敏感に 反応するが,損傷の2次元的分布状態の評価や状態 量としての損傷検出に課題を残している.一方,著 者らは熱弾性応力解析法を利用した新しい損傷評 価法を検討して,同手法が2次元的な応力情報や進 展した損傷情報を提供するにとどまらず,初期損傷 に対しても高い検出感度を示すことを明らかにし てきた[1-3]. しかしながら,熱弾性的に明らかな 不均質・異方性を示す複合材料の損傷解析を定量化 するためにはいくつかの基本的な課題を整理,解決 する必要がある.その中でももっとも基本的な事柄 は(1)損傷像の鮮明なイメージング(材料の不均質 性に起因した熱弾性ノイズの除去),(2)損傷像の 定量評価(微小部における熱弾性効果の評価)であ る.本報告では、一次構造材としてもっとも可能性 の高い CFRP を取り上げ,構造材料としてもよく用 いられる織物強化複合材について,これらを検討す る.

2. 実験材料と方法

本実験には平織り炭素繊維織物(T300-B)/エポ キシ複合材料を使用した.供試材は経糸と緯糸の 構成および密度(13 ストランド/25 mm)が同一の強 化繊維布 14 枚をハンドレイアップ法によりホッ トプレス成形された積層板で,厚さ 2.7 mm,体積 含有率は約 65 % である.試料は経糸方向と平行 に切り出した短冊片で,幅 25 mm,長さ 200 mm, 中央に直径 5 mm の穴を有する.

温度計測には日本電子(株)製の JTG-8010[4]を使 用し,拡大レンズによる詳細観察も行った.そのと きの計測スポット径は 0.14 mm である.また,放 射率を均一にするため,試料表面には黒体塗料を薄 く塗布した.一連の試験では一定負荷条件の下で熱 弾性イメージの測定を行った.熱弾性イメージ計測 の詳細については文献[1]を参照されたい.

3. 不均質・異方性材料の熱弾性損傷解析

直交異方性材料の熱弾性効果 dT は理論的に主 応力変化分の線形和に比例し[5,6]:

dT=-T($\alpha_L d\sigma_L + \alpha_T d\sigma_T$)/ρC。 (1) 等方性材料のように直ちに応力の第一不変量を提 供しない. ここで,T は絶対温度, $\alpha_L \geq \alpha_T$ は繊 維方向およびそれと直角な方向の線膨張係数, σ_L $\geq \sigma_T$ は同じくそれぞれの方向の応力,ρ は物体の 密度,C。は応力一定のもとにおける比熱である.



FIG. 1 Thermoelastic image from a plain-woven carbon fiber composite showing the stress concentration, caused the center hole-notch, imposed on mosaic pattern.

FIG. 1 は試料が損傷を受けていない状態における熱弾性効果を調べた一例で、円孔切り欠き付きの場合を示す。円孔周縁に明瞭な応力集中が観察されるものの、明らかに格子模様に重畳している。これは FRP では $\alpha_L \geq \alpha_T$ が大きく異なり、 とくに CFRP では $75\alpha_L = \alpha_T$ であるため、横方向繊維に直角に作用する応力像が支配的となることによる。また、そのパターンは縦横が等ピッチではなく材料表面に現れるそれぞれの糸方向に長い格子パターンを呈し、材料の織り構造を忠実に反映している。一般に熱弾性イメージの生情報がノイジーである上、不均質・異方性材料の熱弾性イメージにおいてはさらに式(1)で示される材料構造的不均質性に起因したノイズが重畳するが、これらは実験的には除去できない。

しかしながら,複合材料中に生じる損傷を解析 する目的に対しては,熱弾性イメージを適当な方 法で高解像化することにより材料の微視的メゾ的 構造に依存しない鮮明な損傷像を得ることができ る[7]. FIG.2 はその方法により FIG.1 と同種の材



FIG. 2 TSA images showing accumulation of early damage after fatigue loadings of 20K cycles with R= 0.01 and $\sigma max = 0.7\sigma B = 300$ MPa for a CF/epoxy laminate. Load applied vertically.

料に生じた初期疲労損傷を映像化した例である. 図中,中央部に円孔が位置している. ここでは織 り構造の影響は皆無に近く、損傷の発生部位(図 中のハイライト部)のみが抽出された.また,円 孔の縁に沿うように荷重方向に成長する損傷と, 荷重方向と直角な方向に進展する損傷が認められ, 織物複合材料の初期損傷は繊維束単位程度の小さ な規模で生ずることを明瞭に示している.

局所熱弾性効果の定量性と計測 4.

損傷の破壊に対する寄与の評価につては、まず、 損傷発生に伴う応力開放の定量評価,すなわち,損 傷情報の定量性を明らかにする必要がある. FIG. 2を得るために適用した解析方法では、同一試料の 負荷前後の熱弾性イメージ間で演算するため、同 一試料について熱弾性効果の評価が求められる.

そこで、不均質・異方性材の局所に生じる熱弾 性効果の定量性(再現性,ばらつき,精度)を検 討した. 平織り炭素繊維織布強化積層板の熱弾性 効果は FIG.1 に示したようにその強化材の構造形 態を反映して複雑である. Dunn は表面エポキシ 層の熱拡散特性が大きく表面温度に寄与する[8]こ とを指摘しており、また、Zhang らによれば非常に 薄い表面樹脂層が熱弾性効果に大きく影響する[9]. これらを考慮して, FIG. 3 に示すように, 円孔か ら十分離れた点に材料表面に現れる横繊維束の中 央部を 4 カ所適当に選定し、その熱弾性効果を調 べ, その結果を FIG.4 にまとめた.低い加振周波 数に対しては各エリア間で±数%のばらつきが認 められるものの、熱弾性効果が十分に発現する加 振周波数(f₀)帯域では±3%以下のばらつきに低 減する傾向が見られる.したがって, fo以上の加



The analyzed portions on wefts FIG. 3 and thermoelasic effect appearing at a portion far from center circular notch in a CF/epoxy laminate. Load applied vertically.



FIG. 4 Thermoelastic effect response versus frequency of loading for plain woven carbon fabric laminates

振周波数を用いて計測し,負荷前後のイメージに2 次元的なずれがなければ数%以下の誤差で評価で きる可能性がある.局所の平均応力を採用するこ とにより定量性や精度を確認することができる. しかしながら、それぞれのエリア内のばらつきは 比較的大きく(詳細省略), FIG. 3 に見られるよ うに、とくに、曲率の小さな糸幅方向に温度変化 が大きく、局所熱弾性効果の絶対値を評価するた めには、エリアの設定を注意深くする必要がある ことを示している. このことは織物複合材料の断 面が縦横互いの繊維束の交差により試料表面のエ ポキシ層の厚さが不均一であることや構造的に樹 脂ポケットが生じやすいことによると考えられる.

5. おわりに

熱弾性損傷解析情報の定量性に関する有限要素 解析による検討については前報[7]で基本的な検討 を行った.本報告では熱弾性解析を複合材料に適 用する際の基本的な課題を検討した。その結果、 材料の不均質性や構造に依存したノイズを除去し た鮮明な損傷像を得ることができ、また、損傷像 の定量評価の可能性が示された.

参考文献

- 上野谷敏之、小栗泰造、森岡亮次郎、藤井透、日本材料 学会第 25 回 FRPシンポジウム論文集、pp. 23-26 (March、 1] 1996).
- 2] T. Uenoya, T. Fujii, 'Deformation & Fracture of Composites', Proc. DFC-4, (March, 1997) pp. 439-448.
- 31
- T. Uenoya, T. Fujii, Key Eng. Mat., 137, (1998) pp. 139-146. 增喜彰久, 森下侑一, 非破壞検查, 45, pp.798-805 (1996).
- Potter R. T, Greaves L. J, Proc. Conf. on Optical and Opto-Electronic Applied Science and Engineering, 51 SPIE, 817 (Aug. 1987) pp. 134-146. 影山和郎, 植木潔, 強化ブラスチックス, 34, 169-173 (1988).
- 上野谷敏之,藤井透,日本材料学会第27回 FRPシンポジウ 71 ム論文集, pp. 243-246 (March, 1998).
- S. A. Dunn, J. Appl. Mech., 59, pp. 552-558 (1992).
- 9j D. Zhang, N. F. Enke, B. I. Sandor, Exp. Mech., 30(1), pp.

1

1