20117 CFRP 積層複合材の内部損傷観察と動特性評価に関する一考察

Internal Damage Observations and Dynamic Characterization of CFRP Composite Laminates

○正 鈴木 浩治 (千工大)

正 植草 昌彦

正 高橋 芳弘

Kohji SUZUKI, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba

Masahiko UEKUSA and Yoshihiro TAKAHASHI

In this study, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates with three different stacking sequences, that is, unidirectional (UD), cross-ply (CRS) and quasi-isotropic (QIS), were fabricated together with those damping CFRP laminates with a sheet of flexible material (PIEZON) for damping enhancement inserted into the central interfaces, that is, unidirectional (UD+D), cross-ply (CRS+D) and quasi-isotropic (QIS+D). Drop-weight impact tests with the impact energy varied at 4.26, 8.53 and 12.79J were performed to the specimens, to introduce internal damages into them and then X-ray CT images of the present CFRP laminates with the impact damages were obtained. From the CT images, so-called damage volumes of the present specimens were defined and quantitatively acquired by using the image analyzing software (simpleware ver.6). Obvious positive co-relations between the energy dissipations and the damage volumes were observed. By using CT images, damaged CFRP laminate models, which had stiffness reduction regions for damage modeling, were also proposed and their usability was partly shown.

Key Words: CFRP, X-ray CT, FEM, Damage Analysis, Vibration Modal Analysis

1. 緒言

軽量で耐疲労特性にも優れた炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) 積層複合材は、構造材料としてのますますの用途拡大が期待されている一方、成形過程での残留応力や運用中の突発的な外的衝撃などにより生じる内部損傷の非破壊的な検出に関する新技術の創成や既存技術の高度化の必要性が指摘されている⁽¹⁾。

本報では、各種の積層構成を有する CFRP 積層複合材および層間にダンピングシートを挿入した制振 CFRP 積層複合材を実際に成形し、落垂型の衝撃負荷による損傷を導入する。そして、X 線 CT によりその内部損傷を観察するとともに、観察結果と動特性評価との関連についての考察を試みたい。

2. 供試体および測定方法

2.1 供試体の成形

標準的な真空バック成形法 (1atm/135°C で 120min 加熱) を用いて、PAN 系高強度タイプの汎用プリプレグシートから、CFRP 積層平板 (150mm×150mm) を成形した。積層構成として、一方向材: UD ([0_s]), クロスプライ積層: CRS ([0/90]_{2s}) および擬似等方積層: QIS ([0/45/90/-45]_s) の 3 タイプを選定した。またこれら 3 タイプの積層構成中の中央層間にダンピングシート (PIEZON, 木曾興業㈱) をおのおの挿入した制振 CFRP 積層平板として、一方向材: UD+D ([0_s][D][0_s]), クロスプライ積層: CRS+D ([0/90]₂[D][90/0]₂) および擬似等方積層: QIS+D ([0/45/90/-45][D][-45/90/45/0]) も成形した。

2.2 落垂衝撃試験および内部損傷観察

ASTM D3763 を参考にした自作の落錘型衝撃試験機にて供試体に衝撃負荷を与えた。総質量 4.346kg のストライカから供試体までの落下高さ h_0 を 100mm (4.26J の位置エネルギー, 衝突時速度 1.40m/s に相当), 200mm (同 8.53J, 1.98m/s) および 300mm (同 12.8J, 2.43m/s) に設定して試験を実施した。衝突中の荷重はストライカ部に組み込んだロードセル (秤量 20kN) からの出力を動ひずみアンプ (東京測器 DC-204Ra, $\Delta t = 10\mu s$) により処理しパソコンに取り込んだ。荷重点変位の時

刻歴はストライカの運動方程式を修正オイラー法により刻み幅 $\Delta t = 10\mu s$ で時間積分して求めた。加えて、ハイスピードカメラ (カシオ, EX-F1, 1200fps) により落下後のストライカを高速ビデオ撮影し、画像追跡ソフト (フォトリオン, TEMA Lite 3.4) により、ストライカの跳ね上がり高さ h_1 を測定した。

続いて、衝撃試験機にて損傷の導入された供試体の損傷部 (およそ 42mm×42mm) の X 線 CT (分解能およそ 5 μm) を取得した。さらに CT 画像解析ソフト (㈱JSOL, simpleware ver.6) を用いて損傷部分のみを抽出し、損傷形態の観察および損傷部体積の算出を実施した。

2.3 FEM 数値解析による損傷 CFRP 積層平板の動特性評価

X 線 CT 測定により得られた CFRP 積層材内部損傷領域を剛性低下 (本報では 100 分の 1) とみなすことで損傷を簡易的にモデル化した解析モデルを今回提案する。実測された損傷体積を供試体の板厚で割ることで損傷面積を定義し、それに相当する円形領域として損傷部をモデル化した。汎用有限要素法 (FEM) 解析コード ANSYS を用いてその固有振動モードを評価した。20 節点ソリッド要素を用いて積層材厚さ方向にも層毎にメッシュ分割し、積層構成に合わせて異方性主軸方向を設定した直交異方性として一方向繊維強化複合材の材料特性を各層毎に入力した。また境界条件は周辺完全自由とした。

3. 結果および考察

3.1 衝撃損傷の X 線 CT 観察

図 1 は、落下高さ $h_0 = 200mm$ (8.53J) からの衝撃の場合の、(a) 荷重-変位線図および (b) ~ (g) それにより損傷した各供試体の CT 像と CT 像解析ソフト (㈱JSOL, simpleware ver.6) による損傷部分の抽出結果をまとめたものである。まず、一方向材 (UD, UD+D) の場合、強化繊維に沿ったのスプリッティング損傷および衝撃部における繊維の引き抜けと繊維破断が目立つ結果となった。その一方で、クロスプライ積層 (CRS, CRS+D) および擬似等方積層 (QSI, QSI+D) では、一般的に損傷量が減少し、また、特に層間にはく離型の損傷が衝

撃部から層間に沿って広がっていく様子が見られる。

さらに、今回試験した全ての供試体について、損傷量(体積)と供試体衝撃時に消費されたエネルギーとの関係を図2に示す。本報では損傷形態の区別はせずに損傷と認められる部分の全体積量を用いた。衝撃時消費エネルギーは、荷重-変位ヒステリシスを、サンプリング点すべてを用いた台形則にて求積することで算出した。この消費エネルギーには、実際に供試体が損傷することで吸収された分および供試体固定部での摩擦熱として消費された分の合計となるが、固定部摩擦熱によるエネルギー散逸量はすべての供試体で同一と仮定すれば、本エネルギー量をもって、供試体損傷に要したエネルギー量として、少なくとも相対的な比較は可能と考えられる。このように積層構成によらず消費エネルギー量が大きくなると損傷量も増える傾向があることがわかる。

(a) $h_0 = 200\text{mm}$ ($U_0 = 8.53\text{J}$, $v_0 = 1.98\text{m/s}$)

(b) UD

(c) UD+D

(d) CRS

(e) CRS+D

(f) QIS

(g) QIS+D

Fig. 1 Typical experimental results ($h_0 = 200\text{mm}$).

Fig. 2 Co-relations between damages and energy dissipations.

3.2 FEM による固有振動モード解析の結果

図3は、供試体 CT 像より実測された損傷体積と FEM 解析モデル(損傷を 100 分の 1 の剛性低下にてモデル化)から評価された固有振動数(曲げ 2 次モード)との関係である。内部損傷量の増加に伴い構造体としての曲げ剛性が低下し、その結果、固有振動数がわずかながら低下することが本 FEM 数値解析結果から確認することができる。今後、供試体に対する固有振動モードを実測することを予定しており、実測結果と付き合わせることで、本モデル化手法について引き続き検討していきたい。

Fig. 3 Co-relations between damages and 2nd natural frequencies.

4. 結言

本報では、各種の積層構成を有する CFRP 積層複合材および層間にダンピングシートを挿入した制振 CFRP 積層複合材に落垂衝撃損傷を導入し、その X 線 CT による内部損傷観察を実施し、衝撃時に消費されたエネルギー量と CT 像を解析して測定された損傷量とに關係があることが確認された。また、損傷を剛性低下としてモデル化した FEM 数値解析も実施し、動特性変化から内部損傷量を定量的に推定する可能性を例示することができた。

本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号: 22656056)からの援助を受けて実施された。落垂衝撃試験では松本潤一氏(元千葉工業大学大学院生), CT 像観察では神永浄氏(現千葉工業大学学生)からの協力を得た。CT 像解析ソフト simpleware の操作にあたっては株式会社 JSOL からのご指南をいただいた。また、ダンピングシート (PIEZON) のサンプルを提供していただいた木曾興業株式会社にも感謝する。

参考文献

- (1) Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites, C.H. Jenkins, editor, 2nd Edition, Society of Experimental Mechanics (1998), Chapter 26, 249-225.