1011 CFRP 損傷検知の電気抵抗変化法におけるデントの影響 Effect of dent on electric resistance change method for damage monitoring of CFRP

正 ○轟 章 (東工大) 嶋津 恭弘 (東工大院) 水谷義弘 (東工大)

Akira TODOROKI, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Yasuhiro SHIMAZU, Graduate student of Tokyo Institute of Technology

Yoshihiro MIZUTANI, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

An impact load on a thick carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate usually causes a dent. The dent results in a decrease of electrical resistance in the thickness direction. Our previous papers demonstrated the effect of the dent in the measurement of electrical resistance change of a thick CFRP plate subjected to impact loading. The present paper focuses on the mechanism of decrease of the electrical resistance caused by a dent. Experiments were performed to measure local fiber volume fraction after various loading. The observation revealed that the dent is made by plastic deformation of the matrix under compression loading at an impactor. This deformation cause slight increase of fiber volume fraction. The slight increase of the fiber volume fraction causes significant increase of electric conductance in the thickness direction.

Key Words: Composites, Carbon fiber, Electric conductance, Dent

1. 緒 言

軍用機だけでなく、民間航空機においても、炭素繊維複合材料 (CFRP) 積層構造が主構造として使われるようになり、自動車や鉄道車両への拡大も期待されている。CFRP 積層構造は軽量で高強度、高剛性である反面、面外からの衝撃荷重によって用意に層間はく離が発生し、圧縮強度が激減してしまう。CFRP 積層板の薄板では、この衝撃荷重負荷時にはく離とマトリックス割れだけが発生し、電気抵抗が増加することが知られている⁽¹⁾。しかし、CFRP 厚板では、はく離発生荷重が大きくなるために、はく離発生時には荷重点直下に凹部であるデントが発生する⁽²⁾。このデントは電気抵抗減少をもたらす、CFRP 厚板の電気抵抗変化ははく離発生時に電気抵抗減少がおきることが実験的に報告されている。

デントは電気抵抗変化をもたらすため、デントの位置をモニタリングすることで損傷モニタリングが可能であることが報告されている⁽³⁾。しかし、デント発生によって電気抵抗が減少するメカニズムは解明されていなかった。

そこで、本研究では、梁試験片にピンを用いて負荷し、側面から荷重負荷点直下の観察を可能とした。この試験片でデントを発生させ、電気抵抗減少を確認するとともに、繊維の堆積含有率を局所的に断面の画像解析から測定した。得られた結果からデント部の電気抵抗変化のメカニズムを考察した。

2. 試験片および実験方法

実験に用いた材料は三菱レイヨン製一方方向 CF/Epoxy プリプレグ PYROFIL #380 である。このプリプレグを積層構成 $[0_4/90_4]_s$ で積層した。積層板の厚さは 3.2mm である。電気抵抗変化の測定には、図 1 に示す長さ 50mm、幅 30mm の試験片を作成し、電流は表面繊維方向を流し、荷重負荷は表面 90° 方向となるように 4 電極を銅めっきで設置した。銅めっきの方法は参考文献 [4] と同じである。電流電極を表面と裏面に設置し厚さ方向に電流を流した。電流を表面繊維 0° 方向に流すのは、表面層全体を電極として厚さ方向におおよそ均一に電流を流すためであり、 90° 方向に電流を流すと電極直下だけで厚さ方向に流れてしまうことを避ける目的である⁽⁵⁾。電圧測定電極も同様に表裏面に設置した。厚さ方向負荷をピン荷重で行うためにピン接触部分の試験片中央部では電流作成を避け、1-1、2-2、3-3、4-4 の

ように同一番号で分割された電極をリード線で導通することで試験片全体に均一な電流を流す 4 電極法を作成している。つまり、1-1 と 4-4 が電流負荷電極であり、2-2 と 3-3 が電圧測定電極である。

Fig.1 Specimen to measure electrical resistance change

この試験片に直径 10mm のピンを設置し、このピンに圧縮荷重を負荷することで断面内 2 次元の変形をする荷重負荷を実現した。負荷時には試験片下部に厚さ 3mm のゴムシートを設置して、平板上に曲げ変形を生じないようにした。また、ピンと試験片の間にもテフロンシートをはさんで電氣的に絶縁した。負荷の模式図を図 2 に示す。

Fig.2 Schema of loading direction

図 1 の試験片では、デントの概要が観察可能であるが、繊維を画像処理して局所的な繊維の体積含有率を測定するには断面を研磨する必要がある。このため、デント時の局所的繊維体積含有率変化の測定には別の試験片を作成し、断面を研磨してビデオマイクロスコープで観察して局所的な繊維体積含有率を測定した。

使用した試験片寸法は 20mm×20mm×3.2mm とした。断面観察には HiROX 製 DIGITAL MICROSCOPE KH-1300 を用い、倍率は 350 倍で撮影した。画像解析には NI Vision Assistant 8.5 を用いた。画像からカラープレーンを抽出し、閾値を設定し 2 値化することで画像から繊維含有率を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 電気抵抗変化の測定結果

最大負荷が 20 kN と 30kN の 2 種の場合の除荷時の電気抵抗変化率 ($\Delta R/R_0$: ΔR は電気抵抗変化, R_0 は初期電気抵抗) とデントの大きさを表 1 に示す。

Table 1 Electric resistance change

Maximum load	Dent depth [mm]	Dent size [mm]	ERC ratio
20kN	0.016	1.97	0.03
30kN	0.031	3.55	0.16

表 1 からわかるように、最大荷重を増加させると、デント深さが増大し、電気抵抗の減少量が増加している。ピン負荷においても、デントとともに電気抵抗は減少し、その大きさは負荷荷重の増大とともに大きくなることがわかる。

3.2 ピン直下の繊維体積含有率の変化

画像処理によって局所的な繊維体積含有率を求めるには、局所繊維体積含有率を定義するための基準面積の設定が必要となる。面積が小さいほど詳細な分布が得られるが、繊維分布のばらつきの影響を受けやすい。そこで、デントなしの試験片でばらつきの少ない最小の測定面積を設定する。図 3 にその結果を示す。燃焼法による測定結果は繊維堆積含有率が 0.51 であり、 $150 \mu m^2$ で測定することが、最適であることがわかる。

Fig.3 Measurement of V_f

局所的繊維の体積含有率の測定範囲を $150 \mu m^2$ に固定した際の 20kN 負荷と 30kN 負荷後のピン直下の繊維体積含有率を図 4 (a), (b) にそれぞれ示す。図の横軸は $150 \mu m$ の面間の番号であり、図中で□で示した領域がデントが発生している領域である。縦軸が測定した局所的繊維体積含有率である。なお、測定は第 2 層、第 3 層、第 4 層で実施した。第 1 層では変形が大きすぎるために測定面積内に第 2 層が入る場合があるため、この測定から除いている。

図 4 から明らかに、ピン直下で局所的体積含有率の増加が認められる。その上昇は 30kN の負荷時でも約 8% の上昇であり、上昇値そのものはわずかである。しかし、繊維の

体積含有率が 0.4 から 0.7 の間では、繊維接触によって発生する直交方向の導電率は繊維体積含有率の変化に対して指数関数的に導電率が変化しており⁽⁶⁾、8% の変化でも数倍の導電率変化になりえる。

(a) Measured results of 20kN loading

(b) Measured results of 30kN loading

Fig.4 Measurements of fiber volume fraction

4. 結 言

- (1) デント発生によって CFRP の厚さ方向の電気抵抗が減少することを実験的に示した。
- (2) デント直下では繊維の体積含有率が局所的に上昇し、繊維間距離が減少していることが明らかになった。

参考文献

- (1) A. Todoroki, Y. Samejima, Y. Hirano, R. Matsuzaki, Y. Mizutani, J. Solid Mech. & Mater. Eng., JSME, 4(1), (2010), 1-11.
- (2) A. Todoroki, Y. Samejima, Y. Hirano, R. Matsuzaki, Y. Mizutani, J. Solid Mech. & Mater. Eng., 4(6), (2010) 658-668.
- (3) A. Todoroki, Y. Shimazu, Y. Mizutani and R. Matsuzaki, J. Solid Mech. & Mater. Eng., JSME, 5(1) (2011), 44-53
- (4) A. Todoroki, K. Suzuki, Y. Mizutani, R. Matsuzaki, J. Solid Mech. & Mater. Eng., 4(6), (2010), 610-620.
- (5) 轟, 島村, 鈴木, 機論 A, 65(634), (1999), 1330-1336
- (6) A. Todoroki, M. Tanaka, Y. Shimamura, Comp. Sci. & Tech., 62(5), (2002), 619-628