121 導電性を利用した繰り返し荷重下における CFRP パッチの損傷進展評価

Damage Detection of CFRP Patch under Cyclic Loading Condition Using Electrical Conductivity

○学 高橋 市弥 (東大院) 朴 宰範 (東大院)

正 武田 展雄 (東大・新領域)

Ichiya TAKAHASHI, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8904

Jae Beom PARK, University of Tokyo

Nobuo TAKEDA, University of Tokyo

CFRP has some peculiar electrical properties. Taking advantage of these properties, CFRP unidirectional laminates can be used as smart patches to detect the maximum strain applied on structures. In order to confirm the possibility of the practical use of the CFRP smart patch, the change in the voltage distribution due to the damages in CFRP laminate was firstly investigated. As a result, it was revealed to be more effective to measure the total electrical resistance of unidirectional CFRP laminates than to measure the electrical distribution on their surface. Secondly, it was confirmed that the residual resistance change of the unidirectional laminate increased according to the maximum strain by both the loading/unloading test and the analysis using modified δ_{ϵ} model. From these results, the CFRP smart patch was found to be effective to measure the maximum strain.

Key Words: Electrical Conductivity, Residual Resistance Change, Fiber Breakage

1. 緒言

近年航空宇宙構造物の構造材として注目されている炭素繊維強化複合材料(CFRP)は、優れた力学特性とともに、金属とは異なる電気特性を持ち、この2つの特性を活かしたスマート材料としての利用が期待されている。本研究では、そうした電気特性を利用したCFRP材の損傷評価について、以下の2つの側面から検証する。

- (1) 引張荷重下におけるCFRP一方向強化複合材料の表面の電位分布を求め、実験と解析から電位分布と損傷進展の関係について検証する。
- (2) CFRP一方向強化複合材料の繰り返し荷重下における電気抵抗変化を求める。さらに修正 δ_{ϵ} モデル解析によって、電気抵抗変化を利用したスマートパッチの有用性について検証する。

2. CFRP 電位分布測定試験

2.1 実験方法

試験片には、T700S/2500 4層一方向積層板を用いた。そのCFRPの表面に5mm間隔で格子を描き、引張荷重を加えた状態および除荷した状態で、試験片の繊維方向の両端から一定電流を導入し、格子の各頂点における電位を測定した。

2.2 実験結果

結果はFig.1のようになり、繰り返し荷重下においては、大きな電位分布特性の変化は見られなかった。しかし、除荷後において全体の電位が負荷前の電位よりも上昇していた。

3. 繰り返し荷重下におけるCFRPの電気抵抗変化測定

3.1 実験方法

試験片にはM46J/2500を用い、繊維体積含有率を低くするためにプリプレグ1枚の両面にエポキシ樹脂を塗布し、ホットプレスによって成形した。その試験片の中心から等距離の位置に電流導入用

Fig.1: Distributions of electric voltage measured under cyclic loading.

の電極(外側)および電圧測定用の電極(内側)を塗布し、それぞれ銅線を接続した。そして、繰り返し荷重を加えながら電圧を測定した。その電圧値と入力電流値から電気抵抗変化率を求める。

3.2 実験結果

与えたひずみの履歴および電気抵抗測定結果をFig.2に示す。この結果を見れば明らかなように最大ひずみに応じて除荷後の抵抗が増加している(残留抵抗)。これは、最大ひずみ時に、繊維破断が生じているためであると考えられる。

Fig.2: Change in the electrical resistance under cyclic loading.

4. 修正 δ_{ec} モデルを用いた電気抵抗変化解析

4.1 修正 δ_{ec} モデル

この解析では、朴らによる修正 δ_{ec} モデルを用いる。この理論では、CFRP 一方材を、N本の繊維(抵抗)を並列に接続したものをk個直列に接続した回路としてモデル化する。この並列回路部分の抵抗の長さを「電気的無効長さ」といい、 δ_{ec} で表す。このようにモデル化することにより、電気抵抗変化特性を容易に数式化することが可能となる。さらに、単繊維試験の結果から繊維1本の破断後の抵抗を近似した式をこのモデルに組み込むと、電気抵抗変化 $\Delta R/R_0$ と ε の関係は(1)式で表される。

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{(1 + \alpha \varepsilon)(1 + A \varepsilon^2)}{F_w (1 + A \varepsilon^2) + (1 + \alpha \varepsilon)(1 - F_w)} - 1 \quad (1)$$

ただし、

$$F_w = \exp\left[-(\delta_{ec}/L_0)(E_f \varepsilon/\sigma_0)^m\right]$$

α : ゲージ係数 δ_{ec} : 接触点の平均間隔

A: パラメータ(単繊維複合材料試験から決定)

L_0 : 単繊維試験のときのゲージ長さ

σ_0 : Weibull 分布尺度係数 m : Weibull 分布形状係数

4.2 解析結果

M46J/2500について(1)式を用いて解析を行ったところFig.3のようになった。なお、ひずみ履歴はFig.2(a)と等しい。この結果からも分かるように、解析結果には残留抵抗は現れなかった。これは、Fig.2(a)を見ると明らかなように、残留ひずみが生じなかったためであると考えられる。残留ひずみは除荷後も塑性ひずみが残留したもので、このモデルによる解析では、塑性ひずみから除荷後の残留抵抗を算出している。しかし、M46J/2500の場合その残留ひずみが大きく現れる前に破断してしまうために、ひずみゲージでは塑性ひずみを検知できなかったと考えられる。一方 Fig.3 の実験

結果においては、ひずみゲージでは検出できないわずかな塑性ひずみによって電気抵抗が上昇したため、残留抵抗が現れたと考えられる。それに対し、T700S/2500 についての実験結果およびそのひずみ履歴を Fig.4 に示す。T700S/2500 は破断ひずみが M46J/2500 の約 2 倍であるため、残留ひずみがひずみゲージによっても検出できる。したがって解析においても残留抵抗が生じたと考えられる。

Fig.3: Change in the electrical resistance of M46J/2500 obtained from the experiment and that simulated by the analysis using the modified δ_{ec} model.

Fig.4: Change in the electrical resistance of T700S/2500 obtained from the experiment and that simulated by the analysis using the modified δ_{ec} model.

5. 結論

繰り返し荷重下において、繊維破断などの損傷はCFRPの電位分布特性の具体的な変化としては現れないが、除荷後の電位は負荷前の電位よりも高くなっていた。そこで、繰り返し荷重下においてCFRPの電気抵抗を測定したところ、最大ひずみに応じた残留抵抗が生じることが確認できた。この抵抗変化は修正モデルを用いた解析によって再現することができた。よって、このような残留抵抗を用いることで、最大ひずみ値記憶機能を有するスマートパッチとして利用可能であることがわかった。