238 電気抵抗変化による CFRP のはく離検知への導電率異方性の影響

Effect of Orthotropic Electric Conductance on Detection of Delaminations with Electric Resistance Change

正 轟 章 (東工大)
正 島村 佳伸 (東工大)

○学 田中 美帆 (東工大)

Akira TODOROKI*, Miho TANAKA**
Yoshinobu SHIMAMURA*

* Tokyo Institute of Technology, Department of Mechanical Sciences and Engineering, 2-12-1,
O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

** Graduate student of Tokyo Institute of Technology

1. 緒言

CFRP は比強度・比剛性に優れているため、航空宇宙分野などの大型構造物への適用が拡大されている。しかし層間強度が弱いために、容易に層間のはく離が発生し、圧縮強度・剛性が低下する。CFRP 積層板の層間のはく離は目視点検が困難であるため、構造安全性の保証の観点から、簡便な非破壊検査手法の開発が望まれている。

著者らは、CFRP 積層板表面に電極を設置して電気抵抗変化を測定することで CFRP のはく離を検知する手法を提案してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。この手法では、電気抵抗変化とはく離位置や大きさの関係を応答曲面法で逆問題解析を実施している。本研究では、CFRP 積層板の導電率異方性と繊維含有率の関係の実測結果から、さまざまな導電率において FEM 解析を実施し、はく離検知逆問題への影響評価と積層構成の影響について解析的に検討した。

2. 解析方法

2.1 電気抵抗変化 $\Delta R/R$ の計算方法

本研究では汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いて解析を行った。解析対象の CFRP 積層構成は $[0/90]_s$ で、図 1 のような試験片表面に 5 電極をもつ長さ 140mm、厚さ 2mm の梁試験片に対して、層間のはく離の大きさと位置を変えて計算を行った。解析は四角形四節点要素を用い、一辺を 0.125mm の大きさにメッシュ分割を行った。隣り合う 2 つの電極の一方を 0[V] に固定し、他方の電極から 30[mA] の電流を流して、各電極間の電気抵抗変化 $\Delta R_i/R_0$ ($i=1, 2, 3, 4$) を計算する。電気抵抗変化 $\Delta R/R$ は層間のはく離が存在する状態の電極間電位差を層間のはく離が存在しない場合の電極間電位差で規格化した値である。

この解析に用いる CFRP の導電率は、参考文献[5]で実測した値およびその中央値 (表 1) の 4 種類である。導電率 1, 2, 4 は実測値で、導電率 3 は 2 と 4 の平均値である。ただし、繊維体積含有率 V_f 、 0° 方向導電率 σ_0 、 90° 方向の導電率 σ_{90} 、厚さ方向の導電率 σ_t である。

Fig. 1 Specimen $[0/90]_s$

Table.1 Conductivity ratio σ

Number	V_f	σ_{90}/σ_0	σ_t/σ_0	$\sigma_0 [m^{-1}\Omega^{-1}]$
1	0.398	1.77×10^{-4}	1.58×10^{-5}	3.7×10^3
2	0.472	1.05×10^{-3}	2.24×10^{-4}	4.6×10^3
3	0.547	1.91×10^{-2}	2.0×10^{-3}	5.1×10^3
4	0.621	3.71×10^{-2}	3.77×10^{-3}	5.5×10^3

2.2 積層はく離

層間のはく離は、全体の大きさが 10mm, 20mm, 40mm の 3 種類のはく離を作成した。作成場所は、 0° 層と 90° 層の間 (図 1) に 5mm 間隔で、 $x=65\sim65mm$ (10mm), $x=60\sim60mm$ (20mm), $x=50\sim50mm$ (40mm) とした。はく離位置ははく離の中心とする。よって導電率 4 種類に対してそれぞれ 73 点のはく離位置における $\Delta R/R$ のデータを得た。

2.3 導電率の違いによる同定精度の比較

CFRP 積層板は繊維体積含有率により、表 1 のように導電率が大きく異なる。導電率の違いにより得られる電気抵抗変化も大きく異なる。そして表 1 の 4 種類の導電率を用いて、各導電率ごとにはく離位置・大きさを同定する応答曲面を作成し、自由度決定係数 R_{adj}^2 の比較を行うことによって、同定精度の比較を行う。

2.4 応答曲面法による同定

応答曲面法とは品質工学分野におけるプロセス最適化に適用されている手法であり、実験計画、近似関数への回帰、プロセス最適化を含む。応答曲面の関数系としては多項式近似する場合が多く、様々な変数変換を行うことで複雑な関数に近似可能となる。応答曲面法を用いる利点としては、破壊のメカニズムを考慮することなく、実測データを関数近似できること、近似関数を統計的に評価できること、実験計画法を適用することで少ない実験数で小さい分散の近似式が得られることなどがあげられる。本研究において、応答曲面法には (1) 式のように 2 次多項式を用いる。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (n=4) \quad (1)$$

ここで $x_i x_j = x_{ij}$ と置き換えることで、(1) は線形回帰モデル $y = X\beta + \varepsilon$ に変形でき、最小二乗法を用いて回帰係数 β を推定することができる。ここで、

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}, x = \begin{Bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{Bmatrix}, \beta = \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{Bmatrix}, \varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \quad (2)$$

であり、 k は実験点数、 $p=n+1$ は未知係数の個数である。最小二乗法により、係数 β の不偏推定量 b は次式となる。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3)$$
 応答曲面の適合度を表す自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は次式で表される。

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{S_E}{S_{yy}} = 1 - \frac{SS_E / (n - k - 1)}{S_{yy} / (n - 1)} \quad (4)$$

$$S_E = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad S_{yy} = \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / 2$$

ただし、 S_E は残差平方和、 S_{yy} は偏差平方和、 y_i は真の応答、 $\hat{y}_i$ は応答曲面による応答である。自由度調整済み決定係数を使用することで、自由度の異なる回帰式の近似精度を比較することができる。

本研究では、説明変数を層間はく離の大きさ・位置の2種類とし、被説明変数を各電極間の電気抵抗変化 $\Delta R/R_0$ ($i=1, 2, 3, 4$) の4つとして応答曲面を作成し同定を行う。

3. 解析結果および考察

3.1 導電率の $\Delta R/R$ への影響

表1の導電率1~4の場合について、大きさ10mmの層間はく離が $x=-52.5\text{mm}$ の場所に存在する場合の、電極AB間の電気抵抗変化 $\Delta R/R$ の分布を図3に示した。導電率1以外では電極A($x=-70\text{mm}$)で $\Delta R/R$ が計算されるため、はく離による電気抵抗変化がある。しかし導電率1では $\Delta R/R$ が0であり、はく離同定を行うことは不可能である。これは厚さ方向の導電率が非常に小さいため、積層板内部まで電流が流れず、はく離による電気抵抗変化 $\Delta R/R$ が得られないためと考えられる。

Fig.3 Electric resistance change

3.2 応答曲面法による同定

導電率4 ($V_f=0.621$) の場合の応答曲面の推定結果を図4に示した。図4は(a)位置(b)大きさの推定結果であり、横軸が解析した値で、縦軸が応答曲面による推定結果である。(a)位置の R_{adj}^2 は0.5926であり、(b)大きさの R_{adj}^2 は0.8876である。図4より位置、大きさともに同定が可能であるといえる。よって試験片表面に作成した電極を用いて、層間はく離の電気抵抗変化を測定し、応答曲面法を作成して位置・大きさを同定することにより、層間はく離の検知が可能であることが解析的に明らかにされた。

Fig.4 Results of Estimation

3.3 同定精度に及ぼす導電率の影響

導電率2~4の積層板における、応答曲面法の推定精度の比較を行う。図5に導電率ごとの自由度決定係数 R_{adj}^2 を示した。横軸が 90° 方向の導電率 σ_{90}/σ_0 で、縦軸が自由度決定係数 R_{adj}^2 である。図5により、導電率が変化することによって、同定精度は異なる事がわかった。位置と大きさの同定結果はともに、導電率が小さいほうが、同定精度が高いといえる。

繊維含有率が低いと導電率は小さくなり、 90° 方向、厚さ方向の導電率異方性は高くなる。よって異方性が強い方が層間はく離の影響が電気抵抗変化に出やすく、同定精度は高いということが考えられる。

一番値の小さい $V_f=0.621$ の場合においても、図2に示したように層間はく離の同定は可能である。よって電気抵抗変化法は繊維体積含有率の異なる CFRP 積層板に対して、層間はく離検出に有効であるということが明らかになった。

Fig.5 Adjusted R-square

4. 結論

以下のことが解析的に明らかになった。

- (1) 電気抵抗変化法による測定データから応答曲面を作成することにより、はく離検知が可能である。
- (2) 導電率が非常に小さい場合には、はく離による電気抵抗変化は得られない。
- (3) 導電率によって同定精度は変化し、異方性が強いほうが測定精度は高い。
- (4) 実機での導電率において、電気抵抗変化法を用いたはく離検知は可能である。

(参考文献は省略)