

電気ポテンシャル法を用いたCFRP層間はく離検出知的構造 Smart Structures for Delamination Identification of CFRP using Electric Potential Method

正 轟 章 (東工大工), 鈴木洋之 (東工大院)

Akira TODOROKI, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayam, Meguro-ku, Tokyo
Hiroshi SUZUKI, Graduate Student of Tokyo Institute of Technology

Delamination cracks are invisible and cause decrease of compression strength of laminated composites. Therefore, health monitoring system is required for laminates. The present study adopts an electric potential method for health monitoring of graphite/epoxy laminated composites. The electric potential method does not cause strength reduction and can be applied previously fabricated structures by low cost. The present study focuses on the applicability of the electric potential method for identification of delamination crack position and size. Multi points measurements of electric voltage are adopted for the identification, FEM analyses are conducted to investigate the applicability. Response surfaces are applied for the inverse problems. As a result, the response surfaces using 5-point-measurement is the best approach for the identification.

Key words : Composites, Electric Potential Method, CFRP, Delamination, Smart Structure, Health Monitoring

1. 緒言

CFRPは比剛性、比強度の力学特性が優れているため、航空機や宇宙機器などの主構造への適用が検討されている。しかし、層間強度が弱いため、弱い衝撃で外側から目視できない層間はく離が容易に発生し、圧縮特性が著しく低下する。CFRPの活用上、損傷の有無の評価は構造安全性の保証の観点から非常に重要である。そこで本研究はCFRPに強化繊維として埋め込まれている炭素繊維の導電性に着目し、CFRPを構成する炭素繊維がそのまま神経のような役割を有し、損傷を検出する電気ポテンシャル法によるスマート複合材料を開発のための知見を得ることを目的としている。

著者らは既にCFRP積層板を用いて実験的に電気ポテンシャル法の適用可能性を検討してきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。前報では人工欠陥のない試験片を曲げることで発生する層間はく離を想定してFEM解析し、3電極でははく離の発生位置とサイズを同定できないことを示した⁽⁴⁾。本研究では、多数の電極を使用することで、電気抵抗異方性に起因して困難とされた電気ポテンシャル法を用いたCFRP積層板の層間はく離の大きさや位置の同定をFEMで解析的に検討した。

2. 解析モデル

積層板の解析対象は $[0_4/90_4]_s$ 積層平板で、試験片寸法は $L=140\text{mm}$ 、 $2H=2\text{mm}$ とした。これをFig.1に示す。この積層板の表面にFig.1(a)に示す4個およびFig.1(b)に示す5個の電極を取り付け、電極DまたはEの電位を0Vにして電極Aから30mAの直流電流を流す。この積層板に衝撃や3点曲げなどにより積層板の電極間に層間はく離が発生した場合を想定した。航空機の翼などの損傷検出では機体の内部に電極を作成し、機体の外側である電極と反対側から荷重が負荷される事を想定しているため、はく離は電極が存在する側の 0° 層と 90° 層の層間に発生するとした。

本研究では層間はく離を有限要素法でモデル化する際に、はく離位置の節点を二重に定義し、はく離と同時にそれぞれの節点の連結をはずした。これによってはく離を横切る電流は流れない。つまり、解析はモードの開口型はく離を仮定している。また、有限要素への要素分割は四角形四節点要素の一边を $0.25[\text{mm}]$ 以下に設定し、ANSYSで自動要素分割を行い、約6000要素に分割した。

実験結果のモード層間はく離試験での電極間電気抵抗変化⁽³⁾と数値解析による結果との比較から、試験片の厚さ方向の導電率 t と繊維方向の導電率 σ_0 の比 σ_t/σ_0 を 1×10^{-4} とした。また、 90° 方向の導電率 σ_{90} と 0° 方向の導電率 σ_0 の実測結果からそれらの比 σ_{90}/σ_0 を 1×10^{-3} として解析を実施した。

FEM解析において、A-D間(A-E間)に電流を流

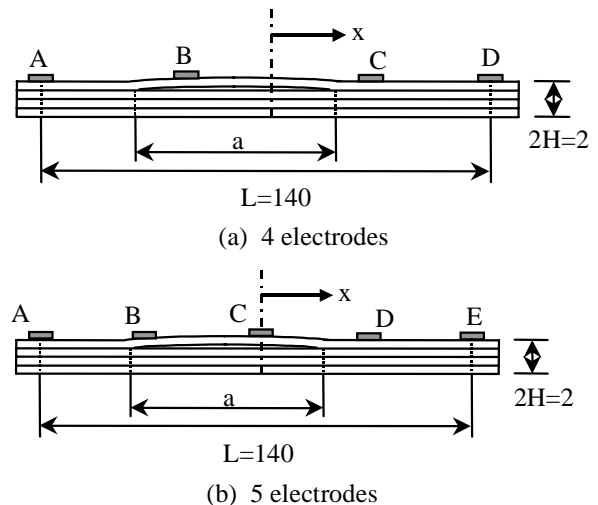


Fig.1 Specimen configurations

して各電極での電圧を測定する方法とA-B、B-C、C-D間のように区分領域に電流を流してその電圧を測定する方法の2種類を検討した。

3. はく離同定への応答曲面の導入

応答曲面法は品質管理のために実験的最適化手法として開発⁽⁵⁾された。応答曲面法は少ない測定結果で小さい分散の変数-応答間の近似関係式を得るために適用される。ここでは簡単のために多項式を選択する。2次多項式を選択する場合、次式となる。

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

本研究では、4電極の場合の独立変数は3個、5電極の場合は4個で

ある．そこで，それぞれ $n=3, 4$ となる．応答曲面法では，この係数 β を得るために最小二乗法を使用する．

さらに，後退消去法によって回帰を悪化させる項を削減し，最良回帰式を選定する．本研究ではその際の有意水準を0.05とした．

5. 結果と考察

5.1 4電極の場合

AD間に電流を流し，はく離の位置 p_x を $x=-65$ から $x=65$ ，大きさ a を10mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mmと組み合わせを変化させた54点を用い，その際のポテンシャル変化比 $\Delta V_i/V_i^0$ ($i=AB, BC, CD$)を解析した．それらを基に式(1)の2次多項式関数で応答曲面を求める．

応答曲面を求める際に用いた測定点のポテンシャル変化比 $\Delta V_i/V_i^0$ ($i=AB, BC, CD$)ではく離の位置と大きさを同定し，真の位置，大きさと比較した．大きさの推定結果をFig.2に示す．横軸はそれぞれの真の値で，縦軸は同定した値である．また，それぞれの値は試験片長さ L で規格化してある．Fig. 2中，印は測定した54点を応答曲面に代入した値である．

応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{ad}^2 は位置同定，大きさ同定のそれぞれで0.264, 0.766である．また，真の値と同定値の差の絶対値はそれぞれ0.16, 0.062で，この試験片の場合，22mm, 8.7mmである．はく離位置 p_x をほとんど同定できていない．はく離の大きさに関しては，傾向は正しいが大きい誤差を含んでおり，実用的でないと考えられる．

5.2 5電極の場合

同定のための情報を増やすためにFig. 1 (b)に示したA, B, C, D, Eの5電極を作成した試験片の電極Aから電極Eに電流を流し，電極Eを0[V]に設定した際の表面のポテンシャル変化を電極A, B, C, Dで検出し，はく離の位置 p_x ，大きさ a を検出する可能性を検討する．

4電極と同様に54点のポテンシャル変化比 V_i/V_i^0 ($i=AB, BC, CD, DE$)を解析し，2次の応答曲面を求めた．ここでも，同様に応答曲面を求める際に用いた測定点での推定精度を検討するため，ポテンシャル変化比 $\Delta V_i/V_i^0$ ($i=AB, BC, CD, DE$)における，はく離の位置と大きさを同定した．大きさの同定結果をFig. 3に示す．得られた応答の自由度調整済み決定係数 R_{ad}^2 は位置，大きさでそれぞれ0.432, 0.875である．また，真の値と同定値の差の絶対値はそれぞれ0.14, 0.042で，この試験片の場合，19mm, 5.8mmである．決定係数，誤差，いずれも4電極を用いた3情報からの同定と比較して，情報量が増えたことにより精度が向上しており，実用上十分な同定が可能であることが明らかになった．

5.3 区分電流法の結果

A-B, B-C等のように区分的に電流を流し同定制度向上を試みた．大きさの同定結果をFig.4に，位置の同定結果をFig.5に示す． R_{ad}^2 は大きさ0.99，位置で0.64であり，前述の試験片全体に電流を流す手法と比較して同定精度が向上することが明らかになった．

6. 結論

- (1) CFRPの電気ポテンシャル法による層間はく離同定には5電極以上必要である．
- (2) 区分的に電流を流す方法で高い精度の同定が可能となる．

参考文献省略

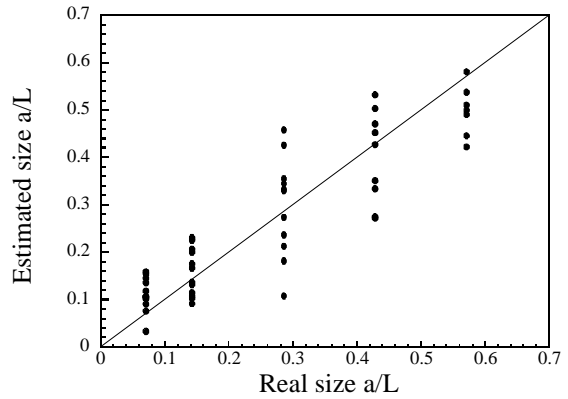


Fig. 2 Results of regression by quadratic polynomial (potential, 4 electrodes)

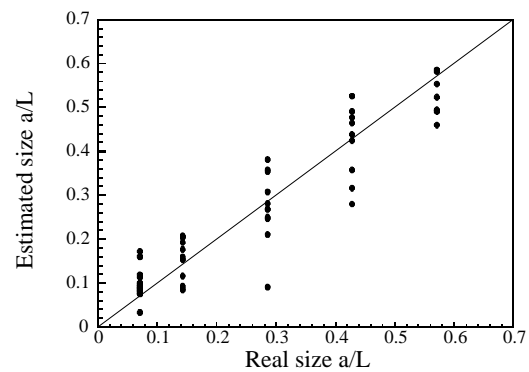


Fig. 3 Results of regression by cubic polynomial (potential, 5 electrodes)

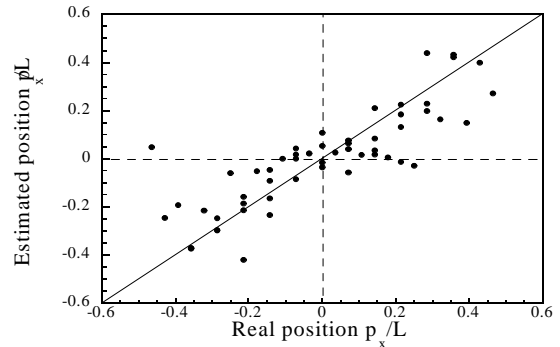


Fig.4 Estimation of position by segment method

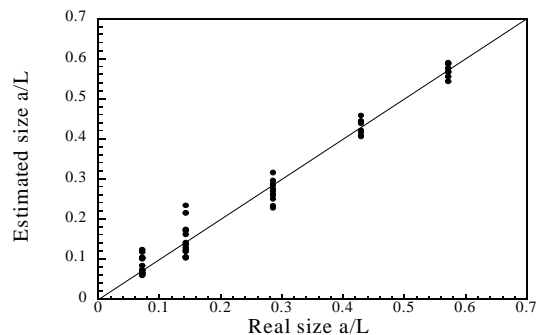


Fig.5 Estimation of size by segment method