

電気ポテンシャル法を用いた CFRP 層間はく離き裂の同定*

轟 章^{*1}, 鈴木洋之^{*2}, 島村佳伸^{*1}

Identification of Delamination Cracks of CFRP by Electrical Potential Method

Akira TODOROKI, Hiroshi SUZUKI and Yoshinobu SHIMAMURA

An electrical resistance method is applied for identifications of size and position of delamination cracks of components of CFRP in the present study. The method does not cause strength reduction of CFRP structures, because the method adopts reinforcement fiber itself as sensors. Due to orthotropic electrical resistance of laminates of CFRP, electric potential fields of CFRP laminates are different from the fields of conventional methods for isotropic metallic materials. Authors have investigated the effect of orthotropic electrical resistance on the method by using FEM. Based on the results, identification of delamination crack size and position was impossible in the case of only an entire electric resistance change of a structure is available. In the present study, multiple points for measurement of electric potential are adopted for identifications of the delamination crack size and position. The response surface methodology is adopted to estimate delamination size and position with electric potential change data. Using FEM analysis, identification of the delamination crack size and position is conducted. As a result, a 5-segment-method is numerically shown to be very effective for identification of delamination crack size and position.

Key Words : CFRP, Electrical Potential Method, FEM, Smart Structure, Response Surface

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, 弱い衝撃で目視困難な層間はく離が容易に発生し, 圧縮強度・剛性が著しく低下する。CFRP のはく離損傷検出は構造安全性の保証の観点から非常に重要である。そこで著者らは 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^{(1),(2)}に着目し, CFRP を構成する炭素繊維がそのままセンサーの役割を有し, はく離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する研究を実施してきた。

電気抵抗変化を利用する電気ポテンシャル法を損傷検出に用いた場合, 強化繊維である炭素繊維をセンサーとして使用する。このためセンサー埋め込みによる強度低下がなく, また既存の構造にも容易に適用可能である。さらに, 実際の工程は電極を表面に作成するだけであるので安価である。電気ポテンシャル法はこ

れまでに金属材料のような等方性電気抵抗の材料において, き裂検出法として研究されている^{(3),(4),(5)}。しかし, CFRP のような電気抵抗異方性を有する材料の研究例はほとんど見られない。

著者らは 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^{(6),(7)}。また, これまでの有限要素法を用いた研究で電極間のはく離を検出することが可能であることが明らかになっている。しかし, 電極数が 3 (電位差情報数 2) 以下の場合には得られる情報が少ないために, はく離の位置, 大きさが異なるにもかかわらず, ポテンシャル変化に差異がない場合があり, 定量的同定はできないことが明らかになっている⁽⁸⁾。

そこで本研究では, 電気ポテンシャル法を用いた損傷検出スマート CFRP 構造開発における層間はく離の検出に際して, 4 つ以上の複数電極間 (3 つ以上の情報) のポテンシャル変化, 電気抵抗変化を有限要素法で解析し, はく離の位置と大きさを同定する可能性について検討した。電流の流し方についても, 試験片全体に電流を流して各場所の電位を測定する方法と区間ごとに電流を流して電気抵抗を求める方法の 2 通りの流れを解析し, はく離検出の可能性と精度向上を検討

*平成 年 月 日受付

*1 〒152-8852 東京工業大学工学部
目黒区大岡山 2-12-1

*2 東京工業大学大学院

した。

複数電極の電気抵抗変化から層間はく離の大きさや位置を検出するには、複数電極での電気抵抗変化と層間はく離の大きさおよび位置の関係を求める逆問題手法が必要となる。実機構造のヘルスマニタリングスマート構造では、検出精度よりもむしろ簡単な構造であればよく判断できることが望ましい場合が多い。また、ニューラルネットワークでは確率に基づく応答の善し悪しが存在する場合がある。本研究でははく離検出に及ぼす電気抵抗変化の信号の優劣を検討するため、電気抵抗変化と層間はく離の大きさおよび位置の関係を簡単な多項式応答曲面で近似した。

2. 測定原理

CFRP では、炭素繊維が導電性を有するが、エポキシ樹脂は導電性がない。CFRP では、 μm オーダーでは導電率が不均一である。しかし、繊維方向の導電性を考えた場合、巨視的には炭素繊維の断面積比に比例した導電性があるとみなせる⁽¹⁾。

繊維と垂直方向の 90° 方向導電性について考える。実際の CFRP では、炭素繊維が完全な直線ではなく、隣接繊維と接触するネットワーク構造をなす(図 1 参照)。したがって、繊維と垂直方向である面内の 90° 方向にも導電性を有する。しかし、その導電率は繊維方向の導電率と比較して小さい。

積層方向の導電性を考える。プリプレグ積層時に間に生じる樹脂リッチ層はエポキシ樹脂であり導電性はない。しかし、樹脂リッチ層は厚さが一定でなく(図 2 模式図参照)、成形法に依存して、炭素繊維は積層方位にも上下層が接するネットワーク構造をしている。このため実際には積層方向にも非常に小さい導電性を有する。ただし、繊維接触頻度は面内とは異なるため積層方位の導電率は 90° 方向の導電率と異なる。

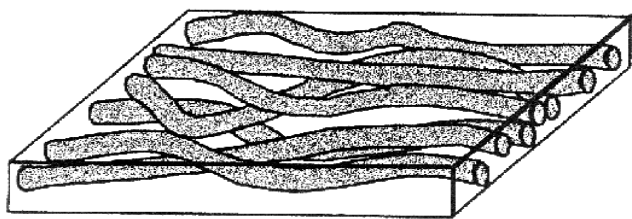


Fig. 1 Network structure of fibers in a ply

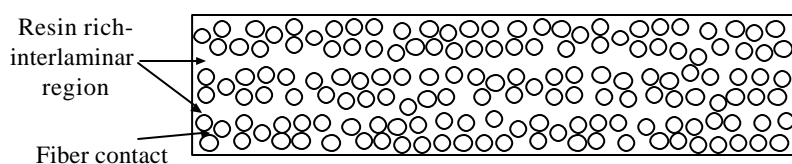


Fig. 2 Resin rich-interlaminar region and fiber contact

3. 有限要素法による数値解析 直流電場問題の支配方程式を以下に示す。

$$J = -\begin{pmatrix} s_x & s_y & s_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2)$$

ここで、

J : 電流密度 [A/m^2]

s : 導電率 [S/m] ($\tau=x, y, z$)

f : 電位 [V]

著者らは既にモード層間はく離試験片を用いて電極直下のはく離に関して電気抵抗変化法の有効性を実験的に検証した^{(6),(7)}。本研究では試験片内部に電極から離れた位置(電極間)にはく離き裂が存在する場合を解析するため、図.3(a), (b)の試験片形状のCFRPを解析対象にした。試験片(a), (b)とも、 x 軸の原点は積層板の中心とした。航空機等の構造の内側に電極を取り付けることを想定して、電極を試験片の同一表面に作成した。

試験片(a)では電極位置は $x=-70, -23, 23, 70$ の4点で、それぞれ幅 2mm の電極を作成した。試験片(b)においても同様に $x=-70, -35, 0, 35, 70$ の5点に電極を作成した。一般に積層板に衝撃荷重が加わる場合、衝撃面と逆側の表面近くに大きなはく離が発生する。そこで、構造物の外側から衝撃が加わることを考慮し、電極を作成する層(内側層)とその下の層の層間にはく離が発生するとした。この試験片に電流を流し、電極間ではく離が発生する場合について有限要素法で解析し、はく離検出を行った。解析に用いた積層構成は $[0_4/90_4]_s$ である。

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、有限要素解析では、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。

モード層間はく離試験での電極間電気抵抗変化の実験結果と数値解析結果との比較⁽⁴⁾から、試験片の厚さ方向の導電率 s_t と繊維方向の導電率 s_0 の比 s_t/s_0 を 1×10^{-4} とした。また、 90° 方向の導電率 s_{90} と 0° 方向の導電率 s_0 の実測結果からそれらの比 s_{90}/s_0 を 1×10^{-3}

として解析を実施した⁽⁹⁾。

ここで、FEM においては微視的に不均一な複合材料を均一異方性材料とモデル化した。つまり、本来層内と樹脂リッチな層間は異なる導電率を有しているが、簡単のために厚さ方向に均一な導電率を有する要素とモデル化して解析した。このため厚さ方向導電率 σ_z は層内の 90° 方位導電率 σ_{90} より小さい。

4. 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⁽¹⁰⁾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。応答曲面の近似関数は多項式に限定されない。例えば、ロジスティック曲線を用いることも可能であり、この場合にはパーセプトロニューラルネットワークも応答曲面と同じになる。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。

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

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 b を得るために最小二乗法を行う。応答曲面法の利点は、近似関数を得るために多項式の最小二乗法を用いており、統計的手法により回帰係数の推定の精度を評価できること、回帰モデルの修正が容易に可能であることにある。

(3)式において $x_j, x_j^2, x_i x_j$ を新たに x_m とおくと、(3)式は次式に線形化される。

$$y = b_0 + \sum_{m=1}^p b_m x_m \quad (4)$$

ここで $p=(n+1)(n+2)/2-1$ である。このように、高次多項モデルは線形回帰モデルに変換できる。この式より、最小二乗法を用いて回帰係数を推定することができる。 k 個 ($k>p$) のデータ点とその評価値(応答) $y_i (i=1, \dots, k)$ が与えられている場合、 $p+1$ 個の係数の重回帰モデルは次式で表現される。

$$Y = Xb + e \quad (5)$$

ただし、

$$Y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{Bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{Bmatrix} \quad e = \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{Bmatrix}$$

ここで、 Y は k 個の測定(解析)された評価値(応答)、 X は k 個の測定点の集合である。 b は重回帰係数ベクトルであり、 e は誤差ベクトルである。最小二乗法を用いることで、 b の期待値 b は次式で得られる。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (6)$$

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。後退消去法とは、式(4)中の全項の係数を決定後、全項を回帰方程式に最後に導入された変数であるかのように扱い、偏 F 検定値

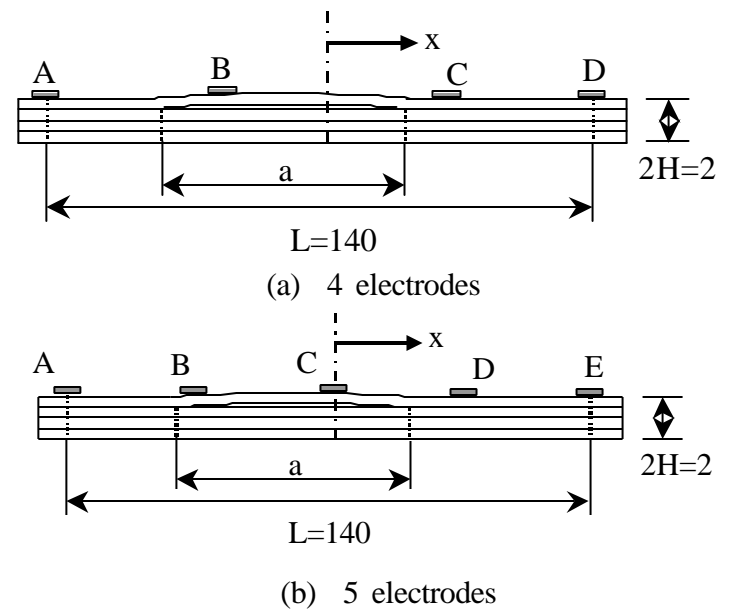


Fig. 3 Specimen for delamination tests

F_L を計算し、有意水準 F_0 と比較して $F_L < F_0$ ならば F_L を引き起こすような変数 X_L を考慮から除外し、残りの変数についても同様の操作を繰り返して項数を削減して回帰式を改良する方法である。本研究ではその際の有意水準 α を 0.05 とした。

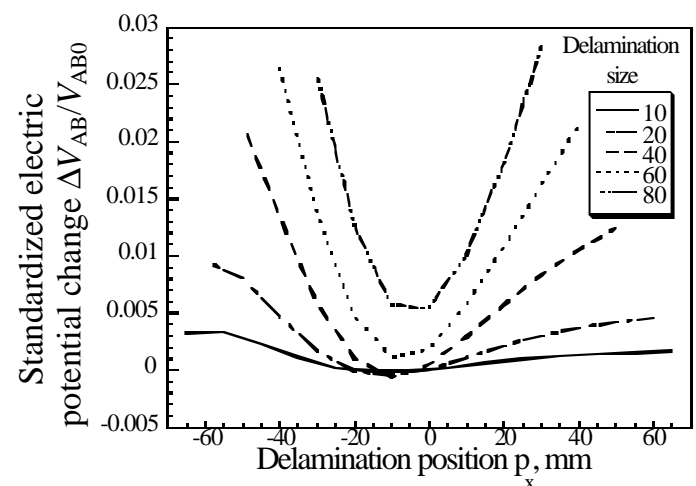


Fig. 4 Relationship between delamination position and electric potential change

5. 結果と考察

5.1. 表面のポテンシャル変化による同定

(1) 4電極の場合

図.3(a)に示したA, B, C, Dの4電極を作成した試験片の電極Aから電極Dに電流を流し,電極D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.

AD間に電流を流し,はく離位置 p_x を $x=-65$ から 65 , 大きさ a を 10mm , 20mm , 40mm , 60mm , 80mm と変化した場合のAB間の電位差変化(ポテンシャル差変化) $DV_{AB}(=V_{AB}-V_{AB0})$ をはく離が存在しないときの初期電位差 V_{AB0} で規格化した値 DV_{AB}/V_{AB0} とはく離の中心位置 p_x の関係を図.4に示す.それぞれの曲線ははく離の大きさ a が 10mm (実線), 20mm (一点鎖線), 40mm (破線), 60mm (点線), 80mm (二点鎖線)を示している.はく離の位置 p_x や大きさ a が変化するにしたがって, DV_{AB}/V_{AB0} が変化することがわかる.ただし,はく離の位置 p_x や大きさ a が異なるにも関わらずポテンシャル変化比は全体でほぼ同じ値になる場合があり, DV_{AB}/V_{AB0} だけでは位置 p_x , 大きさ a を同定できない.これらを同定するためには情報量を増加させるため,他の電極間のポテンシャル変化比と組み合わせる必要があることがわかる.

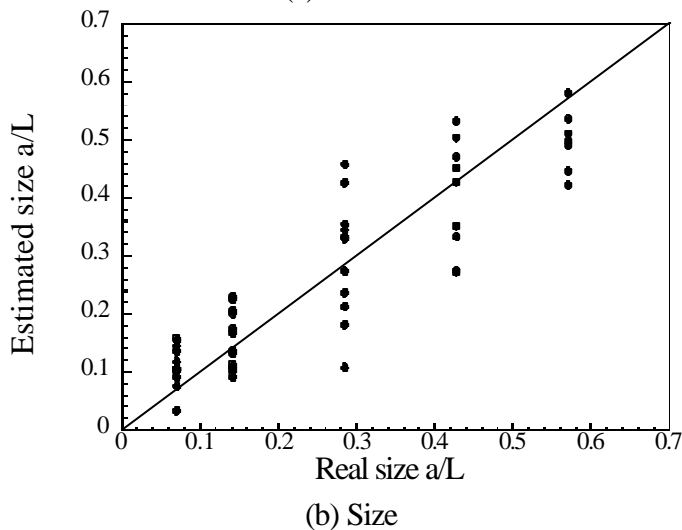
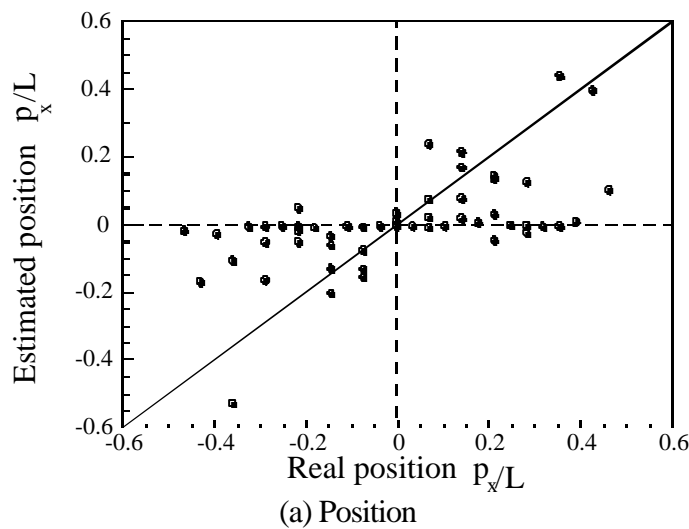


Fig. 5 Results of regression by quadratic polynomial (potential, 4 electrodes)

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 $DV_i/V_{i0}(i=AB, BC, CD)$ を解析した.それらを基に式(3)以降に代入し,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 $DV_i/V_{i0}(i=AB, BC, CD)$ 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.結果をそれぞれ図.5(a), (b)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.図.5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,大きさのそれぞれで 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.図.5(a), (b)からもわかるように,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.なお,試みに式(3)における多項式を3次多項式として同様に応答曲面を求め,はく離の位置,大きさを同定した結果を図.6(a), (b)に示した.

3次多項式の応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{ad}

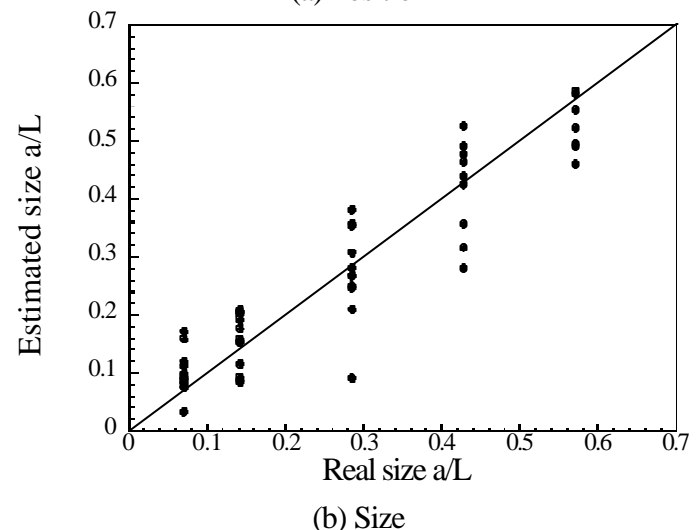
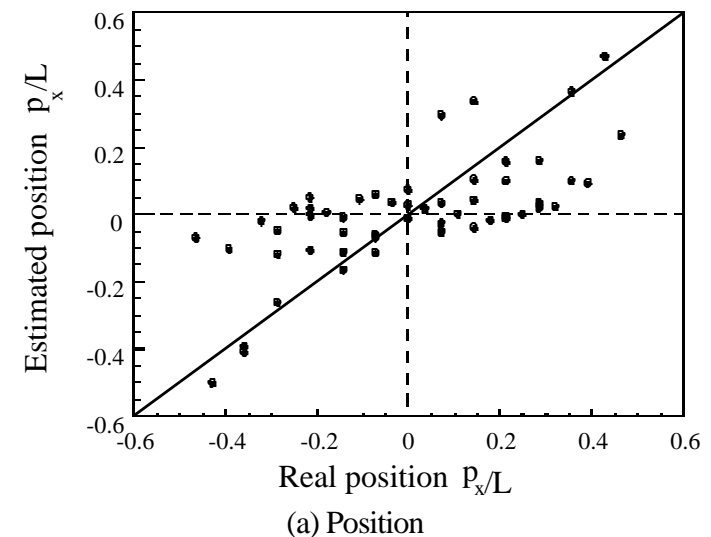


Fig. 6 Results of regression by cubic polynomial (potential, 4 electrodes)

は位置，大きさのそれぞれで 0.322，0.801 である．また，真の値と同定値の差の絶対値はそれぞれ 0.14，0.048 で，この試験片の場合，20mm，6.7mm である．2 次多項式と比較すると多少の改善は見られたものの，依然として誤差は大きかった．このような大きな誤差は情報の不足に起因していると考えられる．

(2) 5 電極の場合

同定のための情報を増やすために図.3(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 DV_i/V_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，図.5 と同様に応答曲面を求め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 DV_i/V_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．結果をそれぞれ図.7(a), (b)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

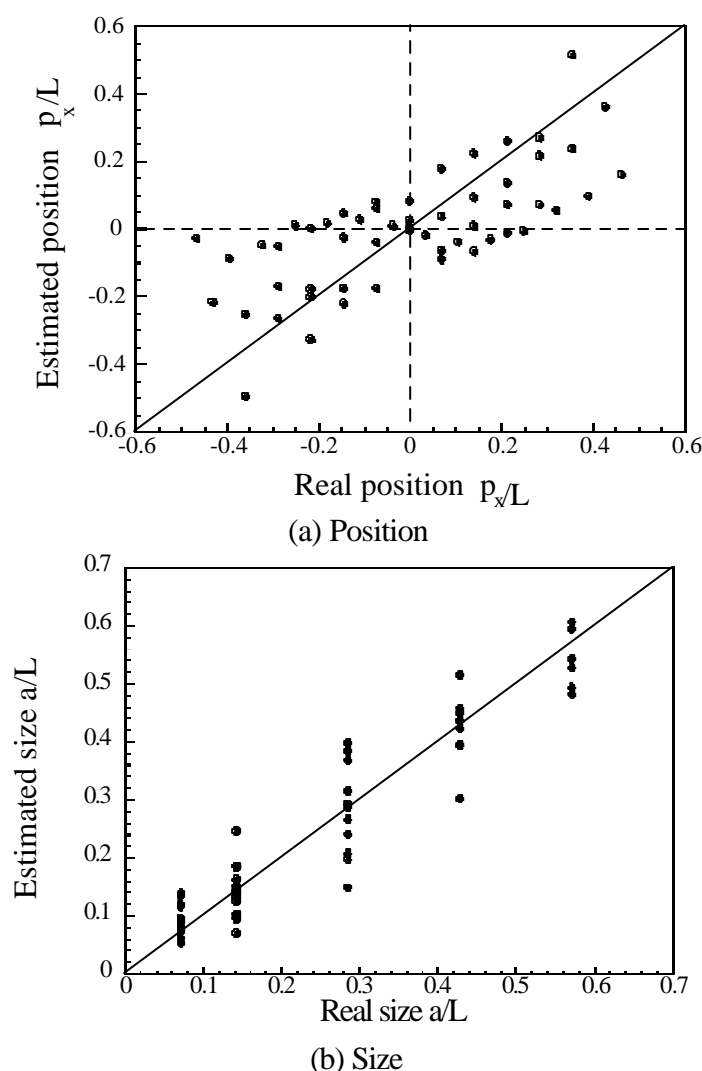


Fig. 7 Results of regression by quadratic polynomial (potential, 5 electrodes)

試験片の場合，19mm，5.8mm である．決定係数，誤差，図.7(a), (b)のいずれも 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いる．したがって，さらに電極を増やし，情報を増やすことによって精度向上が期待される．

5.2. 区間電気抵抗変化による同定

(1) 4 電極の場合

A, B, C, D の 4 電極を用いて，図.3(a)の電極 A から電極 B，電極 B から電極 C，電極 C から電極 D に電流を 3 通りのパターンで流すことで，試験片の電極区間ごとの部分的な電気抵抗変化を測定し，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．

AB間に電流を流し，はく離位置 p_x を $x=-65$ から 65，大きさ a を 10mm，20mm，40mm，60mm，80mm と変化させた場合の AB 間の電気抵抗変化 $DR_{AB}(=R_{AB}-R_{AB0})$ をはく離が存在しないときの初期電気抵抗 R_{AB0} で規格化した値 DR_{AB}/R_{AB0} とはく離の中心位置 p_x の関係を図.8 に示す．それぞれの曲線ははく離の大きさ a が 10mm(実線)，20mm(一点鎖線)，40mm(破線)，60mm(点線)，80mm(二点鎖線)を示している．また，はく離が存在しない試験片の AB 間に電流を流した場合の $x=40$ の断面での x 方向の電流密度 D_x を図.9 に示す．図中横軸 d は電極側表面からの厚さ方向の距離（深さ）である．図.8 から，電気抵抗の異方性に起因して，はく離が AB 間以外に存在する場合(図.8 の $x > -23$ mm 参照)であっても電極 AB 間の電気抵抗が変化していることがわかる．これは，導電率の異方性が大きいために，図.9 に示すように電流を流す電極間以外の領域にも電流が流れるために起こると考えられる．したがってある電極間のみ電流を流し，その電気抵抗変化からはく離の位置 p_x や大きさ a を特定することは不可能である．そこで，はく離の位置 p_x と大きさ a を検出するには，AB 間，BC 間，CD 間にそれぞれ電流を流し，それらすべての電気抵抗変化を利用することが必要になる．

5.1 節と同様に電気抵抗変化比 DR_i/R_{i0} ($i=AB, BC, CD$) を解析し，2 次の応答曲面を求めた．応答曲面の適応度を調査するために，応答曲面を求める際に用いた測定点ではく離の位置と大きさを同定し，真の位置，大きさと比較した図をそれぞれ図.10(a), (b)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．図.10 中，印は測定した 54 点を応答曲面に代入した値である．

自由度調整済み決定係数 R_{ad}^2 は位置，大きさでそれ

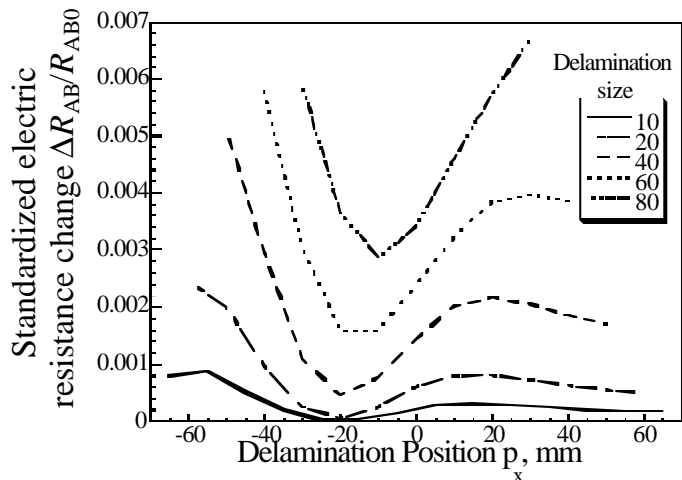


Fig. 8 Relationship between delamination position and electric resistance change

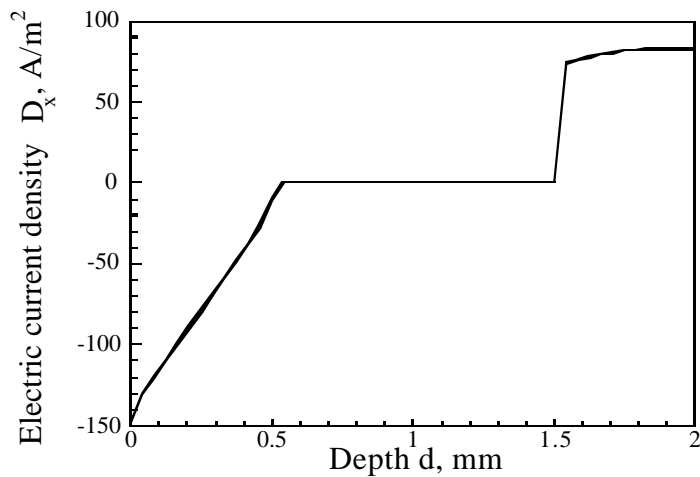
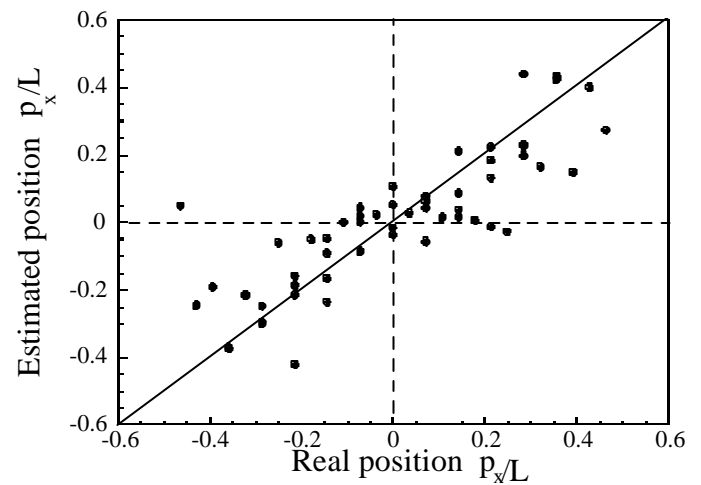


Fig. 9 Electric current density

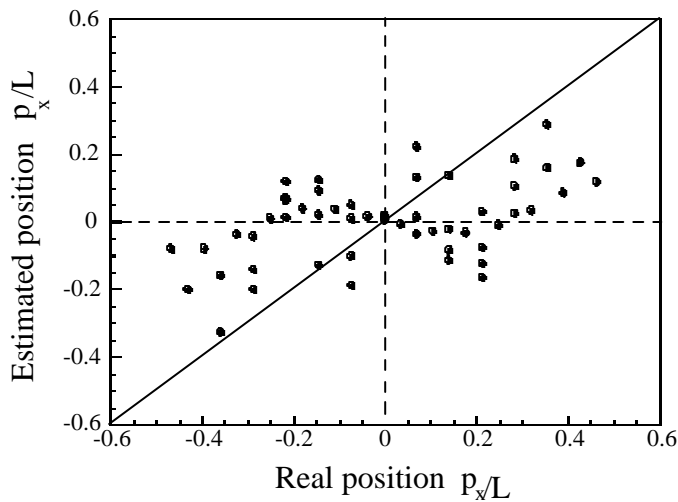
の絶対値はそれぞれ 0.18 , 0.028 で、この試験片の場合、25mm , 3.9mm である。はく離の位置に関しては 5 . 1 節の方法よりも精度が向上している。これは、図.4 でははく離の大きさが異なる場合でも DV_i/V_{i0} が同じ値になることがあるが、図.8 では DR_i/R_{i0} が同じ値になることはないためと考えられる。

(2) 5 電極の場合

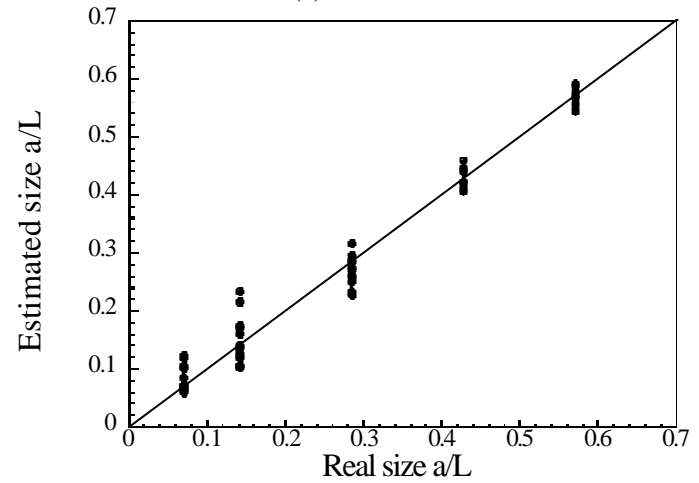
さらに精度を上げるために A , B , C , D , E の 5 電極を用いた 4 情報を用いる。図.3(b)の電極 A から電極 B , 電極 B から電極 C , 電極 C から電極 D , 電極 D から電極 E に電流を 4 通りのパターンで流す。



(a) Position



(a) Position

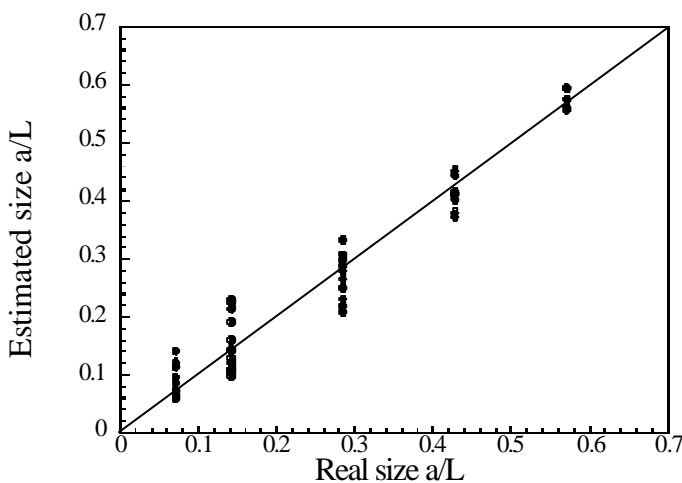


(b) Size

Fig. 11 Results of regression by quadratic polynomial (resistance, 5 electrodes)

4 電極と同様に電気抵抗変化比 DR_i/R_{i0} ($i=AB, BC, CD, DE$) を解析し、2 次の応答曲面を求めた。応答曲面を求める際に用いた測定点ではく離の位置と大きさを同定し、図.10 と同様の比較を実施した結果をそれぞれ図.11(a) , (b) に示す。

得られた応答曲面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 0.625 , 0.966 である。また、真の値と応答曲面からの同定値の差の絶対値はそれぞれ 0.10 , 0.023 で、この試験片の場合、はく離位置、大きさでそれぞれ 14mm , 3.3mm である。区間ごとの電気抵抗を用いたことおよび情報数を増加したことで推



(b) Size

Fig. 10 Results of regression by quadratic polynomial (resistance, 4 electrodes)

測り 0.139 , 0.952 である。また、真の値と同定値の差

定精度の大幅な向上が認められる。区間ごとの電気抵抗変化には測定に切り替えスイッチなどが必要となり、複雑化するが、はく離位置と大きさの推定精度は向上することがわかる。なお、試みに式(3)における多項式を3次多項式として同様に応答曲面を求めた際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0.648, 0.991であった。2次多項式と比較すると多少の改善はあるものの、その差は小さい。

位置 p_x の同定に関しては大きさ a の同定と比較して誤差が大きい。中でもはく離の大きさが10mmの場合に大きな誤差があり、はく離の大きさが小さい場合の位置は十分な精度で同定できていない。

以上のはく離位置、大きさの推定で応答曲面を用いた電気抵抗変化 - はく離位置および大きさ関係推定方法が有効であることが明らかになった。このことから実機の知的構造のように大規模 FEM 解析や実験で逆問題の関係を近似的に求める場合に応答曲面法は簡便で有効であることがわかる。ただし、応答の関数形については問題ごとの考慮が必要と思われる。

5. 結 言

以上、有限要素法を用いて電気ポテンシャル法による CFRP の層間はく離検出手法におけるはく離の位置、大きさの同定について応答曲面法の適用を行い、有効性の検討を実施した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 電極数を5つに増加し、推定に必要な情報を増加することでポテンシャル変化と区間ごとの電気抵抗変化の両者ではく離の位置と大きさの同定精度向上が可能である。
- (2) 設置可能電極数が限定されている場合は、区間ごとの電気抵抗変化比を測定する方法が高精度ではく離き裂の位置と大きさを同定できる。
- (3) 応答曲面法を用いることで、5電極間の区間電極電気抵抗変化からはく離き裂の位置の決定係数が0.625、大きさの決定係数が0.966の実用的精度の同定が簡単に可能であることを示した。

参考文献

- (1) 守屋一政, 遠藤隆, 日本航空学会誌, 36-410, (1988), 37.
- (2) C. N. Owston, Materials Evaluation, 34-11, (1976), 237.
- (3) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 日本機械学会論文集, A-51-467, (1985), 1818.
- (4) 阪上隆英, 久保司郎, 大路清嗣, 山本賢治, 中塚

顕二, 日本機械学会論文集, A-56-521, (1990), 27.

- (5) 多田直哉, 坂之上悦典, 北村隆行, 大谷隆一, 日本機械学会論文集, A-56-522, (1990), 259.
- (6) 轟 章, 小林英男, 松浦克也, 日本機械学会論文集, A-60-574, (1994), 1458.
- (7) 轟 章, 小林英男, 松浦克也, 日本複合材料学会誌, 21-3, (1995), 89.
- (8) 轟 章, 鈴木洋之, 島村佳伸, 日本複合材料学会誌, 24-5, (1998), 176.
- (9) 轟 章, 鈴木洋之, 小林英男, 中村春夫, 島村佳伸, 日本機械学会論文集, A62-622, (1998), 1654.
- (10) R. H. Myers, D. C. Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons. Inc., (1995)