

## 研究論文

電気抵抗変化法の CFRP 積層板の知的はく離検出法における  
はく離形状の影響解析轟 章<sup>\*1</sup>, 田中 美帆<sup>\*2</sup>, 島村 佳伸<sup>\*1</sup>, 小林 英男<sup>\*1</sup>

(2002年11月11日受付)

Analysis of the Effect of the Configuration of the Delamination Crack  
on Delamination Monitoring with Electric Resistance Change MethodAkira TODOROKI,<sup>\*1</sup> Miho TANAKA,<sup>\*2</sup> Yoshinobu SHIMAMURA<sup>\*1</sup> and Hideo KOBAYASHI<sup>\*1</sup>

(Received November 11, 2002)

Since delaminations of composite laminates are usually invisible or difficult to be detected by visual inspections, the delamination causes low reliability of primary structures. In order to improve the low reliability, automatic systems for delamination identifications in-service are desired. The present study employs an electric resistance change method for detections of the delaminations. Although the method is effective to monitor the delamination cracks, the method requires many experiments to solve inverse problems. Since the experiment cost is high, an analytical method for preparation of the data sets of the electric resistance changes is desired. In practical delamination, however, usually includes a matrix cracking. In the present study, therefore, the effect of the matrix cracking on the electric resistance changes between the electrodes is investigated with FEM analyses. As a result, it can be concluded that the simple calculations using a straight delamination crack model are enough for obtaining the data set of electric resistance changes to calculate the response surfaces.

## 1. 緒 論

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、容易に目視不可能な層間はく離が発生し、圧縮強度・剛性が低下するため、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。これまでに CFRP 積層板の層間はく離検出手法の一つとして電気抵抗変化法が提案されており、その有効性が実験的・解析的に広く研究されている<sup>1-9)</sup>。また著者らは積層板に寸法や形状の異なるはく離を作成し、電気抵抗変化率とはく離位置・寸法の関係を応答曲面法による逆問題解析を行うことによって、はく離同定

が可能であることを実験的・解析的に検討してきた<sup>10-15)</sup>。ただし本手法を実構造に適用する場合には、コスト削減のため、実験による電気抵抗変化率の測定は最小限に抑制し、FEM 解析によって、同定用の応答曲面を作成することが望まれる。その際に、実際の積層板には層間のはく離だけでなく、マトリクス割れを伴うはく離位置の遷移による様々な形状のはく離が存在するが、それら全ての形状を考慮して逆問題用の応答曲面を作成するのはコスト的に困難である。そこで、より簡便にはく離の同定を行うために、最も単純なはく離形状のモデルである層間はく離だけによる FEM 解析結果を用いて、はく離同定用の応答曲面を作成することが望まれる。そこで本研究では、マトリクス割れを伴う形状が異なるはく離の FEM 解析を実施し、層間はく離による FEM 解析結果と比較し、はく離形状が測定される電気抵抗変化率に及ぼす影響を解析的に評価した。さらに、層間はく離だけの FEM 解析結果に基づいて同定用の応答曲面を作成し、実はく離形状を模擬したマトリクス割れを伴うはく離の解析結果を用いて同定を実施することにより、

<sup>\*1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科 (152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Graduate School, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

<sup>\*2</sup> 東京工業大学大学院

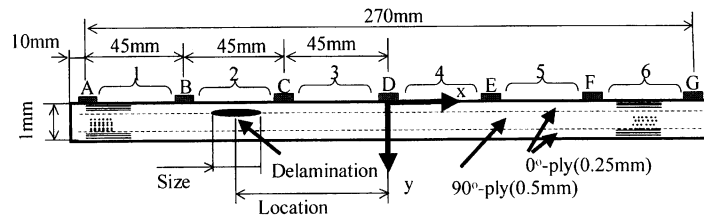


Fig. 1 Configuration of specimen with 7 electrodes [0/90]s.

Table 1 Conductivity ratio  $\sigma$ .

$V_f$	$\sigma_{90}/\sigma_0$	$\sigma_l/\sigma_0$	$\sigma_0 [m^{-1}\Omega^{-1}]$
0.621	$3.71 \times 10^{-2}$	$3.77 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^3$

実はく離形状が本手法を用いたはく離同定精度に及ぼす影響を解析的に検討した。

## 2. 解析

### 2.1 解析方法

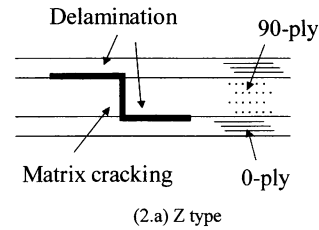
本研究では汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いて解析を行った。解析対象の CFRP 積層構成は [0/90]s で、Fig. 1 のような 2 次元梁モデルを用いた。試験片形状は長さ 290 mm × 厚さ 1 mm であり、電極間隔は 45 mm である。解析には四角形四節点要素を用い、縦 0.0625 mm × 横 0.25 mm の大ききでメッシュ分割を行った。隣り合う 2 つの電極の一方を 0[V] に固定し、他方の電極から 30[mA] の電流を流して、はく離による各電極間の電気抵抗変化率  $\Delta R_i/R_0$  ( $i=1\sim 6$ ) を計算した。電気抵抗変化率ははく離が存在する状態の電極間電位差を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。

Table 1 に解析に用いた導電率を示した<sup>15)</sup>。ただし、繊維体積含有率  $V_f$ 、0° 方向導電率  $\sigma_0$ 、90° 方向の導電率  $\sigma_{90}$ 、厚さ方向の導電率  $\sigma_l$  である。

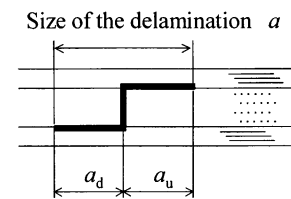
#### 2.1.1 電気抵抗変化率の規格化

解析で得られた電気抵抗変化率は、層間はく離の位置と寸法の両方の情報を有するため、位置同定精度が向上しない<sup>16)</sup>。そこで電気抵抗変化率  $\Delta R_i/R_0$  ( $i=1\sim 6$ ) を 6 次元ベクトルと見なし、式 (1) で示すようにベクトルの大ききで規格化し<sup>16)</sup>、 $\Delta r_i/r_0$  ( $i=1\sim 6$ ) を用いて同定を行うものとする (詳細については参考文献 16) 参照)。

$$\Delta r_i/r_0 = \frac{\Delta R_i/R_0}{\sqrt{\sum_{k=1}^6 \Delta R_k/R_0}} \quad (i=1\sim 6) \quad (1)$$



(2.a) Z type



(2.b) Inverse-Z type

Fig. 2 Configuration of delamination with matrix cracking.

#### 2.1.2 はく離形状

実構造の積層板においては、マトリクス割れを伴う様々な形状のはく離が発生する。先にも述べたように、はく離同定用応答曲面作成のために、FEM 解析では層間はく離だけ (マトリクス割れなし) の場合の電気抵抗変化率の解析データを用いることが望まれている。同定用の応答曲面作成のための層間はく離は、Fig. 1 に示すように電極作成面側の 0°層と 90°層の間に電気絶縁状態を作成したものを用いた。電気絶縁状態ははく離部分において節点を二重に定義し連結をはずすことで作成している。本研究では電気抵抗変化率測定用の電極は実構造の内部に作成することを想定している。そのためはく離を発生させる衝撃は主に電極貼り付け面と逆側の実構造外部から受けることを考え、層間はく離は電極に近い方の層間に作成するものとする。寸法は 5, 10, 20, 30, 40 mm の 5 種類を用い、各寸法において 5 mm 間隔の位置で作成し電気抵抗変化率の計算を行った。層間はく離だけの場合の総計は 263 点の電気抵抗変化率のデータを FEM 解析した。

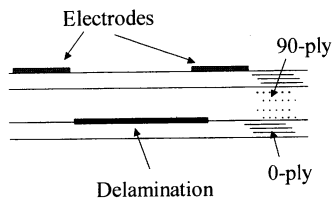


Fig. 3 Configuration of downside delamination crack.

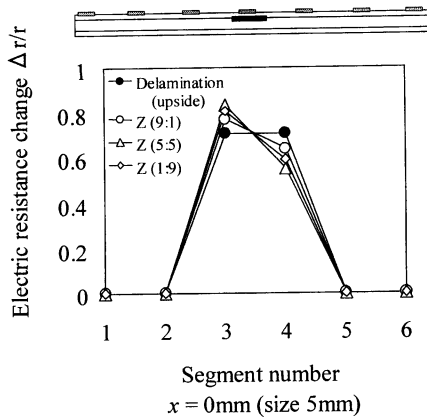


Fig. 4 Effect of delamination configuration on the electric resistance changes.

次に、はく離形状による影響評価を行うために、マトリクス割れを伴う実のはく離を Fig. 2 の 2 種類の形状のはく離で模擬した。本研究では、マトリクス割れを挟んで左上に層間はく離を作成するものを Z 型、右上に層間はく離を作成するものを逆 Z 型と定義している。また実際に発生するはく離は、マトリクス割れを挟む上下の層間はく離の比率が様々である。そこでマトリクス割れの上部のはく離寸法を  $a_u$ 、下部のはく離寸法を  $a_d$  とし、比率を  $a_u : a_d = 9 : 1, 5 : 5, 1 : 9$  と変化させて解析を行った。また本稿に用いる直交積層板においては発生することは少ないが、はく離形状の極端な例として電極貼り付け面と逆側の 0°層と 90°層の間に層間はく離を作成した場合 (Fig. 3) についても解析を行った。

## 2.2 解析結果

### 2.2.1 はく離形状による電気抵抗変化率の差異

はく離形状による電気抵抗変化率への影響を検討するため、層間はく離と Z 型 ( $a_u : a_d = 9 : 1, 5 : 5, 1 : 9$  の 3 種類) のはく離をそれぞれ試験片に同位置・同寸法にて作成し、それぞれの電気抵抗変化率を比較し、その結果を Fig. 4, 5 に示した。ただし、ここで Z 型、逆 Z 型の

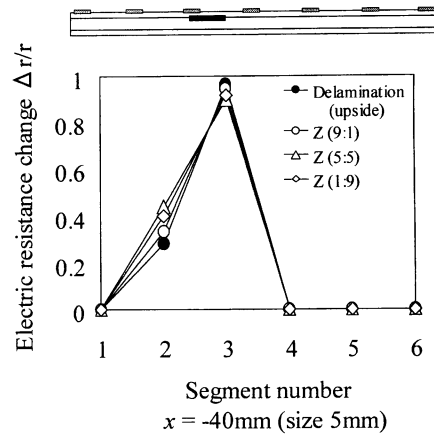


Fig. 5 Effect of delamination configuration on the electric resistance changes.

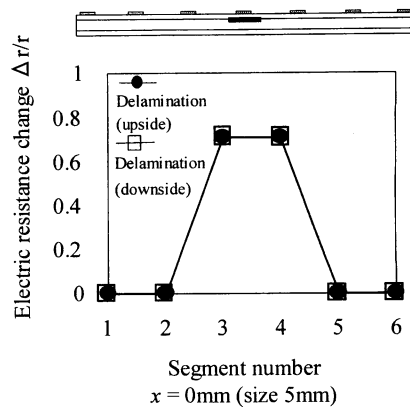


Fig. 6 Comparison between results of upside delamination and downside delamination.

位置と寸法は、図に示すようにはく離の投影長さで中央位置である。横軸が電極区間番号で縦軸が規格化後の電気抵抗変化率  $\Delta r_i / r_{i0}$  ( $i=1 \sim 6$ ) である。Fig. 4, 5 に示されるように試験片のどの部分においても、はく離形状が異なると電気抵抗変化率が異なっている。また Fig. 4, 5 において、層間はく離の電気抵抗変化率と比較して最も電気抵抗変化率の差異が大きかったのは  $a_u : a_d = 5 : 5$  のはく離であった。

次に、極端な例として Fig. 1 の層間はく離と Fig. 3 の電極と逆側に作成した層間はく離との比較を行った。Fig. 4 ( $x=0$  mm), Fig. 5 ( $x=-40$  mm) と同位置・同寸法での層間はく離の電気抵抗変化率をそれぞれ Fig. 6, 7 に示した。Fig. 6, 7 に示されたように、試験片のど

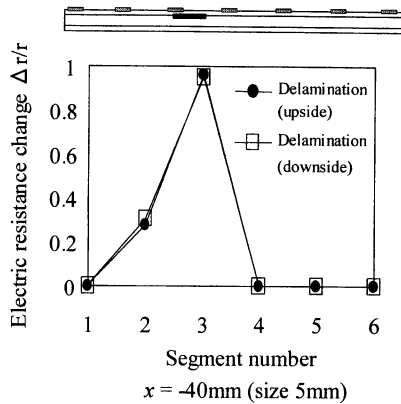


Fig. 7 Comparison between results of upside delamination and downside delamination.

の部分であっても、それぞれのはく離による電気抵抗変化率はほぼ等しく、はく離を作成する層間の違いによる電気抵抗変化率の差異はないことがわかる。以上から、電気抵抗変化率は層間のはく離の厚さ方向の作成位置ではなく  $90^\circ$  層のマトリクス割れの有無によって大きく差異が生じることが明らかになった。これはマトリクス割れが存在する場合に、電極間の電流を最も大きく妨げるためである。

Fig. 4~7の結果により、マトリクス割れの無い層間のはく離の結果と比較して最も差異の大きいのは  $a_u : a_d = 5 : 5$  の形状のマトリクス割れを伴うはく離であった。そこで実のはく離を模擬したマトリクス割れを伴うはく離形状の同定精度への影響評価を行うために、 $a_u : a_d = 5 : 5$  の形状のZ型・逆Z型のマトリクス割れを伴う2種類のはく離の比較を実施した。ここでは  $a_u : a_d = 5 : 5$  の形状のZ型と逆Z型の解析結果と、Fig. 1で示した層間のはく離だけの場合との電気抵抗変化率の比較を実施した。電気抵抗変化率の解析結果の中で、電気抵抗変化率の差異の特に大きい例として、はく離位置が30mmと35mmの場合で、はく離寸法が5mmのはく離と10mmのはく離結果を比較してFig. 8, 9に示す。Fig. 8, 9に示すように、マトリクス割れの有無やZ型・逆Z型の形状の違いによって、同位置・同寸法のはく離であっても電気抵抗変化率は異なる。以上のように、電気抵抗変化率に対してマトリクス割れの影響は無視できないと判断される。

そこで、次節で電気抵抗変化率の差異が同定誤差に及ぼす影響を評価するため、層間のはく離だけの解析結果を用いて作成した応答曲面を用いて、実のはく離のようなマ

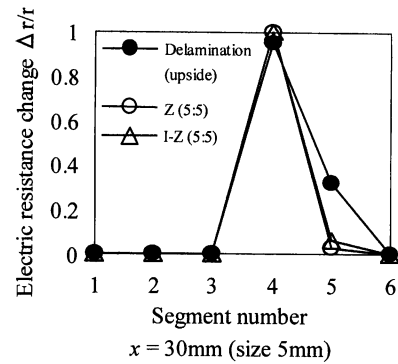


Fig. 8 Difference of electric resistance changes due to the configuration of delamination cracks.

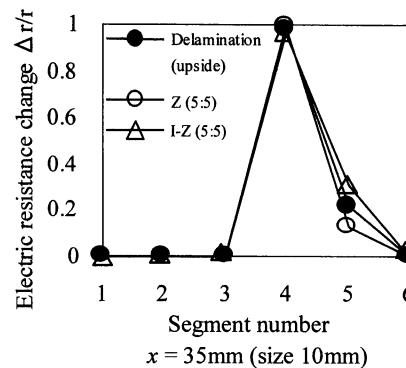


Fig. 9 Difference of electric resistance changes due to the configuration of delamination cracks.

トリクス割れを伴うはく離の同定を行う際のはく離同定誤差を検討する。

### 3. 同定誤差への影響

#### 3.1 応答曲面法

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 경우가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、応答曲面法には式(2)のように2次多項式を用いる。

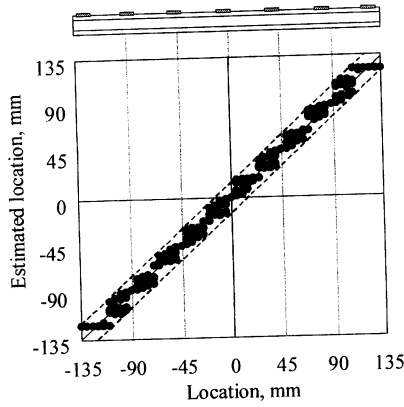


Fig. 10 Results of estimated delamination location.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (n=6) \quad (2)$$

$\beta$  は回帰係数,  $x$  は説明変数,  $y$  は被説明変数である。

ここで  $x_i x_j = x_{ij}$  と置き換えることで, (2) 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  $\beta$  を推定することができる。ここで,

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\beta = \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{Bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix}$$

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  $\beta$  の不偏推定量  $b$  は次式となる。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4)$$

応答曲面の適合度を表す自由度調節済み決定係数  $R_{adj}^2$  は次式で表される。

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{S_E}{S_{yy}} = 1 - \frac{S_E / (n - k - 1)}{S_{yy} / (n - 1)} \quad (5)$$

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

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。自由度調節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, 応答曲面の被説明変数を層間はく離の位置・寸法の2種類とする。層間はく離を作成することに

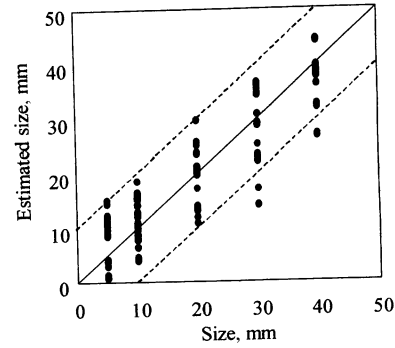


Fig. 11 Results of estimated delamination size.

より得られた 263 点のはく離と電気抵抗変化率の関係をを用いて応答曲面を作成した。はく離位置同定用応答曲面の説明変数には規格化した後の電気抵抗変化率  $\Delta r_i / r_{i0}$  ( $i=1 \sim 6$ ) を用い, はく離寸法同定用応答曲面には電気抵抗変化率  $\Delta r_i / r_{i0}$  ( $i=1 \sim 6$ ) と規格化に用いたベクトルの大きさの計 7 つを用いた。

### 3.2 マトリクス割れを伴うはく離の同定手順

前節ではく離形状により電気抵抗変化率が影響を受けることが明らかになったことから, ここではマトリクス割れを伴うはく離の電気抵抗変化率がはく離同定精度に及ぼす影響の評価を行う。評価方法としては下記の手順で行う。

(1) 作成した寸法 5, 10, 20, 30, 40 mm の 263 点の層間はく離だけの FEM 解析結果を用いて, はく離位置・寸法同定用の応答曲面をそれぞれ作成する。

(2) FEM 解析を実施して, マトリクス割れを伴う  $a_0 : a_6 = 5 : 5$  の Z 型・逆 Z 型のはく離による電気抵抗変化率を解析する。

(3) 得られた解析結果の電気抵抗変化率を層間はく離だけの解析結果から作成した応答曲面に代入し, はく離の位置と大きさの同定を行う。

(4) 得られた同定結果を FEM の解析条件のはく離位置と大きさと比較して誤差評価を行う。

### 3.3 層間はく離による応答曲面の同定結果

層間はく離だけの電気抵抗変化率の解析結果により応答曲面を作成し, 層間はく離の位置・寸法を同定した結果を Fig. 10, 11 に示した。横軸が解析に用いた実際の層間はく離の位置・寸法で, 縦軸が同定結果である。Fig. 10 が位置の同定結果で自由度調節済み決定係数は  $R_{adj}^2 = 0.994$ , Fig. 11 が寸法の同定結果で  $R_{adj}^2 = 0.807$  であった。

図中, 対角線上の結果が正確な同定を意味している。

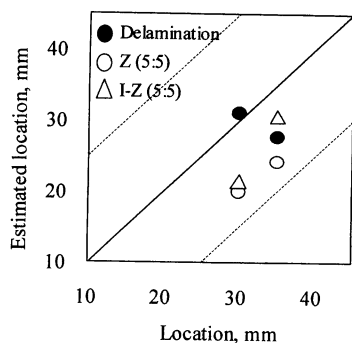


Fig. 12 Results of estimated location in the case that maximum difference of electric resistance change was observed due to matrix cracking.

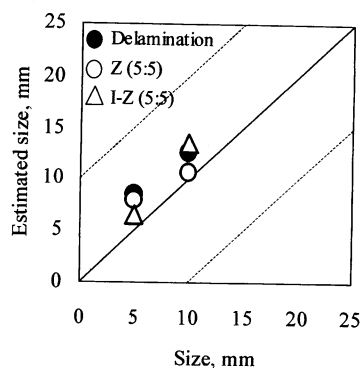


Fig. 13 Results of estimated size in the case that maximum difference of electric resistance change was observed due to matrix cracking.

Fig. 10 の位置同定結果において、実際のはく離位置から 15 mm の誤差部分を点線で示した。全てのはく離は誤差範囲 15 mm 以内で同定されており、ほとんどののはく離は誤差 10 mm 以内で同定可能であった。また、Fig. 11 の寸法同定結果では実際のはく離寸法から誤差 10 mm の部分を点線で示した。ほぼ全てのはく離が誤差 10 mm 以内で同定可能であった。前報と同様に電気抵抗変化法により応答曲面を用いて、位置・寸法ともに精度良く同定可能であることがわかる<sup>16)</sup>。

#### 3.4 マトリクス割れを伴うはく離の同定結果

層間のはく離により得られた応答曲面を用いてマトリクス割れを伴うはく離の同定を行う。前節の Fig. 8, 9 で用いた電気抵抗変化率の差異が大きい  $x=30$  mm (寸法 5 mm),  $x=35$  mm (寸法 10 mm) での Z 型・逆 Z 型のはく離をそれぞれ応答曲面に代入し、同定した結果を Fig. 12, 13 に示す。同位置・寸法での層間のはく離の結果も同時に図に●印で示した。横軸が解析に用いた実際のはく離の位置・寸法で、縦軸が同定結果である。Fig. 12 の位置同定結果において、層間のはく離だけの同定結果 (Fig. 10 参照) から得られた同定誤差範囲の 15 mm の部分を点線で示す。同様に、層間のはく離だけの同定結果 (Fig. 11 参照) から得られた同定誤差範囲 10 mm の部分を点線で Fig. 13 中に示している。Fig. 12, 13 に示すように同寸法・同位置のはく離であっても Z 型、逆 Z 型のはく離形状に依存して同定誤差が異なることがわかる。しかし、位置・寸法ともに、はく離形状 (Z 型、逆 Z 型) による同定誤差は層間のはく離の同定誤差の範囲内であり、マトリクス割れを伴う Z 型、逆 Z 型のはく離であっても、層間のはく離だけの解析結果から求めた応答曲面で同定可能であることが明らかになった。

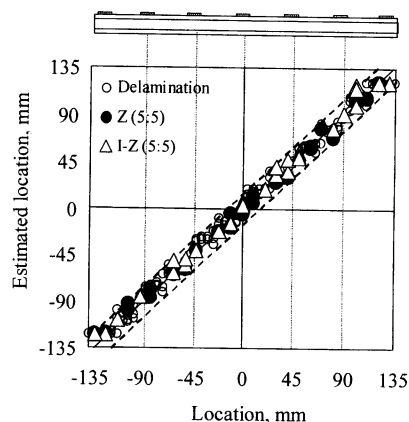


Fig. 14 Results of estimated location of all cases of delamination location and delamination size including matrix cracking.

次に、全体の同定誤差を判断するため、5, 10, 20, 30, 40 mm の 5 種類の各寸法において任意に 6 点ずつ計 30 点のはく離位置を選択し、Z 型・逆 Z 型のはく離を作成して、Fig. 12, 13 と同様に層間のはく離による応答曲面を用いて同定を行った。その結果を Fig. 14, 15 に示した。Z 型・逆 Z 型の同定結果とともに、応答曲面の作成に用いた層間のはく離の同定結果を○印で示す。Fig. 14, 15 に示すように、はく離形状によって同定結果が異なるが、Z 型・逆 Z 型の全ての結果は層間のはく離により作成した応答曲面の誤差範囲内であることが明らかである。よって、はく離形状に依存して得られる電気抵抗変化率は変化するが、本手法の応答曲面によるはく離位置・寸法の同定においては、応答曲面のロバスト性が高く、この差

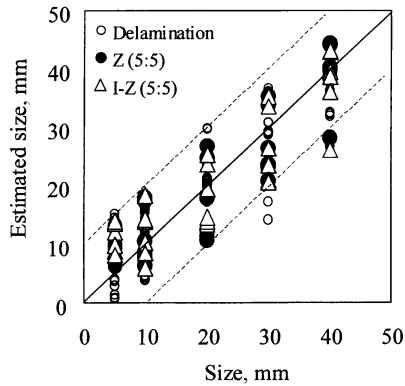


Fig. 15 Results of estimated size of all cases of delamination location and delamination size including matrix cracking.

異の影響は微小であり、層間はく離だけで作成した応答曲面を用いて、マトリクス割れを伴う実はく離の同定も可能であることが明らかになった。以上の結果から、直交積層板の梁形状の試験片においては、電気抵抗変化率に影響があるマトリクス割れを伴う実はく離の場合でも、層間はく離だけの簡便なモデル化による FEM 解析結果の電気抵抗変化率を用いて作成した応答曲面により作成した応答曲面で、実はく離を模擬したマトリクス割れを伴うはく離の同定を実施してもその同定精度は誤差範囲にあり、FEM 解析は層間はく離だけのモデル化で十分である。

#### 4. 結 言

電気抵抗変化法において、マトリクス割れを伴う実層間はく離の影響を検討することを目的として、直交積層板の梁試験片のはく離の FEM 解析を実施した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) マトリクス割れを伴う層間はく離の場合、はく離だけでモデル化した FEM 解析結果と電気抵抗変化率は異なる。

(2) はく離形状の Z 型、逆 Z 型の形状の差異に起因して電気抵抗変化率は異なる。

(3) 電気抵抗変化率に影響がある場合においても、層間はく離だけの FEM 解析結果の電気抵抗変化率を用いて作成した応答曲面を用いて、実はく離を模擬したマトリクス割れを伴うはく離の同定を実施してもその精度は作成した応答曲面の誤差範囲にあり、FEM 解析は層間はく離だけのモデル化で十分である。

#### 参 考 文 献

- 1) 守屋一政, 遠藤 隆: 日本航空宇宙学会誌, **36**, 410 (1988), 139-146.
- 2) C.N. Owston: *Materials Evaluation*, **34**, 11 (1976), 237-244.
- 3) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英: 日本機械学会論文集 (A 編), **51**, 467 (1985), 1818-1827.
- 4) 阪上隆英, 久保司郎, 大路清嗣, 山本賢治, 中塚頭二: 日本機械学会論文集 (A 編), **56**, 521 (1990), 27-32.
- 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 編), **56**, 522 (1990), 259-264.
- 6) P.W. Chen & D.D.L. Chung: *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 3 (1995), 816-818.
- 7) X. Wang & D.D.L. Chung: *Polymer Composites*, **18**, 6 (1997), 692-700.
- 8) J.C. Abrey, Y.K. Choi, A. Chateuminois, B. Dalloz & G. Giraud: *Composite Sci. Technol.*, **61** (2001), 855-864.
- 9) R. Schueler, S.P. Joshi & K. Schulte: *Composite Sci. Technol.*, **61** (2001), 921-930.
- 10) 轟 章, 小林英男, 松浦克也: 日本機械学会論文集 (A 編), **60**, 574 (1994), 1458-1463.
- 11) 轟 章, 小林英男, 松浦克也: 日本複合材料学会誌, **21**, 3 (1995), 89-95.
- 12) 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 (A 編), **64**, 622 (1998), 1654-1659.
- 13) 轟 章, 鈴木洋之, 島村佳伸: 日本複合材料学会誌, **24**, 5 (1998), 176-182.
- 14) 轟 章, 鈴木洋之, 島村佳伸: 日本機械学会論文集 (A 編), **65**, 634 (1999), 1330-1336.
- 15) A. Todoroki, M. Tanaka & Y. Shimamura: *Composite Sci. Technol.*, **62**, 5 (2002), 619-628.
- 16) A. Todoroki, M. Tanaka & Y. Shimamura: *Composite Sci. Technol.* (印刷中).