

CFRP 平板の埋没剥離同定への電気抵抗変化法の適用

轟 章* 田中雄樹** 島村佳伸*

Electric Resistance Change Method for Identification of Embedded Delamination of CFRP Plates

by

Akira TODOROKI*, Yuuki TANAKA** and Yoshinobu SHIMAMURA

In the present study, an electric resistance change method is adopted for the identifications of location and size of the embedded delaminations. Indentation tests are conducted to create embedded delamination cracks in CFRP plates. Two lines and eight columns of electrodes are mounted on the plate surface for measurements of electric resistance changes due to delamination creations. Response surface methodologies are applied to obtain the relation between the delaminations and measured electric resistance changes. The effect of temperature change is experimentally measured using the plate specimen. As a result, the method can successfully estimate the location and size of embedded delaminations, and the effect of the temperature change is neglectable by using compensation for temperature change.

Key Words: CFRP, Delamination, Electric Resistance Change, Smart Structure

1 緒 言

CFRP 積層板は比強度・比剛性などの力学的特性が従来金属材料と比較して優れるため、航空宇宙分野などの輸送機器の構造材料に適用されている。しかし、積層構造であるため層間強度が弱く、工具落下など面外からの負荷で容易に層間剥離が生じる。層間剥離は目視発見が困難であり、積層板の圧縮強度・圧縮剛性を著しく低下させる。CFRP 積層構造物の信頼性確保のために層間剥離を現場で容易に検出する知的構造の開発が要求されている。

著者らは、炭素繊維の導電性を利用し、層間剥離で生じる CFRP 積層板内部の電気抵抗変化を積層板表面に作成した複数電極を用いて測定することで、層間剥離位置と寸法を定量的に同定する知的構造開発を梁試験片の貫通剥離で実験的に実施した^{1),2)}。これは炭素繊維をセンサとして利用することで、光ファイバセンサーなどの異物を新たに埋め込むことによる強度低下や成型法の問題もなく、実際は電極を構造表面に作成するだけであるため既存構造に容易にかつ安価に適用可能である。

これまでに CFRP 梁試験片の貫通き裂を用いて剥離位置と寸法の同定実験を実施し、電気抵抗変化法が有効であること、高同定精度は表面層 0°方向に 5 個以上電極を配置すると得られること、また直交及び擬似積層の積層板を用いて積層構成の影響を実験的に検討し、積層構成ごとに応答曲面³⁾を作成すれば電気抵抗変化で剥離検出が可能であることを実証している²⁾。しかし、実機では埋没剥離が発生し、電気抵抗変化法のこの実機剥離への有効性は検証されていない。そこで本研究では、梁試験

片で得られた結果から出力変化の大きい直交積層の平板試験片に対して、改善した電気抵抗変化法を提案し、圧子押し込みによる実埋没剥離を発生させて剥離の位置と寸法の同定実験を実施し、同定問題に対する本手法の有効性を実験的に実証した。加えて実機環境で重要な、測定環境温度が及ぼす影響を実験的に検討した。

2 試験片および実験方法

2.1 試験片

本実験で用いた材料は、三菱レイヨン製一方方向 CFRP プリプレグ TR340M150ST である。これを 1.1MPa × 130 × 1h の成型条件でホットプレスにより [0₂/90₂]_S に積層した。これから 0°方向長さ約 200mm、90°方向長さ 105mm の試験片を作成した。厚さは約 1.4mm である。試験片寸法を図 1 に示す。

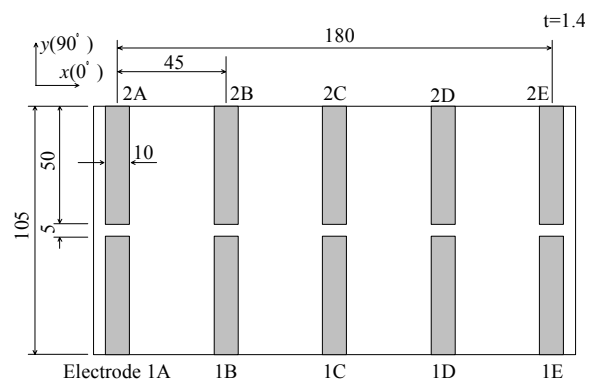


Fig.1 Specimen configuration

+ 原稿受理 平成 年 月 日 Received

* 正 会 員 東京工業工学部機械宇宙学科 〒152-8552目黒区大岡山2-12-1, Dept. of Mechano-aerospace.Eng. Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552

** 東京工業大学大学院 Graduate student of Tokyo Institute of Technology

層間剥離発生による試験片の電気抵抗変化を測定するため、試験片の片側表面に電極を作成した。電極は梁試験の結果に基づき、表面層 0°方向に 5 列配置し、90°方向には 2 行とした。したがって電極数は試験片 1 枚につき 10 個となる。電極は積層板成型時に積層板表面に厚さ 0.02mm の銅箔を圧着し一体成型した。電極を試験の片面だけに作成しているのは、航空宇宙機器などの薄板シェル構造物の内面のみに電極を配置して、層間剥離を検出することを想定しているためである。

また、層間剥離の位置を表す座標 x, y を図 1 のように定義する ($0 \leq x \leq 180\text{mm}$, $0 \leq y \leq 105\text{mm}$)。

2.2 剥離作成方法

平板試験片に対して、図 2 に示す圧子押込方式の治具を用いて層間剥離を作成した。この治具を使用することで、作成する剥離位置を自由に制御可能である。剥離寸法は治具の直径を変化させることで制御可能であり、 $\phi = 10, 15, 30, 50\text{mm}$ の 4 種類の治具を使用した。また、一般に薄板 CFRP 積層板に面外衝撃荷重が負荷される場合、負荷面とは逆側面近くに層間剥離が発生する。そこで、薄板シェル構造の外側からの衝撃により、内側に大きな剥離が生じることを模擬して⁴⁾、電極配置面とは逆面から荷重を負荷した。試験には島津製作所製油圧サーボ試験機(容量 200kN)を用い、変位制御(0.98mm/min)にて実施した。

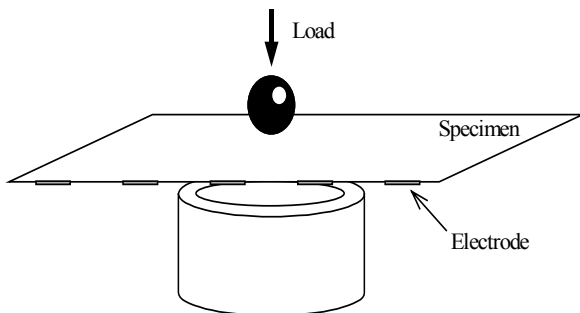


Fig.2 Indentation test

2.3 電気抵抗変化測定装置

層間剥離による電気抵抗変化は極めて微小なため、抵抗変化比の直接測定は困難である。梁試験で生じた電気抵抗抵抗変化は最大で 0.01Ω程度であった¹⁾。平板試験片では埋没剥離であり、測定電流が剥離部以外でも流れることが可能であるため、さらに電気抵抗変化が小さく、梁試験片のブリッジ回路では有効な変化を測定できなかった。そこで図 3 に示す改良型のひずみゲージによる原測定理と同じ電気抵抗ブリッジ回路を用いることにより電気抵抗変化比を測定した。ひずみゲージによるひずみ測定と原理が全く同じなので、測定機器もひずみ測定と同じ機器を用いた。このため、測定値は「ひずみ」として出力される。しかし、ここでは単に電気抵抗変化比を表しており、試験片の変形を意味するものではない。電気抵抗変化比とひずみ測定機器で出力される「ひずみ」の関係は以下の式で与えられる。

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{Rk_s} \quad (1)$$

ここで、 ε はひずみ測定装置で出力される「ひずみ(試験片の変形とは異なる)」、 ΔR は層間剥離による電気抵抗変化、 R は剥離発生前の試験片の電気抵抗、 k_s はゲージ率(約 40)である。このゲージ率とは、ひずみゲージ測定機器がひずみゲージ出力をゲージ率 2 として測定電圧差から計算するために、接続しているブリッジの抵抗の違いから生じる見かけ上の倍率であり、変形のひずみと電気抵抗変化比との関係とは関連がない。以後、試験片の変形を表すひずみとの混乱を防ぐため、ひずみ測定装置で出力される「ひずみ」を電気抵抗変化比()と読み替える。

測定感度を向上させるため、ブリッジを形成する金属皮膜抵抗には抵抗値の小さいもの(22Ω)を使用した。ブリッジ電圧は 2V であるため、測定電流は約 87mA である。層間剥離による電気抵抗変化は各電極間(1A-1B, 1B-1C, ..., 2D-2E)の 8 点で測定するため、ブリッジ回路も各電極間に 8 個作成した。電気抵抗変化比はデータロガー(共和電業製 UCAM-10A)を用いて測定した。

層間剥離を作成して電気抵抗変化比を測定した後、剥離の位置および寸法を測定した。試験片に完全に埋没する層間剥離の測定には超音波探査映像装置(日立建機製 AT5000)を用いた。

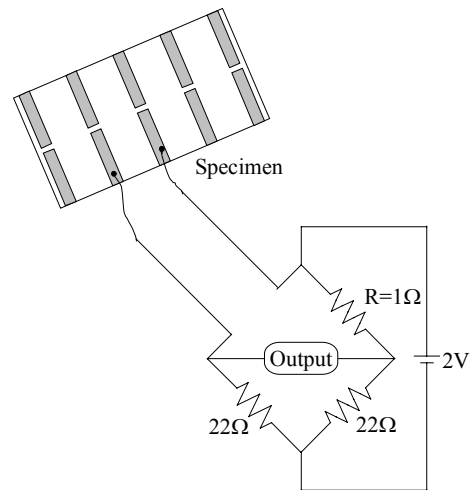


Fig.3 Bridge circuit

3. 応答曲面法の導入

3.1. 応答曲面法

層間剥離による電気抵抗変化比から剥離の位置および寸法を同定するには、電気抵抗変化比と剥離の位置および寸法の間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知的構造では、検出精度よりも簡単に概略の推定ができることが望ましい。

本研究では、電気抵抗変化比と層間剥離の位置および寸法の間関係を応答曲面で近似した。応答曲面法とは品質工学で用いられるプロセス最適化手法で³⁾、説明変数と

被説明変数(応答)の関係を効率良く関数近似し、工程を最適化する方法である。

本手法において応答曲面法を用いる利点としては次の3つが挙げられる。

- (1)複合材料積層板の剥離はマトリクス割れを伴い、厚さ方位の剥離位置が遷移する複雑な過程を得る。センサー出力と剥離を関連付ける関係式を統計的に求めることで、この複雑な破壊過程を考慮する必要がない。
- (2)最小2乗法による近似関数の各係数を統計的手法により評価可能である
- (3)逆問題に対して実験計画法を適用可能であり、少ない実験数で小さい分散の近似式が得られる。

応答曲面の近似関数には簡単であることから多項式が多く用いられる。2次多項式を用いた場合の応答曲面は次式になる。

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

ここでkは変数の数である。2変数 x_1, x_2 の場合、次式のようになる。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 \quad (3)$$

ここで、 $x_3=x_1^2$, $x_4=x_2^2$, $x_5=x_1 x_2$ と置き換えることで式(3)は線形重回帰式に変換できる。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad (4)$$

実験点数をnとすると、n回の実験結果は次式で行列表示できる。

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (5)$$

ただし、Yは応答ベクトル、Xは実験点座標、 β は係数ベクトル、 ε は誤差ベクトルである。

最小2乗法により、係数 β の不偏推定量bは次式で得られる。

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

さらに各係数のF検定の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。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 は次式となる。

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E / (n - k - 1)}{S_{yy} / (n - 1)} \quad (7)$$

ここでnは実験数、kは変数の数である。また、 SS_E は残差平方和、 S_{yy} はyの平均値まわりの総変動平均である。詳細は参考文献1),3)を参照されたい。

式(6)から、応答曲面の各係数の分散は $(X^T X)^{-1}$ を小さくすることにより相対的に小さくすることができる。この $(X^T X)^{-1}$ 最小化の実験点選択が実験計画法である。これには応答Yが必要でないため、低コストの計算である。本研究では、拘束条件などの影響を受けない計算機利用の実験計画であるD最適基準を用いる^{1),3)}。

3.2 応答曲面法の逆問題への適用

層間剥離(位置・寸法)による電気抵抗変化比の測定は順問題に相当し、測定した電気抵抗変化比を用いた剥離の位置・寸法の推定は逆問題に相当する。この逆問題の応答曲面作成には多数の実験が必要となる。しかしこれ

はコストを増大させるため、逆問題応答曲面を作成するための最適実験点選択、つまり逆問題実験計画が必要となる。本研究では前報¹⁾と同じ逆問題の最適実験計画を適用した。簡単に述べると以下に要約される。

- 1.順問題実験計画に基づき層間剥離を作成し、8電極間の電気抵抗変化比を測定する。
- 2.剥離の位置および寸法から各電極間の電気抵抗変化比を求める応答曲面(順問題応答曲面)を2次多項式で作成する。
- 3.順問題応答曲面を用いて、多数点の電気抵抗変化比の近似値を計算する。
- 4.近似値と実験値の合計集合に対してD最適基準により実験計画を適用する。このとき実験点の3倍選択し、必ず選択点には実験点を含むようにする。
- 5.選択点を用いて、電気抵抗変化比から剥離位置水準および寸法水準を求める応答曲面(逆問題応答曲面)を2次多項式で作成する(水準については次節で説明する)。

3.3 水準

本手法では測定誤差の影響を丸める目的で水準を用いる。連続量である剥離の位置および寸法を水準として離散化することで、入力誤差に対する逆問題応答曲面のロバスト性を向上させることが可能である。

逆問題応答曲面による推定水準と実測水準が一致した場合に正答とし、正答率は正答データ数の全データ数に対する割合で定義する。位置水準は各電極間の8水準、寸法水準は3水準とする。本研究は薄板を対象としており、厚さ方位の位置同定は考慮しない。また厚さ方位の剥離面の遷移に起因する電気抵抗変化は全て、応答曲面の係数決定の回帰に際し、電気抵抗変化の測定誤差として取り扱う。

4. 実験結果と考察

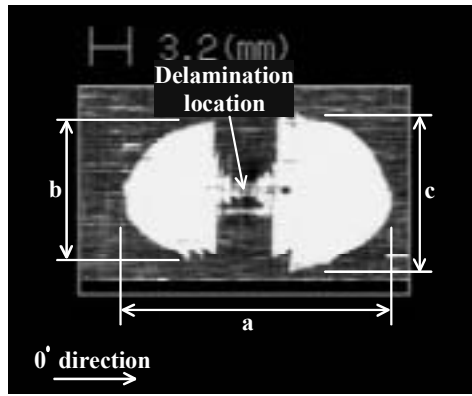
4.1 層間剥離

平板試験片内部に発生した層間剥離を、超音波探査影像装置で撮影したCスキャン影像を図4(a)に示す。剥離は完全に試験片に埋没しており、実機構造で発生する層間剥離と同じである。積層構成が $[0_2/90_2]_S$ であるため、層間剥離が電極側 0° - 90° 層間に発生し、 0° 方向に蝶の羽根のような形状となっている⁴⁾。また図4(b)に示すように、電極配置面近くに層間剥離が発生する。

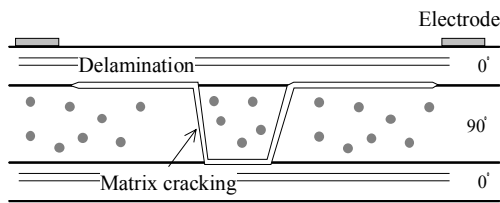
剥離を同定する際の位置および寸法の基準を作成する。剥離位置は蝶の羽根形状の付け根部分と定義した。寸法定義は図4(a)に示すように複数考えられるが、剥離の最大寸法、すなわちa,b,cの最大値と定義した。

4.2 電気抵抗変化

電気抵抗変化比の実測例を図5(a),(b)に示す。図5(a)は剥離が列内の2電極(2B-2C)間に存在する場合(Case A)、図5(b)は、剥離が列間の4電極(1A-1B,2A-2B)間に存在する場合である(Case B)。剥離の存在する位置水準で大きな変化が発生している。列間に剥離が存在する(b)ではy水準1,2の両者の位置水準で抵抗変化が発生し



(a) C-Scan image



(b) Schematic image of cross section

Fig.4 Delamination configuration

ている。また、隣接する電極間でも電気抵抗変化比の変化が生じている。これは CFRP の電気抵抗の著しい異方性に起因して、 0° 層で電流が選択的に流れ、測定電極間以外にも電流が流れて測定している電極区間以外の剥離の影響を受けるためである。詳細な解析については既報を参照されたい⁵⁾。

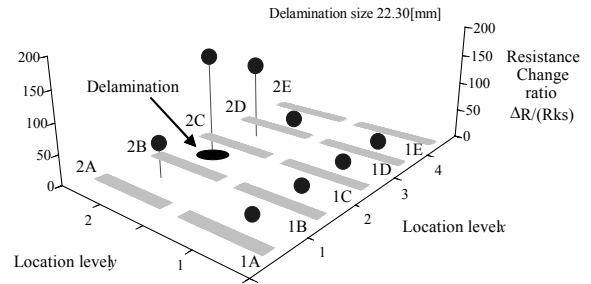
4.3 同定結果

測定した電気抵抗変化比から、剥離の位置および寸法を同定した。このとき、剥離寸法や位置水準順列の定義が同定精度に影響を与えるため、同定精度が最大化されるようにそれらの定義を適切に設定した。

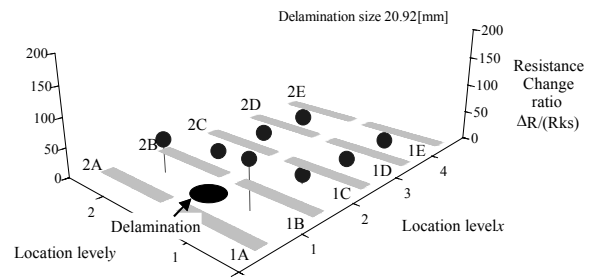
4.3.1 剥離寸法定義および寸法同定 剥離寸法と電気抵抗変化比には相関関係が存在する。そこで電気抵抗変化比と最も相関の高い剥離寸法を採用することで、同定精度向上を図る。剥離寸法定義は(1)a(0°方向の最大値)、(2)b,c の最大値(90°方向の最大値)、(3)a,b,c の最大値(剥離の最大寸法)の3種類とした。ここで、a から c の記号は図 4 に対応する。

76 点の実験値を用いて、それぞれの剥離寸法定義に基づき、電気抵抗変化比から層間剥離寸法を求める逆問題応答曲面を作成した。この際、逆問題の実験計画は適用しない。剥離の同定精度向上には逆問題の実験計画を適用する必要があるが、梁試験片において回帰点だけの正答率は実験計画に無関係であったことから、寸法定義の検討を目的として簡便のため直接逆問題応答曲面を求めた。逆問題応答曲面による推定値と実測値との誤差平均をそれぞれの定義で比較した。

結果を表 1 に示す。表には逆問題応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 も併記する。剥離定義(2)の誤差平均は 7.03% と比較的低いだが、同定精度は剥離定義に影響



(a) Case A



(b) Case B

Fig. 5 Resistance ratio change

Table2 Estimation performance of size

| | |
|-------------------------|----------------------|
| Number of experiments | 64 |
| Number of selected data | 192 (64×3) |
| R_{adj}^2 | 0.753 |
| Estimation | Used in RS 81.3% |
| reliability | Not used in RS 58.3% |

Table1 Mean error and R_{adj}^2

| Size | Mean error [%] | R_{adj}^2 |
|------|----------------|-------------|
| (1) | 7.32 | 0.813 |
| (2) | 7.03 | 0.795 |
| (3) | 7.32 | 0.813 |

されない。したがって、本研究では安全側に考え、剥離定義は(3)剥離の最大寸法を採用する。

また、寸法水準の分割は 水準 1(13mm 以上 17mm 未満)、水準 2(17mm 以上 21mm 未満)、水準 3(21mm 以上 25mm 未満)の 3 水準とした

以上の結果に基づき、剥離寸法を同定した。64 点の実験値を用いて剥離の位置および寸法から 8 電極間の電気抵抗変化を求める 8 個の順問題応答曲面を作成した。それぞれの順問題応答曲面で、回帰精度を悪化させる実験値は取り除き精度の向上を図っている。また順問題応答曲面を作成する際、近似領域分割は実施していない。それぞれの区間の順問題応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は、0.671, 0.621, 0.628, 0.688, 0.747, 0.593,

0.619, 0.739 である。

作成した順問題応答曲面に剥離位置 x, y および剥離寸法の数値を代入し、各抵抗変化の近似実験値を作成した。剥離位置に関しては x は 20mm から 160mm まで 5mm 間隔で、 y は 25mm から 80mm まで 5mm 間隔で、剥離寸法に関しては、13mm から 25mm まで 0.5mm 間隔で代入した。以上の手続きで計算した近似実験値と 64 点の実験値の合計(約 8800 個)に対して、D 最適基準により実験計画を実施した。それぞれの積層構成で、64 点の実験値は必ず選択されるようにし、全部で 192 点(実験点数の 3 倍)選択した。選択点の剥離寸法を先に述べたように水準化し、8 電極間の電気抵抗変化比から寸法水準を求める逆問題応答曲面を作成した。順問題応答曲面、逆問題応答曲面とも 2 次多項式近似である。そして逆問題応答曲面による推定位置水準と実測位置水準を比較し、推定水準が実測水準と一致した場合に正解とした。この際、逆問題応答曲面の精度を確認するため、応答曲面の回帰に使用しなかった 12 個の実験値をそれぞれの逆問題応答曲面に代入して同定精度を比較した。

逆問題応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 、正答率を整理して表 2 に示す。また、個々の推定結果を図 6 に示す。図中縦軸は実数値で表した剥離寸法水準推定結果、横軸は測定された寸法水準である。印は回帰に使用したデータの推定値、印は回帰に使用しない新実験結果の推定値である。応答曲面の回帰に使用した選択点の正答率は 81.3% で、回帰に使用しなかった実験点の正答率は 58.3% である。誤差も隣接水準の範囲内であり、大きく外れる予測値はない。

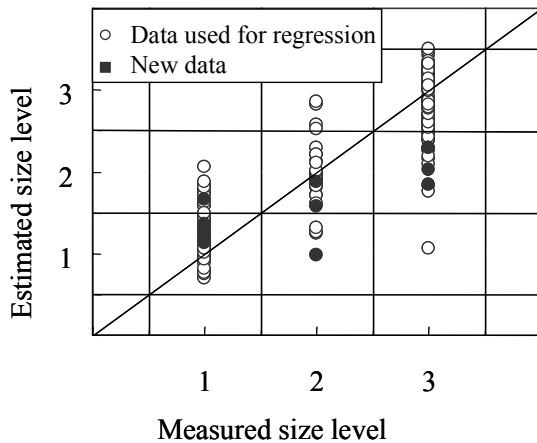


Fig.6 Estimated size by RS

4.3.2. 位置水準順列の設定および位置同定 本研究では多項式応答曲面を用いている。このため、水準の順列を適切に定義する必要がある。応答曲面の近似精度を最も向上させる抵抗変化(設計変数)空間に対する位置水準(応答)の順列を検討する。位置水準順列は図 7 (a),(b),(c) に示す 3 種類を検討した。すなわち、(a)は位置水準に 2 方向(x 水準, y 水準)設け、それぞれに関して逆問題応答

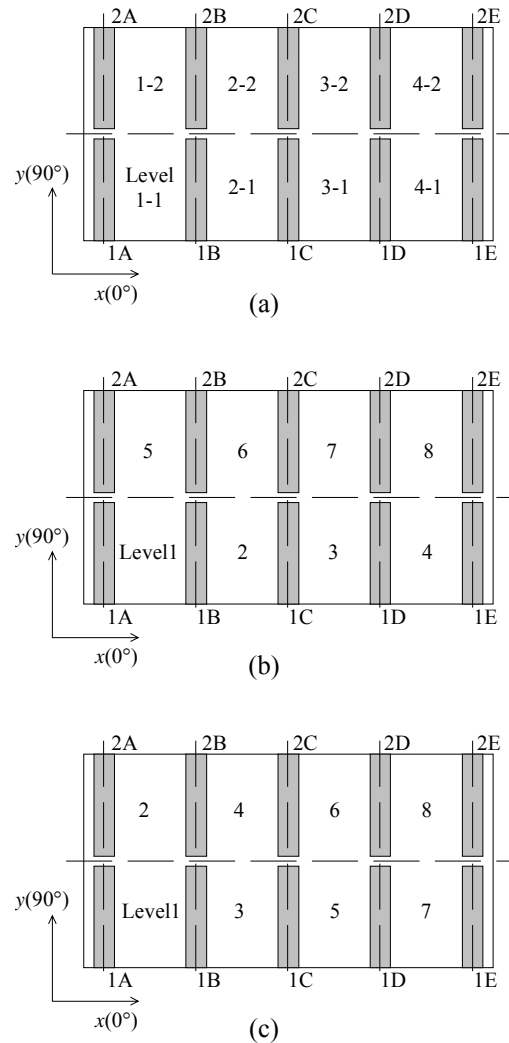


Fig. 7 Definition of location level

曲面を作成し、 x 水準, y 水準の両方が正解の場合のみ正答とする。また、(b),(c)は位置水準を単純に 8 個の水準に分割したもので、水準順列が異なるものである。したがって、(a)の水準分割法では x 水準を求める逆問題応答曲面と y 水準を求める逆問題応答曲面の 2 個が作成され、(b),(c)の位置に関する逆問題応答曲面はそれぞれ 1 個だけである。

前節と同様、選択された 192 点の剥離位置を、先に述べたような 3 種類の位置水準の順列に基づいて水準化し、それらを用いて 8 電極間の電気抵抗変化から剥離位置水準を求める逆問題応答曲面を作成した。逆問題応答曲面は 2 次多項式近似である。そして逆問題応答曲面による推定位置水準と実測位置水準を比較し、推定水準が実測水準と一致した場合に正解とした。この際、逆問題応答曲面の精度を確認するため、応答曲面の回帰に使用しなかった 12 個の実験値をそれぞれの逆問題応答曲面に代入した。

逆問題応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 、正答率などを整理して表 3 に示す。また、個々の推定結果を図 8, 9 に示す。図 8 は x 方位水準、図 9 が y 方位水準

Table3 Estimation performance of location

| Definition of level | (a) | (b) | (c) |
|-------------------------|----------------|-------|-------------|
| Number of experiments | 64 | | |
| Number of selected data | 192 (64 × 3) | | |
| R_{adj}^2 | x | 0.920 | 0.864 0.913 |
| | y | 0.826 | |
| Estimation reliability | Used in RS | 86.5% | 59.2% 63.0% |
| | Not used in RS | 66.7% | 58.3% 33.3% |

の結果である．図中縦軸は位置水準推定の実数値，横軸は測定位置水準である．図8中 印はy水準1の回帰に使用した結果の推定値であり， 印はy水準2の回帰に使用した結果の推定値， 印は下記に使用しない実験結果の推定値である．図9中 印は回帰に使用した結果の推定値， 印は回帰に使用しない実験結果の推定値である．図7(a)の位置水準順列の正答率が最も高く，応答曲面の回帰に使用した選択点での正答率は86.5%で，回帰に使用しなかった実験点の正答率は66.7%である．これは，図7(a)ではx,yの2水準を設けることで連続的な位置水準の順列が実現されているが，図7(b),(c)では必ずしも位置水準の順列が連続的に実現されていないためである．つまり，(b)では，位置水準1のy方向隣接水準は5であり，(c)では位置水準1のx方向隣接水準は3で

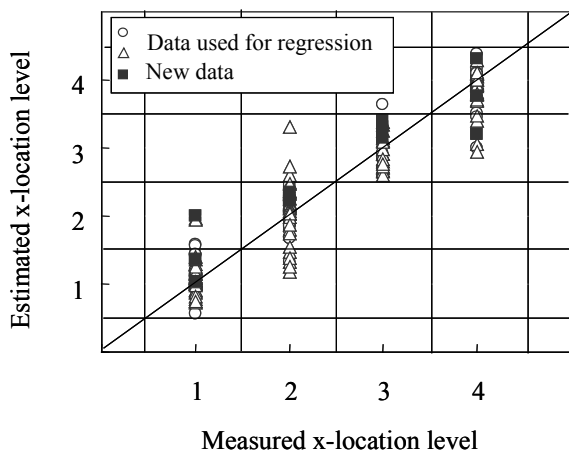


Fig.8 Estimated location level of x-coordinate

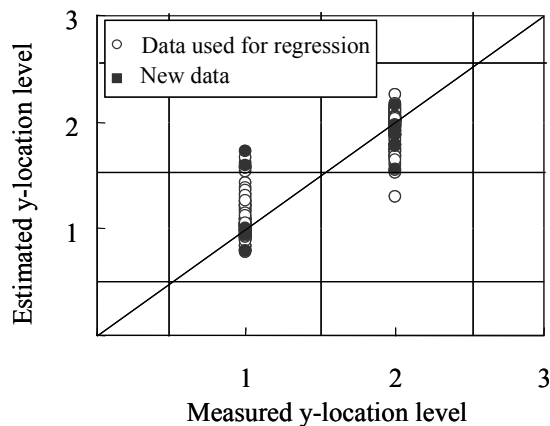


Fig.9 Estimated location level of y-coordinate

あって，連続番号である2ではない．加えて，図7(a)の方法ではx水準を求める逆問題応答曲面とy水準を求める逆問題応答曲面を個々に作成することで，近似精度が向上していることも同定精度向上に寄与している．

図7(a)の水準順列での隣接水準も許容した場合の正答率は，応答曲面の回帰に使用した選択点で99.5%，回帰に使用しなかった実験点で100%であり，高い正答率を示している．隣接水準とは，x方向，y方向とも両隣の水準を意味する．例えば位置水準1-1の場合，隣接水準とは1-2,2-1の2水準であり，水準1-2の場合，隣接水準とは1-1,1-3,2-2の3水準である．隣接水準も許容した正答率とは，実機大規模構造における正答率を想定したものである．

したがって位置の水準分割は図7(a)のようにx,yの2水準設け，それぞれの位置水準ごとに逆問題応答曲面を作成する方法により，高精度に直交積層板の剥離位置の同定が可能である．

4.3.3 温度変化に起因する電気抵抗変化 実機環境では温度変化が無視できない．温度変化は剥離以外で電気抵

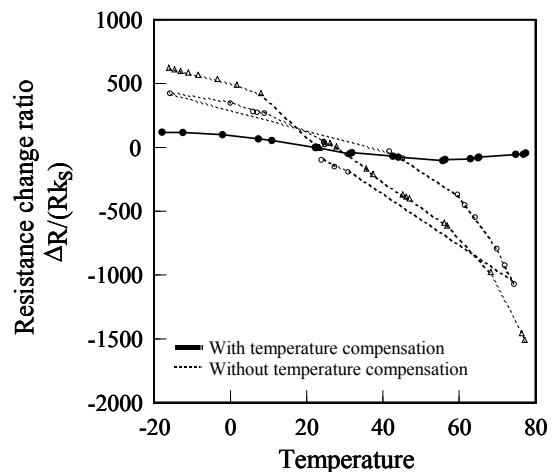


Fig.10 Effect of temperature on resistance change

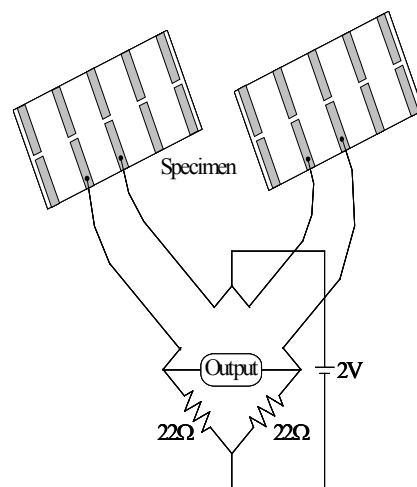


Fig.11 Temperature compensation bridge circuit

抗変化を発生させる要因として考えられるため、その影響を実験的に検討した。

平板試験片の電気抵抗変化比を測定しながら、温度を電気炉と冷凍庫を用いて約-20 から約 80 まで変化させた。気温約 25 における抵抗変化を初期値(ゼロ)としている。温度は熱電対を用いて測定した。その結果の1例を図 10 の点線で示す。各試験片で3もしくは4点の抵抗変化比を測定し、その平均値を1個の点として表示している。高温になると抵抗変化値が急激に減少し、低温になると抵抗変化値が増加する傾向が見られる。また、ヒステリシスも認められ、常温に戻した際に生じる抵抗変化値は温度変化による抵抗変化値の最大値の約 10% である(図 10)。温度変化に起因する電気抵抗変化の原因は炭素繊維固有の値かまたは繊維接触点の抵抗変化が考えられ、詳細は不明であるが、剥離発生により実測される抵抗変化の絶対値が最大で 300 程度であるのに対し、温度変化による抵抗変化の絶対値は最大で 1500 にも達するため、この影響は極めて大きい。

そこで通常のひずみゲージに用いられる温度補償を実施し、温度変化による電気抵抗変化の抑制を検証した。温度補償ブリッジ回路を図 11 に示す。1 個のブリッジ回路につき異なる 2 枚の試験片を用い、それぞれを同様の環境中に置いた。その結果の1例を図 10 に実線で示す。

温度補償を実施しない結果と比較すると温度変化による電気抵抗変化を大幅に抑制することが可能であり、また、ヒステリシスも認められなかった。以上より、本測定手法では、ひずみゲージと全く同様に初期化時と測定時の温度差を小さくし、さらに温度補償を実施することで温度変化の影響は除去可能であり、実機構造に対する本手法の適用可能性を損なうものではないことが明らかになった。

以上の結果から、直交積層板の埋没剥離の位置と寸法同定に際して、電気抵抗変化法が有効であることが実証された。実機の実剥離同定に際しては、多方向積層板や板厚の影響を今後検討する必要がある。

5. 結 言

CFRP 積層板表面で測定した電気抵抗変化比を用いて、実機剥離と同じ埋没層間剥離の位置および寸法を定量的に同定する手法を提案し、直交積層平板試験片に対して適用した。得られた結果は以下の通りである。

- (1)埋没した実層間剥離の同定に際しても、電気抵抗変化法が有効であることを実験的に示した。
- (2)位置を座標ごとに水準化して順列を設定し、それぞれの座標ごとに逆問題応答曲面を作成することで、電気抵抗変化比による実機埋没剥離の位置および寸法の高精度同定が可能である。
- (3)測定装置全体の電気抵抗は温度によって大きく変化し、剥離同定に影響を及ぼすが、温度補償を実施することでその影響を除去可能である。

参考文献

- 1) 田中雄樹, 轟 章, 島村佳伸, 日本機械学会論文集 A 編, 65A-640, (1999), 2432-2438
- 2) 田中雄樹, 轟 章, 島村佳伸, 小林英男, 中村春夫, 第 24 回複合材料シンポジウム講演要旨集, 日本複合材料学会, (1999), 27-28
- 3) R. H. Myers, D. C. Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons, Inc.,(1995)
- 4) 青木雄一郎, 末益博志, 間島理, 第 24 回複合材料シンポジウム講演要旨集, 日本複合材料学会, (1999), 163-164
- 5) 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, 64A-622, (1998)