

複数電極電気抵抗変化の応答曲面を用いた CFRP はく離検出知的構造の開発

田中 雄樹^{*1}, 轟 章^{*2}, 島村 佳伸^{*2}

Smart Structure for Delamination Detection of CFRP Using Response Surface of Electric Resistance Change of Multiple Electrodes

Yuki TANAKA, Akira TODOROKI, Yoshinobu SHIMAMURA

Compression strength and stiffness of laminated CFRP structural components are severely degraded by delaminations. The delaminations are unfortunately invisible or difficult to inspect by naked eyes. This brings significance of development of smart structures for detection of delaminations of CFRP. In the present study, an electric resistance change method is adapted for identifications of delamination crack position and size of CFRP laminates, and possibility of identification of delamination cracks is experimentally investigated by using cross ply laminates. 3-point-bending test are conducted using specimens with multiple electrodes to generate delamination cracks. Firstly, response surface to predict electric resistance change are constructed from measured electric resistance change. Secondary, design of experiments are conducted for inverse problem to predict delamination crack position and size from electric potential changes. Finally, response surface to predict delamination crack position and size are constructed. Using the response surface method with design of experiments, delamination crack position and size are predicted within practical precision without consideration of fracture mechanism.

Key Words : CFRP, Delamination, Electric Potential Method, Response Surface Methodology, Smart Structure, Design of Experiments

1. 緒言

CFRP 積層板は比強度, 比剛性など力学的特性に優れているため, 幅広い分野に活用されている。しかし積層構造であるため層間強度が弱く, 比較的弱い衝撃で容易に層間はく離が生じ, 圧縮強度・圧縮剛性が著しく低下する。そこで設計荷重限界値は目視で判別可能なはく離発生時の圧縮強度が採用されており, 優れた力学的特性を十分には活かしていない。このような背景から, 稼働中もしくは保守点検時に非破壊的, 自動的に容易に層間はく離を検出できる知的構造が望まれている。知的複合材料としては, 光ファイバーを埋め込み内部のマトリックス割れや層間はく離を検出する試みを実施されているが⁽¹⁾, 成形法や光ファイバー埋め込みによる強度低下などの問題がある。

そこで本研究では, 金属材料の欠陥検出に用いられている電気ポテンシャル法を用いて⁽²⁾⁻⁽⁴⁾CFRP 積層梁に内在する層間はく離を非破壊的, 自動的に検出する知的 CFRP 構造の開発を行なった。具体的には CFRP 中の炭素繊維をセンサとして用い, 積層板表面に作成した複数の電極間のはく離作成前後での電気抵抗変化からはく離の位置, 大きさを実験的に同定しようというものである。このようにすることによって, 光ファイバーなどをセンサとして埋め込んだことによる強度低下はなく, また表面に電極を作成するだけであるので簡単かつ安価に適用可能である。

著者らの一部はこれまでに電気ポテンシャル法を用いて CFRP 積層梁に内在する層間はく離の位置と大きさを同定する方法が有効であることを FEM により解析的に示している⁽⁵⁾。本研究ではその解析結果をもとに, 複数電極の電気抵抗変化から CFRP 積層梁に内在する層間はく離の位置と大きさの同定を実験的に行なった。

複数電極の電気抵抗変化から層間はく離の位置と大きさを検出するには, 複数電極での電気抵抗変化と層

*平成 年 月 日受付

〒152-8852 目黒区大岡山 2-12-1

*1 東京工業大学大学院

tanaka@ginza.mes.titech.ac.jp

*2 東京工業大学工学部

間はく離の位置および大きさ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onitoring知的構造では、検出精度よりもむしろ簡単な構造ですばやく判断できることが望ましい場合が多い。また、判断部分にニューラルネットワークを用いた場合、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多項式応答曲面で近似した。多項式応答曲面を用いることで、破壊メカニズムを考慮することなく逆問題推定式が作られ、また逆問題に対して実験計画を用いることが簡単になる。本研究では逆問題への実験計画法の導入を行ない、効率の良い最適実験計画を実施した。

2. 試験片および実験方法

2.1. 試験片

使用した材料は新日鐵化学製一方向 CFRP プリプレグ A125-Rc33% を $180 \times 1 \text{MPa} \times 2\text{h}$ の成形条件で $[0_2/90_2]_s$ に積層したものである。この積層板から長さ 290mm、幅 15mm の短冊状試験片を作成した。厚さは約 1mm である。

試験片の電気抵抗変化測定のために表面に電極を作成した。これには積層板成形時に 0.02mm 厚の銅箔を積層板表面に積層して一体成形した。著者らの FEM による解析結果から、電気抵抗異方性が強い場合でも試験片の表面に作成する電極が 5 個以上あれば精度良くはく離の位置と大きさの同定が可能であることがわかっており、そこで本実験での電極数は 7 個とし、各電極間の間隔を 45mm とした。したがって測定する電気抵抗変化は 1 つの試験片につき 6 ヶ所である。使用した試験片形状および寸法を Fig. 1 に示す。試験片の同一面上に電極を作成した理由は、航空機などのシェル構造物の内面だけに電極を取り付けて、層間はく離の発生を検出することを想定しているためである。

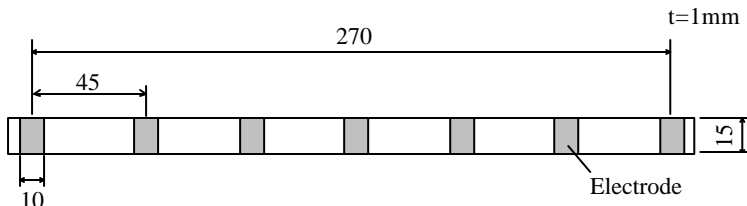


Fig.1 Specimen configuration

2.2. 測定用回路

測定する電気抵抗変化は極めて小さいため Fig. 2 のような電気抵抗ブリッジ回路をひずみ測定用データロガ

ー(共和電業製 UCAM-10A)上の 6 つのチャンネルにそれぞれ組み、試験片の電気抵抗変化をひずみとして測定した。

電気抵抗変化と出力されるひずみは次式で関係づけられる。

$$\frac{\Delta R}{R} = k_s e \quad (1)$$

ここで、 ΔR ははく離による電気抵抗変化、 R は初期抵抗、 k_s はゲージ率(=2)、 e はひずみである。この式から、出力されるひずみを大きくするためには抵抗変化比をできるだけ大きくしなければならない。抵抗変化 ΔR は著者らの解析結果から 0.001Ω 程度であり、各電極間の抵抗は 0.8Ω 程度であるので、初期抵抗 R をできるだけ小さくし 3Ω とした。この場合、出力されるひずみは約 150μ となる。ブリッジ間電圧のバランスを取るために 5Ω の可変抵抗を試験片と直列に接続した。また、その他の抵抗に 240Ω を用いているのは、回路に過度の電流を流さないためである。

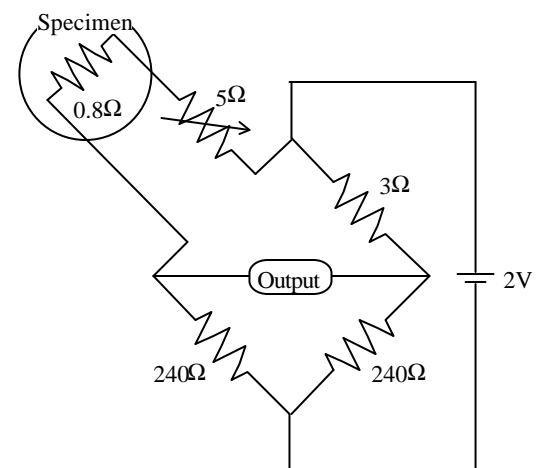


Fig.2 Bridge circuit

2.3. 実験方法

この試験片にスパン 10mm 程度の 3 点曲げ(ヘッドスピード 0.98mm/min.)を実施し(Fig. 3),層間はく離を作成してはく離作成前後での各電極間のひずみ $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_6$ を測定した。はく離の大きさはスパンの大きさを変えることで制御可能であり、スパンが大きいかほど大きなはく離が生じる傾向がある。一般に積層板に衝撃荷重が

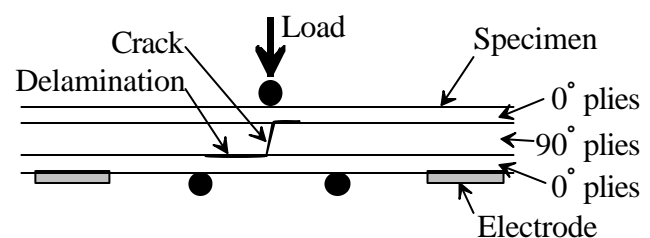


Fig.3 Generation of a delamination crack by 3-point-bending test

加わる場合、衝撃面とは反対側の 0°層と 90°層界面に大きなはく離が発生する。そこで3点曲げによりはく離を発生させる際、電極貼り付け面と反対面から負荷した。

はく離を作成しひずみを測定した後、はく離の位置と大きさを測定した。試験片内部のはく離の位置と大きさは超音波探査映像装置（日立建機製 AT5000）を用いて測定した。

試験片の概略図を図4に示す。7個の電極をそれぞれ A,...,G, 各電極間 AB,...,FG を 1,...,6 と呼ぶ。はく離の位置ははく離の中心位置とし、はく離による各電極間のひずみをそれぞれ $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_6$ とする。

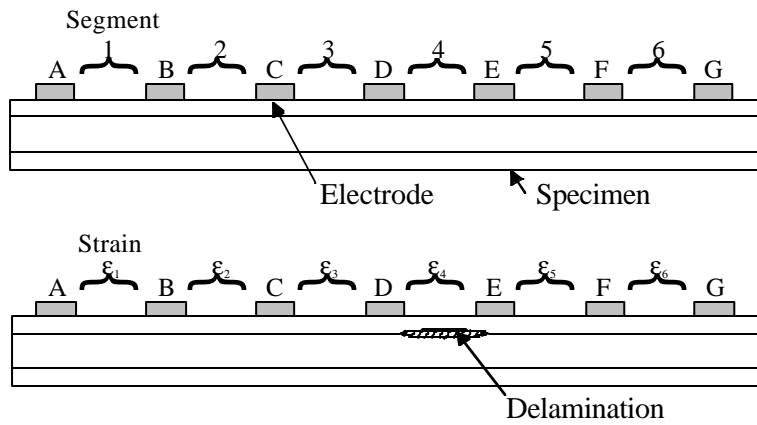


Fig.4 Specimen for electric potential measurement

3. 応答曲面法の導入

3.1. 応答曲面法

応答曲面法とは品質工学で用いられる手法で⁽⁶⁾、変数と応答の関係を最小2乗法と実験計画法を用いて効率良く関数近似し、工程を最適化する方法である。

本研究では、はく離位置、大きさと実測した各電極間のひずみの関係を応答曲面法で近似的に求めた。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)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。(2)近似関数を統計的に評価できる。(3)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。

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次の多項式を用いた場合の応答曲面は次式になる。

$$y = \mathbf{b}_0 + \sum_{j=1}^k \mathbf{b}_j x_j + \sum_{j=1}^k \mathbf{b}_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \mathbf{b}_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

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

$$y = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 x_1 + \mathbf{b}_2 x_2 + \mathbf{b}_3 x_1^2 + \mathbf{b}_4 x_2^2 + \mathbf{b}_5 x_1 x_2 \quad (3)$$

$x_3 = x_1^2, x_4 = x_2^2, x_5 = x_1 x_2$ と置き換えることにより式(3)は線形重回帰に変換できる。

$$y = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 x_1 + \mathbf{b}_2 x_2 + \mathbf{b}_3 x_3 + \mathbf{b}_4 x_4 + \mathbf{b}_5 x_5 \quad (4)$$

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。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\hat{\mathbf{a}} + \hat{\mathbf{a}} \quad (5)$$

ただし、

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

$$\hat{\mathbf{a}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{b}_0 \\ \mathbf{b}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_k \end{Bmatrix} \quad \hat{\mathbf{a}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{e}_n \end{Bmatrix}$$

ここで $\hat{\mathbf{a}}$ は誤差ベクトルである。

最小2乗法により、係数 $\hat{\mathbf{a}}$ の不偏推定量 \mathbf{b} は次式で得られる。

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

\mathbf{b} の分散・共分散行列は次式で与えられる。

$$\text{cov}(b_i, b_j) = C_{ij} = \mathbf{s}^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \quad (7)$$

ここで \mathbf{s}^2 は \mathbf{Y} の誤差であり、その推定値は次式で与えられる。

$$\mathbf{s}^2 = \frac{SS_E}{n - k - 1} \quad (8)$$

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。

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{SS_E / (n - k - 1)}{S_{yy} / (n - 1)} \quad (9)$$

ここで 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り、それぞれ次式で表される。

$$SS_E = \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} - \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (10)$$

$$S_{yy} = \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \quad (11)$$

応答曲面の各係数は $b_i = 0$ の仮説を t 検定することでその項の寄与が検査できる。各係数の t 値は次式で表される。

$$t_0 = \frac{b_j}{\sqrt{\mathbf{s}^2 C_{jj}}} \quad (12)$$

ここで C_{jj} は式(7)の jj 成分である。

3.2. 実験計画法

応答曲面の各係数 \mathbf{b} の分散は、式(6)から $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ を小さくすることにより応答 y を用いないで実験点の選択だけで相対的に小さくすることができる。この $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ の最小化の実験点の選択が実験計画法である。

実験計画法には、直交計画⁽⁷⁾、中心複合計画⁽⁷⁾など多種がある。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。モーメントマトリックスMを次式で定義する。

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{X}^T \mathbf{X}}{k} \quad (13)$$

D最適基準とはMの行列式を最大化する実験点を選択することである。D最適の判定にはD有効性 D_{eff} を用いる。 D_{eff} は変数を-1から1までに正規化した場合、次式で与えられる。

$$D_{eff} = \frac{|\mathbf{M}|^{1/p}}{k} \quad (14)$$

ここで $p = k + 1$ である。D最適とは実験候補点の集合から式(14)で与えられる D_{eff} を最大にする実験点を n 個選択することである。このように行列式を最大化することで $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ の全成分を相対的に小さくしている。

3.3. 逆問題への応答曲面法の利用

はく離き裂を与えて電気抵抗変化を測定することは順問題に相当し、電気抵抗変化からはく離の位置と大きさを同定することは逆問題になる。

本研究では、実験的にはく離の位置と大きさの異なる複数の試験片で実測したひずみから逆にはく離の位置と大きさを求める。はく離位置は各電極間隔(45mm)の6水準、はく離サイズの水準は、微小なはく離も検出できることを示すためサイズの小さい方を細かく分割し、水準 1(2~4mm)、水準 2(4~7mm)、水準 3(7~12mm)の3水準とした。この水準の組み合わせは18通りであるが実験誤差を考慮してすべての場合で複数回実験を実施してひずみを実測する。これは順問題の実験であり、全因子計画が採用されたことになる。順問題(はく離 ひずみ問題)において最適実験計画であっても逆問題(ひずみ はく離位置、ひずみ はく離サイズ)では最適な実験計画とは限らない。

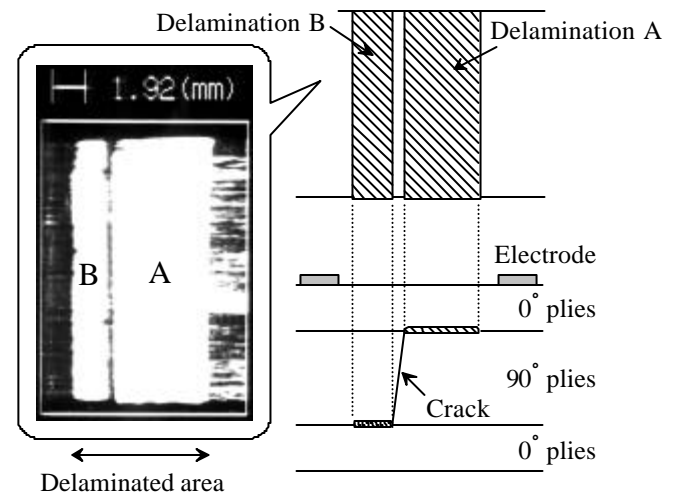
そこで順問題の近似関数を応答曲面で作成し、その応答曲面を用いて多数の応答 y を作成する。作成した y を用いて逆問題の最適実験計画を行なう。具体的にははく離位置、大きさを変数とした各ひずみの応答曲面(順問題応答曲面)を作成する。作成した順問題応答曲面を用いて多数点のひずみを求める。求めたひずみを変数としてはく離位置およびはく離サイズのそれぞれの応答曲面(逆問題応答曲面)を作成する。逆問題応答曲面の作成のための実験計画をD最適基準を用いて行なう。この際、選択点数を実験点数よりも必ず大きくし、逆問題応答曲面には必ず実験点を含むようにする。一般に順問題の応答曲面作成には比較的容易に高

精度のものが得られる。得られた順問題応答曲面を用いて逆問題応答曲面の分散を最小化する実験点を近似的に求めている。

4. 実験結果および考察

4.1. 層間はく離

超音波探査映像装置(SAM)で撮影した層間はく離を図5(a)に示す。図中白四角の部分がはく離である。はく離には図5(b)に示すように90°層マトリックス割れを通じて別の層間はく離が発生している。マトリックス割れの右側の大きなはく離は、電極側に発生したはく離(はく離Aとする)であり、左側の比較的小さなはく離は電極とは反対側に発生したはく離(はく離Bとする)である。本研究でははく離Aの大きさをはく離の大きさとした。はく離は概して図5(a)に示すような長方形になったが、台形のように板幅方向に対して変化がある場合、はく離の大きさとしてその平均値をとった。



(a) Delamination crack with scanning acoustic microscope (b) Schema of delamination crack

Fig.5 Actual delamination crack

4.2. 出力結果

各区間にはく離が存在するときの応答例を図6に示す。はく離の存在する区間のひずみ(抵抗変化)が急激

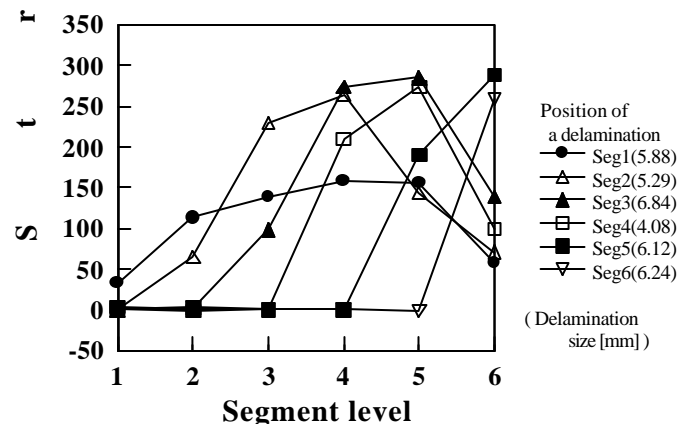


Fig.6 Measured strain

に大きくなっていることがわかる．ひずみが負の値になっている点は測定誤差である．またシンボルの数値ははく離の大きさである．図からわかるようにはく離が存在する電極間以外の区間でもひずみが増加する．これは著者らが FEM 解析で示したように CFRP の電気抵抗異方性に起因して，電流を流す電極間以外の領域にも電流が流れるためである．また，はく離サイズが大きいとひずみ変化も大きくなる傾向があるが，出力傾向は変化しない．

4.3. 同定結果

はく離の位置と大きさを種々変化させた 54 点の実験データを用いて 3.3 で述べたような方法により順問題応答曲面から実験計画を適用して逆問題応答曲面を作成するデータ点を求め，はく離の位置と大きさを同定した．順問題応答曲面，逆問題応答曲面とも 2 次多項式近似とした．

はく離位置と大きさから各ひずみを求める 6 つの順問題応答曲面を作成する際，応答曲面の近似範囲を分割し近似精度を向上させた．まず 3 つの応答曲面を，近似範囲にダブリがないように電極 A~C，C~E，E~G の 90mm の範囲でそれぞれ作成した．これらの応答曲面の境界(電極 C，E)付近では応答曲面の精度が落ちるため，さらに 2 つの応答曲面を境界から ±20mm の範囲でそれぞれ作成した．順問題応答曲面の R_{adj}^2 は最悪でも 0.632 であり，良く近似できている．

得られた順問題応答曲面に，はく離位置は 10 ~ 260mm まで 0.5mm 間隔で，はく離サイズは 2~9mm まで 0.2mm 間隔で代入し，各ひずみの近似データを作成した．全データ数は約 18000 程度になるが，各ひずみで構成される類似した 6 次元ベクトルはあらかじめ削除し，このデータから D 最適により実験計画を実施した．このとき 54 点の実験データは必ず選択されるようにし，全部で 90 点選択した．

選択された 90 点のはく離位置と大きさを水準化したデータを用いて，各ひずみからはく離位置水準，はく離サイズ水準を求める逆問題応答曲面をそれぞれ作成し，実際の位置の水準，大きさの水準と比較した．

前述の通り，位置は 6 水準，大きさは 3 水準に分割し，応答曲面により推定した水準が実測した水準と等しければ正解とした．この際応答曲面の精度を確認するため，逆問題応答曲面作成時には用いなかったデータを順問題応答曲面から作成し代入した．

比較のため，実験計画を行わずに 54 の実験点から直接逆問題応答曲面を求めた．

4.3.1. はく離位置同定結果

はじめに，実験結果から実験計画を適用しない逆問題応答曲面を作成した．実測した 54 点の結果を用いて，各電極間のひずみを説明変数，はく離の位置を水準化した数値を被説明変数とした 2 次の逆問題応答曲面を作成した．応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は 0.624 となった．

次に前述した方法で実験計画を適用した逆問題応答曲面を作成した(表 1 参照)．応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は 0.698 である．表 1 では後退消去法により t 検定で寄与しないと判断された項を除いている．そして実際の位置水準と比較した結果を図 7 に示す．図の横軸は真の水準で，縦軸は推定水準である．正しく推定された場合は図中の対角線上に図示される．格子状の実線は各水準の分割を表し，対角の水準四角内に存在した場合が正解である．図中の印は応答曲面を求める際に用いた 90 点の結果を推定したものであり，6 つの印は応答曲面を求める際には用いなかった順問題応答曲面から算出した点で推定した結果を図示したものである．

応答曲面作成時に用いたデータに関しては，全データ数 90 個中正解したデータ数は 52 個で正答率は 57.8% である．応答曲面により推定したはく離の位置水準が，少なくとも実際のはく離位置水準に隣接する水準内に存在すると推定したデータ数は 84 個で，はく離が少なくとも隣接水準内に存在すると推定する確率は 93.3% である．応答曲面作成時に用いなかったデータに関しては，正答率は 50% である．隣接水準内も含

Table 1 Response surface of delamination position

$R_{adj}^2=0.698$

Coefficient	Estimate	t Ratio
Intercept	4.2397459	15.76
ϵ_1	-0.0523100	-6.89
ϵ_2	0.0175362	2.56
ϵ_3	-0.0258050	-4.84
ϵ_5	-0.0123850	-3.60
ϵ_6	0.0140870	3.49
$\epsilon_2*\epsilon_1$	-0.0001310	-2.05
$\epsilon_2*\epsilon_2$	0.0000969	2.10
$\epsilon_3*\epsilon_1$	0.0007163	6.24
$\epsilon_3*\epsilon_2$	-0.0003850	-3.84
$\epsilon_3*\epsilon_3$	0.0002612	4.00
$\epsilon_4*\epsilon_2$	-0.0001570	-2.26
$\epsilon_4*\epsilon_3$	-0.0001550	-1.78
$\epsilon_4*\epsilon_4$	0.0000622	1.41
$\epsilon_5*\epsilon_1$	0.0005700	5.02
$\epsilon_5*\epsilon_2$	-0.0002220	-1.85
$\epsilon_5*\epsilon_3$	0.0002674	3.06
$\epsilon_5*\epsilon_4$	-0.0000690	-1.37
$\epsilon_5*\epsilon_5$	0.0000390	2.16
$\epsilon_6*\epsilon_1$	-0.0008820	-6.68
$\epsilon_6*\epsilon_2$	0.0005868	4.56
$\epsilon_6*\epsilon_3$	-0.0003020	-3.79
$\epsilon_6*\epsilon_6$	-0.0000310	-2.69

めると正答率は 83.3%である．実験計画を用いないものと比較すると，実験計画を適用したもののほうが明らかに R_{adj}^2 が向上している．

はく離位置の同定精度に及ぼすはく離サイズの影響を 図 8 に示す．はく離の大きさが大きいほど位置の推定精度が高いことがわかる．隣接水準も含めて考えると，実用的には水準 2(4~7mm)の大きさのはく離が判定可能であると判断できる．

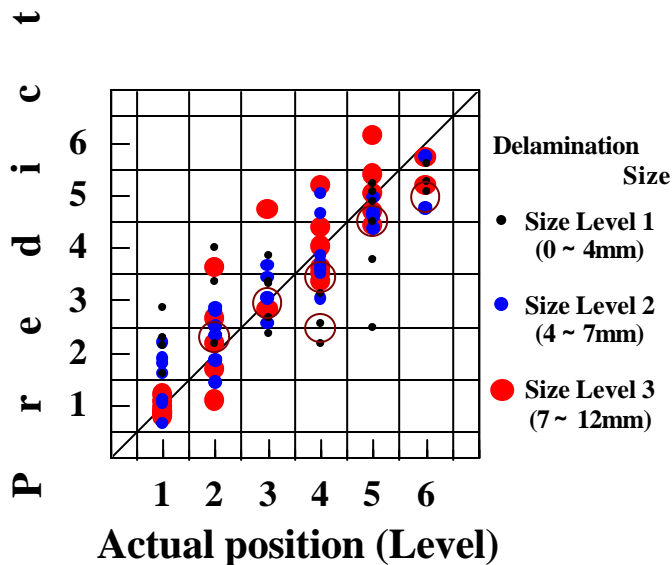


Fig.7 Predicted results of position levels by response surface

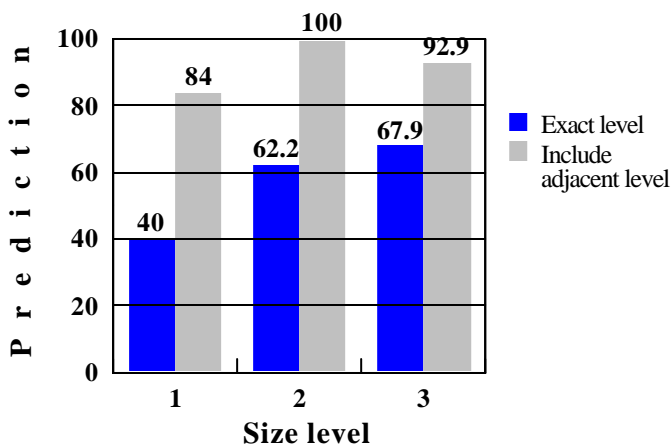


Fig.8 Effect of size level on reliability of predicted position

4.3.2. はく離サイズ同定結果

初めに実験計画を適用しない逆問題応答曲面を作成した．実験により得られた 54 点の結果を用いて，各電極間のひずみを説明変数，はく離の大きさを水準化した数値を被説明変数とした 2 次の逆問題応答曲面を作成した．応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は 0.439 である．

次に前節と同様に実験計画を適用した逆問題応答曲面を作成した結果を表 2 に示す．位置の同定と同様に t 検定を行なった．応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は 0.700 である．そして実際の大きさの水準と

比較した結果を 図 9 に示す．図の横軸は真の水準で，縦軸は推定水準である．図中对角線は正答した場合を示している．格子状の実線は各水準の分割を意味し，対角の水準四角内に存在した場合が正解である．図中の印は応答曲面を求める際に用いた 90 点の結果を推定したものであり，6 つの印は応答曲面を求める際には用いなかった順問題応答曲面から算出した点で推定した結果を図示したものである．

応答曲面作成時に用いたデータに関しては，全データ数 90 個中正解したデータ数は 76 個で正答率は 84.4%である．応答曲面作成時には用いなかったデータに関しては，正答率は 66.7%である．

実験計画を用いないものと比較すると，実験計画を適用したもののほうが R_{adj}^2 が大幅に向上している．また大きさの推定では水準 1 の誤差が大きいが，隣接す

Table 2 Response surface of delamination size

$R_{adj}^2=0.700$

Coefficient	Estimate	t Ratio
Intercept	1.4197252	12.98
ϵ_1	-0.0071180	-2.63
ϵ_2	0.0081480	3.77
ϵ_3	-0.0085170	-4.49
ϵ_4	0.0035306	1.98
ϵ_5	-0.0051820	-2.82
ϵ_6	0.0110151	6.04
$\epsilon_1*\epsilon_1$	-0.0000110	-1.08
$\epsilon_3*\epsilon_1$	0.0000288	2.15
$\epsilon_4*\epsilon_4$	0.0000235	2.71
$\epsilon_5*\epsilon_2$	0.0000139	1.04
$\epsilon_5*\epsilon_4$	-0.0000230	-1.67
$\epsilon_5*\epsilon_5$	0.0000095	1.42
$\epsilon_6*\epsilon_2$	-0.0000200	-1.44
$\epsilon_6*\epsilon_3$	0.0000263	3.77
$\epsilon_6*\epsilon_4$	-0.0000270	-1.78
$\epsilon_6*\epsilon_5$	0.0000249	2.04
$\epsilon_6*\epsilon_6$	-0.0000320	-3.62

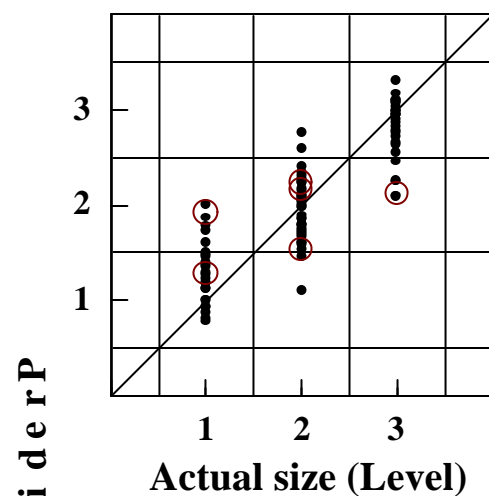


Fig.9 Predicted results of size levels by response surface

る水準を越えて判定されるものはないことがわかる。この図からも実用的精度を考慮すれば水準 2 以上のはく離(4~7mm)は同定可能であり、水準 1(2~4mm)は誤差が大きいと判断できる。

以上から、応答曲面法を用いることで破壊メカニズムを考慮することなく電気抵抗変化による CFRP のはく離き裂が同定可能であることが実証された。

5. 結言

以上、実験的に CFRP $[0_2/90_2]_5$ 積層梁を用いて、7 電極間の電気抵抗変化の情報をもとに層間はく離の位置と大きさを同定する知的構造の開発を行なった。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 応答曲面法を適用した電気抵抗変化によって、破壊のメカニズムを考慮することなく簡便に CFRP のはく離を同定する知的構造が開発されることを実証した。
- (2) 逆問題のはく離同定に応答曲面と実験計画を適用することで、低コストで簡便に同定式を得られることが実証された。
- (3) 電気抵抗変化によって同定可能なはく離き裂は少なくとも 4~7mm 以上であることが実験的に明らかになった。

参考文献

- (1) 北出真太郎, 福田武人, 逢坂勝彦, 池内淳一, FRP シンポジウム講演論文集, 第 21 回, (1992), 38.
- (2) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 機論(A編) 51-467, (1985), 1818-1827
- (3) 阪上隆英, 久保司郎, 大路清嗣, 山本賢治, 中塚 顕二, 機論(A編), 56-521, (1990), 27-32
- (4) 多田直哉, 坂之上悦典, 北村隆行, 大谷隆一, 機論(A編), 56-522, (1990), 259-264
- (5) 轟 章, 鈴木洋之, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集 No.98-5 vol.B (1998), 359
- (6) R. H. Myers, D. C. Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons. Inc.,(1995)
- (7) 例えば, 実験計画法, 田口玄一, (1976), 丸善