

多点電圧変化による CFRP 平板の埋没はく離知的検出構造

轟 章^{*1}, 田中 雄樹^{*2}, 島村 佳伸^{*1}, 小林 英男^{*1}

Smart Structure for Detection of Embedded Delamination of CFRP Plates using Multi-point Voltage Change

Akira TODOROKI, Yuki TANAKA, Yoshinobu SHIMAMURA and Hideo KOBAYASHI
Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

The present study employs an electric voltage change method for the identifications of location and size of embedded delamination cracks of CFRP plates. Measurements of electric voltage change at multiple points are robust against electric resistance change of electrodes, and the method is usually called four-probe method for high precision measurements of electric resistance change. However, our previous analysis showed the method is less sensitive than the method that uses change of electric resistance between the electrodes. In the present study, high precise measurement system of electric voltage change is developed, and the electric voltage measurement method is adopted for identification of embedded delamination location and size. As a result, the electric voltage change method is shown to be useful for the identifications of embedded delamination cracks of CFRP plates.

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

1. 緒言

CFRP 積層板は層間強度が弱く、工具落下など面外からの衝撃により容易に層間はく離が生じる。この層間はく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ため、層間はく離を現場で容易に検出する知的構造の開発が必要とされている。

著者らは、CFRP の強化材である炭素繊維の導電性を利用し、層間はく離によって生じる 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の電極を用いて測定することによって、層間はく離の位置および寸法を定量的に同定する知的構造の開発を実験的に実施している⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。構造材に埋め込まれている炭素繊維をセンサに利用することで、異物を新たにセンサとして埋め込むことによる強度低下や成形の問題もなく、かつ実工程は電極を構造表面に作成するだけであり、既存構造に容易にかつ安価に適用可能である。

これまでに貫通き裂を有する CFRP 梁試験片を用い

てはく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、電極を表面層 0°方向（表面層繊維方向）に 5 個以上配置すれば高い同定精度が得られることを実証している⁽¹⁾⁽²⁾。また、積層平板の埋没はく離を対象として直交積層板と擬似等方積層板で、実埋没はく離に対して電気抵抗変化法の有効性を実証している⁽³⁾⁽⁴⁾。

著者らはこの炭素繊維接触網のはく離による破壊を利用したはく離同定法に関し、2 電極間電気抵抗変化による方法と、試験片に電流を流して多点の電圧変化を測定する電圧変化法の同定精度を FEM 解析で比較検討し、電圧変化法が電気抵抗法に比較して同定精度に劣ることを既に示している⁽⁵⁾。しかし、電気抵抗変化法は、2 電極間の電気抵抗変化を測定するため、電極信頼性に大きく依存し、現状の銅箔を用いた電極では長期信頼性不足という問題点を有している。電圧変化法は電流電極と電圧測定電極が異なるため、通常の高精度電気抵抗測定に使用される 4 電極法と同じで電極の抵抗変化に影響を受けないという利点がある。

そこで、本研究では、電圧変化法のアナログ電気回路を工夫することで高精度電圧変化測定を実施した電圧変化法を採用した。これを用いて、実機で発生する

*平成 年 月 日受付

〒152-8852 目黒区大岡山 2-12-1

*1 東京工業大学工学部

atodorok@ginza.mes.titech.ac.jp

*2 東京工業大学大学院

埋没はく離を生じる平板試験片に対してはく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、電気抵抗変化法と同定精度を比較検討した。

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 $[0_2/90_2]_S$ 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。試験片形状と寸法を図1に示す。

層間はく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個配置し、90°方向には2列とした。したがって電極数は試験片1枚につき10個となる。電極は積層板成形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。電極を試験片の片面だけに作成しているのは、航空宇宙機器の薄板シェル構造内面だけに電極を配置して、層間はく離を検出することを想定しているためである。

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

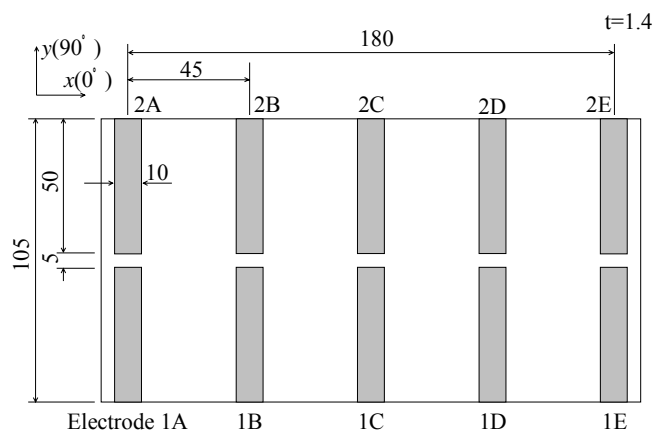


Fig.1 Specimen configuration

2.2. はく離作成方法

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はく離を作成した。この治具を使用することで、作成するはく離位置を自由に制御可能である。はく離寸法は支持円筒治具の直径を変化させることで制御可能であり、直径 $\phi = 10, 15, 30, 50\text{mm}$ 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はく離が発生する。そこで、電極配置面側にはく離を発生させるため、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。

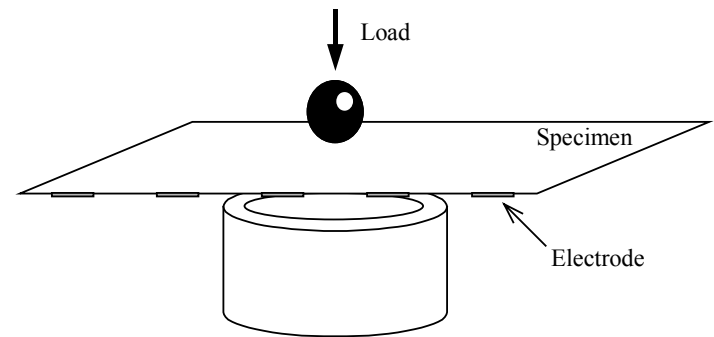


Fig.2 Indentation test

2.3. 電圧変化測定装置

層間はく離による電気抵抗変化は極めて微小なため、抵抗変化のLCRメータなどによる直接的測定は困難である。前報までの研究ではひずみゲージによるひずみ測定と同じ電気抵抗ブリッジ回路を用いて電気抵抗変化を測定した。本研究では電圧変化を測定する。大きな電圧変化を発生させるには大電流が必要があるが、大電流はCFRP積層板を発熱させる。そこで、初期状態の電圧からの微小変化を差動増幅させる回路を複数個作成し、微小な電圧変化を測定した。

使用した実験装置を図3に示す。実験装置は平板試験片に一定電流を流す定電流路と、層間はく離による各電極の電圧変化を1000倍に増幅する差動増幅回路、そして電圧変化を測定するデータロガー(共和電業製UCAM-10A)からなる。

電気抵抗変化法と異なる点として、試験片の電極1A-2A間、1E-2E間をリード線により短絡している点があげられる。これははく離発生時にも試験片全体にほぼ均一に電流を流すことおよび電源電極面積を広くすることで電源電極部のCFRPとの接触抵抗変化による電圧変動の影響を小さくすることが目的である。電極1A,2Aを入力、電極1E,2Eを回路上の接地とし、電極A-E間に一定電流を流す。

平板試験片には定電流回路により250mAの一定電流を入力している。この電流値は比較的大きなものであるが、これは層間はく離によって生じる電圧変化を十分に大きく測定するためである。本定電流回路ではトランジスタに大熱容量のもの(A814,30W)を使用し、大電流を安定的に発生させている。これは、測定用差動増幅回路では電圧変化を1000倍に増幅しているため、測定中の電流値変動は致命的誤差原因となるためである。

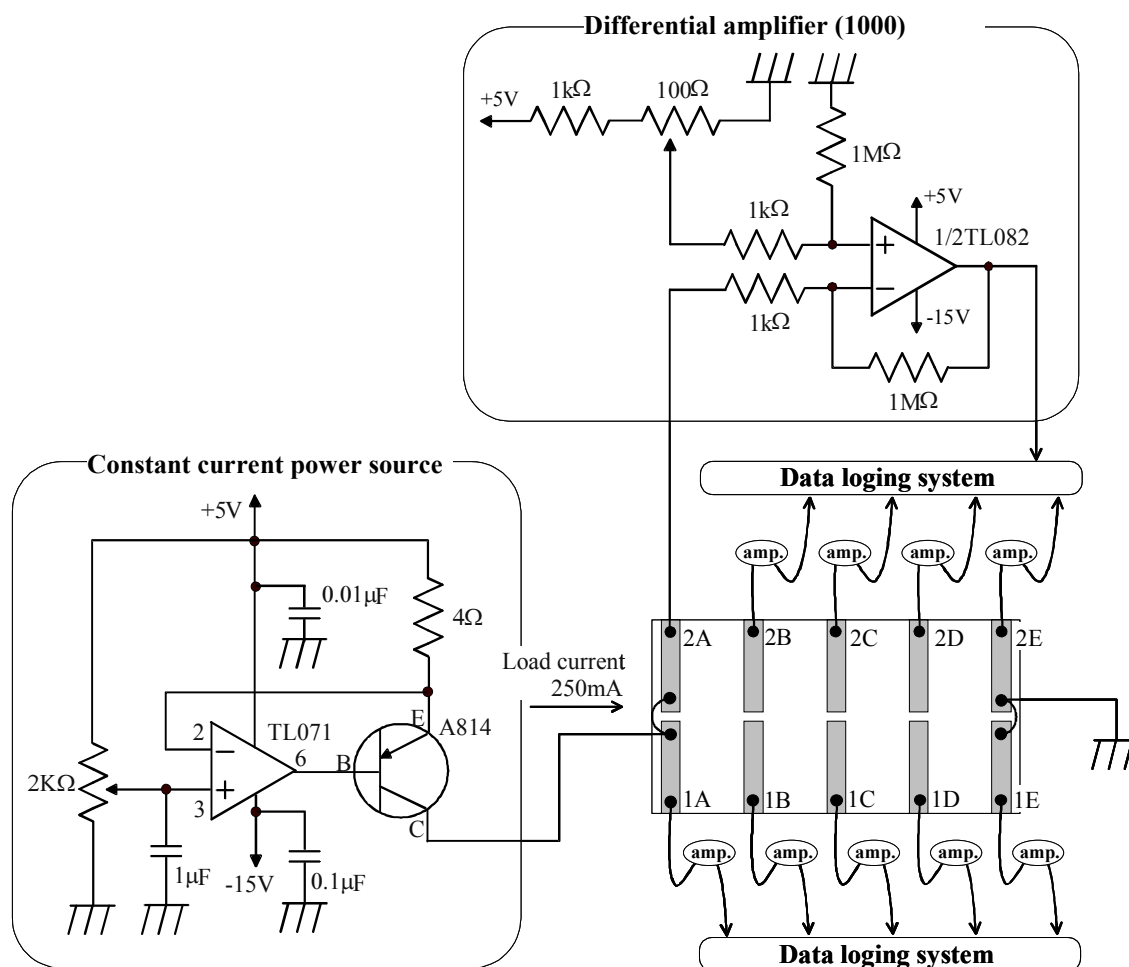


Fig.3 Electric circuit used for voltage change method

試験片の電気抵抗が約 0.6W , 電流が 0.25 A であるため , 消費電力は $0.6 \times 0.252 = 0.0375\text{W}$ である . 試験片の表面積の寸法を考慮するとこの数値は十分小さく , 通電による試験片温度上昇も測定されなかった .

3. 応答曲面法の導入

3.1. 応答曲面法

層間はく離による電気抵抗変化からはく離の位置および寸法を同定するには , 電気抵抗変化とはく離の位置および寸法の間係を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 , 検出精度よりもむしろ簡単な構造で実時間同定できることが望ましい場合が多い .

本研究では , 電気抵抗変化法と同様に電圧変化と層間はく離の位置および寸法の間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)の間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)破壊の種類を考慮することなく , 実験値を関数近似することが可能(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(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 .

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

ここで k は変数の数である . 2 変数 x_1, x_2 の場合 , 次式のようなになる .

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

$x_3 = x_1^2, x_4 = x_2^2, x_5 = x_1 x_2$ 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 .

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad (3)$$

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 .

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

ただし , \mathbf{Y} は応答ベクトル , \mathbf{X} は実験点座標 , $\boldsymbol{\beta}$ は係数ベクトル , $\boldsymbol{\varepsilon}$ は誤差ベクトルである .

誤差最小 2 乗法により , 係数 $\boldsymbol{\beta}$ の不偏推定量 \mathbf{b} は次式で得られる .

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (5)$$

さらに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 は次式で表される .

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E / (n - k - 1)}{S_{yy} / (n - 1)} \quad (6)$$

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, 6] を参照されたい.

式(6)から, 応答曲面の各係数 b 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 $(X^T X)^{-1}$ の最小化の実験点の選択が実験計画法である. これには応答 Y を必要としないため, 非常に低コストである. 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),(6)}. D 最適基準とは, $|X^T X|$ を最大化する実験計画である.

3.2. 応答曲面法の逆問題への適用

層間はく離(位置・寸法)に起因する電気抵抗変化の測定は順問題に相当し, 測定した電気抵抗変化を用いたはく離の位置および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な実験点の選択, つまり逆問題における最適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はく離を作成し, 8 電極間の電気抵抗変化を測定する.
2. はく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, 多数点の抵抗変化の近似値を計算する.
4. 近似値と実験値の合計に対して 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, 電気抵抗変化からはく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.

3.3. 水準

水準分割は位置・寸法とも電気抵抗変化法の積層構成 $[0_2/90_2]S$ のものと同様であり, 位置水準は図 4. に示すような 8 水準, 寸法水準は, 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. なお, はく離寸法の定義は前報と同様に最大寸法とした.

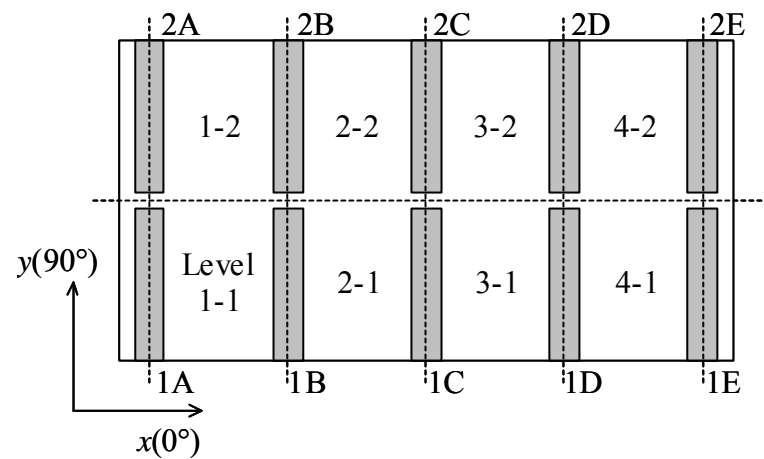


Fig.4 Delamination location levels

はく離は超音波 C スキャン(板厚方位に超音波を入射し, 超音波プローブを XY 方位に移動させて XY 面の損傷を画像化する)で測定される投影長さから測定している. はく離位置は, 薄板であり, 厚さ方位の位置同定が極めて困難なことから, 物理的に薄板のはく離位置に差異が小さいことから, 平板の平面上の座標だけを用い, 厚さ方位の同定は行わない.

3.4 はく離位置と大きさの同定手法

試験片に層間はく離を発生させ, 層間はく離発生前後における各電極の電圧変化を測定する. 1 個のはく離につき測定される電圧変化は 10 個となるが, 電圧変化値として実際に応答曲面に使用されるものは, 電極間の電圧の変化の差 $(\Delta V_{1A} - \Delta V_{1E}), (\Delta V_{1B} - \Delta V_{1E}), (\Delta V_{1C} - \Delta V_{1E}), (\Delta V_{1D} - \Delta V_{1E}), (\Delta V_{2A} - \Delta V_{2E}), (\Delta V_{2B} - \Delta V_{2E}), (\Delta V_{2C} - \Delta V_{2E}), (\Delta V_{2D} - \Delta V_{2E})$ の 8 個である. これは, 層間はく離が生じて V_{1E}, V_{2E} は回路上の接地点であり変化しないこと, 電気抵抗変化法と比較のため情報量(逆問

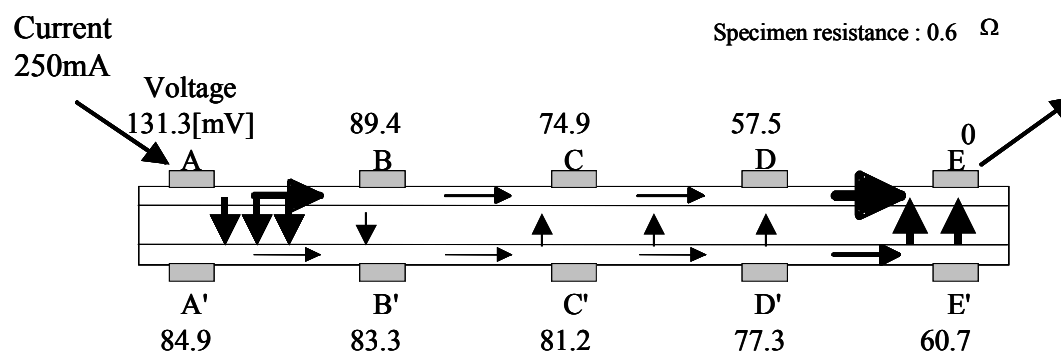


Fig.5 Electric potential distribution and schema of electric current

題応答曲面の説明変数の数)を同じにするためである。また、 $\Delta V_{1A}, \Delta V_{1B}, \dots, \Delta V_{2E}$ は増幅回路により 1000 倍に拡大された実測値をそのまま使用する。

6 4 個の実験値を取得したのち、逆問題応答曲面により層間はく離の位置および寸法を同定する。同定には電気抵抗変化法と同様に実験誤差に頑健な方法として水準に離散化した値を用いる。

4. 実験結果と考察

4.1 電圧変化測定結果

試験片内の電流の流れを観察するために、特別に試験片表裏面両面に電極を取り付けて約 250mA の一定電流を通電した際の電圧分布を図 5 に示す。図は試験片の横断面図である。図中の値は各行における実測した電圧値の 2 列の電極の平均である。例えば電極 A の電圧値 131.3mV は電極 1A と電極 2A の平均値である。図中矢印は実測した電圧値から推測した試験片表面および板厚方位を流れる電流量を表したものである。内部 90° 層内の電流については測定結果が無いため不明であり記入していないだけであることに注意されたい。入力もしくは接地に近い電極間(AB,DE 間)に比較的大きな電流が流れている。また、裏面に流れる電流は小さいことがわかる。電流電極ごく近傍で 90° 層を通過して下部 0° 層内に流れ込むあるいは電源電極に戻る電流が存在する。平板中央近傍では板厚方位に流れる電流は非常に少ない。このため、板中央付近のはく離による電圧変化は小さいことが予想される。

8 分割した各位置水準に層間はく離を作成した際の、10 個の各電極で測定した電圧変化を表 1 に示す。表にはその寸法が同程度のはく離を選択して記載している。四角で囲んだ部分は、その電極間にはく離が存在していることを示している。電圧変化は増幅回路により 1000 倍に増幅された値である。表 1 からのはく離の位置によって電圧変化の様相は大きく異なっているのがわかる。

はく離が x 水準 1 もしくは 4 に存在する場合と比較して、x 水準 2 もしくは 3 に存在する場合には、電圧変化は極端に小さくなる。これは先に述べたように、この付近に板厚方位に流れる電流が非常に小さいためであり、この付近に存在するはく離は同定困難であることを意味する。したがって、電源電極の間に設置する電圧変化測定用電極の数を過多にするかあるいは電源電極間隔を広くすると、はく離同定は困難となる。その数と間隔は本実験の 3 個かつ 180mm 以下が適切であると思われる。

Table 1 Measured electric voltage change

Delamination			Voltage change[mV]				
Location	level	size	2A	2B	2C	2D	2E
x	y	[mm]	1A	1B	1C	1D	1E
1	1	23.51	-641	-175	-84	-41	4
			-656	69	64	43	8
1	2	22.95	-467	-30	9	28	-7
			-458	-112	-55	-25	-7
2	1	21.46	-49	-15	1	-13	-9
			-51	8	-7	-15	-11
2	2	22.68	-19	-48	-14	-2	3
			-20	-1	0	5	3
3	1	21.76	-26	-26	-26	-26	-2
			-22	-13	-14	38	-3
3	2	21.75	-36	-36	-21	-12	-18
			-38	-36	-36	5	-18
4	1	22.08	-283	-268	-250	-213	-19
			-282	-291	-280	-207	-9
4	2	22.35	-312	-326	-320	-279	-2
			-311	-290	-266	-215	-9

4.2 はく離同定結果

はく離の位置および寸法を変化させた 64 点の実験値から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。順問題応答曲面の自由度調整済み決定係数は、各電圧変化に対してそれぞれ 0.698, 0.668, 0.720, 0.708, 0.696, 0.722, 0.778, 0.767 である。水準化した位置計算としては十分な精度が得られている。作成したそれぞれの順問題

Table 2 Comparison of estimation performance

Method of measurement		Voltage	Resistance	
Staking sequence		[0 ₂ /90 ₂]s	[0 ₂ /90 ₂]s	
Number of electrodes		10		
Spacing of electrodes		45mm		
Number of experiments		64		
Number of selected data		192 (64×3)		
R_{adj}^2	Location	x	0.903	0.920
		y	0.695	0.826
	Size	0.678	0.753	
Estimation performance	Used in RS	Location (absolute)	84.4%	86.5%
		Location (practical)	97.4%	99.5%
		Size	80.7%	81.3%
	Not used in RS	Location (absolute)	37.5%	66.7%
		Location (practical)	100.0%	100.0%
		Size	12.5%	58.3%

応答曲面に、はく離位置 x, y およびはく離寸法の数値を代入し各電圧変化の近似実験値を算出した。代入した数値は電気抵抗変化法と同様、はく離位置の x 方向は 20mm から 160mm まで 5mm 間隔で y 方向は 25mm から 80mm まで 5mm 間隔で、はく離寸法は 13mm から 25mm まで 0.5mm 間隔である。

得られた近似実験値と 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。このとき 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。選択された 192 点のはく離位置および寸法を水準化した数値を用いて、各電圧変化からはく離位置水準(x, y)、はく離寸法水準を求める逆問題応答曲面をそれぞれ作成した。順問題応答曲面、逆問題応答曲面とも 2 次多項式近似とした。そして逆問題応答曲面により推定した位置水準および寸法水準を、実測した位置水準および寸法水準と比較した。前述の通り、位置は 8 水準、寸法は 3 水準に分割し、逆問題応答曲面による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 8 個の実験値を逆問題応答曲面に代入して推定した。

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 2 に示す。表には電気抵抗変化法の結果も併記しておく。 R_{adj}^2 は回帰に用いた点での近似の精度を表しており、良好な精度であると判断できる。応答曲面の回帰に使用した実験計画による選択点の正答率は、位置で 84.4%、隣接水準も含めた場合は 97.4%、寸法で 80.7% である。応答曲面の回帰に使用しなかった実験値の正答率は、位置で 37.5%、隣接水準も含めた場合は 100%、寸法で 12.5% である。

応答曲面の回帰に使用した選択点に関しては、位置・寸法とも電気抵抗変化法と同程度の高い精度を示しており、電圧変化法の実機構造への適用可能性が実験的に確認された。

応答曲面の回帰に使用しなかった実験値では電気抵抗変化法と比較して非常に低い正答率である。しかし、隣接水準を含めた場合の位置正答率が 100% と高いことから、測定法や同定法の工夫により、はく離位置同定精度の向上を図ることが可能であると思われる。

電圧変化法では寸法の推定誤差が大きい。そこで、はく離寸法同定で得られたはく離寸法の予測値と測定された寸法水準を比較して図 6 に示す。この図において、横軸は測定されたはく離寸法水準、縦軸は推定されたはく離寸法水準である。図中の実線は水準分割の間隔を表している。図中对角線上の結果が正答を表し

ており、対角線上の黒塗り箱内の結果が水準で考えた場合の正答を意味している。この結果から、誤答の場合でも隣接水準を推定しており、著しく測定値を外れた推定はないことがわかる。

この結果から得られる推定誤差を 2 次の多項式応答曲面で近似し、平板上のはく離位置によるはく離寸法推定誤差の分布を調査した結果を図 7 に示す。誤差(応答)自体は近似値であるので参考程度の意味しかないが、誤差分布の概観を見ることができる。図から明らかに、板厚方位の電流の小さい試験片中央での誤差が大きくなっている。以上のことから、試験片への電流の流し方の改善によってはく離寸法予測精度の向上も可能であることがわかる。また、回帰に使用しない実験結果の寸法推定値正当率が低い原因として、この中央付近の測定が困難であることによって、実験誤差の影響を受けやすいことが考えられる。平板への電流の流し方を改善(電源電極間隔の縮小)することではく離後の電圧変化出力は増大することが明らかであることから、この回帰に使用しない結果の寸法推定誤差も改善可能であると判断できる。以上の結果から、電圧変化法も実用的に適用可能であると判断される。

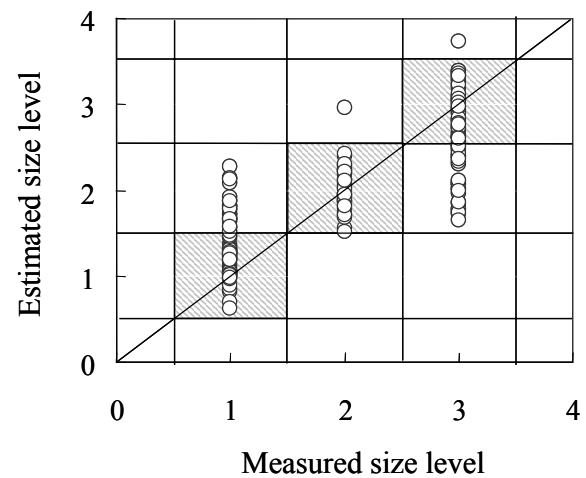


Fig.6 Estimation results of delamination size

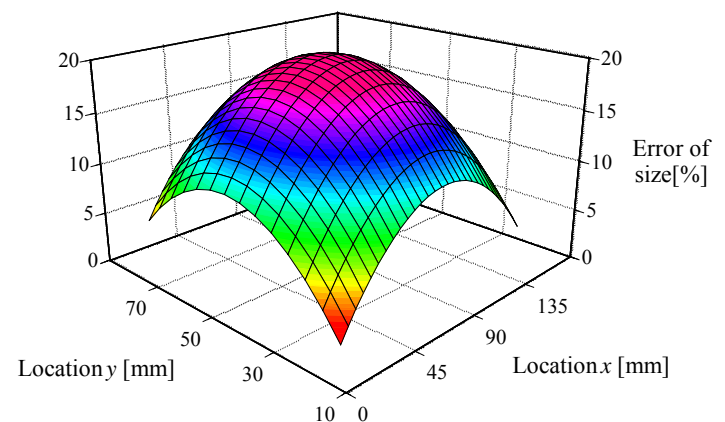


Fig.7 Estimation error of delamination size

5. 結言

CFRP 積層板に定直流電流を流し、はく離後の平板表面で測定した電圧変化を用いて、実機はく離と同じ

埋没層間はく離の位置および寸法を定量的に同定する電圧変化法を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) 電圧変化法でも本研究で用いた回路を用いることで電気抵抗変化法とほぼ同等の正答率で実機に生じる埋没はく離の位置と寸法の検出が可能である。電極信頼性の影響の少ない電圧変化法の有効性が実証された。
- (2) 板厚方位に流れる電流は板中央で非常に少ないことに起因して板中央部の推定誤差が大きくなる傾向があり、電極間隔の適切化が必要である。

参考文献

- (1) 田中雄樹, 轟 章, 島村佳伸, 機論, 65A-640, (1999), 2432-2438
- (2) 田中雄樹, 轟 章, 島村佳伸, 小林英男, 中村春夫, 機論, 66A-647, (2000), 1355-1361.
- (3) 轟章, 田中雄樹, 島村佳伸, 材料, 50-5, (2001) 印刷中
- (4) 轟章, 田中雄樹, 島村佳伸, 日本複合材料学会誌, 27-3, (2001) 137-145.
- (5) 轟 章, 鈴木洋之, 小林英男, 中村春夫, 島村佳伸, 機論 64A-622, (1998), 1654
- (6) R. H. Myers, D. C. Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons. Inc., (1995)