

研究論文

電位差法を用いた CFRP 積層板のはく離モニタリング ——同定誤差原因と 2 段階はく離同定による改善——

上田 政人^{*1}, 轟 章^{*2}, 島村 佳伸^{*2}, 小林 英男^{*2}

(2003 年 10 月 8 日受付)

Monitoring of Delamination of Laminated CFRP with Electric Voltage Method
——Two-Stage Monitoring Method for Various Shapes of Delamination——

Masahito UEDA,^{*1} Akira TODOROKI,^{*2} Yoshinobu SHIMAMURA^{*2} and Hideo KOBAYASHI^{*2}

(Received October 8, 2003)

Monitoring of delamination is indispensable for CFRP structures. In authors' previous studies, the delamination can be monitored with the electric resistance change method. This method provided excellent performance of estimations. However, the method requires complicated electric circuits and uses a two-probe method: electric resistance at the electrodes has significant effect. To resolve these problems, an electrical voltage change method is adopted in the present study. Since the electrical voltage change method provides poor performance of estimations in our previous study, the present study employs a standardization method that has shown significant improvement of estimations for the electrical resistance change method. As a result, the electrical voltage change method shows good performance of estimations for delaminations located near the edges of the specimen and poor performance near the middle of the specimen. The zigzag shape has large effect on the performance of estimations for the delamination near the middle of the specimen. In this paper, two-stage delamination monitoring method that is not affected by the shape of delamination is proposed. The validity of this method is verified using the FEM analysis.

1. 結 言

CFRP 積層板構造は優れた比強度, 比剛性を有するため, 航空宇宙機器構造や輸送機器構造において適用が拡大している。しかし, CFRP 積層板は層間強度が弱く, 小さい衝撃でも容易にはく離が生じる。このはく離は CFRP 積層板の圧縮強度を著しく低下させるため, CFRP 積層板の本来の力学的特性の発揮及び, 構造安全性保証の観点から簡便なはく離検出法が望まれている。

CFRP 構造では炭素繊維自体の導電性を利用した損傷検知や負荷ひずみ測定手法が多くの研究者から提案されている¹⁻¹⁰⁾。この方法はセンサー埋め込みによる強度

低下が生じないことや, 積層板表面に電極を取り付けるだけで安価に適用が可能であるという利点を有する。このため, 著者らはこれまでに CFRP 構造の電気特性変化法を用いたはく離検出手法の開発を解析的及び実験的に実施してきた¹¹⁻¹⁷⁾。

これまでの研究において, CFRP 積層板の片側表面に複数電極を作成し, 隣接電極間電流負荷時の電極間電気抵抗変化ではく離位置と寸法の同定が可能であることが実証された¹¹⁾。また, 測定した電気抵抗変化を規格化することで非常に高い精度ではく離位置が同定可能であることが示された¹⁷⁾。しかしながら, この電気抵抗変化法は同定精度が高いが, 測定回路を順次切替えて多数回の電流負荷が必要であるために, システム回路が複雑になってしまう。また 2 電極法を用いているために電極不都合などの影響を分離できない。

これらの問題点を改善する方法として, 1 対の電流電極と多数の電圧電極を設置した電位差法を採用し, 電流を構造全体に流した状態で電圧電極の電極間電位差を測

^{*1} 東京工業大学大学院博士課程 (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

^{*2} 東京工業大学大学院理工学研究科

定する方法がある。この方法では1回の電流負荷で構造全域のはく離同定が可能であり、また電流電極と電圧電極を分離するために電極不具合の影響も分離可能となる。以前の著者らのFEM解析^{11,12)}及び実験的研究^{13,14)}により、電位差法でははく離による電位変化が小さく、同定精度が低下することが既に示されているが、電気抵抗変化法で著しい同定精度向上をもたらした規格化法を適用することで、電位差法でも同定精度の向上が可能であることが示された¹⁸⁾。

また、実機に電気特性変化法を適用する場合、応答曲面作成に多数の実験実施が必要になるが、これはコスト高となる。このため、はく離に起因する電気抵抗変化をFEM解析で得ることが望ましい。実際のはく離はマトリックス割れを伴い、はく離は複雑なジグザグ形状であるが、FEM解析では解析の簡便化のため直線はく離を用いる方が便利である。

直線はく離とマトリックス割れを伴うジグザグ形状はく離の差異を解析し、はく離がジグザグになると電気抵抗変化に差異が生じるが、直線はく離との差異は小さく、はく離位置や寸法の同定には影響がないことが電気抵抗変化法については示されている¹⁷⁾。しかしながら、電位差法では、電流印可電極間の中央付近にて、はく離形状の影響を大きく受けてしまい、直線はく離の応答曲面を用いてZ型や逆Z型の割れの同定をする場合、大きく誤同定してしまうことが明らかとなっている¹⁸⁾。

しかし、前報では電位差法を採用した際、はく離が梁中央部にある場合だけジグザグ形状のはく離に対して寸法の誤同定を生じた。そこで、本研究では電位差法における梁中央付近での同定誤差原因の解明とその改善手法の提案を行う。また、直線層間はく離から作成した応答曲面を用い、マトリックス割れを伴うジグザグ形状の実はく離も同定可能な、はく離形状に依存しない2段階同定方法を提案する。

2. 電位差法

CFRP積層板の強化材の炭素繊維は導電材料であり、繊維が接触したネットワーク構造となっている。CFRP積層板に電流を負荷し、はく離が生じることによるCFRP積層板表面の電位分布変化を検出する。金属材料においては、検出した電位分布から逆問題としてはく離の位置と寸法の同定が可能であることが既に示されている^{19~21)}。

この電位差法をCFRP積層板に適用する場合、炭素繊維自体をはく離検出用のセンサーとして用いるために、他のセンサーの埋め込みによる強度低下や重量増加が生じない。また、電流負荷用と電位差測定用の電極を積層板表面に貼り付けることでモニタリング可能であり、安価であり、既存構造にも適用可能であり、システム補修も容易である。

3. 解析方法及びはく離同定

3.1 解析モデル

本研究では、汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いて FEM 解析を行う。試験片形状は長さ 200 mm、厚さ 1 mm の二次元梁である (Fig. 1 参照)。積層構成は直交積層 [0/90]s である。ここでは 1 層の厚さを 0.5 mm にしている。梁試験片の表面には 7 個の電極が取り付けられており、実際のシェル構造において機器内側だけに電極を設置することを想定している。

直交積層 [0/90]s では、電流を試験片両端部表面から負荷すると、試験片全体で厚き方向電流が生じる。この厚き方向電流によって、はく離発生時に積層板内で電位の変化が生じるため、はく離発生前後での電極間電位差変化を測定することで、はく離の同定が可能である。

FEM 解析では四角形四節点要素を用い、要素分割は縦が 0.0625 mm、横 0.25 mm とした。電極幅は 5 mm であり、節点を結合して電位を等しくしている。また解析

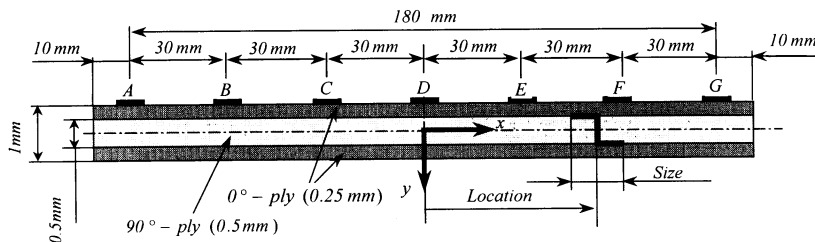


Fig. 1 Analytical model of laminated CFRP.

Table 1 Conductivity ratio of CFRP ($V_f=0.472$).

V_f [vol%]	σ_{90}/σ_0	σ_t/σ_0	σ_0 [$m^{-1}\Omega^{-1}$]
0.472	1.05×10^{-3}	2.24×10^{-4}	4.6×10^3

に用いた CFRP の導電率は参考文献 15) で繊維体積含有率 $V_f=0.472$ の CFRP で実測した値である。これを Table 1 に示す。Table 1 において、 σ_0 は繊維方位の導電率、 σ_{90} は繊維直交方位 (90° 方位) の導電率、 σ_t は厚さ方位の導電率 (層間樹脂リッチ層を含む) である。

3.2 はく離同定手法

本研究では電位差法からはく離の同定を行う逆解析手法として応答曲面法を用いる。応答曲面の詳細は参考文献 22) を参照されたい。これまでの著者らの研究により、応答曲面には 2 次多項式で十分であることが既に FEM 解析及び実験的に示されている¹¹⁻¹⁷⁾。

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

梁型試験片の端部電極から他端部まで電流を負荷するため、電極 A に電流 50 mA を負荷し、電極 G の電位を 0 V とする。

はく離のない状態で中心電極 D を基準に電極 AD, BD, CD, DE, DF, DG 間の電位差 V_{i0} ($i=1\sim 6$) を算出する。

次に、はく離がある状態で電流を負荷し、これらの電極間での電位差 V_i ($i=1\sim 6$) を同様に求める。設定したはく離寸法は 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mm の 9 通りであり、はく離の位置は $x = -90$ mm から $x = 90$ mm までの区間において 5 mm 間隔の位置で作成し、合計 315 通りの FEM 解析を実施する。ただし、はく離寸法が 20 mm 以上の場合については、端部に貫通したはく離が生じないように 5 mm ずつ内側に移動させた。

以上で得られたはく離発生に起因する電位差からその

変化率 $\Delta V_i/V_{i0}$ を算出し、得られた電位差変化率ベクトルをその大きさを規格化する。応答曲面の説明変数は規格化された電極間電位差変化率ベクトル $\Delta v_i/v_{i0}$ と、その大きさ L の計 7 個であり、被説明変数ははく離位置または寸法である。

$$\frac{\Delta v_i}{v_{i0}} = \frac{\Delta V_i/V_{i0}}{L} \quad (i=1\sim 6) \quad (2)$$

$$L = \sqrt{\sum_{k=0}^6 (\Delta V_k/V_{k0})^2}$$

応答曲面を作成する際には、 t 検定により回帰寄与の低い項は削除し、自由度調整済み決定係数が最大になるようにする²²⁾。

3.3 はく離形状

はく離の形状については直線層間はく離、また、マトリックス割れを伴うジグザグ型はく離の例として Z 型及び逆 Z 型のはく離の 3 種類を想定した (Fig. 2 参照)。Z 型のはく離とは、マトリックス割れを挟んで左上と右下に等長の層間はく離を持つはく離であり、逆 Z 型はその対称形である。上部と下部のはく離長さの比率はそれぞれ等しい場合が最も直線はく離との差異が大きくなったため、ここでは等長の層間はく離を持つ Z 型及び逆 Z 型のはく離影響だけを考えた¹⁷⁾。

梁試験片は左右対称であるため、梁中央を原点とする。層間はく離はその中央部まで、Z 型及び逆 Z 型のはく離についてはマトリックス割れの位置 (はく離中央) までの距離をその位置と定義する。またはく離寸法はそれぞれのはく離の投影全長である。ここで、直線はく離は電極側の層間に生じさせた。これは一般的に、衝撃を受けた反対側の層間に大きなはく離が発生するためである。FEM 解析において、はく離の作成の際は、節点を二重に定義して要素分割を行い、はく離発生時に節点を分離して完全に電流が流れない状態を模擬している。

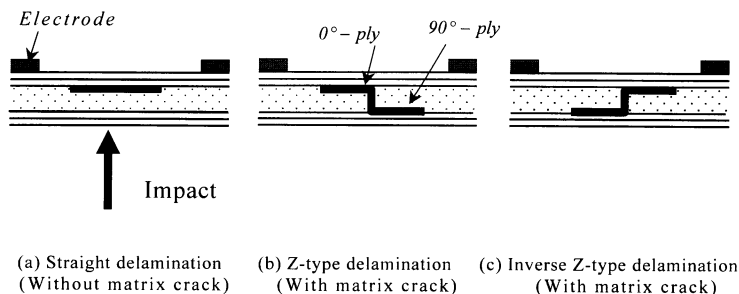


Fig. 2 Types of delamination crack.

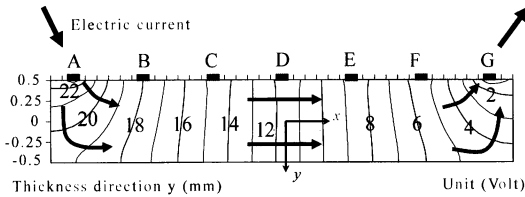


Fig. 3 Contour plot of electric voltage in CFRP beam.

3.4 はく離同定

前報¹⁸⁾において梁試験片全体に電流を負荷し、FEM解析により得られた直線層間はく離発生に起因する電位差からはく離の位置と寸法を推定する2つの応答曲面を作成した。この直線層間はく離の応答曲面では自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は位置同定で0.9988, 寸法同定で0.9251であった。自由度調整済み決定係数は1に近い値であれば精度良く近似できていることを示している。規格化法を適用することにより、電位差法を用いても非常に精度良くはく離が同定された。しかし、直線はく離の結果から得られた応答曲面を用いてZ型及び逆Z型のはく離寸法を同定した結果、はく離が梁中央付近にある場合には大きな同定誤差が生じた。特に寸法同定においては15 mm程度以下の小さいはく離において大きな誤差を生じている。例えば7 mmのはく離寸法が-40 mmと同定された。しかし、位置の同定精度は非常に良く、梁中央部付近でのみ誤差を生じていた。

隣接電極間に電流を流して電気抵抗変化を測定する電気抵抗変化法では、はく離形状の差異が同定精度に影響を与えなかった¹⁷⁾。しかし、電流を梁試験片の端部電極から他端部に負荷する前報で用いた電位差法では、はく離が梁中央部付近にある場合だけはく離形状の影響を受け、大きく誤同定してしまう結果となった。

4. はく離同定誤差原因の検討

電極 A に 50 mA の電流を負荷し、電極 G を 0 V に設定した際の試験片内の電位分布を Fig. 3 に示す。図の横軸は試験片長手方位の座標であり、縦軸は厚さ方位の座標である。試験片中に示している数字は等電位線を意味している。この図から明らかなように、電流電極 A および G の近傍では厚さ方位に電位分布があり、電流が厚さ方位に流れていることを示している。これは電極を設置した上表面の0°層だけでなく、下表面の0°層にも電流が流れていることを意味している。しかしながら、試験片中央近傍では等電位線が表面に垂直になり、電流は完

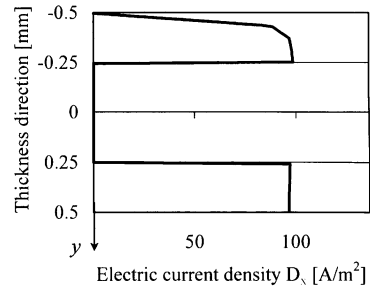


Fig. 4 Electric current density to the longitudinal direction at $x=0$.

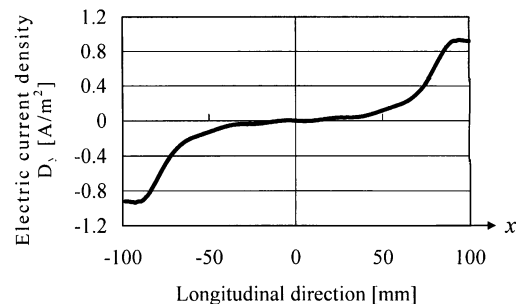
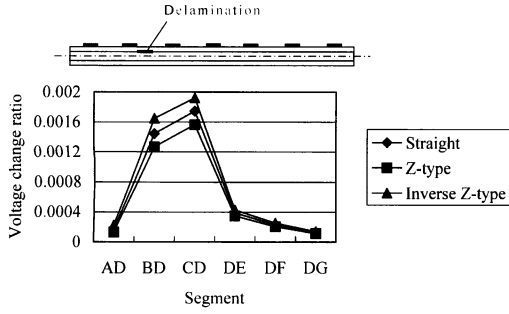


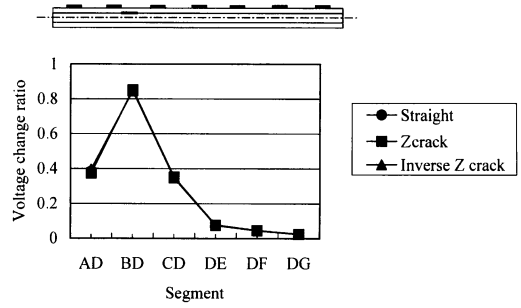
Fig. 5 Electric current density to the thickness direction at $y = -0.25$ mm.

全に表面に水平に流れている。Fig. 4 に梁中央部における長手方位の電流密度分布を示す。縦軸は厚さ方位位置であり、横軸は電流密度である。この図から、ほぼ半分の電流が下表面0°層を流れていることがわかる。Fig. 5 に電極側表面0°層と中央部90°層の層間を流れる厚さ方位の電流密度を示す。横軸が長手方位の座標であり、縦軸が電流密度である。この図から梁試験片の中央部では厚さ方向に流れる電流密度が0になっていることがわかる。

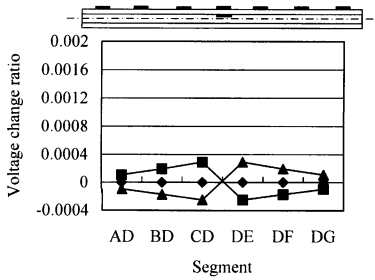
はく離の寸法が5 mm の場合の、規格化していない電極間電位差変化率を Fig. 6 (a), (b) に示す。はく離位置が、電流電極 A に近い Fig. 6 (a) の場合、はく離のジグザグ形状に無関係に電極間電位差変化率はほぼ同じ形状になっている。これは90°層内を流れる電流がほとんどないため、マトリックス割れの影響に比較して、層間はく離が厚さ方位に流れる電流を妨げる効果が大きいため、はく離形状が影響を与えていないことが原因である。これに対して同じ5 mmのはく離が試験片中央にある Fig. 6 (b) の場合、厚さ方位電流密度が低いために、先の電流電極に近い場合と比較して非常に電位変化が小



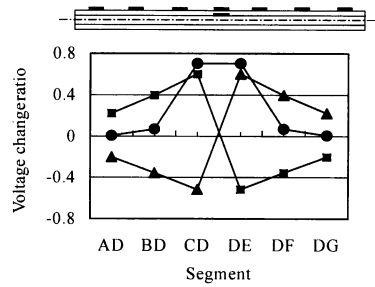
(a) Delamination location $x=-50$ (Delamination size 5 mm)



(a) Delamination location $x=-70$ (Delamination size 5 mm)



(b) Delamination location $x=0$ (Delamination size 5 mm)



(b) Delamination location $x=0$ (Delamination size 5 mm)

Fig. 6 Electric voltage changes without standardization (delamination size 5 mm).

Fig. 7 Standardized electric voltage changes (delamination size 5 mm).

さい。そのため、はく離形状による微小な差異のみが表れている。次に、この場合の規格化した電極間電位差変化率を Fig. 7 に示す。この図から、はく離形状に起因した電位変化のごくわずかな差異が規格化によって大きく拡大されていることがわかる。

2 電極間の電位を測定する電気抵抗変化法では、規格化法は実験的にも成功している。これは、電気抵抗変化法では隣接電極間に電流を流すために電流電極間距離が狭く、板厚方位の電流が極端に低下する領域がほとんどないことに起因する。一方電位差法では、電流電極間距離が広いために試験片中央部付近において厚さ方位の電流の流れがなくなる領域が生じる。このため、はく離形状に依存したごくわずかな数値上の差異が拡大されてしまうことが誤同定の原因となった。したがって、梁中央付近から板厚方位に電流を流す方法を追加することで精度良い同定が可能となることが推察される。

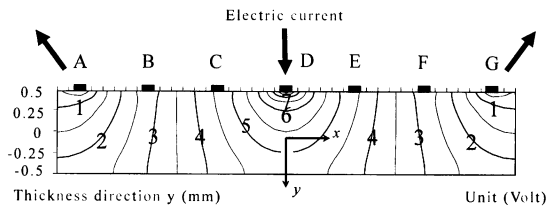


Fig. 8 Contour plot of electric voltage in CFRP beam when electric current is charged at the center electrode D.

5. 改善した拡大応答曲面による同定手法

電位差法では、はく離が中央付近にある場合だけ厚さ方向電流の不足のために電位差変化が小さく、規格化で誤差が拡大されてしまう。しかし、従来の規格化手法でも電極 CE 間以外の外側にはく離がある場合には十分な精度で同定が可能であり、また、CE 間にはく離がある場合でも、はく離が CE 間にあることは正確に予測可能で

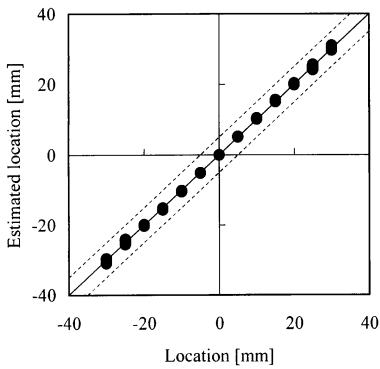


Fig. 9 Estimated location of straight delamination crack between electrodes CE using the response surface made from the analysis of the straight delamination crack ($R_{adj}^2=0.9996$).

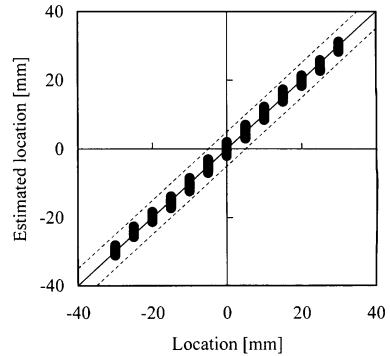


Fig. 11 Estimated location of Z-type and inverse Z-type delamination crack between electrodes CE using the response surface made from the analysis of the straight delamination crack.

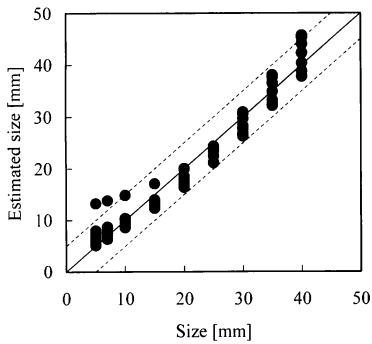


Fig. 10 Estimated size of straight delamination crack between electrodes CE using the response surface made from the analysis of the straight delamination crack ($R_{adj}^2=0.9472$).

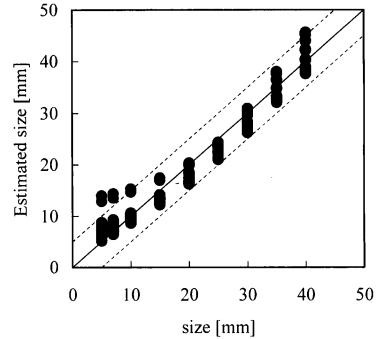


Fig. 12 Estimated size of Z-type and inverse Z-type delamination crack between electrodes CE using the response surface made from the analysis of the straight delamination crack.

あった。そこで、はく離がCE間にあると判定された場合に、別の方法で精度の良い同定を実施する。具体的には、試験片中央付近での板厚方向に流れる電流を増加させるため、CE間にはく離があると判定された場合には電流の流し方を変えた2段階の同定を行う。すなわち、中央電極Dを電流負荷電極とし、端部電極A及びGを電位0Vに設定する。このように電流負荷経路を変えて各電極での電位変化を再度測定する (Fig. 8 参照)。

中央電極Dに50 mAの電流を負荷し、試験片両端の電位AとGを0Vに定める。まず、はく離のない状態でAB, AC, AD, EG, FG間の電位差を求める。次にはく

離発生後の各電極間電位差を求め、規格化電位差変化率を算出する。計算に使用したはく離寸法は、先と同様に5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mmの9通りである。はく離の位置は試験片中央付近の-30 mm (電極C) から30 mm (電極E) の区間に5 mmの間隔で作成した、合計117通りのFEM解析を実施した。

直線ははく離のFEM結果を前節と同様に規格化し、位置と寸法を同定する応答曲面を作成した。結果をFig. 9, 10に示す。横軸は与えられたはく離の位置または寸法であり、縦軸は同定されたはく離の位置または寸法である。従って、実線で示した対角線は推定の正解を表し、

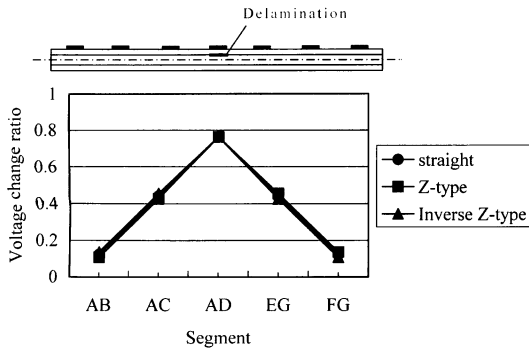


Fig. 13 Standardized electric voltage changes between the electrodes when electric current is charged at the electrode D (delamination location is $x=0$ and delamination size is 5 mm).

破線は±5 mmの誤差範囲を示している。なお、応答曲面には1次式を用いた。その理由は、区間が狭いため、1次式でも同定が高い精度で可能であること、また、次数が低いほど変動に対するロバスト性が高いためである。ここで、位置同定の応答曲面の R_{adj}^2 は0.9996、寸法は0.9472である。

次にこの直線はく離から求めた応答曲面を用いて、Z型及び逆Z型のはく離位置と寸法を同定した。結果をそれぞれFig. 11, 12に示す。図の縦軸と横軸はFig. 9, 10とそれぞれ同じである。図から、はく離が試験片中央にあるにもかかわらず、Z型、逆Z型のはく離が、図中の対角線付近にあり、直線はく離の応答曲面で精度よく同定できていることがわかる。

中央電極Dに電流を流した際の、長さ5 mmのはく離が梁中央にある場合の規格化後の電極間電位差変化率をFig. 13に示す。図中横軸は各電極であり、縦軸は電位差変化率である。長さ5 mmのはく離が中央にある場合でも、直線はく離の結果とZ型、逆Z型の差異は非常に小さくなっている。これは、中央部から電流を流すことで、梁中央付近での厚さ方位電流密度が大きくなり、層間部ではく離に起因する電位変化が大きくなったためである。さらに、狭い範囲のはく離を同定するために拡大応答曲面となっており、同定精度が向上している。

6. 結 論

CFRP直交積層板梁に電流を流して試験片表面の複数の電極位置での電位差変化からはく離の位置と寸法を同定する電位差法において、梁試験片中央付近に存在す

る小さいはく離に対してはく離形状により同定精度が著しく低下した。この現象についてFEM解析に基づき原因を考察し、改善のため、中央から電流を流し拡大応答曲面を用いる方法を提案してその有効性を確認した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 梁試験片全体に電流を流す電位差法では、梁試験片中央付近で板厚方位に流れる電流が非常に減少する。このためにはく離による電位差変化がごく微小になり、規格化法ではく離形状に依存した誤差が拡大されるために直線はく離から得られた応答曲面ではZ型・逆Z型のはく離の同定ができない。

(2) 直線はく離による応答曲面を用い、他の実はく離形状を精度よく同定するために、はく離が梁中央区間に存在する場合に対して、中央電極から試験片端部に電流を流し、この電位差変化から得られた応答曲面ではく離を同定する拡大応答曲面手法を提案した。

(3) 提案した拡大応答曲面手法により、梁中央区間の直線はく離の結果だけからZ型・逆Z型のはく離の精度よい同定が可能であることが明らかになった。

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) K. Schulte & C. Baron: *Composites Sci. Technol.*, **36**, 1 (1989), 63-76.
- 3) P.W. Chen & D.D.L. Chung: *Smart Mater. Struct.*, **2**, 1 (1993), 22-30.
- 4) P.E. Irving & C. Thiagarajan: *Smart Mater. Struct.*, **7**, 4 (1998), 456-466.
- 5) J.C. Abry, S. Bochart, A. Chateauminois, M. Salvia & G. Giraud: *Composites Sci. Technol.*, **59**, 6 (1999), 925-935.
- 6) D.C. Seo & J.J. Lee: *Composite Structures*, **47**, 1-4 (1999), 525-530.
- 7) I. Weber & P. Schwartz: *Composites Sci. Technol.*, **61**, 6 (2001), 849-853.
- 8) N. Muto, Y. Arai, S.G. Shin, H. Matsubara, H. Yanagida, M. Sugita & T. Nakatsuji: *Composites Sci. Technol.*, **61**, 6 (2001), 875-883.
- 9) S. Kubo, M. Kuchinishi, T. Sakagami & S. Ioka: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **15** (1/4) (2002), 261-268.
- 10) J.B. Park, T. Okabe, N. Takeda & W.A. Curtin: *Composites: Part A*, **33**, 2 (2002), 267-275.
- 11) A. Todoroki & H. Suzuki: *Applied Mechanics and Engineering*, **5**, 1 (2000), 283-294.
- 12) A. Todoroki: *Composites Sci. Technol.*, **61**, 13 (2001), 1871-1880.

- 13) A. Todoroki & Y. Tanaka : *Composites Sci. Technol.*, **62**, 5 (2002), 629-639.
- 14) A. Todoroki, Y. Tanaka & Y. Shimamura : *Composites Sci. Technol.*, **62**, 9 (2002), 1151-1160.
- 15) A. Todoroki, M. Tanaka & Y. Shimamura : *Composites Sci. Technol.*, **62**, 5 (2002), 619-628.
- 16) A. Todoroki, M. Tanaka & Y. Shimamura : *Composites Sci. Technol.*, **63**, 13 (2003), 1911-1920.
- 17) 轟 章, 田中美帆, 島村佳伸, 小林英男 : 日本複合材料学会誌, **29**, 3 (2003), 113-119.
- 18) 上田政人, 轟 章, 島村佳伸, 小林英男 : 日本複合材料学会誌, **30**, 4 (2004), 135-141.
- 19) C.N. Owston : *Materials Evaluation*, **34**, 11 (1976), 237-244.
- 20) T. Sakagami, S. Kubo & K. Ohji : *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **7**, 2 (1990), 59-65.
- 21) N. Tada, Y. Hayashi, T. Kitamura & R. Ohtani : *Int. J. Fract.*, **85**, 1 (1997), 1-9.
- 22) R.H. Myers & D.C. Montgomery : *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (2nd Ed.), John Wiley & Sons, Inc., New York (2002).