

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 ——規格化電位差法の適用とはく離形状の影響評価——

上田 政人*¹, 轟 章*², 島村 佳伸*², 小林 英男*²

(2003年9月2日受付)

Monitoring of Delamination of Laminated CFRP with Electric Voltage Method
——Application of Standardization Method and Effect of Shape of Delamination Crack——

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

(Received September 2, 2003)

Monitoring of delamination is indispensable for CFRP structures. In authors' previous studies, the delamination can be monitored with electric resistance change method. This method provided excellent performance of estimations. However, the method requires complicated electric circuits and uses a two-probe method: electrical resistance at 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. Moreover, the effect of zigzag shape of delaminations caused by the matrix cracking on the performance of estimations is investigated using FEM analyses. 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 when the delamination locates near the middle of the specimen. FEM analyses show the small electrical current through the thickness direction near the middle of the specimen causes these effects on the performance of estimations.

1. 緒 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および, 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研究者から提案されている¹⁻¹⁰⁾。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実証されている¹¹⁻¹³⁾。

この方法は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り, システム補修も容易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および実験的に実施してきた¹⁴⁻²⁰⁾。

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

*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

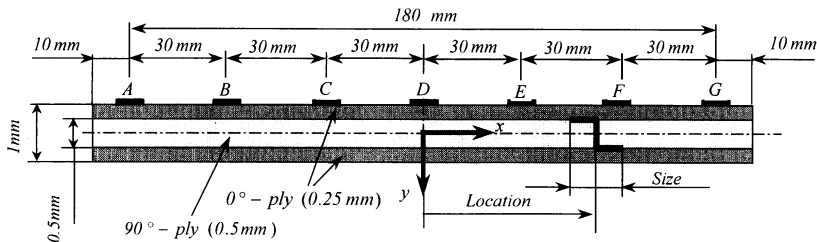


Fig. 1 Analytical model of laminated CFRP.

抵抗変化ではなく離位置と大きさの同定が可能であることが実証された¹⁴⁾。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離位置が同定可能であることが示された²⁰⁾。しかし、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り、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。しかしながら、著者らのFEM解析¹⁵⁾および実験的研究¹⁶⁾により、電位差法ではく離による電圧変化が小さく、同定精度が低下することが既に示されている。これに対して、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電位差法に適用することで、同定精度の低下を回避できる可能性があるが確認されていない。

また、実機に電気抵抗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、はく離が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。

そこで前報では、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、はく離位置や大きさの同定には影響がないことが示されている¹⁷⁾。

以上の背景から、本研究では試験片全体に電流を負荷

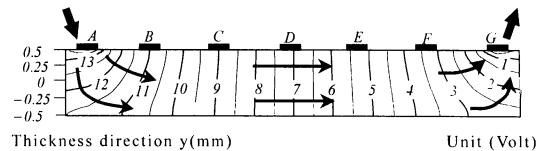


Fig. 2 Contour plot of electric voltage in CFRP beam.

する電位差法を採用した。CFRP直交積層板梁型試験片のFEM解析を用いて電流を梁の全体に流し、規格化法を用いた電位差法によりはく離同定を実施し、その同定精度を検討する。また、FEM解析の簡便性の観点から、電気抵抗変化法と同様に、直線層間にはく離から作成した応答曲面を用いてマトリックス割れを伴うジグザグ形状のはく離を同定し、はく離形状の差異による同定精度への影響についても検討する。

2. 解析方法

2.1 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、試験片全体で厚さ方向電流が生じる (Fig. 2参照)。この厚さ方向電流によって、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

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

あり、節点を結合して電位を等しくしている。また解析に用いた CFRP の導電率は参考文献 19) 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。

2.2 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 21) を参照されたい。応答曲面には以下の 2 次多項式を採用する。

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

2 次多項式の応答曲面で十分であることは既に FEM 解析および実験的に示されている^{14~20)}。梁型試験片の端部電極近傍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 -90 mm から +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を規格化する。ここで述べる規格化法とは、6 個の電位差変化率ベクトルを、その大ききで除して単位ベクトル化することである。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、その大きき 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。

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

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

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。

2.3 はく離形状

はく離の形状については直線的層間はく離、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 型および逆 Z 型のはく離の 3 種類を想定した (Fig. 3 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 Z 型および逆 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 型および逆 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。

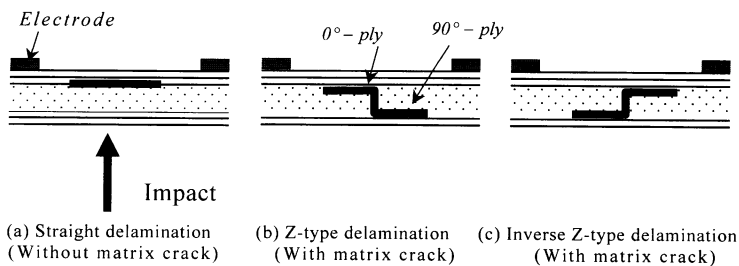


Fig. 3 Types of delamination crack.

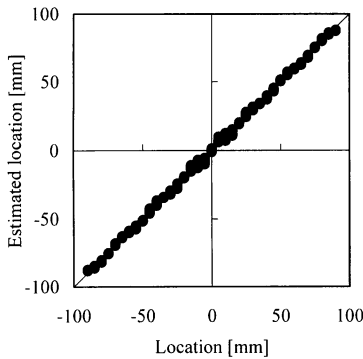


Fig. 4 Estimated location of straight delamination crack using the response surface made from the analysis of the straight delamination crack ($R_{adj}^2=0.9988$).

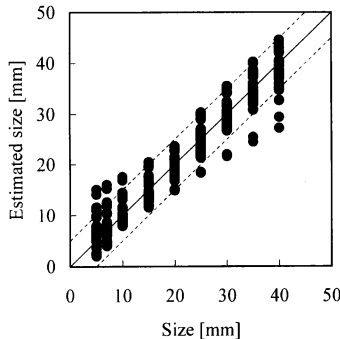


Fig. 5 Estimated size of straight delamination crack using the response surface made from the analysis of the straight delamination crack ($R_{adj}^2=0.9251$).

3. 同定結果

3.1 直線はく離の規格化法による同定

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。作成した応答曲面を用いて回帰に用いた直線層間はく離の位置および寸法を同定した結果をFig. 4およびFig. 5に示す。図中で横軸は実際のはく離位置および寸法であり、縦軸は応答曲面で推定されたはく離の位置と寸法である。したがって、対角線上に位置する結果は推定が正確であることを意味する。自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 はそれぞれ0.9988および0.9251である。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

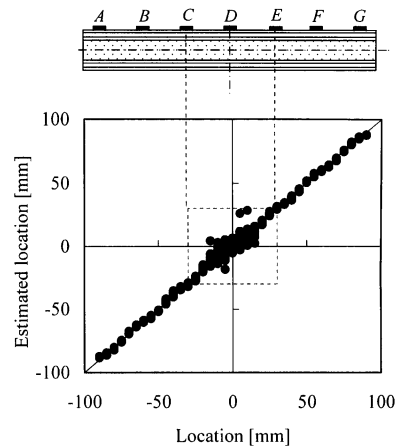


Fig. 6 Estimated location of Z-type and inverse Z-type delamination crack using the response surface made from the analysis of the straight delamination crack.

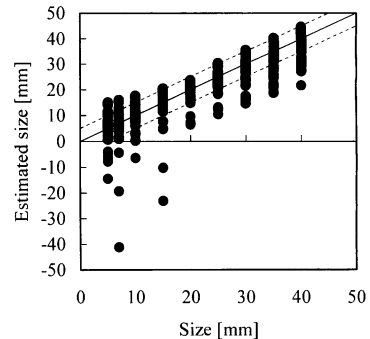


Fig. 7 Estimated size of Z-type and inverse Z-type delamination crack using the response surface made from the analysis of the straight delamination crack.

ることを示している。この結果から、直線はく離においては、電位差法においても規格化法を用いることで同定精度向上が認められる。特に電位差法の位置同定においては、著者らの以前の研究では $R_{adj}^2=0.432$ であり¹⁵⁾、同定精度向上は著しい。

この結果から、従来は実用上、同定精度に問題があった電位差法でも規格化法を使うことで実用的な同定精度が得られることが明らかになった。

3.2 マトリックス割れの影響

直線はく離の結果から得られた応答曲面を用いてZ型および逆Z型のはく離位置を同定した結果をFig. 6

に、寸法を同定した結果を Fig. 7 にそれぞれ示す。縦軸横軸は Fig. 4, 5 と同様である。図中の実線は、実際のはく離位置および寸法を表し、破線は±5 mm の誤差範囲を示している。

この結果から、直線はく離から求めた応答曲面にもかかわらず、はく離位置については非常に精度良く同定されていることがわかる。しかし、梁中央部付近において同定精度の低下が認められる。

はく離寸法同定では、直線はく離から求めた応答曲面で同定した Z 型および逆 Z 型のはく離に対しては、大きく誤同定しているものが存在している。大きく誤同定しているはく離は、位置同定で若干の誤差が生じた場合と同様にはく離が梁の中央部付近に存在する場合であった。

電気抵抗変化法で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から端に負荷した電位差法では、はく離が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ことが明らかとなった。

はく離がない場合の梁試験片における電極設置面側 0/90 層間 ($y = -0.25$ mm) での厚さ方向電流密度を Fig. 8 に示す。横軸は x 方位の座標、縦軸は電流密度で

ある。またはく離が梁中央部付近に存在するときの規格化した電極間電位差変化率の分布を Fig. 9 に示す。横軸は電圧測定位置の電極であり、縦軸は規格化した電位差変化率である。

これらの結果から、厚さ方位の電流密度の高い電流電極付近の部分（梁端部付近）では電位差変化率は割れの形状によらずほぼ同一になっている。電流密度が低くな

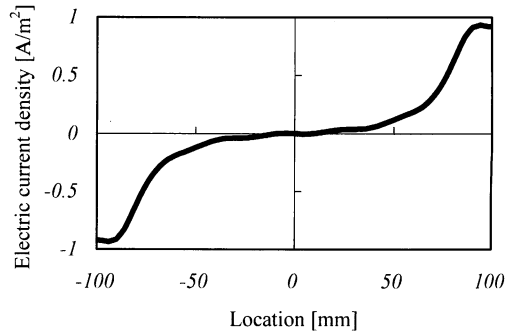


Fig. 8 Electric current density of the thickness direction at the interface between the surface 0°-ply and 90°-ply near the surface of the specimen top.

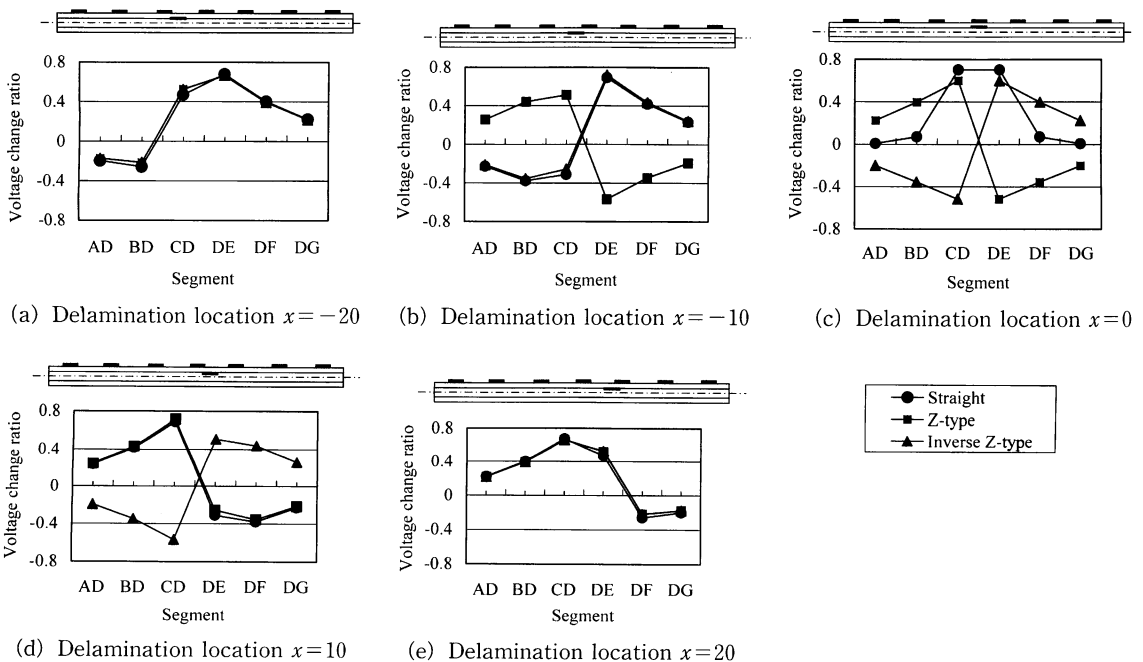


Fig. 9 Standardized electric voltage changes between the electrodes (delamination size 5 mm).

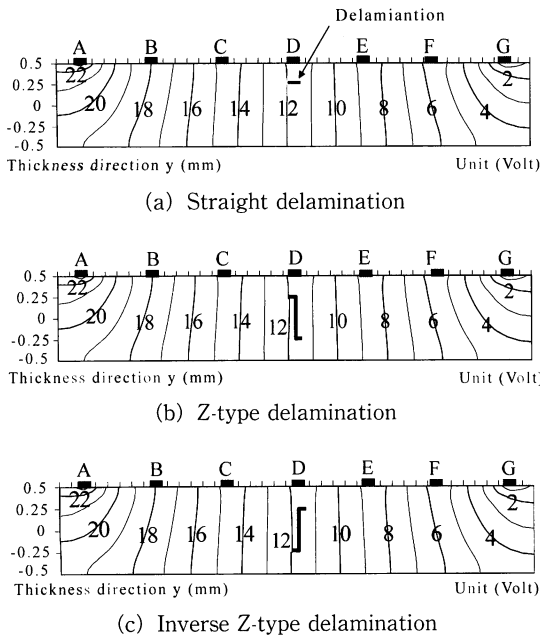


Fig. 10 Contour plot of electric voltage when delamination locates $x=0$ and delamination size is 5 mm.

る中央部付近では、電位差変化率ははく離の形状に大きく影響を受けて差異が生じている。この傾向は梁試験片を用いた電気抵抗変化法の実験結果ともよく一致している¹⁹⁾。

Fig. 10 に、はく離形状によって電位差変化率が大きく異なる分布を示したはく離が梁中央に存在する場合の梁の電位分布を示す。また、Fig. 11 はそのはく離周辺部を拡大したものである。この結果より、電位差法でもはく離形状によって梁表面全体の電位分布は影響を受けていないことがわかる。

Fig. 12 に規格化前の電位差変化率を示す。梁の両端部付近の厚さ方向の電流密度が高いところでは、はく離が電流の流れを大きく妨げることによって電位差変化率が大きくなる。はく離が中央部にある場合、板厚方向の電流密度が低いため、電位差変化率は非常に小さくなる。すなわち、中央部付近では要素分割の差異などに起因する微小な誤差の影響が、規格化によって拡大されると考えられる。

電位差法に規格化の手法を適用することで、電位差変化率から位置の情報を取り出すことができ、応答曲面作成に用いたはく離の同定精度は向上した。電気抵抗変化法では隣り合う電極間に電流を印可したことによって、

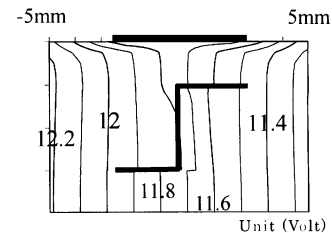
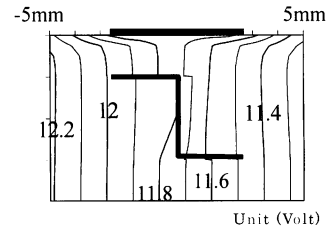
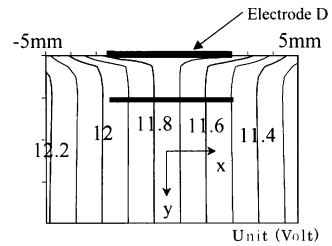


Fig. 11 Contour plot of electric voltage near the delamination when delamination locates $x=0$ and delamination size is 5 mm.

厚さ方向の電流密度が高いためにはく離形状に大きく影響されることはなかった。しかしながら、電位差法では中央部での厚さ方向の電流密度が低くなることから、中央部付近では同定精度は見かけ上はく離形状に大きく依存する結果となった。

以上から、直線はく離の FEM 解析結果から求めた応答曲面を用いて、実はく離形状である Z 型および逆 Z 型のはく離を同定する際、梁中央部での電位差変化率がはく離形状によって大きな差異を生じ、これが大きな誤同定を招いている。電位差法を実用化するためにはこの中央部付近での同定精度向上が課題であることが明らかとなった。

4. 結 論

本研究では、直交積層板の CFRP 梁全体に電流を負荷

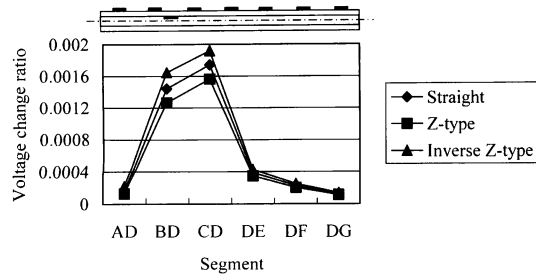
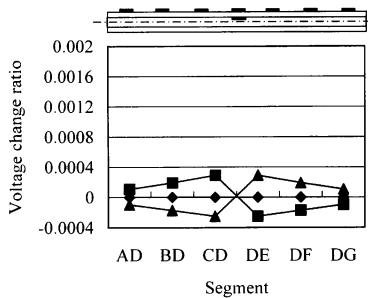
(a) Delamination location $x = -50$ (b) Delamination location $x = 0$

Fig. 12 Electric voltage changes without standardization (delamination size 5 mm).

して表面に複数設置した電極間の電位差を測定する電位差法を採用し、規格化法の適用を検討した。また、マトリックス割れを伴う Z 型および逆 Z 型のはく離を、直線はく離の FEM 解析結果から得られた応答曲面を用いて同定し、同定精度におよぼすはく離形状の影響を評価した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 電位差変化を規格化することで、電位差法においても高い精度で直線はく離の位置と寸法が同定可能であることを示した。

(2) 直線はく離の FEM 解析から得られた応答曲面を用いてマトリックス割れを伴う Z 型および逆 Z 型はく離の同定を実施すると、梁中央部以外では精度よく同定可能であることが明らかになった。

(3) 梁中央部においては厚さ方向の電流密度が非常に小さいために、マトリックス割れを伴う Z 型および逆 Z 型のはく離の同定には大きな誤差が生じた。

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. Chateauinois, 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) C.N. Owston: *Materials Evaluation*, **34**, 11 (1976), 237-244.
- 12) T. Sakagami, S. Kubo & K. Ohji: *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **7**, 2 (1990), 59-65.
- 13) N. Tada, Y. Hayashi, T. Kitamura & R. Oh-tani: *Int. J. Fract.*, **85**, 1 (1997), 1-9.
- 14) 田中雄樹, 轟 章, 島村佳伸: 機論 (A), **65**, 640 (1999), 2432-2438.
- 15) 轟 章, 鈴木洋之, 島村佳伸: 機論 (A), **65**, 634 (1999), 1330-1336.
- 16) 轟 章, 田中雄樹, 島村佳伸, 小林英男: 機論 (A), **67**, 658 (2001), 1002-1008.
- 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) A. Todoroki & Y. Tanaka: *Composites Sci. Technol.*, **62**, 5 (2002), 629-639.
- 19) A. Todoroki, M. Tanaka & Y. Shimamura: *Composites Sci. Technol.*, **62**, 5 (2002), 619-628.
- 20) A. Todoroki, M. Tanaka & Y. Shimamura: *Composites Sci. Technol.*, **63**, 13 (2003), 1911-1920.
- 21) 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).