

非対称電流負荷による電位差法を用いた CFRP 積層板のはく離モニタリング

上田政人^{*1}, 轟章^{*2}
島村佳伸^{*2}, 小林英男^{*2}

Delamination monitoring of CFRP laminate using asymmetrical dual charge electric potential change method

Masahito UEDA, Akira TODOROKI
Yoshinobu SHIMAMURA and Hideo KOBAYASHI

CFRP laminate is very sensitive to the impact. Even a low impact creates a delamination and results in the deterioration of the structural reliability. In our previous study, electric resistance change method (ERCM) and two-stage electric potential change method (two-stage EPCM) are proposed to monitor the delamination in the CFRP laminate. ERCM is suited to be applied to the part of the structure where the high accuracy of estimation is required. On the other hand, two-stage EPCM is suited to be applied to the large structure or the part which required rapid monitoring. In this paper, asymmetrical dual charge EPCM is newly introduced. The method can reduce the number of electric charges compare to the ERCM and show fine estimation throughout the object although two-stage EPCM shows poor performance near the center of the charged electrodes. The proposed method is, therefore, to be a standard of the delamination monitoring methods which utilize the electrical property of CFRP laminate. FEM analyses and experiments are conducted in this paper. As a result, the applicability of the method to the practical use is confirmed.

Key Words : Structural Reliability, Composite Material, Delamination, CFRP

1. 緒 言

炭素繊維強化複合材料 (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) は従来金属と比較して優れた比強度, 比剛性や耐疲労性を有しており, 特に航空宇宙分野においては二次構造から一次構造へと適用が拡大している。しかしながら, CFRP 積層板が構造強度部材として使用される場合, 積層構造であることから小さな衝撃でも容易に層間はく離を生じ, 強度が著しく低下することが問題となっている。そのため構造健全性の保証, さらに定期検査に要する膨大なコスト削減のために, CFRP 積層板に適用可能な簡便なヘルスマニタリング手法が強く望まれている。

CFRP積層板は強化材である炭素繊維が導電性を有していることから, 負荷ひずみ, 温度変化, 繊維破断

などに起因した電気的变化を利用したモニタリング手法が提案されている⁽¹⁻¹⁸⁾。

これまでに著者らは, CFRP積層板の片側表面に複数電極を設置して, はく離発生に起因した電気特性変化よりはく離を同定する電気抵抗変化法及び2段階同定電位差法を提案し, その有効性を実証した^(19,27)。

電気抵抗変化法では全ての隣接電極間通電時の電気抵抗変化を測定するため, 多数回の電流負荷を実施する。このために同定精度が優れ, 高精度なはく離同定が要求される構造部位への局所設置に適している^(19,29)。一方, 2段階同定電位差法は一对の電流負荷電極と多数の電圧測定電極を設置し, 電流を構造全体に流して電極間電位差変化を測定する。従って, 1回の電流負荷ではく離発生のモニターが可能であるため, 多数回の電流負荷が必要である電気抵抗変化法と比較して大型構造物への適用に向いている^(25,27)。

本研究では, これら2つの方法とは異なる非対称電流負荷を用いた電位差法を提案する。この方法では, はく離は2回の電流負荷により得られる電極間電位差

*原稿受付 年 月 日。

*¹正員, 東京工業大学大学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

*²正員, 東京工業大学工学部 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

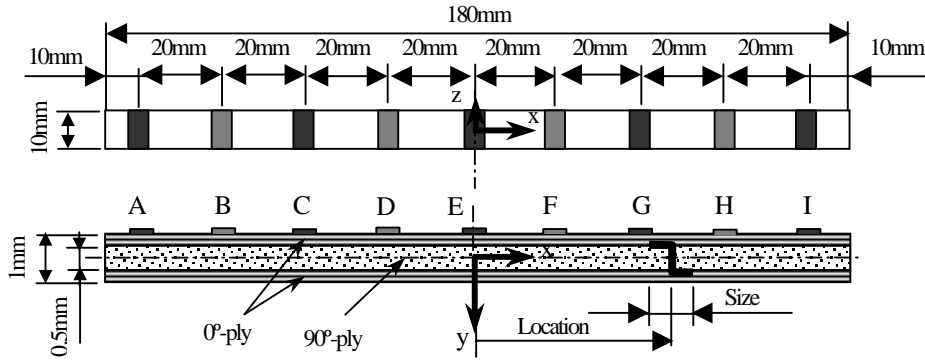


Fig.1 Configuration of specimen with nine electrodes

変化を用いて同定するため、電気抵抗変化法と比較して電流負荷回数は大幅に削減され、また、4電極法を用いるために電極不都合の影響を受けにくい。一方、2段階同定電位差法では、はく離が電流負荷電極間中央付近に生じる場合にははく離に起因する電位差変化が小さく、はく離形状に依存して異なるために検出、同定精度が低下するが、提案手法ではこのような領域は存在しない。また、実機構造では例えば航空機主翼の桁間でのスキン部台形領域など、非対称構造部位への適用には2段階目領域の決定のために追加解析や追加実験が必要となるが、提案手法では不要であり、電流負荷経路も常に一定であるため系統だった簡便なシステム構築が可能となる。

これより提案する非対称電流負荷による電位差法は上記2つの方法の利点を生かしながら、欠点を改善した方法である。本研究では、この非対称電流負荷による電位差法を提案し、その有効性を解析的及び実験的に明らかにする。

2. 試験片形状及び解析方法

試験片形状は長さ180mm、幅10mm、厚さ1mmの[0/90]_s直交積層板である(図1)。試験片片側表面には9個の電極が設置しており、電極BF及びDHが電流負荷電極、電極A、C、E、G、Iが電圧測定電極であり、電極間電位差は4電極法での測定となる。積層板に生じるはく離は、試験片表面(xz面)への投影全長をはく離寸法、試験片中央からはく離寸法中央までの距離をはく離位置とする。なお、はく離はz方向に一樣とする。

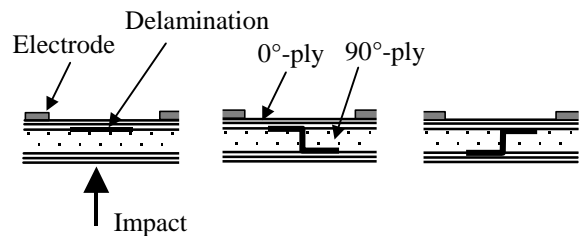
FEM解析は汎用有限要素法ソフトANSYSを用いて行った。四角形四節点要素を用い、要素分割はx方向を0.25mm、y方向を0.0625mmとした。z方向には一樣なため、要素分割は行っていない。電極は節点をカップリングして電位を等しくしている。はく離作成の

際は、節点を二重に定義して要素分割を行ない、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。また、解析に用いるはく離形状は直線状の層間をはく離、マトリックス割れを有するZ型及び逆Z型のはく離である(図2参照)。Z型及び逆Z型のはく離が直線状の層間をはく離に対して電位差変化に与える影響が最も大きいことが以前の研究より明らかとなっている⁽²⁴⁾。

解析に用いたCFRPの導電率は参考文献[22]で実測した値であり、これを表1に示す。表1において、 σ_0 は繊維方位導電率、 σ_{90} は繊維直交方位導電率、 σ_t は厚さ方位導電率であり、厚さ方位導電率は層間樹脂リッチ層も含んだ値である。

3. 非対称電流負荷による電位差法

電流を電極BからFに負荷した場合(電流経路とする。図3参照)、厚さ方位電流密度は電流負荷電極間中央部すなわち $x=20\text{mm}$ にてゼロとなる。従って、この部分にはく離が存在する場合、マトリックス



(a) Straight-type (b) Z-type (c) Inverse Z-type
Fig.2. Delamination crack shapes used in the FEM analyses

Table 1. Conductivity ratio σ

$V_f[\text{vol}\%]$	σ_{90}/σ_0	σ_t/σ_0	$\sigma_0[\text{S/m}]$
47.2	1.05×10^{-3}	2.24×10^{-4}	4.6×10^3

割れの影響を受けて規格化電極間電位差変化ははく離形状に依存し大きく異なる⁽²⁵⁻²⁶⁾。図 4 は、寸法 5mm のはく離が $x=20\text{mm}$ 付近に存在するときの電極 AC, CE, EG, GI 間の規格化電位差変化を FEM により算出した結果である。横軸は電位差測

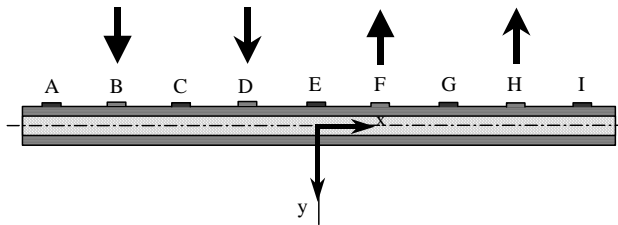
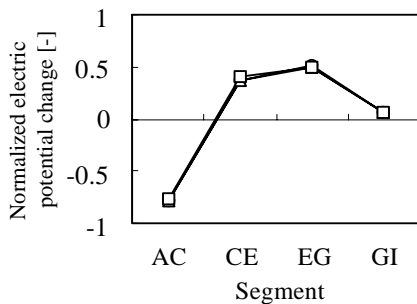
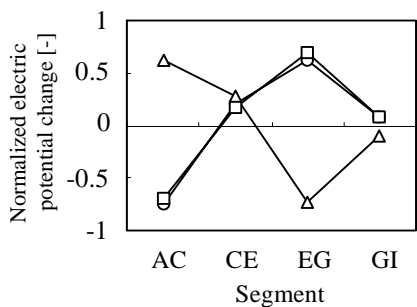


Fig 3. Asymmetrical electric path

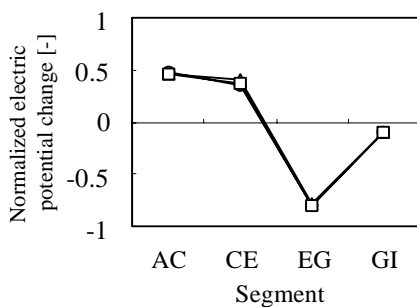
○ : Straight △ : Z-type □ : Inverse Z-type



(a) Delaminations locate at $x=25\text{mm}$



(b) Delaminations locates at $x=20\text{mm}$



(c) Delaminations locates at $x=15\text{mm}$

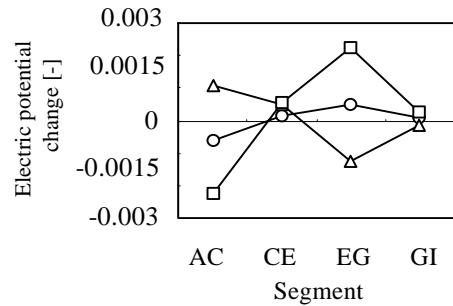
Fig 4. Normalized electric potential changes

定電極間を示し、縦軸は規格化電極間電位差変化を表す。はく離が電流負荷電極間中央 $x=20\text{mm}$ に存在するときのみ規格化電極間電位差変化ははく離形状に依存して大きく異なっている。このことが原因となり、はく離が電流負荷電極間中央付近に存在する場合のみ、はく離形状に依存した大きな誤同定を導く⁽²⁵⁾。

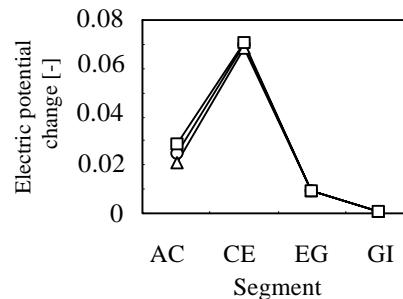
一方、図 5 ははく離が電流負荷電極間中央部 $x=20\text{mm}$ 及び電流負荷電極部 $x=60\text{mm}$ に存在する場合の規格化前の電極間電位差変化を FEM により算出した結果である。はく離が電流負荷電極間中央部に存在する場合(図 5a)、電位差変化ははく離形状に依存して大きく異なるが、厚さ方位電流の消滅のために電流障害の影響が小さく、電位差変化の絶対値ははく離が電流負荷電極部に存在する場合(図 5b)と比較して非常に小さい。

次に、電流を電極 D から H (電流経路 とする。図 3 参照) に負荷することを考える。はく離が $x=20\text{mm}$ 付近に存在する場合、はく離は電流負荷電極に近いので、厚さ方位電流密度を阻害する影響が大きく、マトリックス割れなどはく離形状の影響をほとんど受けにくい大きな電位差変化を得ることができる。

はく離が $x=20\text{mm}$ に存在する場合の、電流経路 と により得られた電極間電位差変化を



(a) Delaminations locate at $x=20\text{mm}$



(b) Delaminations locate at $x=60\text{mm}$

Fig 5. Electric potential changes before normalization

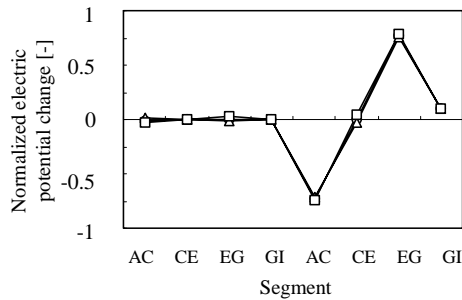


Fig 6. Normalized electric potential changes obtained from the asymmetrical electric charges

FEMにより算出し、得られた計8個の電極間電位差変化を1組として規格化したものを図6に示す。図中横軸表記の添え字は電流経路を表す。電流経路では厚さ方位電流密度の低下のためにはく離形状に依存して電位差変化は大きく異なるが、電流経路により得られる電位差変化と比較するとその大きさは非常に小さく、その差異はごく僅かである。また、電流経路でははく離は電流負荷電極付近に存在するため、電位差変化ははく離形状にほとんど影響を受けない。従って、このように非対称に2回電流を負荷することによりそれぞれ得られる電極間電位差変化を用いることで、はく離形状に依存しない規格化電極間電位差変化を得ることができる。つまり、はく離形状に依存せずすべてのはく離の位置及び寸法が同定可能となる。

ここで、上述のように非対称に電流負荷を行なう場合には、はく離が電流電極の外側に生じる場合もある。図7は、電流経路における積層板内部の電位分布をFEMにより算出したものである。CFRP積層板の強い電氣的異方性のために、電流負荷電極の外側にも迂回電流が生じている。従って、電流負荷電極間よりも外側にはく離が生じる場合にも、はく離に起因して電位差変化は生じるため、はく離の検出が可能である。

4. はく離同定方法

本研究では、はく離に起因した電極間電位差変化よりはく離を同定する方法として応答曲面法を用い

る⁽²⁸⁾。まず、電極BF間(電流経路)及び電極DH間(電流経路)に電流をそれぞれ負荷し、電極AC, CE, EG, GI間の電位差 P_{i0} 及び P_{i0} をそれぞれ測定する。はく離発生後にも再び電流を負荷し、各電極間電位差 P_i 及び P_i を測定し、電極間電位差変化を得る。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - P_{i0} \\ \Delta P_i = P_i - P_{i0} \end{cases} \quad (i=1 \sim 4) \quad (1)$$

この2種類のデータをすべて用い、規格化したものを応答曲面の説明変数とする。

$$\Delta p_i = \frac{\Delta P_i}{L}, \Delta p_i = \frac{\Delta P_i}{L} \quad (2)$$

$$L = \sqrt{\sum_{k=0}^4 (\Delta P_{i1}^2 + \Delta P_{i2}^2)}$$

従って、はく離位置の同定では説明変数は規格化電極間電位差変化 p_i, p_i の8個、はく離寸法ではこれに規格化に用いたノルム L を加えた9個となる。応答曲面には2次多項式を採用する。

$$y = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_j x_i \quad (3)$$

はく離位置及び寸法はそれぞれに作成した応答曲面式(3)を用いて同定される。応答曲面作成の際にはt検定により、回帰寄与の低い項は削除している。

5. FEM解析による検討

5.1 応答曲面作成 応答曲面作成のためにFEM解析で模擬するはく離形状はマトリックス割れのない層間はく離である。解析に用いたCFRPの導電率は表1の値である。はく離寸法は5, 10, 20, 30, 40mmの5通り、はく離位置は $x=80$ mmから80mmまでの区間において5mm間隔の位置で作成し、合計306回のFEM解析を実施した。ただし、はく離寸法によっては端部に貫通したはく離が生じないように

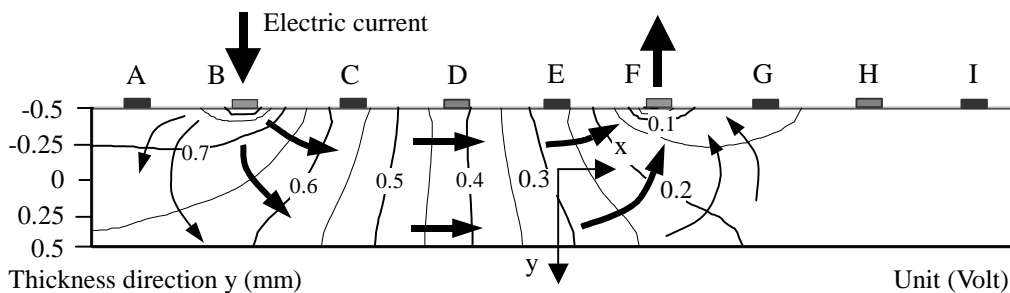


Fig 7. Contour plot of electric potential in the CFRP laminates

5mmづつ内側に移動している．本手法のはく離形状に対するロバスト性を評価するため，作成した応答曲面を用いてZ型及び逆Z型のはく離同定を行なう．また，応答曲面作成に使用していない7, 15, 25, 35mmの層間のはく離，Z型及び逆Z型のはく離についても同様に電位差変化を算出し，同定することで本手法の内挿の同定精度評価も行った．応答曲面作成の際には，規格化電位差変化 p_i に対しては最大値1の10%の誤差を，ノルムLには自身の10%の誤差を乱数により作成し，足し合わせることによって得られる擬似的に誤差を含めたデータも加えて応答曲面を作成した．これは，実際に実験結果よりはく離同定を行なう場合に，実験誤差を許容する応答曲面を作成することを想定している．

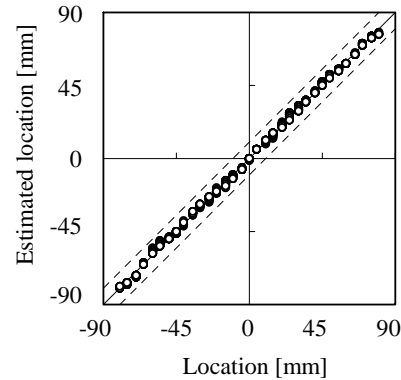
5・2 同定結果 マトリックス割れのない層間のはく離に起因したFEM解析より作成した応答曲面を用いて直線のはく離，Z型及び逆Z型の全てのはく離位置及び寸法を同定した結果を図8に示す．ここで，作成した応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は位置同定用応答曲面で $R_{adj}^2=0.9909$ ，寸法同定用で $R_{adj}^2=0.9955$ であった．

横軸は実際のはく離位置または寸法であり，縦軸は同定したはく離位置または寸法である．従って，図中に実線で表す対角線が正確な同定を示す．また，はく離位置同定での破線は $\pm 10\text{mm}$ ，はく離寸法同定での破線は $\pm 5\text{mm}$ の誤差範囲を示す．それぞれの電流負荷経路の中央部にはく離が存在する場合にも同定精度の低下は生じず，また，はく離形状にも依存せずに非常に精度よく同定されている．更に，学習に用いていないはく離についても学習データと同様に高精度に同定されている．非対称電流負荷による電位差法の有効性がFEM解析により明らかとなった．

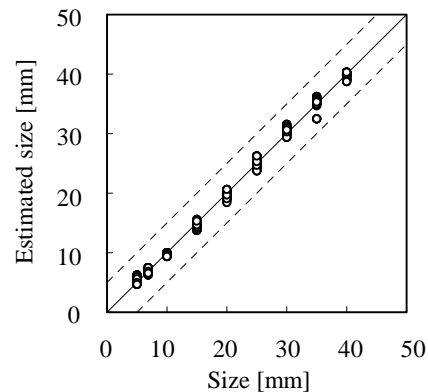
6. 実験による検討

6・1 試験片作成 用いた材料は三菱レイヨン製一方向プリプレグシート PYLOFIL#380 であり，オートクレーブ製法により $130\text{C}^\circ \times 0.7\text{MPa} \times 90\text{min}$ にて硬化させた．その後，図1のように長さ180mm，幅10mmにダイヤモンドカッターを用いて切断した．厚さは約1mmである．作成した試験片の繊維体積含有率をJIS K 7075 燃焼法で測定した結果は65.5%であった．試験片片側表面には長さ4mm，厚さ0.02mmの銅箔を一体成形することにより，電極を設置した．

積層板へのはく離の挿入は島津製オートグラフを用い，3点曲げ治具を用いた層間せん断試験によ



(a) Estimated location



(b) Estimated size

Fig 8. Estimation results of straight, Z, and inverse Z-type delamination cracks

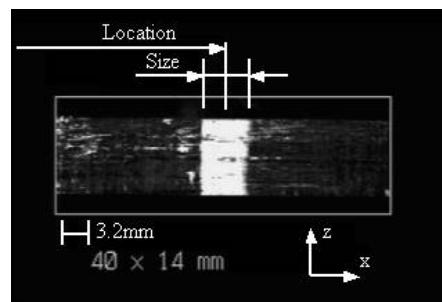


Fig 9. Ultrasonic C-scan image of a delamination

り行なった．はく離の位置及び寸法は光学顕微鏡を用いて測定した．生じたはく離のほとんどはマトリックス割れを有する層間のはく離である．また，超音波探傷装置を用いたCスキャン映像による観察の結果，はく離は幅方向(z方向)にほぼ一様であることを確認した(図9)．

6・2 電極間電位差変化測定回路 はく離発生に伴う電極間電位差変化は微小であるため，差動増幅回路を用いて電圧電極 A, C, E, G, I の電位変化を

1000 倍に増幅し，共和製データロガーPCD-320A にて測定した．

6・3 等価導電率の探索 FEM 解析結果から作成した応答曲面を使用し，実験より得られた電位差変化を用いてはく離同定を行なうためには，FEM 解析結果と実験結果の間に整合性を与える等価導電率の探索を行なう必要がある．等価導電率の探索方法については参考文献[27]を参照されたい．ここでは，等価導電率探索のために計 4 回はく離実験を行った．はく離はそれぞれ電極 AB 間($x=-64.9\text{mm}$)，BC 間($x=-52.65\text{mm}$)，EF 間($x=8.35\text{mm}$)，FG 間($x=29.9\text{mm}$)に挿入し，電流経路 による電位差変化を測定した．これら 4 組の実験結果を用いて，実験結果と整合性を有する解析結果が得られる等価導電率を探索した．等価導電率の探索結果は以下ようになった．

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 32000 \text{ [S/m]} \\ \sigma_{90} &= 9.60 \text{ [S/m]} \\ \sigma_t &= 8.32 \text{ [S/m]} \end{aligned} \quad (4)$$

図 10 は，等価導電率を用いた FEM 解析により得られた電極間電位差変化と実験値との比較である．実験結果と解析結果は良く一致している．

6・4 応答曲面作成 算出した等価導電率を用いて FEM 解析を実施し，マトリックス割れのない層間はく離に起因した応答曲面を作成した．はく離寸法は 5, 10, 20, 30, 40mm の 5 通り，はく離位置は $x=-80\text{mm}$ から 80mm までの区間において 5mm 間隔の位置で作成し，合計 306 回の FEM 解析を実施した．また，実験誤差を許容するために，前章と同様の方法にて誤差を含めたデータも合わせて用いて応答曲面を作成した．

6・5 同定結果 はく離実験は計 70 回行ない，はく離に起因した 70 組の電位差変化を得た．FEM 解析より作成した応答曲面を用い，実験より得られた合計 70 組の規格化電極間電位差変化から全てのはく離の位置及び寸法を同定した結果を図 11 に示す．縦軸，横軸及び図中破線は図 8 と同様である．また，前節で等価導電率探索に用いた実験値についても同定し，合わせて示した．

実際のはく離形状は様々であるが，位置及び寸法ともに全てのはく離が非常に精度良く同定されている．また，電流負荷電極間中央部にて同定精度の低下は生じていない．これより，本手法が実験的にも有効であることが示された．

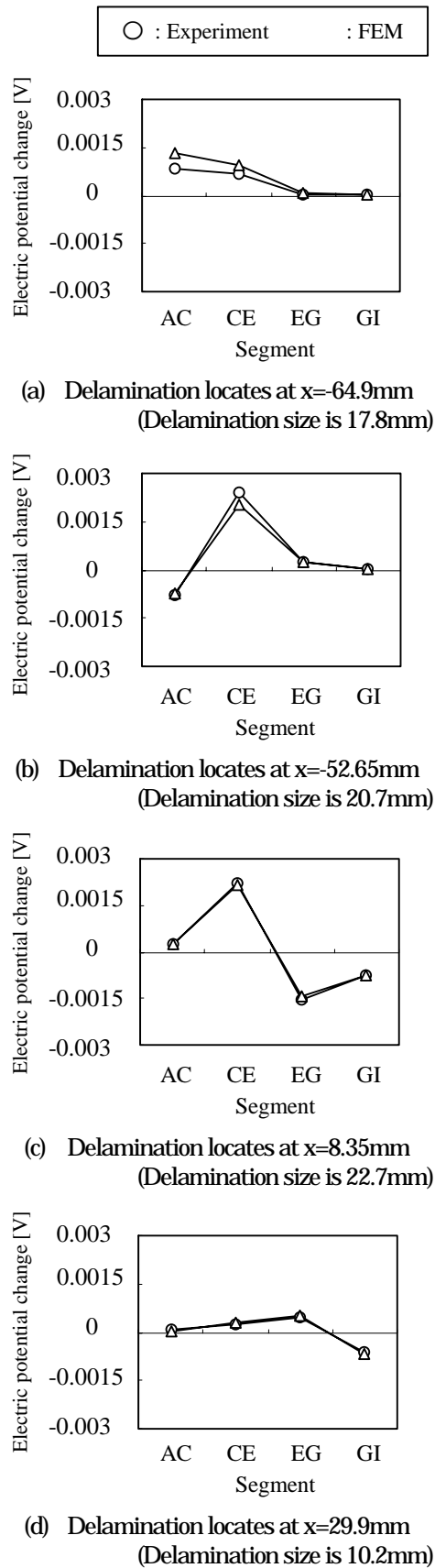
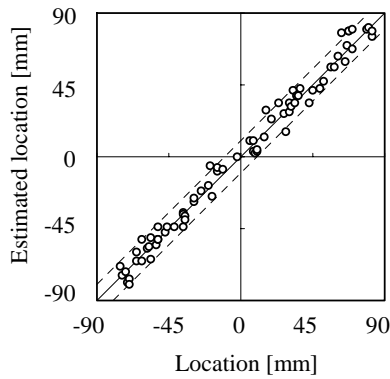
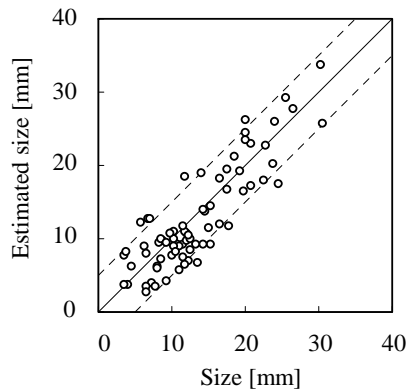


Fig 10. Comparison of the electric potential changes between experimental results and FEM analyses



(a) Estimated location



(b) Estimated size

Fig 11. Estimation results of experimental data using the RS made from the FEM analyses with equivalent electric conductivity

7. 結 言

CFRP 積層板のはく離検出手法である電気抵抗変化法と2段階同定電位差法の利点を合わせ持つ非対称電流負荷による電位差法を提案した。本手法はその特徴からこれら電気特性変化を利用したはく離モニタリングの基準となる方法である。得られた結果を以下に示す。

1. 非対称に2回電流を負荷して得られる電極間電位差変化を合わせて用いて規格化することで、電流負荷電極間中央部にはく離が生じた場合にもはく離形状に依存しない規格化電位差変化を得ることができる。
2. FEM 解析により、提案手法がマトリックス割れなどはく離形状の影響を受けずに、精度良くはく離位置及び寸法の同定が可能であることが明らかとなった。また、学習に用いていないはく離についても学習データと同様に同定可能であることが示された。
3. 数回のはく離実験により等価導電率を算出し、はく離同定用応答曲面を FEM 解析より作成した。多数回のはく離実験を実施し、作成した応答曲面を用いてはく離の同定を行なった。全てのはく離が非常に精度良く同定され、提案した手法の有効性が実証された。
4. 提案手法は電気抵抗変化法と比較して電流負荷回数が少ないこと、2段階同定電位差法と比較して同定精度の低下する領域が存在しないことなどから、これら電気特性変化を利用したはく離モニタリング法の基準となる。本手法を基準として更に精度が要求される場合には電気抵抗変化法を、大規模構造物や迅速なモニタリングが必要な場合には2段階同定電位差法を用いるという体系が、本手法の提案により確立された。

参 考 文 献

- (1) Moriya K and Endo T, A study on flaw detection method for CFRP composite laminates, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 32-98 (1990), 184-196.
- (2) K. Schulte and C. Baron, Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements, Compos Sci Technol, 36-1(1989), 63-76.
- (3) P. W. Chen and D. D. L. Chung, Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection, Smart Mater Struct, 2-1 (1993), 22-30.
- (4) P. E. Irving and C. Thiagarajan, Fatigue damage characterization in carbon fibre composite materials using an electrical potential technique, Smart Mater Struct, 7-4 (1998), 456-466.
- (5) J.C. Abry, S. Bochart, A. Chateauminois, M. Salvia and G. Giraud, In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements, Compos Sci Technol, 59-6 (1999), 925-935.
- (6) D. C. Seo and J. J. Lee, Damage detection of CFRP laminates using electrical resistance measurement and neural network, Compos Struct, 47,1-4 (1999), 525-530.
- (7) I. Weber and P. Schwartz, Monitoring bending fatigue in carbon-fibre/epoxy composite strands: a comparison between mechanical and resistance techniques, Compos Sci Technol, 61-6 (2001), 849-853.
- (8) N. Muto, Y. Arai, S. G. Shin, H. Matsubara, H. Yanagida, M. Sugita, and T. Nakatsuji, Hybrid

- composites with self-diagnosing function for preventing fatal fracture, *Compos Sci Technol*, 61-6 (2001), 875-883.
- (9) S. Kubo, M. Kuchinishi, T. Sakagami and S. Ioka, Identification of delamination in layered composite materials by the electric potential CT method, *Int J appl electrom*, 15 (2002), 261-267.
- (10) J. B. Park, T. Okabe, N. Takeda and W.A. Curtin, Electromechanical modeling of unidirectional CFRP composites under tensile loading condition, *Composites: Part A*, 33-2 (2002), 267-275.
- (11) R. Schueler, S. P. Joshi and K. Schulte, Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping, *Compos. Sci. Technol*, 61(2001), 921-930.
- (12) C. N. Owston, Eddy current methods for the examination of carbon fibre reinforced epoxy resins, *Mater eval*, 34-11 (1976), 237-244
- (13) P. E. Irving and C. Thiagarajan, Fatigue damage characterization in carbon fibre composite materials using an electrical potential technique, *Smart Mater. Struct*, 7 (1998), 456-466
- (14) A. S. Kaddour, F. A. R. Al-Salehi and S. T. S. Al-Hassani, Electrical resistance measurement technique for detecting failure in CFRP materials at high strain rates, *Compos Sci Technol*, 51-3 (1994), 377-385.
- (15) J. W. Cho and J. S. Choi, Relationship between electrical resistance and strain of carbon fibers upon loading, *J Appl Polym Sci*, 77 (2000), 2082-2087.
- (16) S. Wang and D. D. L. Chung, Temperature/light sensing using carbon fiber polymer-matrix composite, *Composites: Part B*, 30-6 (1999), 591-601.
- (17) R. Prabhakaran, Damage assessment through electrical resistance measurement in graphite fiber-reinforced composites, *Exp Technol*, 14 (1990), 16-20.
- (18) M. Kupke, K. Schulte and R. Schuler, Non-destructive testing of FRP by d.c. and a.c. electrical methods, *Compos Sci Technol*, 61-6(2001), 837-847.
- (19) A. Todoroki, The effect of number of electrodes and diagnostic tool for monitoring the delamination of CFRP laminates by changes in electrical resistance, *Compos Sci Technol*, 61-13 (2001), 1871-1880.
- (20) A. Todoroki and Y. Tanaka, Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method, *Compos.Sci Technol*, 62-5 (2002), 629-639.
- (21) A. Todoroki, Y. Tanaka and Y. Shimamura, Delamination monitoring of graphite/epoxy laminated composite plate of electric resistance change method, *Compos Sci Technol*, 62-9 (2002), 1151-1160.
- (22) A. Todoroki, M. Tanaka and Y. Shimamura, Measurement of Orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method, *Compos Sci Technol*, 62-5 (2002), 619-628.
- (23) A. Todoroki, M. Tanaka and Y. Shimamura, High performance estimations of delamination of graphite/epoxy laminates with electric resistance change method, *Compos Sci Technol*, 63-13 (2003), 1911-1920.
- (24) 轟章・田中美帆・島村佳伸・小林英男, 電気抵抗変化法の CFRP 積層板の知的はく離検出法におけるはく離形状の影響解析, *日本複合材料学会誌*, 29-3 (2003), 113-119.
- (25) 上田政人・轟章・島村佳伸・小林英男, 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), *日本複合材料学会誌*, 30-4 (2004), 135-141.
- (26) 上田政人・轟章・島村佳伸・小林英男, 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), *日本複合材料学会誌*, 30-4 (2004), 149-156.
- (27) M. Ueda and A. Todoroki, Delamination monitoring of CFRP laminate using the two-stage electric potential change method with equivalent electric conductivity, *Eng Fract Mech* (in review)
- (28) R. H. Myers and D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology*, (2002), John Wiley & Sons, Inc., New York.