

電気ポテンシャル法を用いた CFRP はく離検出手法における

電気抵抗異方性の評価*

轟 章^{*1}, 鈴木洋之^{*2}, 小林英男^{*1}, 中村春夫^{*1}, 島村佳伸^{*1}

Evaluation of Orthotropic Electrical Resistance for Delamination Detection of CFRP by Electrical Potential Method

Akira TODOROKI, Hiroshi SUZUKI, Hideo KOBAYASHI Haruo NAKAMURA and Yoshinobu Shimamura

Smart structures are appropriate approaches to obtain high structural reliability of CFRP. Electrical potential method for detection of damages does not bring strength reduction of CFRP structures. However, laminates of CFRP have orthotropic electrical conductivity, and it is required to evaluate the effect of orthotropic electric resistance on detection of delamination. In the present study, orthotropic electrical resistance is shown to be a main factor of difference between experimental results of authors and of Moriya by FEM. FEM analyses show the low electric conductivity in the thickness direction causes small inclination of the relation between delamination crack length and electric resistance. A new approach for measurement of the electric conductivity in the thickness direction also proposed.

Key Words : CFRP, Electrical Potential Method, FEM, Smart Structure, Orthotropic Electrical Resistance

1. 緒言

CFRP は比剛性, 比強度の力学特性が優れているため, 航空機や宇宙機器などの主構造への適用が検討されている。しかし, 層間強度が弱いため, 弱い衝撃で目視できない層間はく離が容易に発生し, 圧縮特性が著しく低下する。CFRP の活用上, はく離損傷の検出は構造安全性の保証の観点から非常に重要である。そこで本研究は CFRP に強化繊維として埋め込まれている炭素繊維の導電性に着目し, CFRP を構成する炭素繊維がそのままセンサーの役割を有し, 損傷を検出する電気ポテンシャル法によるスマート複合材料を開発するための知見を得ることを目的としている。

電気ポテンシャル法を損傷検出に用いた場合, 強化繊維である炭素繊維をセンサーとして使用する。このためセンサー埋め込みによる強度低下がなく, また既存の構造にも容易に適用可能である。さらに, 実際の工程は電極を表面に作成するだけであるので安価である。電気ポテンシャル法はこれまでに金属材料のような電気抵抗等方性の材料において, き裂検出法として研究されている⁽¹⁾。しかし, CFRP のような電気抵抗異方性を有する材料では研究例が見られない。著者ら

は CF/epoxy 積層板を用いて実験的に電気ポテンシャル法の適用可能性を検討してきた^{(2),(3)}。本研究では, 電気ポテンシャル法を用いた損傷検出スマート CFRP 構造開発における電気抵抗異方性の差異による影響評価と厚さ方向の電気抵抗測定手法の提案を目的として有限要素法を用いて解析的に検討した。

具体的には, 著者らの一部が既の実施した二重片持梁試験片を用いたモード試験結果^{(2),(3)}と守屋らの実験結果⁽⁴⁾との差異の原因を有限要素法解析結果と比較検討して CFRP の電気ポテンシャル法における主因子を明らかにした。

実際の積層板厚さ方向の電気抵抗は成形手法により異なることが予想される。そこで, 厚さ方向の電気抵抗が及ぼす影響を解析的に検討した。

CFRP の厚さ方位導電率は, 面内導電率と比較して $10^2 \sim 10^4$ 程度の差異があり, 通常の抵抗測定方法では実験誤差が大きくなる。そこで, 積層板の厚さ方向の導電率を決定することを目的として, 二重片持梁試験片のモード層間はく離試験時におけるはく離き裂長さと電気抵抗変化の比例関係から逆に厚さ方向導電率を測定する方法を提案する。

*平成 9 年 8 月 日受付

*1 東京工業大学工学部目黒区大岡山 2-12-1

*2 東京工業大学大学院

2. CFRP の電気抵抗異方性

CF/epoxy 積層板では, 炭素繊維が導電性を有する

が、マトリックスであるエポキシ樹脂には導電性がない。したがって、微視的には導電率が不均一である。しかし、繊維方向の導電性を考えた場合、炭素繊維の導電性は均一であると仮定すると、巨視的には炭素繊維の断面積比(体積含有率 V_f)に比例した導電性があるとみなすことができる。

また、繊維と垂直方向である面内の 90° 方向の導電性について考える。実際の CFRP では、炭素繊維が完全な直線ではなく、いたるところで隣接繊維と接触するネットワーク構造をしている(図 1 参照)。したがって、繊維方向だけでなく、繊維と垂直方向である面内の 90° 方向にも導電性を有する。しかし、その導電率は繊維方向の導電率と比較して小さい。

積層方位の導電性を考えた場合、プリプレグを積層する際にその間に生じる樹脂リッチ層はエポキシ樹脂であり導電性はない。しかし、樹脂リッチ層は厚さが一定でなく(図 2 参照)、成形法に依存して、炭素繊維は積層方位にもいたるところで上下層が接するネットワーク構造をしている。このため実際には積層方向にも非常に小さい導電性を有する。ただし、繊維接触

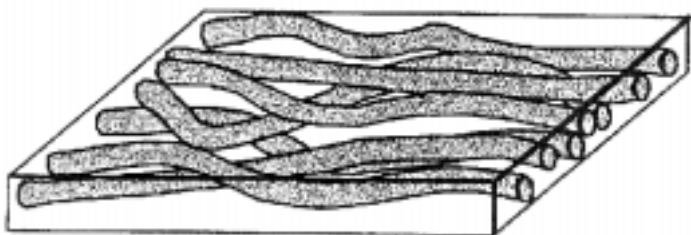


Fig. 1 Network structure of fibers in a ply

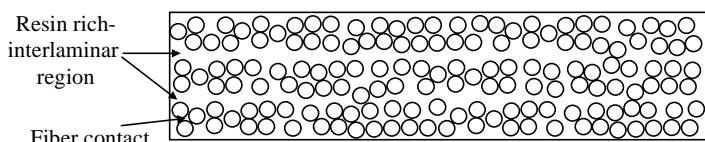


Fig. 2 Resin rich-interlaminar region and fiber contact

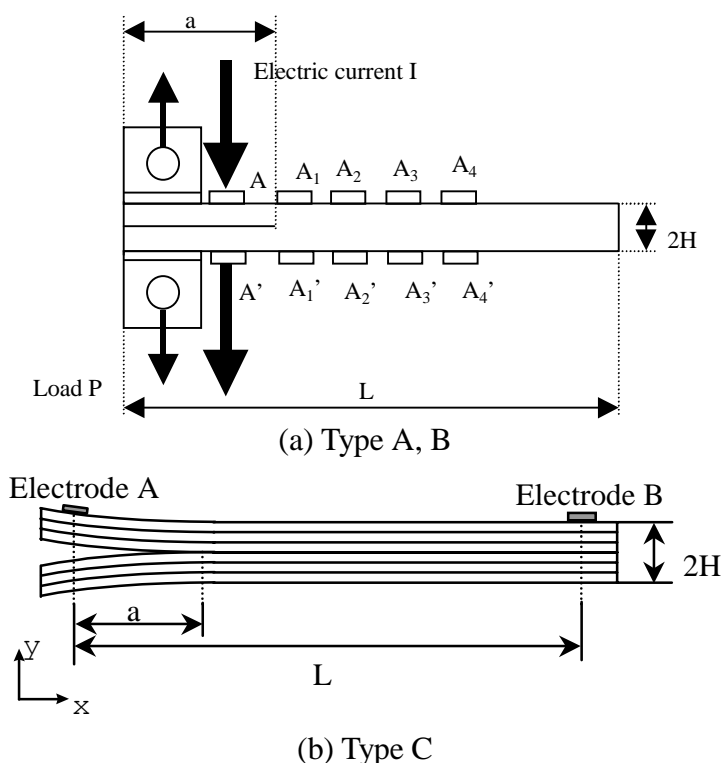


Fig. 3 Specimen for delamination tests

頻度は面内とは異なるため積層方位の導電率は $0^\circ, 90^\circ$ 方向の導電率とは異なる。

3. 有限要素法による数値解析

直流電場問題の支配方程式は以下に示される。

$$J = - \begin{pmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2)$$

ここで、

- J : 電流密度[A/m²]
- σ : 導電率[S/m] ($=x, y, z$)
- ϕ : 電位[V]

である。これは異方性を考慮した伝熱問題と同じである。そこで本研究では汎用有限要素法アプリケーション ANSYS の伝熱オプションを用いて、単位を変換して導電率異方性の直流電場問題を解析した。

本研究では、著者らが既に電気ポテンシャル法の有効性を実験的に検証したモード層間はく離試験片を解析対象とした。これを図.3 に示す。試験片寸法は著者らの実験(タイプ A)と守屋の実験(タイプ B)の 2 種を用いた。両者の寸法および V_f の差異表 1 に示す。また、異方性の影響評価に用いた解析モデルの寸法(タイプ C)を表 1 に示す。タイプ C では航空機等の構造の内側に電極を取り付けることを想定して、電極を試験片の同一表面に 2 つ貼りつけた。この試験片に電流を流し、電極の下部ではく離が進展するようなはく離き裂について有限要素法で解析し、電気抵抗異方性の程度によるポテンシャル変化への影響について検討する。

本研究では層間はく離き裂を有限要素法でモデル化する際に、はく離位置で節点を二重に定義し、はく離と同時にそれぞれの節点の連結をはずした。これに

Table 1 Specimen size and volume fraction of carbon fiber

	L[mm]	2H[mm]	D[mm]	a_0 [mm]	V_f [%]
A	160	2	20	40	60
B	200	1	20	50	65
C	140	2	20	10	

Table 2 Experimental results of electrical conductivity

	0	90	t
Electrical conductivity	7.76×10^2	0.530	3.74

よってはく離を横切る電流は流れない。つまり、解析はモード I 負荷時を仮定している。また、有限要素への要素分割は四角形四節点要素の一つの要素の一辺を 0.25[mm]以下に設定し、ANSYS で自動要素分割を行い、約 6000 要素に分割した。

解析に先立ち、タイプ A と同じ材料の試験片の一部を用いて 0° 方向、90° 方向、厚さ方向のそれぞれの導電率を抵抗計で実測した。結果を表 2 に示す。ただし、厚さ方向の導電率は導電率異方性が大きく、さらに試験片厚さが薄いため、実測値に誤差が大きい。

4. 結果と考察

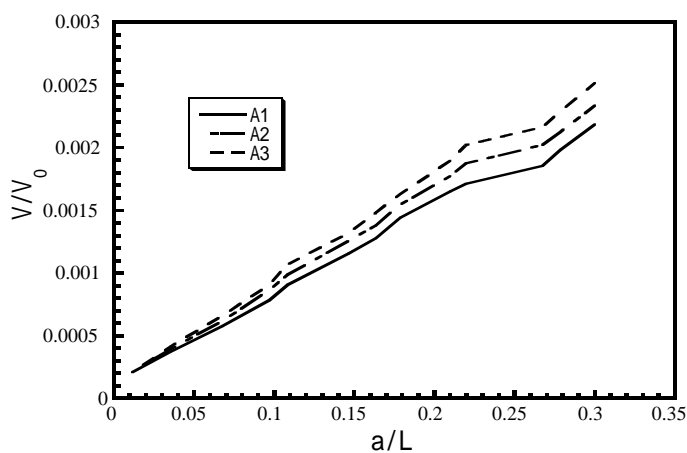
4.1. 電気ポテンシャル法の因子解析

著者らの一部が実施した実験と、守屋の実験では、図 3(a)に示すように、層間はく離靱性試験片のはく離を挟む位置に電極 A, A' を作成した。また、電位差測定のための電極 A_n-A_n' (n=1,2,3,...) を作成した。電極 A から電極 A' に直流電流を流し、はく離の進展時の電極 A_n-A_n' (n=1,2,3,...) 間の電気ポテンシャルの変化を実測した。著者らの試験(タイプ A)と守屋ら⁽⁴⁾の試験(タイプ B)では、厚さが守屋らの試験片の場合が薄く、繊維炭素含有率が高い(表 1 参照)。はく離進展量 a を試験片長さ L で無次元化した値 a/L と電気ポテンシャル変化 V の関係における両者の結果の

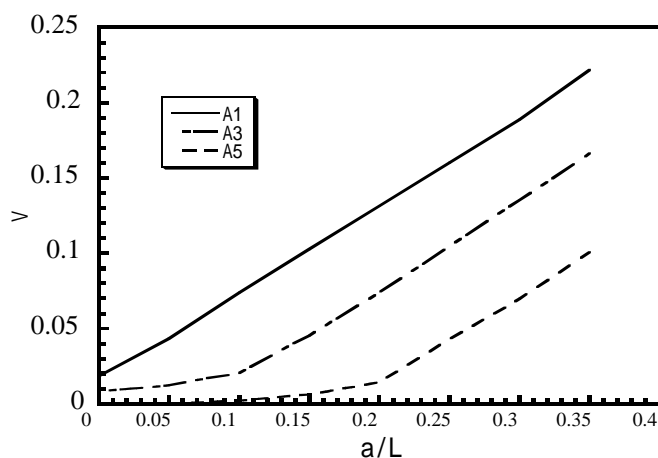
一例を図 4(a), (b)に示す。図 4(a)のタイプ A の実験結果では、はく離の進展に伴い、電気ポテンシャルがどの位置でも直線的に増大した。これに対してタイプ B の実験結果では電気ポテンシャルを検出する電極 A_n-A_n' の位置をはく離の先端が通過するまではほとんど電気ポテンシャルに変化がない。き裂が電極位置を通過するとそれぞれの電極でほぼ同じ傾きで電気ポテンシャルが増大した。

この要因を有限要素法で検討する。先に述べたように試験片厚さが薄いため、厚さ方位の導電率は正確でない。そこで厚さ方位の導電率をパラメータとしてはく離き裂長さ比 a/L と電気ポテンシャル変化の関係を解析し、実験値と一致する導電率を求めた。求めた積層方向の導電率 σ_t と 0° 方向の導電率 σ_0 の比 σ_t/σ_0 は 1×10^4 である。この値を用いてタイプ A, B の試験片を解析した結果を図 5(a),(b)にそれぞれ示す。電極位置によって傾きが異なるが、タイプ A, B の両者において、はく離き裂進展開始と同時にすべての電極において電気ポテンシャルが増加している。これは、著者らの実測結果(図 4(a))と一致しており、守屋らの結果(図 4(b))と異なる。解析においてタイプ A, B の間には板厚の差異があるが、板厚は 4(a), (b)の差異の要因ではないことがわかる。

また、両者の繊維炭素含有率 V_f の違いによる積層

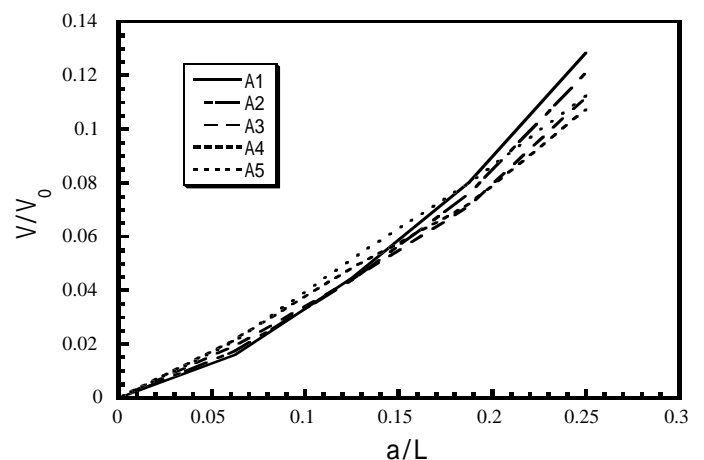


(a) Type A

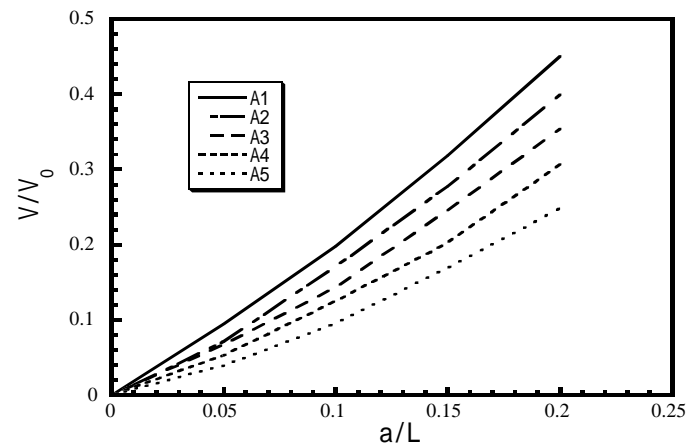


(b) Type B

Fig. 4 Experimental results of delamination test



(a) Type A



(b) Type B

Fig. 5 Analysis results of delamination test
($\sigma_t/\sigma_0=1 \times 10^4$)

方向の導電率の違いを考慮し、積層方向の導電率 σ_t と 0° 方向の導電率 σ_0 の比 σ_t/σ_0 を 1×10^{-2} として図 5 の場合と同様の解析を実施した。その解析結果をタイプ A, B それぞれについて図 6(a),(b)に示す。両タイプの試験片形状ではく離進展による電気ポテンシャル変化の傾向は守屋の実験結果と一致している。つまり、はく離の先端が電気ポテンシャルを検出する電極 A_n-A_n' の間を通過するまではほとんど電気ポテンシャルに変化がなく、通過と同時に既に通過した電極の場合とほぼ同じ傾きで電気ポテンシャルが増大するという結果が得られた。

これらの結果から、著者らの実験と守屋らの実験の差異は厚さ方向の導電率の差異が原因であると判断できる。守屋らの実験では、 V_f がわずかに大きいため層間に樹脂リッチ層が生じる確率が著者らの試験片と比較して少ないと推察される。このため、厚さ方向の導電率が守屋らの試験片(タイプ B)の方が大きくなったと考えられる。電気ポテンシャル法による層間はく離検出は厚さ方向の導電率が主因で異なる現象が認められることがわかる。また、その厚さ方向の導電率比は $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 程度まで大きく変動することが明らかになった。また、この値は実測した値とは 10^2 倍程度異なり、実測が極めて大きな誤差を含むことがわかる。

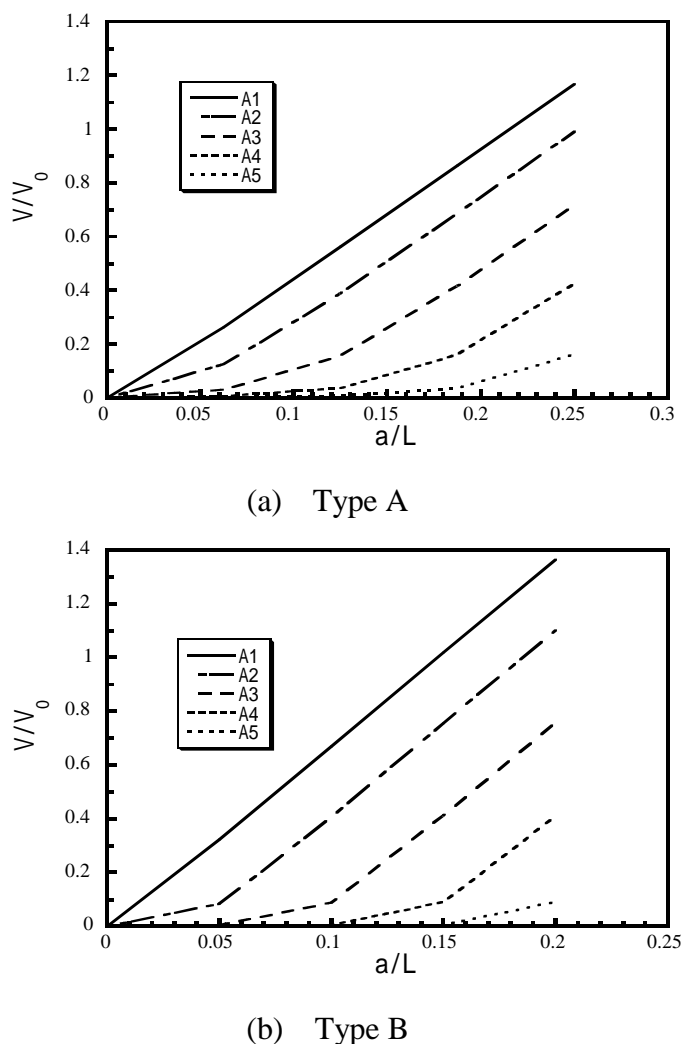


Fig. 6 Analysis results of delamination test ($\sigma_t/\sigma_0 = 1 \times 10^{-2}$)

4.2. 電気抵抗異方性の程度による影響

解析した積層構成は $[0^\circ]_s$ 積層板と $[90^\circ]_s$ 積層板である(図 3(b)参照)。解析対象は試験片長さ L は 140[mm]、試験片厚さ $2H$ は 2[mm] である。この試験片の電極 B の電位を 0[V] に設定し、電極 A から電極 B に 30[mA] の直流電流を流した。ただし、はく離は積層の中央位置に存在するとし、はく離長さ a を 10[mm] から 30[mm] まで増加させた。

$[0^\circ]_s$ 積層板と $[90^\circ]_s$ 積層板のそれぞれの解析結果を図 7(a), (b) に示す。図中横軸ははく離進展量 a を試験片長さ L で規格化した値 a/L であり、縦軸は電気抵抗値の増分 R をはく離進展前の初期電気抵抗値 R_0 で規格化した値 R/R_0 である。 $[0^\circ]_s$ 積層板では積層方向の導電率 σ_t と 0° 方向の導電率 σ_0 の比 σ_t/σ_0 を $1, 1 \times 10^{-1}, 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}$ の 4 通りで解析した。 $[90^\circ]_s$ 積層板では積層方向の導電率 σ_t と 90° 方向の導電率 σ_0 の比 σ_t/σ_0 を $1, 1 \times 10^1, 1 \times 10^2, 1 \times 10^3$ の 4 通りとして解析した。

導電率が等方材料で、板厚が十分に薄く、はく離長さが比較的小さい場合に a/L と R/R_0 の関係は比例定数 1 の正比例関係になることが示されている⁽²⁾。しかし、図 7(a) から $[0^\circ]_s$ 積層板では積層方向の導電率 σ_t が小さくなるほど比例定数が 1 より小さくなり、はく離に伴う電気抵抗変化が小さくなることがわかる。

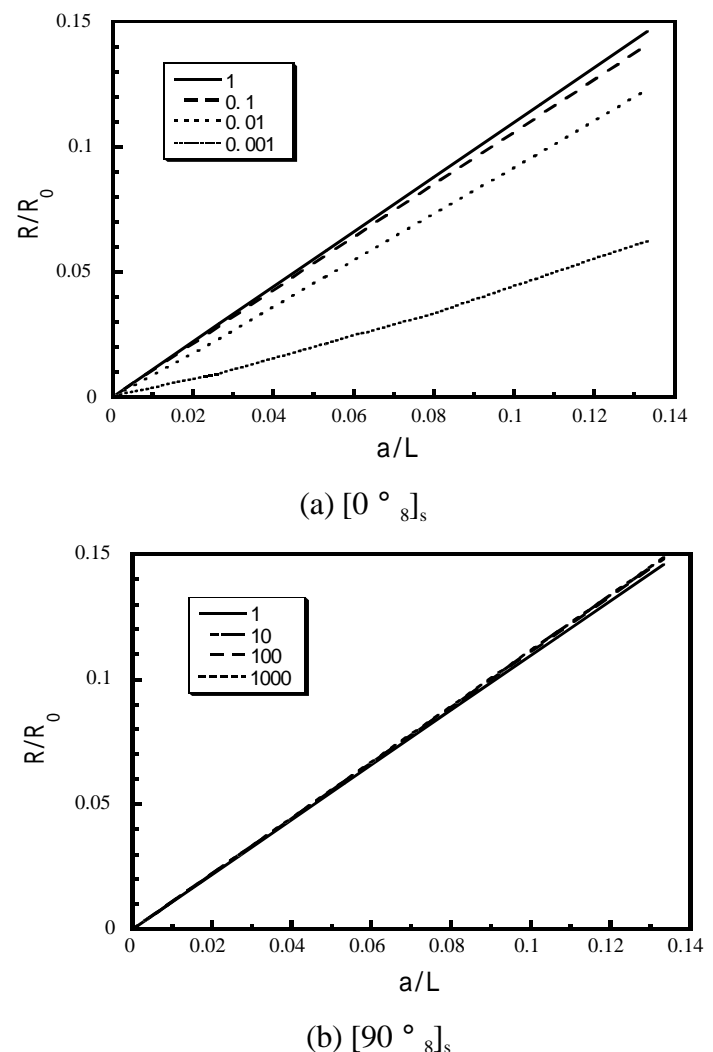
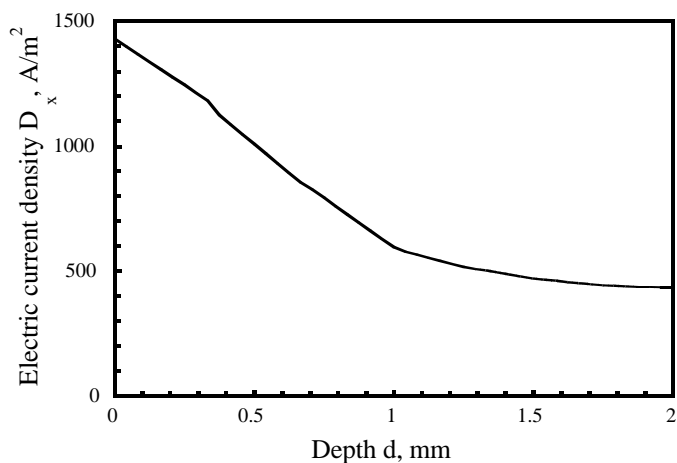


Fig. 7 Analysis results of relationship between delamination size and electric resistance

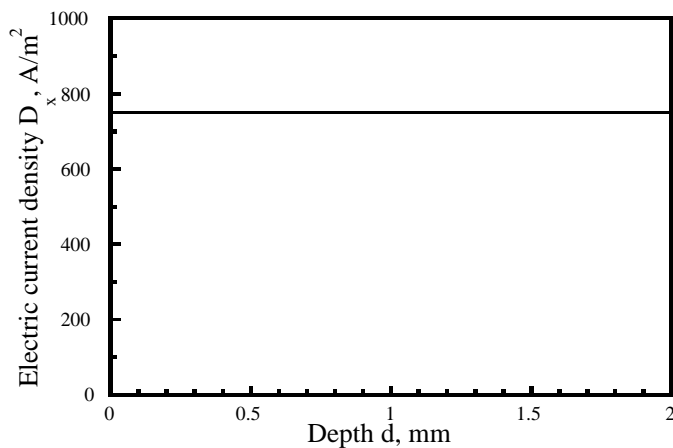
また，図 7(b)から $[90^\circ]_s$ 積層板では積層方向の導電率 σ_x に関わらず，これらの関係はほぼ正比例関係にあり，電気抵抗変化は厚さ方向の電気導電率との比に依存しないことがわかる．

これらの試験片のはく離がない場合の試験片内部 x 方向電流密度 D_x の電極側表面からの深さ方向分布をそれぞれ図 8(a)，(b)に示す．ただし，解析に用いた $[0^\circ]_s$ 積層板の導電率比 σ_x/σ_0 は 1×10^{-3} ， $[90^\circ]_s$ 積層板の導電率比 σ_x/σ_0 は 1×10^3 である．図 8(a)から， $[0^\circ]_s$ 積層板では導電率の異方性が大きいいため試験片内で電流が不均一に流れており，電極側表面付近に多くの電流が流れていることがわかる．したがって， $d=1$ [mm]ではく離が発生すると，はく離下部($d>1$)で電流が流れなくなるが，はく離下部を流れる電流が当初から比較的少ないため，はく離による電気ポテンシャル変化は小さい．その結果図 7(a)のように異方性が大きくなるほどはく離に伴う電気抵抗の増加の傾きも小さいと考えられる．一方， $[90^\circ]_s$ 積層板では，図 8(b)からわかるように，試験片内部でほぼ均一に電流が流れているために a/L と R/R_0 の関係がほぼ正比例関係になると考えられる．

これらから $[0^\circ]_s$ 積層板の場合，電気抵抗異方性が大きいとはく離き裂進展による電気抵抗変化が小さくなることわかる．しかしながら，その電気抵抗変化



(a) $[0^\circ]_s$



(b) $[90^\circ]_s$

Fig. 8 Effect of electrical orthotropic residue for electric density

はひずみゲージのひずみ負荷による電気抵抗変化と同程度であり，電気抵抗ブリッジ回路を組むことにより十分検出可能であることが実験的に示されている^{(2),(3)}．

4.3. 積層方向の電気抵抗の決定

積層方向の導電率は単純な抵抗測定では実験的に測定することが困難である．電気ポテンシャル法を実機に適用する場合，まずモード I 層間のはく離試験片で適用可能性を検証するのが妥当であろう．そこで，先に示した結果(モード I 層間のはく離試験の a/L と R/R_0 の関係は比例関係($R/R_0 = a/L$)にあり，その比例定数は電気抵抗異方性に依存する)を用いて厚さ方位の導電率を逆に求める手法について考察した．

積層方向の導電率 σ_x と 0° 方向の導電率 σ_0 の比 σ_x/σ_0 と比例定数 a/L の関係を 3 通りの厚さ($2H = 1, 2, 4$ [mm])についての解析結果を図 9 に示す．ただし，試験片長さ L は 140[mm]である．縦軸は積層方向の導電率 σ_x と 0° 方向の導電率 σ_0 の比 σ_x/σ_0 で，横軸は $R/R_0 = a/L$ 関係の比例定数である．図 9 から，異方性が大きくなると同じ導電率の比であっても，試験片厚さに依存して比例定数も変化し，試験片厚さが薄いほど比例定数が大きくなることわかる．これは，試験片が薄いほど試験片の下部まで電流が流れやすく，はく離の影響を受けやすいからである．

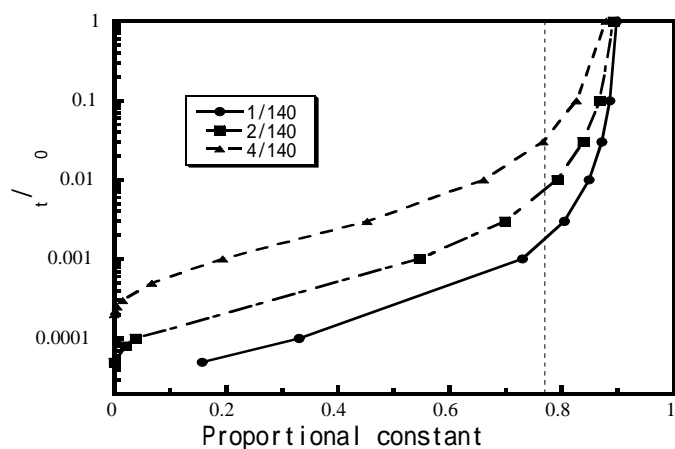


Fig. 9 Relationship between proportional constant and σ_x/σ_0

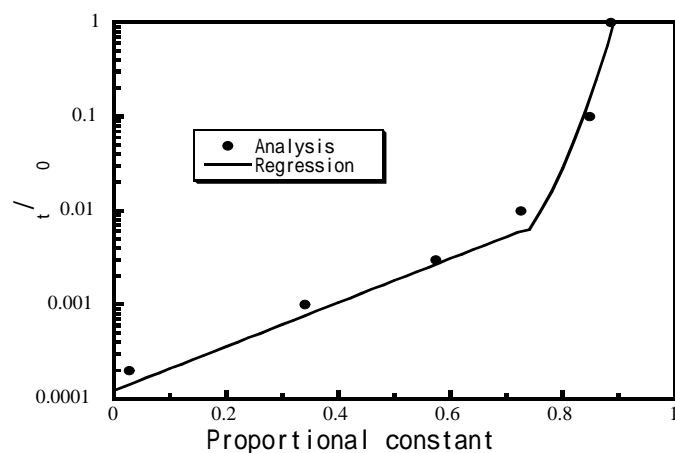


Fig. 10 Regression curve for σ_x/σ_0

図9から $2H/L$ と比例定数 α がわかれば導電率の比 $\sigma_t / \sigma_{0^\circ}$ が逆に一意に決定できることがわかる。そこで図9の結果から逆に、 $2H/L$ 、 α が既知の場合に $\sigma_t / \sigma_{0^\circ}$ を求める関係式を得る。これは単に $2H/L$ 、 α を変数として重回帰した。

図9の関係は比例定数 α が0.76程度以下の直線部(領域1)とそれ以上の曲線部(領域2)に分けられる。そこで領域1と領域2でそれぞれ α と $2H/L$ から $\log(\sigma_t / \sigma_{0^\circ})$ を以下の式のように重回帰した。

$$\log(\sigma_t / \sigma_{0^\circ}) = \begin{cases} -4.988 + 2.339 \times \alpha + 50.159 \\ \times 2H/L & (0 < \alpha < 0.76) \\ 33.515 - 104.152 \times \alpha + 73.349 \times \alpha^2 \\ + 52.367 \times 2H/L & (0.76 \leq \alpha < 0.9) \end{cases} \quad (3)$$

この式(3)の自由度調整済み決定係数 R_{adj} はそれぞれ0.976, 0.919である。回帰の適応度を確認するため試験片厚さ $2H=3[\text{mm}]$ のときの解析結果と回帰式の $\sigma_t / \sigma_{0^\circ}$ の関係を比較した結果を図10に示す。解析結果と回帰式は一致している。

したがって、以下の手順で厚さ方向導電率 σ_t を決定することができる。

- (1) はく離き裂を検出したい構造と同一の成形法で作成した、 0° 積層板の $2H/L$ を実測する。
- (2) モード I 層間はく離試験を行い、 R/R_0 と a/L の関係の比例定数 α を実測する。
- (3) 回帰式を用いて測定した $2H/L$ と α から導電率比 $\sigma_t / \sigma_{0^\circ}$ を決定する。
- (4) 比較的容易に精度良く測定できる σ_{0° 、 σ_{90° を測定し、導電率比 $\sigma_t / \sigma_{0^\circ}$ から σ_t を決定する。

実機の場合、モード I 層間はく離試験片を用いて測定可能性等を事前に検証することを考えれば、その際に式(3)から厚さ方位の導電率が実測できるため、本手法は有効であると判断される。ただし、本手法で

は、 0° 層試験片だけを対象にしており、多方位に積層した積層板も同じ厚さ方位の導電率を有すると仮定している。これについては今後の実験的検討が必要である。

5. 結 言

以上、有限要素法を用いてCFRPの層間はく離検出への電気ポテンシャル法の適用に及ぼす電気抵抗異方性の影響を検討した。

- (1) 電気ポテンシャル法によるCFRPのはく離検出において、厚さ方向の導電率比は $10^{-2} \sim 10^{-4}$ の程度であり、この異方性の影響が大きいことが明らかになった。
- (2) 電気抵抗異方性が大きい場合、はく離き裂進展による電気抵抗変化は検出可能な範囲で小さくなる。
- (3) 0° 積層板の二重片持梁試験片のモード I 試験を実施することにより、実験的に測定が困難である厚さ方向の導電率 σ_t を決定することができる。

参考文献

- (1) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 日本機械学会論文集, A-51-467, (1985), 1818.
- (2) 轟 章, 小林英男, 松浦克也, 日本機械学会論文集, A-60-574, (1994), 1458.
- (3) 轟 章, 小林英男, 松浦克也, 日本複合材料学会誌, 21-3, (1995), 89.
- (4) 守屋一政, 遠藤隆, 日本航空学会誌, 36-410, (1988), 37.