層間はく離検出知的 CFRP 構造への電気ポテンシャル法の適用*

轟 章^{*1}, 小林 英男^{*1}, 松浦 克也^{*2}Application of the Electric Potential Method to Smart CFRP Structures
for Detecting Delaminations

Akira TODOROKI, Hideo KOBAYASHI and Katsuya MATSUURA

CF/Epoxy composites have been applied to many aircraft structures. The composite plate compression properties, however, are easily decreased by delaminations. Thus an approach for detecting the delaminations, therefore, is widely desired now. In this study, therefore, an electric potential method was discussed for a real time non-destructive evaluation method of delaminations because this method has several advantages comparing with the embedded optical fiber. To obtain the basic properties of the CF/Epoxy composites, mode I and II delamination tests were conducted and the relations between the electric resistance change and the delamination crack length were measured. As a result, the electric resistance bridge circuit approach was proved to be excellent for detecting the delaminations from inside the aircraft structures.

Key Words: Delamination, Electric Potential Method, Electric Resistance Bridge Circuit Method, Smart Structure

1. 緒 言

CFRP 構造物は優れた力学的特性を有するため、航空宇宙機器の一次構造物に適用されつつあるが、層間はく離抵抗が非常に小さく、点検時の工具落下などによって容易に層間はく離が発生し、圧縮強度および剛性を著しく低下させる。特に CFRP では、衝撃後の圧縮強度が著しく低いため、設計許容荷重はこの特性で決定されており、CFRP の優れた力学的特性を十分に活かした設計はなされていない。近年、構造物にセンサー、アクチュエータを取付けたり、埋込むことで構造物、材料のき裂発生・進展を構造物、材料自身が検知し、補修する知的構造・材料が現在注目されている。そこで、CFRP 構造物の層間はく離の発生・進展を点検時、運行中もリアルタイムに検出可能な知的構造物化が現在強く望まれている。これに対して成形時に光ファイバーを埋込み、内部のマトリックス割れや層間はく離を検出する試みが現在行われている^{(1)~(3)}。しかしこの方法は、以下の問題点がある。
① 既存構造物に適用不可② 光ファイバー埋込みによる強度低下③ 光ファイバー破断時の修理が非常に困難④ ひずみ測定で検出する場合には、点検時(無負荷時)

の検出が不可能⑤ 光ファイバー-マトリックス界面はく離による機能寿命

そこで本研究では、CFRP 構造の外側(機体内側)の電極取付けだけで既存構造物にも適用可能であり、強度低下もなく、センサー部の修理も容易でリアルタイム検出可能な手法として電気ポテンシャル法を取り上げ、その有効性の基礎的検討を行った。CFRP には導電性の炭素繊維と絶縁材料の樹脂が複合されており、この電気ポテンシャル法は強化繊維の炭素繊維をそのままセンサーとして用いることに他ならない。しかし、その電気的基礎特性は現在のところ全く未知であり、実験的検討が不可欠である。このため、本研究では基礎的可能性を探る目的で、0・積層板を用いて層間はく離試験を実施し、電気ポテンシャル法によるはく離き裂長さ検出実験を行った。

2. 材料および試験片、実験方法

用いた材料はT300/Epoxy(東レP3051-25:成形条件130℃×0.4MPa×1.5H)であり、積層構成は $[0_2]_T$ である。成形時に中央に長さ30mmの2つ折りテフロンフィルムを挿入し、人工欠陥を作成した。この平板から、長さL=200mm、幅B=20mm、厚さ2H=約2mmの試験片を作成した。実験は、この試験片を用いて、モードⅠ層間はく離試験(図1参照)とモードⅡ層間はく離試験(図2参照)を実施した。

モードⅠ試験では、アルミニウム合金製ブロックタ

* 平成4年9月3日 日本機械学会材料力学部門講演会において講演、原稿受付 平成5年5月10日。

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

*² 東京工業大学大学院。

図1. モードⅠ (DCB) 試験片

イブ治具を用いて2重片持ち梁試験 (DCB試験) を実施した⁽⁴⁾。ただし、試験片の絶縁性を確保するため、治具と試験片の間にGFRP積層板を挟んで試験片に接着した。試験は島津製作所製電気油圧式サーボ試験機を用いて、変位制御で負荷速度1.5mm/minで実施した。負荷途中で負荷保持し、試験片側面から読み取り顕微鏡を用いてはく離き裂長さを測定した。なお、試験片側面からのはく離き裂長さ観察を容易にするため、試験片側面にあらかじめ事務用修正液を塗布しておいた。

モードⅡ試験では、3点曲げ式の治具を用いた端部切欠き曲げ試験 (ENF試験) を実施した。モードⅡ試験では、はく離き裂前縁形状に凹凸が激しくなるため⁽⁵⁾、はく離き裂長さの側面観察ではなく、筆者らが既に超音波顕微鏡を用いて、平均はく離き裂長さとの誤差が小さいことを実験的に検証している荷重-荷重点変位関係のコンプライアンスから計算した⁽⁶⁾。なお、ENF試験の場合でははく離き裂長さが短い場合 ($a/Ls < 0.7$: a ははく離き裂長さ、 $2Ls$ は3点曲げスパン) に、試験系が $dG_I/da > 0$ であるため、はく離き裂進展と同時にはく離き裂は急速に進展する。このため、本実験では、 $a/Ls \approx 0.7$ で実験を開始し、はく離き裂進展に伴い逐次試験片端面から負荷点までの距離 m (図2参照) を増大させた。便宜のため、スパンは一定とした。

電極の取り付けは、カーボン両面テープ、アルミニウムテープ、銀ペースト、カーボンペースト、アルミニウム板、銅板などの数種の試行錯誤の結果、以下の方法が最も安定しており、実験に採用した。

- ① 試験片をエメリー紙 (600番程度) で研磨し、アセトンで洗浄する。
- ② 洗浄部に銀ペーストを塗布する。
- ③ ひずみゲージターミナルを一ヶ所の電極に二個向かい合わせるように接着する。
- ④ リード線をターミナル両端にはんだ付けする。
- ⑤ 銀ペーストでリード線と試験片の導通を確保する。
- ⑥ 導電性アルミニウムテープで固定する。

図2. モードⅡ (ENF) 試験片

電気ポテンシャル法としては、直流定電流を流し、試験片の電気抵抗変化を電圧変化に換算する従来の方法 (以下ポテンシャル法と略記) と直流ブリッジ回路を用いた方法 (以下ブリッジ法と略記) の2種を用いた。電極の構造断面図を付録に示す。

電極取り付け位置は、はく離き裂を挟むように取り付ける方法 (図1: A-A') と、航空機の機体内側に電極を取り付けることを想定した方法 (図1: A-B) の両者を検討した。ブリッジ法では電極はこれのみであるが、ポテンシャル法では、試験片内部の電気ポテンシャル分布を調査する目的で、 $A_1 \sim A_7$ までの電極を取り付けた (図1参照)。

試験片の電気抵抗はA-A'間で約4Ω、A-B間で約2Ωであり、非常に小さいので、ブリッジを安定的に平衡させるのはこのままでは困難である。そこで、試験片に直列に120Ωの高精度抵抗をつなぎ、このブリッジ回路を安定的に平衡させた。これを図3に示す。図中可変抵抗には10Ωのものを用いた。ブリッジは共和電業製シグナルコンディショナと接続し、この微小電流を流し、ブリッジ間電圧をこれを用いて高精度に増幅した。

3. 実験結果および考察

3.1 モードⅠ試験

ポテンシャル法 (A-A') のはく離き裂増分 $\Delta a / L$ - 抵抗変化 $\Delta R / R_0$ 関係実測結果を図4に示す。図中 A_0 は電極間 (A-A') 間の変化である。ポテンシャル法では、入力電流を変化させて測定したが、図4は0.7Aの定電流を入力した結果である。図中縦軸は電圧計で測定した電圧からオームの法則で計算した抵抗値の初期値 R_0 で規格化した抵抗変化 ΔR であり、横軸は試験片長さ L で規格化したはく離き裂増分 Δa である。図から、ポテンシャル法を用いた場合、はく離き裂長さの進展に伴い、全ての電極では線形の関係の抵抗変化が生じており、はく離き裂長さが検出可能であることがわかる。守屋らはCFRP0

図 3. ブリッジ法回路図

図 4. ポテンシャル法 (A-A') の結果

・ 積層板および $0^\circ/90^\circ$ 積層板で同様の実験を実施し、図 4 と異なる非線形関係を得ている⁽⁷⁾。守屋らの結果では、はく離き裂先端が電極位置に達するまでは、その電極電圧の変化はほとんどなく、はく離き裂先端が通過後はほぼ直線的に上昇する結果を得ている (図 5 模式図参照)。この差異の原因として、試験片厚さが守屋らの場合には約 0.3mm と薄いこと、繊維の体積含有率が異なること (守屋らの場合には $v_f = 0.65$ 、本研究では 0.6) があげられる。つまり、守屋らの実験では、試験片が薄く、繊維の体積含有率も高いため、CFRP 導電性が高いため、電流ははく離き裂を迂回してすぐに下の電極に流れ、試験片全体端部にまで流れていないと考えられる。本研究の結果では、図 4 から明らかなように、はく離き裂の進展につれて、試験片の全ての点の電圧が上昇し、抵抗が増加しており、電流が試験片全体を流れていることが想像できる。この結果から、CFRP においてはその電気的特性が成形法によって著しく異なることがわかる。つまり、実機での使用には、実機とは同様の試験片を作成し、電気的特性を取得する必要があることを示していると思われる。これについては、今後さまざまな CFRP で確認する予定である。

図 5. 守屋らの結果 (模式図)⁽⁷⁾

これらの結果を定性的に検討するために以下の簡便な解析を実施した。試験片を電気的に均質な等方性材料と仮定する。A-A' 間電極の場合、簡単に試験片内ポテンシャルが均一と考えると、導電部の断面積は、試験片リガメント部断面積であるので、はく離き裂進展に伴い、抵抗 R は次式で表示される。

$$R = R_0 / (1 - \Delta a / (L - a_0)) \quad (1)$$

したがって、抵抗変化 $\Delta R = R - R_0$ は次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta R &= R_0 \{ 1 / (1 - \Delta a / (L - a_0)) - 1 \} \\ &\approx R_0 \Delta a / (L - a_0) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 R_0 は試験開始時の初期抵抗、 Δa は試験開始時からの はく離き裂進展量、 a_0 ははく離き裂長さである。式 (2) から、 a_0 は L に比較して小さい ($a_0/L = 0.15$: $\therefore \Delta a / (L - a_0) \approx \Delta a / L$) ので、抵抗変化 $\Delta R / R_0$ は $\Delta a / L$ にほぼ比例することがわかる。現実には比例定数は図 4 から明らかなように、本研究の電極位置では 0.05 である。これは、電気的に等方でないこと、試験片内ポテンシャル分布が均一でないことがあげられる。これらの要因のため、式 (2) の $y = x / (1 - x)$ の形において、 $x = \Delta a / L$ ではなく、実際には $x = \alpha (\Delta a / L)$ となっており、この係数 α がほぼ 0.05 であるために図 4 の結果が得られたと推察される。詳細なポテンシャル分布は今後解析する予定である。

ポテンシャル法においては、図 4 で示したように、はく離き裂進展に伴う抵抗変化を検出できた。しかし、測定電圧ははく離き裂進展後変化し、10 分程度の後安定化する挙動を示した。この原因を調査するため試験片に熱電対を取り付け、各入力電流に対する試験片温度の時間変化を測定した。この結果を図 6 に示す。入力電流としては、0.1、0.5、0.7、1.0 A の 4 種類で試験した。その結果、0.7 A では 10 分の安定時間が必要であり、また試験片温度も 50℃ にまで上昇することが明らかになった。そこで、電流を 0.1~0.7 A まで変化させ、試験片温度が定常状態になった時の試験片の電気抵抗を実測したところ全く変化は認められず

図 6. ポテンシャル法における試験片温度変化

図 8. モード I : ブリッジ法 (A-A') の結果

図 7. CFRP 試験片の電気特性モデル化

一定値であった。また、試験片の温度分布はほぼ均一であった。CFRPでは、繊維および繊維のネットワーク構造を抵抗成分に、樹脂部をコンデンサーに置き換えて考えることができる(図7参照)。試験片温度上昇は、この抵抗成分で生じた発熱が原因であり、この温度上昇によって樹脂が膨張し、コンデンサーのキャパシタンスが変化することによって、電圧が変化し、見かけ上抵抗が変化していると思われる。図7の回路に定電流 I を流したときの電圧 V の微分方程式は次式となる。

$$I = V/R + C dV/dt + V dC/dt \quad (3)$$

式(3)から、熱による C の変化 dC/dt によって、電圧 V が変化し得ることがわかる。ただし、CFRPの電気的特性は未知な部分が多く、他の要因も否定できない。今後解析的に検討する予定である。

以上示したように、ポテンシャル法にはいくつかの問題点がある。これをまとめると、以下のとおりである。

- ① 安定化に時間がかかる。
- ② 高精度化には大電流を必要とする。
- ③ 消費電力が大きい。
- ④ 温度上昇が激しい。

図 9. モード I : ブリッジ法 (A-B) の結果

これらのことから理想的には、小電流で高精度に測定可能な手法が望まれる。このため、本研究ではブリッジ法を検討した。ブリッジ法は既に図3に示したが、ホイートストンブリッジに試験片を組み込むことで、上記の問題点を解決している。ブリッジ法 (A-A') のはく離き裂進展に伴う抵抗変化の実測結果を図8に示す。図中縦軸および横軸は図4と同じであり、●印と▲印は異なる試験片の結果である。図4の A_0 の結果は電極間抵抗変化であり、これとブリッジ法の結果は定量的にはほぼ一致している。また、異なる試験片の結果もほぼ一致しており、はく離検出法として有効であることがわかる。電圧安定化に必要な時間は1分程度であり、また安定化保持時間を待たずに実測した結果(図8中の△印)と保持した後に測定した結果(図8中の▲印)を比較すると、その差異は小さい。このことから、ブリッジ法では安定化保持時間を必要としないことがわかる。ブリッジ電圧は4V、電流は最大でも30mAであり、消費電力も小さく、温度上昇もない。以上から、ブリッジ法がリアルタイムはく離検出に適していることが実証された。

ブリッジ法 (A-B) のはく離き裂進展に伴う抵抗変化を図9に示す。航空機構造の内側に取り付けるこ

図10. モードⅡ：ブリッジ法（A-A'）の結果

図11. モードⅡ：ブリッジ法（A-B）の結果

とを想定したA-B間電極の場合、実測結果の抵抗変化はA-A'間のはほぼ5分の1程度の変化であり、非常に小さい。これは、試験片全体の抵抗は約2Ωであり、はく離き裂進展に伴い導電部断面積が減少する部分が増大することで抵抗変化が生じるためと推察される。図中●印と▲印は異なる試験片の結果であり、両者の差は無視できない。また、はく離き裂進展に伴い抵抗変化は非線形になってきている。

A-B間電極の場合を定性的に検討するため、A-A'間の場合と同様の仮定を行い、近似的に解析する。はく離き裂が進展した部分では断面積が半分になる効果を有するので、抵抗が2倍になるとすると、試験片抵抗Rは次式となる。

$$R = R_0 + \rho \Delta a \quad (4)$$

ここで、 ρ ははく離き裂のない部分の単位長さ当たりの抵抗である。ところで、 ρ は次式で表わされる。

$$\rho = R_0 / (L + a_0) \quad (5)$$

式(5)を式(4)に代入して、 $\Delta R = R - R_0$ を解析すると次式を得る。

$$\Delta R = R_0 \Delta a / (L + a_0) \quad (6)$$

$a_0/L < 1$ であるので、抵抗変化 $\Delta R/R_0$ は次式となる。

$$\Delta R/R_0 \approx \Delta a/L (1 - a_0/L) \quad (6)$$

したがって、A-B間電極の場合にも、抵抗変化ははく離き裂進展に対して線形に増加する。ただし、この解析は、先にも述べたようにCFRPを電氣的に均質等方性材料と見なし、また試験片内部の電気ポテンシャル分布を考慮していない。このため、実際には式(2)と同様に式(7)を $\Delta R/R_0 = x(1 - a_0/L)$ とおいた場合に $x = \alpha (\Delta a/L)$ であり、図9の結果からこの α が0.01の程度であることがわかる。なお、詳細な解析は今後の検討課題である。

実験的に非線形となった原因としては、リード線接

続部および電極の信頼性があげられる。A-A'間電極の場合、抵抗変化が大きく、上記の試験片の変形による接続部分の抵抗変化は無視できる程度であるが、A-B間電極の場合、抵抗変化は非常に小さく、上記の接続部分の変化が無視できない程度になっているためと考えられる。したがって、さらに高信頼性の電極作成法を今後検討する必要がある。しかし、はく離き裂進展に伴う抵抗変化は十分実測可能であり、A-B間のようにはく離き裂の上面にだけ電極を取り付けてもはく離が検出可能であり、航空機のCFRP構造物のリアルタイムはく離検出に有効であることが明らかとなった。

3.2 モードⅡ試験

モードⅠ試験において、ブリッジ法の有効性が実証されたので、モードⅡ試験ではブリッジ法だけを検討した。モードⅡ試験では、はく離き裂はせん断応力によって進展する。このため、はく離き裂面はモードⅠ試験と異なり、接触したままである。

A-A'間電極の実測結果を図10に示す。図中縦軸および横軸はモードⅠの場合と同じである。図から、はく離き裂面が接触しているモードⅡ試験においても、はく離き裂進展に伴い抵抗変化がほぼ線形に生じていることがわかる。また、この変化率もほぼモードⅠの結果と同じである。図中丸印と三角印は異なる試験片の結果であり、両者はほぼ一致している。図中黒塗り印と白抜き印は安定化保持を行った場合と行わない場合の結果であり、両者に差異はない。以上のことからモードⅡ試験においてもブリッジ法（A-A'）は有効であることがわかる。

A-B間電極の実測結果を図11に示す。A-B間電極の場合でもはく離き裂進展に伴い抵抗変化は線形に増加していることがわかる。ただし、その変化率はモードⅠの場合（図6参照）と比較して5分の1程度

であり、非常に小さい。A-A' 間ではモードⅠとは同じ変化率が得られたのに対して、A-B間では変化率がモードⅡで小さくなってしまった。この原因は不明であり、今後詳細に検討する予定である。しかしながら、モードⅡ A-B間電極においても、はく離き裂進展を検出可能であることが実証されたと判断できる。ただし、モードⅡ試験においては、はく離が急速進展する場合 ($a/L > 0.7$ の場合) があり、このときには衝撃によって、電極抵抗が変化してしまい、はく離き裂進展を定量的に評価できなかった。A-B間のように抵抗変化が小さい場合には、電極の信頼性が最重要課題であると判断できる。

4. 結 言

以上、CFRP 0・積層板を用いて層間はく離試験を実施し、電気ポテンシャル法（ポテンシャル法、ブリッジ法）の有効性を実験的に検証した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 直流定電流を用いるポテンシャル法は、高精度測定のためには、大電流を必要とし、試験片の著しい温度上昇をまねき、電圧安定に時間がかかるため、リアルタイムはく離検出には適さない。
- (2) ブリッジ法は小電流で高精度に測定可能であり、リアルタイムはく離検出に有効である。
- (3) 航空機構造内側に電極を取り付ける CFRP 知的構造を想定した手法でも、抵抗変化は非常に小さいが、はく離をブリッジ法で検出可能である。
- (4) はく離面が接触しているモードⅡ試験においてもモードⅠの結果と同様に、はく離き裂進展に伴い、抵抗変化はほぼ線形に増加した。

謝 辞

本研究の遂行に際し平成4年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A)（課題番号04750073）の補助を得た。

参考文献

- (1) 北出真太郎, 福田武人, 逢坂勝彦, 池内淳一, FRPシンポジウム講演論文集, 第21回, (1992) 38.
- (2) B. Hofer, Composites, 18, 4, (1987) 309.
- (3) S. R. Waite and G. N. Sage, Composites, 19, 4, (1988) 288.
- (4) 影山和郎, 小林孝行, 柳沢昇, 菊池正紀, 宮本博, 日本機械学会論文集, A-53, (1987), 2386.
- (5) 轟 章, 小林英男, 日本機械学会論文集, A-57, (1991), 1648.
- (6) 轟 章, 小林英男, 李宋基, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 72, 920, (1992), 373.
- (7) 守屋一政, 遠藤隆, 日本航空宇宙学会誌, 36, 410, (1988), 37

付 録

電極部を0・繊維に直角に切断した断面図を以下に示す。

付図1 電極構造概念図