研究論文

スマート CFRP 構造開発を目的とした電気
ポテンシャル法による層間はく離検出法の適用性検討

轟 章*, 小林 英男**, 松浦 克也***

(1994 年 8 月 26 日受付)

Application of Electrical Potential Method as Delamination Sensor
for Smart CFRP Structures

Akira TODOROKI*, Hideo KOBAYASHI** and Katsuya MATSUURA***

(Received August 26, 1994)

CFRP composite plate structures have been generally known as that those have high specific mechanical properties. The CFRP composite plate, therefore, has been widely applied to many kinds of aircraft structures. The composite plate structures, however, have a weak point at interlamina strength. Since a delamination resistance of its plate is very low, delaminations easily yield by a low velocity impact loading or fatigue loading. For this reason, a smart structure to detect a delamination is desired now. In this study, therefore, an applicability of an electrical potential method to detect a delamination was examined experimentally from a stand point of a sensor for a smart structure. Effects of prepreg thickness, kind of electric current of electrical resistance bridge, loading mode and stacking sequence were all experimentally researched by using T 300/Epoxy. Mode I and II types of tests were conducted and the electrical resistance changes were measured by the electrical resistance bridge circuit. As a result, the followings were obtained. (1) In the case that there are many interlaminae by using thin prepreg sheet, the electrical resistance change is smaller than that of thick one because the electrical resistance to the plate thickness becomes large. (2) The AC is better for an electrical resistance bridge circuit than DC because it gave more stable results than those by DC. (3) Though the delamination crack surfaces contact with each other in the mode II tests. The electrical resistance change could be measured by the AC electrical resistance bridge method. (4) In the actual composite, plates, the nonlinear relations between the delamination crack growth and the electrical resistance of the specimen were obtained due to the delamination crack plane transition.

1. 緒 言

一方向プリプレグを多方位に積層して作成する CFRP 積層板は面内負荷の力学特性が非常に優れているため、航空宇宙機器用の主構造として適用が拡大されている。しかし、積層構造であるため、層間はく離抵抗が著しく弱く、工具落下や壁面への衝突などの点検中の不注意による低速度衝撃荷重によって容易に層間はく離

が発生し、著しい圧縮強度・剛性の低下をもたらすことは良く知られている。層間はく離は一般に外見からはその存在を判断しにくいいため、CFRP 積層構造物の実機の設計荷重の限界値は、肉眼で判別可能な大きなはく離発生時の圧縮強度となっているのが現状である。さらに、実機運用時に常に層間はく離の点検を必要としている。このような背景から、層間はく離を自動的に検出する知的 CFRP 構造の開発が望まれている。

これに対して、既に光ファイバーを埋め込み、各種の損傷を検出する知的構造など^{1,2)}、いくつかの提案がなされているが、飛行前の無負荷状態で既存の航空機に容易に適用可能なシステムは提案されていない。著者らは、金属材料のき裂検出に適用されている電気ポテンシャル法を CFRP 積層板の層間はく離検出に適用する試みを

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

Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152, Japan

* 助教授 Assistant Professor, ** 教授 Professor,

*** 大学院生 Graduate Student

提案し、新たに電気抵抗ブリッジ法を適用してその可能性を示した³⁾。電氣的にCFRPの損傷を検出する手法は既にいくつか提案されている⁴⁻⁶⁾。これらは、大電流を用いるため試験片温度上昇が生じたり⁴⁾、炭素繊維の破断を取り扱うため層間はく離の検出には利用できない手法であった^{5,6)}。また、層間はく離靱性試験片のはく離き裂長さ測定に対して、電気抵抗線ブリッジ法を用いる手法も既にFischerらによって報告されているが、はく離き裂を挟むように電極を取り付けるため、既存の航空機構造の内面に電極を取り付けることを想定していない⁷⁾。

本研究では、前報告³⁾と異なるプリプレグ(同じ炭素繊維)、積層構成のCFRP積層板を用いて、電気ポテンシャル法によるCFRP積層板の層間はく離検出に及ぼすプリプレグ厚さ、ブリッジ電圧の種類、負荷モードなどの違いの影響や積層構造の影響を、人工欠陥を有するモードI、モードII層間はく離靱性試験で検討し、その有効性と問題点を実験的に検討した。

2. 試験片及び試験方法

用いた材料は一方向長繊維強化エポキシ樹脂の東レ製プリプレグP3211-12(炭素繊維T300,マトリックス樹脂エポキシ3631:繊維の体積含有率 $V_f=60\%$ 、成形条件: $180^\circ\text{C} \times 0.4\text{ MPa} \times 1.5\text{ h}$)である。このプリプレグ

を以下のA, B, Cの3タイプに積層した積層板を作成した。

Aタイプ: $[0_s \nabla 0_s]$

Bタイプ: $[0_2/90_4/0_2 \nabla 90_2/0_4/90_2]$

Cタイプ: $[\pm 45/0_4/\pm 45 \nabla 0/\pm 45/0_2/\pm 45/0]$

上記 ∇ 部分に2つ折りのテフロンフィルム(厚さ25 μm)を成形時に挿入し、長さ30 mmの人工欠陥を有するCFRP積層板を作成した。この平板から長さ150 mm, 幅20 mm, 厚さ約2 mmの試験片を作成した。タイプAは既報と同じ 0° だけの積層板である。タイプBは $0/90$ 界面に初期欠陥が存在する。タイプCは $0/45^\circ$ 界面に初期欠陥が存在する。なお、タイプB, Cは非対称積層板である。

この試験片に電極を取り付け、衝撃荷重によって予き裂導入後に電気抵抗ブリッジ法で試験片の電気抵抗変化を実測しながらモードI、モードIIの層間はく離靱性試験⁸⁾を実施し、はく離き裂長さ a と電気抵抗変化の関係を実測した。試験片および治具をFig. 1(a), (b)にそれぞれ示す。モードI試験はアルミ合金製ブロックタイプ治具を用いた2重片持ち梁試験片である⁸⁾。ブロックと試験片の間にGFRP製の電気絶縁材料を貼り付けた。モードII試験は3点曲げ試験である。モードIIの場合は、はく離き裂長さ a がスパン長さ S の約35%より小さいとはく離き裂は不安定に急速進展する。このため、本実験では $a/S > 0.35$ となるようにスパン長さを変更した⁹⁾。予き裂は、人工欠陥内部に剃刀の刃を衝撃的に挿入し、人工欠陥先端から約15 mmの長さまで挿入した。

電極は、以下の要領で作成した。

① 試験片をサンドペーパーで100, 240, 400, 800, 1000番で研磨後、粒径0.3 μm のアルミナ研磨材で研磨する。

② 研磨面をアセトンで洗浄する。

Fig. 1 Specimen and jig configurations.

Fig. 2 Electrode foundation by using strain gauge terminal.

Fig. 3 Cross section of electrode.

Fig. 4 Electrode position on specimen.

③ ひずみゲージ用ターミナルを電極 1 個に対して 2 個ずつ 10 mm ほどの間隔で互いに向き合わせて試験片上面に接着する (Fig. 2 参照)。

④ 導電性銀ペーストをターミナル間の試験片表面上に薄く塗布し乾燥させる。

⑤ 1 本のリード線を両ターミナルにはんだ付けする。

⑥ リード線を埋め込むように銀ペーストを少しずつ塗布し乾燥させる。

⑦ 十分乾燥させる。

⑧ 導電性アルミニウム箔テープで全体を固定、保護する。

最終的な電極断面を Fig. 3 に示す。この電極を試験片の上面に 2 箇所作成した (Fig. 4 参照)。試験片同一面上に電極を作成した理由は、航空機などの板殻構造の内面だけに電極を取り付けて、層間はく離き裂の発生を検出することを想定しているためである。

CFRP 積層板の炭素繊維は蛇行しており、層内で隣接繊維に互いに接触しネットワーク構造を構成している。こればかりでなく、樹脂リッチ部の層間を越えて炭素繊維は互いに接触しており、試験片全体で炭素繊維のネットワーク構造を構成しているため、層間はく離き裂が発生すると、試験片中の導電部断面積が減少し (炭素繊維ネットワーク構造の破壊)、電気抵抗が増加する。これは既に 1 プライが比較的厚い (1 プライ厚さ約 250 μm) CFRP 積層板 (積層構成 $[0_4 \nabla 0_4]$: 積層板厚さ約 2 mm) で著者らは実験的に示した³⁾。また、守屋ら⁴⁾、Fischer ら⁷⁾ も CFRP のモード I 層間はく離試験で、き裂を

Fig. 5 Electrical resistance bridge circuit.

挟むように試験片上下に電極を作成した場合について、実験的に導電性を検証している。

層間はく離靱性試験は、MTS 社製油圧サーボ試験機 (容量 98 kN) を用いて変位制御 (負荷速度 16.6 $\mu\text{m/s}$) で行った。試験片側面に事務用修正液を塗布し、試験片側面から読み取り顕微鏡ではく離き裂長さを実測した。

試験片と 120 Ω の高精度電気抵抗を直列に接続し、電気抵抗ブリッジを作成した。ただし、試験前に試験片電気抵抗を実測し、その電気抵抗だけ可変抵抗で余分に補正した (Fig. 5 参照)。この電気抵抗ブリッジに動ひずみアンプを接続し、電気抵抗線ひずみゲージによるひずみ測定と全く同様に、ブリッジ間電圧を 500~2,000 倍に増幅して電気抵抗変化を測定した。用いた動ひずみアンプは共和電業製 DPM-602 A (ブリッジ間電圧 5 V, 電流 ± 30 mA, 周波数 5 kHz) である。なお、直流電流での電気抵抗変化との関連を調査する目的で、動ひずみアンプの代わりに直流シグナルコンディショナーを用いて測定した試験も一部実施した。これは共和電業製 CDV-230 C (10 V, ± 5 mA) を用いた。以下このブリッジ間電圧に交流を用いた場合 (動ひずみアンプを用いた場合) を交流ブリッジ法、直流電圧を用いた場合 (シグナルコンディショナーを用いた場合) を直流ブリッジ法と略称する。

3. 実験結果と考察

3.1 プリプレグ厚さの影響

タイプ A 試験片を用いてモード I 試験を実施し、既報で用いた T 300/Epoxy (120°C $\times$ 2 h : 積層構成 $[0_4 \nabla 0_4]$)³⁾ で直流ブリッジ法で測定したはく離き裂長さ $\Delta a/L$ (L : 試験片長さ 150 mm) と電気抵抗の変化 $\Delta R/R_0$ の関係と比較検討した。既報の材料の結果を Fig. 6 に、タイプ A の試験片の実測結果を Fig. 7 に示す。両者を比較すると、どちらもはく離き裂進展に伴いほぼ直線的に

Fig. 6 Electrical resistance change with delamination crack increase in thick prepreg composites.

Fig. 7 Electrical resistance change with delamination crack increase in type A.

電気抵抗が増加している。しかしその変化率（直線の傾き）は、タイプ A の場合（Fig. 7）は既報の結果（Fig. 6）のほぼ 1/3 である。両材料で、繊維の体積含有率はほぼ同一であり、繊維は T 300 で同じである。両者の材料の差異は、既報の材料が、1 プライの厚さが本研究の材料の倍（試験片厚さは同じ）であること、epoxy 樹脂の硬化温度が本研究の材料の方が高いことだけである。直流電気に対して epoxy 樹脂は無関係であり、繊維のネットワークだけが関係していることを考慮すると、既報の材料の場合は本研究の材料よりも 1 プライの厚さが 2 倍に厚いため、試験片厚さを同じにした場合には、積層数が半分となり、樹脂リッチの層間の数が少なくなることがこの差異の原因として考えられる。つまり、積層数が多いと繊維接触に有害な層間が増加し、厚さ方向の電気抵抗が増加して、電気が試験片表面上により多く流れ、層間はく離の進展による断面積の変化の影響が小さくなるということが考えられる。

厚さ方向の電気抵抗を実測することは試験片が薄いために極めて困難である。そこで、試験初期の電気抵抗を

Fig. 8 Electrical resistance change with delamination crack increase measured with AC bridge circuit.

Fig. 9 Electrical resistance change with delamination crack increase in mode II test.

実測し、比較した。既報の材料では、この電気抵抗は 2 Ω であり、タイプ A の場合には 3 Ω であった。このことから、タイプ A の方が層間が多いだけ電気抵抗が高いことがわかる。

3.2 ブリッジ間電圧の影響

ブリッジ間電圧について、直流ブリッジ法と交流ブリッジ法を比較検討するため、交流ブリッジ法でタイプ A 試験片の $\Delta a/L$ - $\Delta R/R_0$ 関係を実測した。結果を Fig. 8 に示す。Fig. 7 と Fig. 8 を比較すると、交流ブリッジ法の結果（Fig. 8 参照）は比較的ばらつきが少ないが、試験初期でやや非線形な増加を示した後、ほぼ直線的に増加している。この試験初期の非線形は、人工的に導入した予き裂の影響と推察される。つまり、予き裂導入面とはく離き裂進展面との格差やき裂自体の湾曲（凹凸）が原因と推察される。そこで、後半のほぼ直線上に増加している部分の傾きだけを比較すると、交流ブリッジ法の傾きは直流ブリッジ法の約半分程度の傾きである。これは、交流を用いることで電流が表皮効果によって試験片表面を流れるようになったためと思われる。CFRP は炭

(a) Results of the electrodes on the 0 degree side

(a) Results of the electrodes on the 0 degree side

(b) Results of the electrodes on the 90 degree side

(b) Results of the electrodes on the 45 degree side

Fig. 10 Electrical resistance change with delamination crack increase in type B mode I specimen.

Fig. 11 Electrical resistance change with delamination crack increase in type C mode I specimen.

素繊維が導電性であり樹脂が絶縁性である。このため、交流電流の方が試験片を流れやすく、データのばらつきが小さいと思われる。しかし、交流電流には表皮効果があるため、最適な交流周波数が存在すると思われる。以上の結果から、交流ブリッジ法の方がデータばらつきが小さいため、以後は交流ブリッジ法を用いて評価する。

3.3 荷重モードの影響

タイプ A 試験片でモード II 試験を実施し、はく離き裂進展に伴う電気抵抗を測定した。結果を Fig. 9 に示す。図中白抜きシンボルは荷重時、黒塗りシンボルは除荷時の実測結果である。モード II 試験では、荷重中にはく離き裂面が互いに接触するため、荷重時の電気抵抗変化は除荷時より小さい。荷重時にはく離き裂進展に伴い、電気抵抗がほぼ直線的に増加していることから、はく離き裂進展によって炭素繊維ネットワークが破壊されており、荷重による破面接触によっても完全には回復しないことがわかる。

モード I 試験の結果 (Fig. 8 参照) と比較すると、負

荷時にはモード I の結果よりも電気抵抗変化は小さいが、除荷時には若干モード II 試験結果の方が電気抵抗変化が大きい。しかし、除荷時の電気抵抗変化がモード I よりもやや大きいことは試験片ごとのばらつきの範囲内と判断される。つまり、破面接触がない場合には、負荷モードによらずほぼ同じ電気抵抗変化となると判断される。

3.4 積層構成の影響

実機の構造部材の複雑な積層構成を模擬したタイプ B, C の試験片を用いて同様に、はく離き裂進展に伴う電気抵抗変化を実測した。モード I 試験におけるタイプ B, タイプ C 試験片の実測結果をそれぞれ Fig. 10(a), (b), Fig. 11(a), (b) に示す。タイプ B, C では、積層構成が非対称になっている。このため、電極取付面が 0° 繊維側(a)と 90° また 45° 側(b)の 2 種測定した。どちらの場合も電極が 0° 側にある場合 (Fig. 10, 11(a) 参照) には電気抵抗変化がそうでない場合 (Fig. 10, 11(b) 参照) よりも小さい。試験初期の電気抵抗はタイプ B, C の試

Fig. 12 Delamination crack plain transition from the initial defect.

Fig. 13 Electrical resistance change with delamination crack increase in type B mode II specimen.

験片で、 0° 側に電極を取り付けた場合にはほぼタイプ A と同じである (3Ω) のに対して、タイプ B で 90° 側の場合には 50Ω 、タイプ C の 45° 側では 9Ω と大きくなった。このことから、電極を 0° 側に取り付けたと、表面の 0° 層内の電気抵抗が層間や 90° 、 45° 層内よりも著しく低いと、表面の 0° 層内を流れる電流が多くなり、層間を流れる電流が少なくなるためであると思われる。したがって、実機に電極を取り付ける場合には、表面層の繊維に直角に電流が流れる方位に作成すべきであると判断される。

全ての試験片の電気抵抗変化はタイプ A 試験片のような 0° 層だけの場合と異なり、電気抵抗変化が著しく非線形となっている。これは、Fig. 12 に示すようにモード I 試験時にはく離き裂面が試験片中央から遷移してしまうことに起因している。はく離き裂面は 90° 層や 45° 層内のマトリックス割れを伴って隣接層間に遷移すると、電極側から遠い面に遷移する場合にははく離き裂進展に伴う電気伝導断面面積の変化が小さくなるために電気抵抗変化は小さくなる。Fig. 10(a)、Fig. 11(a) の場合、電極作成表面が 0° 層であり、またこのはく離き裂面の遷移が電極と遠い方向に行われることに起因して、電気抵抗

Fig. 14 Electrical resistance change with delamination crack increase in type C mode II specimen.

変化が著しく小さくなっていると判断される。

タイプ B 試験片の 90° 側に電極を取り付けた場合 (Fig. 10(b) 参照) と、タイプ C 試験片では、負荷時 (図中白抜き印) と除荷時 (図中黒塗り印) の実測を行った。この結果から、モード I 試験においても除荷時に破面接触が生じ、電気抵抗が減少するが、繊維のネットワーク構造は完全に破壊されているため、電気抵抗は除荷時でも増大していることがわかる。

タイプ B、C のモード II 試験の実測結果を Fig. 13, 14 にそれぞれ示す。ただし、どちらも非 0° 層側に電極取付を行った。どちらの試験片でも、はく離き裂面の遷移が生じており、電気抵抗変化は著しく非線形になっている。しかし、はく離き裂の進展に伴って、負荷時、除荷時で電気抵抗が増大していることがわかる。

以上の結果から、実機の複雑な積層構成の構造物では、はく離き裂面の遷移が生じ、はく離き裂長さの増大と電気抵抗変化が線形増加の関係でなくなることを、電極は繊維に直角に電流が流れる方位に作成すると電気抵抗変化が大きいことが明らかになった。実機の層間ははく離き裂面遷移だけでなく、複数はく離き裂などが発生する。このため、現在の電気抵抗変化を電気抵抗ブリッジ法で測定するだけでは、はく離き裂の発生検出は可能であるが、その大きさまでは検出できない。これは今後の課題である。

4. 結 論

以上 T 300/Epoxy 積層板を用いて、層間はく離き裂検出の知的構造を対象とした CFRP への電気ポテンシャル法の適用性について、プライ厚さ、ブリッジ間電圧、負荷モード、積層構成の影響を実験的に評価した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 同一厚さ試験片においてプリプレグブライ厚さが減少し、積層数が増大すると層間数が増加するため、厚さ方位の電気抵抗が増加し、厚さ方位に流れる電流が減少するためにはく離き裂進展に伴う電気抵抗変化割合が小さくなる。

(2) 直流ブリッジ法、交流ブリッジ法のどちらも適用可能であるが、比較的交流ブリッジ法の方がデータのばらつきが小さい。ただし、交流電流には表皮効果があるため、交流周波数の最適化が必要である。

(3) モード I、II の両方で、負荷除荷時のどちらでもはく離き裂が検出可能である。はく離き裂面が接触するモード II 試験片では除荷時に電気抵抗変化が大きくなる。モード I 試験では、逆に除荷時にはく離き裂面が接触し電気抵抗変化が小さくなる。

(4) 実機の複雑な積層構成の構造の場合、電極は繊維と直角に電流が流れる方位に作成するとはく離き裂進展に伴う電気抵抗変化が大きいの。ただし、はく離き裂面の遷移が生じるため、電気抵抗変化は非線形となる。

本研究の遂行にあたり、石川島播磨重工業株式会社技術研究所の盛田英夫氏に試験片の援助を受けた。謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 北出真太郎, 福田武人, 逢坂勝彦: 第 23 回 FRP シンポジウム講演論文集, 日本材料学会 (1994), II-1-II-3.
- 2) B. Hofer: *Composites*, **18** (1987), 309-316.
- 3) 轟 章, 小林英男, 松浦克也: 機論 A, **60** (1994), 1458-1463.
- 4) 守屋一政, 遠藤 隆: 日本航空宇宙学会誌, **36** (1988), 139-146.
- 5) K. Schulte: *Comp. Sci. Tech.*, **36** (1989), 63-76.
- 6) 武藤範雄, 柳田博明, 宮山 勝, 中辻照幸, 杉田稔, 大塚 靖: 日本複合材料学会誌, **18** (1992), 144-150.
- 7) Chr. Fischer & F.J. Arendts: *Comp. Sci. Tech.*, **46** (1993), 319-323.
- 8) 影山和郎, 金原 勲, 大沢 勇, 北條正樹: 造船論, **168** (1991) 499-508.
- 9) 轟 章, 小林英男: 機論, **57** (1991), 1648-1653.