

## 審査の結果の要旨

氏名 朴 宰 範

工学修士 朴 宰範 提出の論文は、「Damage Detection of CFRP Composites Using Electrical Conductivity (電気導電性を利用した炭素繊維複合材料の損傷評価)」と題し、7章と付録よりなる。

軽量航空宇宙構造材として注目されている炭素繊維強化複合材料(以下、CFRP材)は、優れた力学特性とともに電気導電性をもち、両者の特性を活用した知的材料としての活用が期待されている。しかし、従来の研究は実験結果の定性的な説明に限られ、その支配因子の把握や理論解析はあまり行われていない。本論文では、引張荷重下におけるCFRP材の電気抵抗変化挙動に関する実験および理論的考察を行い、その結果に基づいた数値・理論解析モデルを提案することを主な目的としている。

第1章は「序論」であり、CFRP材の電気抵抗変化挙動に関する現状と問題点をまとめた上で、本研究の目的と意義を述べている。

第2章は「CFRP材の電気・力学特性」であり、CFRP材の電気・力学特性の実験結果を述べている。炭素繊維単体、および、樹脂中に埋め込まれた炭素繊維の比抵抗値の測定をもとに、引張荷重下におけるCFRP材の電気抵抗変化に関して、炭素繊維の伸び、破断、さらに繊維の接触という三つの現象を検討し、電気抵抗変化に及ぼす影響を調べている。とくに、接触点の役割について検討し、繊維破断により一本の繊維の中で導電パスとしての機能がなくなる長さを意味する電氣的無効長さという新しい概念を提案している。この概念の導入によって、ゲージ長さ不依存性と繊維体積含有率への依存性といったCFRP材の電気抵抗変化における二つの実験事実の説明が初めて可能になり、提案された概念の有用性が確認されている。

第3章は「CFRP材の電気抵抗変化の測定方法」であり、CFRP材の適切な電気抵抗測定方法について検討している。電気ポテンシャル理論から導かれた線形異方性抵抗モデルにより、直流2端子、直流4端子などの電極の付け方が電気抵抗の測定値に及ぼす影響を定量的に評価している。本章の結果より、電気異方性を考慮した電気抵抗の適切な測定方法の確立、および測定値の正しい解析が可能となった。

第4章は「引張荷重下におけるCFRP材の電気・力学モデル」であり、炭素繊維の接触に起因する導電パスの平均長さを考慮し、電気抵抗線の並列セルが直列に並んでいる電気回路をCFRP材の等価回路として考え、この回路が力学的損傷を受けることをモデル化し、電気抵抗変化率を定式化している。抵抗線の伸びは歪ゲージ係数の導入により、また、抵抗線の破断は炭素繊維の生き残り率、すなわち、ワイブル統計関数を導入することにより、力学損傷を電気抵抗変化率と結びつけること

を可能としている。また、解析モデルによる計算結果と実験結果との比較により、並列セルの長さが求められ、第 2 章で提案された電氣的無効長さの定量的な評価が可能となっている。

第 5 章は「パーコレーション構造としての CFRP 材」であり、絶縁体のマトリックスの中に埋め込まれた導電体相互の接触に起因する複合材の導電性を扱う電気パーコレーション理論に基づき、CFRP 材の電気異方性から内部接触状況の推定を行う方法を提案している。理論解析では、既存の 2 次元幾何学パーコレーションモデルに加え、電気回路のキルヒホッフ法則を適用した不連続モデルを用いている。接触点分布と電気異方性との関係を調べることで、CFRP 内部に存在する繊維束とマトリックスリッチ領域に起因する接触点の固まり(Cluster)の重要性を確認している。また、クラック、円孔などの欠陥を有する CFRP 材の電位分布を測定し、平滑な試験片の電位分布との大きな差があることを確認し、電位分布マップを利用した損傷診断技術の可能性を示している。

第 6 章は「CFRP 材の荷重履歴評価」であり、負荷－除荷繰返し荷重下における CFRP 材の最大歪記憶機能に関して、実験および理論解析を行っている。繊維破断が最大歪に依存することを考慮するとともに、低歪領域で観察される破断繊維の導電パス機能の除荷による回復現象に注目し、そのメカニズムの解明と経験式を利用した定式化を行った。第 4 章で提案された解析モデルを、破断繊維の低歪領域での導電性回復現象が含まれるように修正することによって、負荷－除荷繰返し荷重下における CFRP 材の電気抵抗変化挙動、とくに、前回受けた最大歪による残留抵抗の増加を精度良く予測することに成功している。

第 7 章は「結論」であり、本研究で得られた結論を述べ、今後の課題について検討している。

以上要するに、本論文は、引張荷重下における CFRP 材の電気抵抗変化挙動に関する実験および理論的考察を行い、その結果に基づいた数値・理論解析モデルを提案し、実験結果を定量的に説明することに成功している。これにより、優れた力学特性と電気導電性の両者の特性を活用した知的材料としての CFRP 材の今後の活用を支援する強力なツールを提供しており、その工学的意義は大きいものとする。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。