

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 寧 霄光

近年、高い比弾性率・比強度を持つ繊維強化樹脂複合材料（以下、複合材料）は、軽量化材料として注目を集め、航空機、船舶、自動車に適用が進み、さらなる用途の拡大が期待されている。複合材料構造において、部材間の荷重伝達を担う継手には、高い信頼性が求められるとともに、重量増加を伴わない継手方式の採用が望ましい。樹脂系接着剤で結合させる接着継手は、軽量化、応力集中、疲労特性などの観点で機械的継手に対して優位性を持つ。一方、品質がばらつきやすく、外部環境による劣化、き裂の不安定な進展などによる信頼性の低下が懸念される。加えて、外部からの検査が難しいことから、使用中の健全性評価のための検査技術が確立されているとは言えない。

現在、構造物に一体化したセンサを用いて、初期の損傷・劣化などの異常検知、使用中の損傷進展を監視して、構造健全性を評価する構造ヘルスモニタリング（SHM）に注目が集まっている。荷重を伝達する継手部は重要なモニタリング対象として挙げられる。またSHMにおいて構造健全性につながる一次情報を取得するセンシング技術は重要であり、精度・分解能、安定性、耐久性に対して高い要求が課せられる。光ファイバセンサは、軽量、可とう性、高強度、耐食性、耐電磁誘導性、防爆性などの優れた特徴から、SHMのためのセンシング技術として注目されている。特に、光ファイバに沿ってひずみや温度の分布を測定できる分布型光ファイバセンサは、構造の変形状態および局所的な応力集中までも精度よく検出できる技術として盛んに研究・開発が進められている。本研究で対象とする光周波数領域反射計（OFDR）は、1mm以下の空間分解能での分布測定を可能とし、Fiber Bragg Grating（FBG）と組み合わせることで、光ファイバに沿ったひずみ、あるいは温度を高い精度で分布的に測定できる技術である。

本研究では、接着継手の接着部に直接光ファイバセンサを埋め込み、接着部内のひずみ分布を高空間分解能・高精度で測定し、その測定結果からその健全性を評価することを目的としながら、新たに開発した測定システムにより長時間にわたる連続的な動的ひずみ分布測定を可能とし、繰り返し荷重下にある接着継手に適用した。埋め込まれた光ファイバセンサによって得られたひずみ分布は、先行研究や詳細な有限要素モデルと比較され高い精度や安定性を持つことが確認された。さらに、ひずみ分布および反射スペクトルの変化からき裂の発生と進展を精度よく推定できることが示された。最後に分布計測が可能な光ファイバセンサの接着継手のSHMに対する適用性を向上させる提案がなされた。

本論文は、”Structural health monitoring of adhesive bonded single-lap joints in composite materials by fiber-optic distributed sensing system（分布型光ファイバセンサを用いた複合材料シングルラップ継手の構造ヘルスモニタリング）”と題し、6つの章からなり、英文で書かれている。

第1章は序論であり、複合材料の接着継手の構造健全性評価技術の必要性を示したのち、本研究の目的、研究のアプローチと論文構成が述べられている。

第2章では、せん断継手としての接着継手の形態、応力分布、損傷形態が示され、健全性評価のための非破壊検査技術、SHMに関して先行研究を参照してまとめられている。接着部に埋め込まれた光ファイバによって分布的に測定されたひずみ情報が、接着層に発生するき裂など損傷検知に対する高感度な指標になり得ることを示しつつ、変動荷重下において適用可能な測定システムと損傷検知手法の開発の必要性が述べられている。また、一般的なせん断継手であるシングルラップ継手を対象とすることが述べられている。

第3章では、本研究で使用されたOFDR方式の分布測定技術を中心に光ファイバセンサについてまとめている。従来の分布型光ファイバセンサでは、測定速度が遅いため変動荷重下での測定ができない。そこで、接着継手の繰り返し荷重試験を対象として必要な仕様をまとめ、その仕様をもとに新たに開発した測定システムについて記述している。また、ひずみ分布を算出するまでの信号処理の検討を行っている。

第4章では、接着継手の繰り返し荷重試験において接着部のひずみ分布測定を行った結果を示している。高い測定精度・安定性を確保するには、接着部への光ファイバの埋め込み状態が重要であることが述べられ、複合材料の被着材にコキュア方式で埋め込み、接着継手試験片を作製する方法を考案している。また測定精度評価のために埋め込まれた光ファイバを含んだ詳細な有限要素モデルを作成した。静的試験で得られた接着部のひずみ分布測定結果は有限要素解析（FEA）による結果とよく一致したが、これは上記の埋め込み手法の妥当性と詳細モデルによるものである。次に繰り返し荷重試験において動的測定が長時間にわたり行われた。静的試験同様に測定と解析の結果はよく一致した。再現性の検討から動的測定は約5Hzで長時間にわたり極めて安定的に行われたことが確認された。

第5章では、損傷検知手法の検討を行った。前章の試験で顕微鏡による接着層のき裂が観測されており、このき裂検知を課題とした。実用性の高いシンプルなアルゴリズムにより、測定されたひずみ分布からき裂先端の位置を同定する手法を提案し、観測とよく一致する結果が得られることを確認した。また信号処理で得られる反射スペクトルの分布が、き裂先端位置によって変化すること、光ファイバ長手方向のひずみ分布が支配的な影響を持つことを示し、上述した手法よりも直接的かつロバストな損傷検知手法の開発に成功した。本章では、さらに埋め込み型の分布型光ファイバセンサによる接着継手のSHMへの適用性を高めるため、製造時のモニタリングやより実用的なセンサの導入方法について提案がなされている。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめ、今後の展望が述べられている。

以上を要するに、本論文では、接着継手に対して変動荷重下でも適用可能な分布型光ファイバセンサを用いた有用性・実用性の高い損傷検知手法が提案され、接着層で発生・進展するき裂先端の位置を精度よく同定できることを実証した。この結果を得るために測定システム、センサの設置方法、信号処理、解析シミュレーションなどを総合的に検討、改良・開発し、SHMの実用化に向けて基盤的な技術進歩が得られている点は、システム創成学分野にとって大きな価値がある。

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。