

## 論文の内容の要旨

論文題目 埋め込み FBG センサを用いた CFRP 積層板の損傷モニタリング

氏名 矢代 茂樹

近年、様々な分野において、高比強度・高比剛性といった利点を持つ CFRP などの繊維強化プラスチックが積極的に適用されている。しかし、その積層材は、円孔などの応力集中部においてスプリッティングやトランスバースクラック、層間はく離が同時に発生する損傷形態を示す。

一方で、CFRP などの先進複合材料の主要構造部材への適用が広がる中、その安全性・健全性を評価、保証する構造ヘルスマニタリング技術に対する関心が急速に高まっている。ヘルスマニタリングに使用されるセンサの中でも、FBG 光ファイバセンサは、高精度な計測や多点化の容易さなどの多くの利点を持っていることから非常に注目されている。近年では、FBG センサを用いたひずみ/温度モニタリングだけでなく、積層板に発生する損傷を検出する研究も行なわれている。実構造物に必ず存在する応力集中部について、その近傍で発生する複数損傷を検出するだけでなく、それらを予測し、推定する損傷モニタリングが実現すれば、運用段階における構造部材の健全性評価に大きく貢献する。

以上の観点から、本研究では、積層板の応力集中部近傍における損傷に注目し、積層板に埋め込んだ FBG センサを利用した損傷モニタリングを提案した。まず、FBG センサ埋め込んだ応力集中部を有する積層板に対する損傷解析ならびに光学解析を提案し、積層板の損傷形態と反射光スペクトルの変化を予測した。これらの成果を基に、埋め込んだ FBG センサの反射光スペクトルから積層板の損傷形態を推定する逆問題解析手法を提案し、その妥当性を検証した。

第 2 章では、FBG センサを埋め込んだ応力集中部を有する積層板を対象とし、層レベルの全損傷を表現する損傷解析、ならびに、得られたひずみ分布から FBG センサの反射光スペクトルを求める光学解析を提案し、以下の結論を得た。

- (1) 有限要素解析に基づく結合要素を用いた損傷解析を提案した。積層構造をレイヤーワイズモデルで表し、これらのレイヤーには Mindlin 板要素を用いて面外変形を考慮した。さらに Mindlin 板要素間に結合要素を組み込むことで積層板の複数損傷を表現した。
- (2) 本解析では、直接反復法によって非線形平衡方程式の求解の安定化を図るとともに、解が収束する要素サイズの制限を回避した。
- (3) 不均一なセンサ特性の分布をもつ FBG センサの反射光スペクトルを求める数値解析を、上

記の損傷解析と直接結び付けた。本光学解析により、積層板の損傷進展過程における反射光スペクトルの変化を解析で得られる。

ここで提案した解析モデルおよび解析手法では、(a) 残留強度パラメータを用いた結合力要素によって複数損傷を表現し、(b) 損傷解析と光学解析を連続して行える、という点において、本研究で提案する損傷モニタリングの重要な基礎となっている。

第3章では、切り欠きを有する CFRP クロスプライ積層板を対象として、複数損傷の進展と、埋め込んだ FBG センサの反射光スペクトルの変化を明らかにし、以下の結論を得た。

- (1) 両側切り欠きを有する FBG センサ埋め込み CFRP クロスプライ積層板の引張試験を行った。埋め込んだ FBG センサの反射光スペクトルは、切り欠き近傍の損傷形態に対応して大きく変化した。
- (2) 複数損傷を表現する損傷解析を用い、実験で得られた損傷形態および反射光スペクトルの変化を再現し、解析モデルの妥当性を検証した。
- (3) スプリッティングとトランスバースクラックが低いひずみで生じ、荷重が増加するにつれて層間はく離がそれらの交点から発生・進展するという損傷の進展過程を明らかにした。
- (4) FBG センサの反射光スペクトルに対するそれぞれの損傷の影響を調べた。トランスバースクラックはスペクトルの細かいピークの変化に、層間はく離は長波長側の大きいピークに対応することを示した。

これらの結果より、FBG センサの反射光スペクトル形状がセンサの軸方向ひずみ分布を介して損傷形態の情報を含んでいることが明らかとなり、埋め込み FBG センサによって積層板の損傷形態を推定できる可能性を示唆した。

第4章では、前章で示した損傷解析および光学解析を基に、FBG センサの反射光スペクトルから切り欠き近傍の損傷形態を推定する手法を提案し、以下の結論を得た。

- (1) 反射光スペクトル形状を目的関数とし、損傷形態をいくつかのパラメータで表し、これらを数理的に最適化する損傷同定手法を提案した。
- (2) 数値解析にて得た反射光スペクトルを入力情報として積層板の損傷形態を推定した。推定結果は損傷解析で得た損傷形態と概ね一致し、本手法が妥当であることを示した。
- (3) 定義した損傷形態パラメータに対して、反射光スペクトル形状の感度が高い位置に FBG センサを配置できれば、さらに推定の精度を上げることが可能であることを示唆した。
- (4) 大域的最適解を探索するトンネル法を本手法に適用し、推定の精度を上げる効果を確認した。
- (5) 実験で測定した反射光スペクトルを入力情報として、損傷形態の推定を行った。推定した損傷形態は観察結果に概ね一致し、本手法を実験結果に対しても適用可能であることを示した。

ここで得られた結果は、推論的ではあるが、応力集中部近傍の損傷形態が FBG センサのスペクトル形状と一対一に対応することを裏付けている。これは、応力集中部に FBG センサを埋め込むことにより、チャープ構造を持つことに起因しているものとする。

第 5 章では、切り欠きを有する CFRP クロスプライ積層板の損傷形態を、任意の負荷下において推定する手法を提案し、以下の結論を得た。

- (1) 両側切り欠きを有する FBG センサ埋め込み CFRP クロスプライ積層板の負荷除荷試験を行った。損傷の発生、進展に伴い、反射光スペクトルの形状は敏感に変化した。除荷時に測定した反射光スペクトルは、異なる損傷形態に対して、同じひずみレベルでも異なる形状を示した。
- (2) 前章に示した損傷形態推定手法を基に、負荷ひずみの推定を同時に行う新たな手法を提案した。負荷ひずみは、損傷形態パラメータとは独立に、反射光スペクトルの波長シフトから推定した。
- (3) 実験で測定した反射光スペクトルから、負荷ひずみを推定した。最大負荷時および除荷時ともに、負荷ひずみの推定結果は実験結果と概ね一致した。
- (4) 実測した反射光スペクトルから、切り欠き近傍の損傷形態を推定した。最大負荷時・除荷時ともに、推定した損傷形態は、実験で観察した損傷形態と概ね一致した。

以上の結果より、本研究で提案した損傷形態推定手法が、ゲージ部におけるチャープ構造が実現する限り、任意の負荷下において実測したセンサ応答に対して適用可能であることを示した。

第 6 章では、チャープ FBG センサ利用した有孔クロスプライ積層板の損傷モニタリングを提案し、以下の結論を得た。

- (1) 円孔を有する CFRP クロスプライ積層板の引張試験を行った。負荷の増加に伴い、円孔縁からスプリットが強化繊維方向に発生・進展し、複数のトランスバースクラックが発生した。さらに、層間はく離もスプリットに沿って 1/4 楕円形状に広がった。
- (2) 測定したチャープ FBG センサの反射光スペクトルは、トランスバースクラックが発生すると、複数の波長において局所的に光強度が低下した。層間はく離が発生すると長波長側で光強度が回復し、はく離の進展に従ってその領域が大きくなった。
- (3) 損傷解析によって、実験にて観察した複数損傷の形態およびその進展を再現した。さらに、光学解析にて得られた反射光スペクトルは、損傷形態の違いによって大きく形状が変化し、それらは実験結果と概ね一致した。
- (4) 第 5 章に示した損傷形態および負荷ひずみの推定手法に対し、数値破壊シミュレーションの結果を損傷形態推定の初期値として利用することで不適切な局所最適化を回避するという、推定の効率化を図った新たな手法を提案した。

- (5) 実験で測定した反射光スペクトルから，円孔近傍に発生する損傷形態を推定した。推定した損傷形態は，実験で観察した損傷形態と概ね一致した。さらに，反射光スペクトルの測定結果に含まれるノイズの影響を，損傷形態推定の際に除去できることを明らかにした。
- (6) 一種類の損傷のみ発生する場合のスペクトル形状をセンサの格子間隔分布から説明し，損傷の種類とスペクトル形状の変化を対応させた。また，スペクトル形状から簡易に損傷形態を見積もれることを実験結果で示した。
- (7) 損傷によるスペクトル形状の変化における，ゲージ位置と初期チャープ構造の影響を調べた。格子間隔の大きい端部を円孔縁に配置することで，チャープ FBG センサの特徴であるゲージ内の位置情報がさらに明確になることを示した。また，全チャープが大きいほど，スペクトル形状の変化に含まれる損傷の影響を特定しやすくなることを示した。
- これらの結果は，本研究で提案した手法により，構造部材において現実的な応力集中の形状である円孔について，その近傍に発生する複数損傷を予測・推定できることを示している。チャープ FBG センサを利用することによって，応力集中部の損傷形態を容易に推定できるとともに，損傷が大きく進展した場合でも推定可能であることがわかった。

以上の結論より，クロスプライ積層板に限定されているが，応力集中部近傍の複数損傷進展の予測，およびその損傷形態の推定に関して，重要な知見を得た。本研究によって，埋め込み FBG センサを用いた積層板の応力集中部における損傷モニタリング手法の基礎を確立できたものとする。構造物の安全性を保証するという観点から，本研究が工学的に貢献することを望む。