114 細径 FBG センサによるクラック検出手法の CRRP 疑似等方性積層板への応用

Application of Crack Detection by Small-Diameter FBG Sensors
to CFRP Quasi-Isotropic Laminates

○ 学 水谷 忠均 (東大・院)
正 武田 展雄 (東大・新領域)

正 岡部 洋二 (東大・新領域)

Tadahito MIZUTANI, Graduate Student, The University of Tokyo

c/o Komaba Open Laboratory, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8904

Yoji OKABE, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Nobuo TAKEDA, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

The authors have applied newly developed small-diameter Fiber Bragg Grating(FBG) sensors, whose cladding was $40\mu\text{m}$ in diameter, for the detection of transverse cracks in Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP) quasi-isotropic laminates. Loading/unloading test was carried out, and reflection spectra from the FBG sensor were measured at various tensile strain. When transverse cracks occurred in the laminate, the shape of reflection spectrum was drastically distorted, and the Full Width at Quarter Maximum(FWQM) increased in proportion to the transverse crack density in the 90° ply. This change in the form of the spectrum could be confirmed by the theoretical calculation.

Key Words: CFRP Laminates, Transverse Cracks, Small-Diameter Optical Fiber, FBG Sensor

1 はじめに

現在, 構造部材そのものにセンサ機能を持たせ, 構造の健全性を常時監視するリアルタイム・ヘルスマニタリングの研究が盛んに行われている。センサ材料としては様々なものが提案されているが, その中でも光ファイバセンサは軽量, 無誘導性など, 他のセンサ材料に比べ多くの利点を持つ。そこで本研究では, 東京大学・日立電線(株)によって新たに開発された, クラッド径が $40\mu\text{m}$ の FBG(Fiber Bragg Grating) センサを利用した複合材料の損傷検出を行う。以下, このセンサを細径 FBG センサと呼ぶ。

このセンサは通常の FBG センサと比べ外径が非常に細く, センサを埋め込む母材への影響を極力小さくすることが可能になる。また FBG センサからの反射光は, センサに均一なひずみがかかったときは, スペクトル形状が一定に保たれたまま, ひずみ量に比例して全体がシフトするが, 不均一なひずみがかかったときは, 形状が複雑に変化しながらシフトしていく。この不均一なひずみ分布への応答を利用して, 著者らはこれまで, この細径 FBG センサを, CFRP クロスプライ積層板の損傷検出に適用してきた[1]。本研究では, これをより実用的な積層構成である CFRP 疑似等方性積層板の損傷検出に応用することを試みた。

2 試験片および実験装置

本研究では CFRP 疑似等方性積層板 (T800H/3631, (株)東レ) に細径 FBG センサを埋め込んだ試験片を作製した。積層構成は $[45/0/-45/90]_s$ であり, Fig.1 に示すように, 細径 FBG センサは 90° 層に接するように -45° 層中に埋め込み, 光ファイバの両端は積層板を厚さ方向に貫通して, 試験片の表面から取り出している。この位置に細径 FBG センサを埋め込むことにより, 0° 方向に引っ張り負荷をかけた際に 90° 層中に発生するトランスバースクラックを検出することが可能となる。

この試験片に対し, 準静的な負荷除荷試験 (変位速度:

0.25mm/min) を行った。負荷除荷試験中は広帯域光源からのレーザ光を細径 FBG センサに入射し, 光スペクトラムアナライザを用いて細径 FBG センサからの反射光スペクトルを測定した。また, トランスバースクラックの観察は, レプリカ法による端面観察で行った。これらの実験装置の全体図を Fig.2 に示す。

3 実験結果および解析

引張試験を行った結果, Fig.3 のようなクラック-ひずみ線図が得られた。この図の (A)-(E) に対応した点で測定した反射光スペクトルを Fig.4 に示す。なお, Fig.4 の縦軸は, 光源のデータで規格化している。

Fig. 1 Schematic of a CFRP quasi-isotropic laminate with an embedded small-diameter FBG sensor.

Fig. 2 Schematic of the experimental system.

Fig. 3 Crack density in 90° ply of the quasi-isotropic laminate measured through loading/unloading test.

Fig. 4 Reflection spectra at each strain ε and crack density ρ . These correspond to the data (A)-(E) in Fig. 3.

Fig. 5 Calculated reflection spectra which correspond to the measured spectra in Fig. 4.

Fig. 6 Relationship between crack density and spectrum width.

この結果より、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まで形状を保ち、試験片に加わるひずみ量に比例してスペクトル全体がシフトしていることがわかる。しかし、積層板にトランスバースクラックが発生した後は、スペクトル形状が複雑に変化しながらシフトしている。これらの現象は以下のように考えることができる。損傷のない積層板中に埋め込まれた細径 FBG センサは、軸方向のひずみ分布が均一になるために、そのひずみ量に応じた狭帯域の波長が反射される。ところが積層板中に損傷が存在すると、その近傍でひずみ分布が不均一になるために、反射光の形状は崩れ、クラック密度の増加とともに複雑な変化をしていく。

そこで、これらの現象を理論解析からアプローチした。細径 FBG センサの軸方向ひずみ分布を求めるために、レプリカ観察によって得られたクラックの位置を用いて試験片の 3 次元モデルを作り、ABAQUS によって FEM 解析を行った。このようにして求めたひずみ分布から細径 FBG センサの格子間隔分布、平均屈折率分布を計算し、さらに行列伝達法を用いてモード結合方程式を解くことで、反射光スペクトルを求めた。この計算には光導波路解析プログラム"IFO_Gratings"(Optiwave Corp.)を用いた。計算結果を Fig.5 に示す。Fig.4, Fig.5 を比較すると、スペクトル形状はトランスバースクラック発生に伴い変化し、クラック密度の増加とともにさらに複雑に変化する様子を再現することができた。このように細径 FBG センサは、クラック発生による不均一なひずみ分布に対して敏感に反応しており、スペクトル形状の変化からトランスバースクラックの発生を検知できる。

さらに、クラック密度増加に伴うスペクトル幅の変化について注目し、Fig.6 にその関係を示す。ここで、スペクトル幅は FWQM(Full Width at Quarter Maximum; ピークの 1/4 の高さにおける全幅)で定義し、負荷をかける前に測定した FWQM で規格化している。実験で得られた FWQM はクラック密度とよい相関を示しており、FWQM がクラック密度、つまり積層板の損傷進展状況を把握するためのよいパラメータであることがわかる。

なお、FWQM の実験値と理論値の間には差があるが、この原因の 1 つとして、積層板の熱残留ひずみによって細径 FBG センサが積層板の厚さ方向と幅方向で異なる応力を受けて、複屈折が誘起されたことが考えられる。また、その他の原因として、解析に用いた光ファイバの光学パラメータが不正確であることも考えられる。今後、解析の精度を向上させることにより、より実験値に近い FWQM が求まると思われる。

4 まとめ

本研究では、新規に開発された細径 FBG センサを CFRP 擬似等方性積層板に埋め込み、反射光スペクトルを測定しながら引張試験を行った。

その結果、積層板に損傷がない段階では反射光スペクトルの形状、幅ともに大きな変化は生じないが、積層板に損傷が発生した時点でスペクトルの形状は乱れ、スペクトル幅は広がることがわかった。また、スペクトル幅は積層板のクラック密度と密接な関係を持っているために、スペクトル幅からクラック密度が定量的に評価できることがわかった。

5 謝辞

本研究は、経済産業省・大学連携型産業科学技術研究開発プロジェクト「知的材料・構造システム」の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により、(財)次世代金属複合材料研究開発協会 (RIMCOF) のとりまとめの下で実施したものである。

参考文献

- [1] Y.Okabe, T.Mizutani, S.Yashiro, and N.Takeda, "Application of small-diameter FBG sensors for detection of damages in composites," Proc. SPIE, 4328, 295, 2001.