組み込み FBG センサによる FW FRP のリアルタイム 硬化およびヘルスマモニタリング[†]

高坂 達郎* 中村 聡良**
逢坂 勝彦* 澤田 吉裕*

Real-Time Cure and Health Monitoring of FW FRP by Using Built-in FBG Sensors

by

Tatsuro KOSAKA *, Akira NAKAMURA **, Katsuhiko OHSAKA * and Yoshihiro SAWADA *

Recently real-time monitoring technique by using built-in sensors of FRP is expected to reduce the cost and enhance the reliability. In the present paper, built-in FBG fiber optic sensors were applied to cure and health monitoring of filament winding (FW) glass/epoxy pipes. FW pipes were wound by $\pm 45^\circ$ helical $\pm 5^\circ$ parallel winding methods. The FBG sensors were embedded between helical and parallel layers along axis direction of the pipes. Internal strain monitoring of the FW pipes was conducted during cure and fatigue tests. From the results of the cure monitoring, it was found that FBG sensors could be used for measurement of the curing shrink as well as the thermal residual strain. The results of the fatigue tests showed that strain from the FBG sensors had very good agreement with that from the attached strain gauges. Young's modulus of the pipes measured by the FBG sensor was almost constant during the fatigue tests although transverse cracks occurred in the parallel layers. However, the spectral shape reflected from the FBG sensor was affected by existence of the fatigue cracks. In order to evaluate degree of damages near the sensor, correlation coefficient calculated from the spectral shape was introduced. The experimental results showed that the correlation coefficient was useful for evaluation of damages.

Key words : Cure and health monitoring, Smart composites, Filament winding, Fiber optic sensor, FBG sensor, Strain measurement, Damage detection

1 緒 言

FW (Filament Winding) 成形繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics : FRP) は、軽量かつ高剛性、高強度といった特徴を生かして、釣り竿やゴルフシャフトなどのコンシューマ分野だけではなく、宇宙構造物の構造部材やロケット・モーターケース等の先進分野においても利用されている。しかし、FW 成形 FRP は他の成形法における FRP と同様、成形過程で発生する欠陥や、運用時におけるマトリックス・クラック、層間はく離などの損傷発生のため、金属材料などに比べて信頼性が低いという欠点を有する。この FRP の信頼性を向上する方法として、最近、損傷をリアルタイムでモニタリングするヘルスマモニタリング手法が注目を集めている。この手法においては、FRP 内部に発生する損傷をリアルタイムで検出する組み込みセンサを用いて実現される。

組み込みセンサを用いた FRP のリアルタイム・モニタリング手法は、成形中に行われる硬化モニタリングと、FRP 構造の運用中に行われるヘルスマモニタリングに分けられ、多種多様な組み込みセンサが検討されている。¹⁾ 組み込みに使われるセンサの中でも、光ファイバセンサはその強度や軽量性、柔軟性から複合材料への組み込みに適したセンサ素材の 1 つであると考えられている。また、

光ファイバセンサは電磁界に影響されないという特徴をもつため、電磁ノイズに強い。これらの特徴を生かして、光ファイバセンサを用いた複合材料のリアルタイム・モニタリングに関する研究が、国内だけでなく世界各国で盛んに行われている。

光ファイバセンサを用いたモニタリング手法に関しては、ひずみ測定や損傷測定に関して、マイケルソン干渉計型センサ、EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) センサや FBG (Fiber Bragg Grating) センサ、B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) センサなどの光ファイバひずみセンサを用いた研究が行われている。^{2)~13)} それらの中でも特に EFPI センサや FBG センサは B-OTDR と比較して高いひずみ精度を持ち、硬化時の微小な内部ひずみ変化の測定に適している。そこで筆者らはこの点に着目し、FRP 積層板に関して、成形時から運用時までのモニタリングを同じ光ファイバセンサを用いて行う手法を確立することを目的とした研究を行ってきた。^{14), 15)} 一方 FW 成形 FRP は張力を与えた強化繊維を型に巻きつけることによって成形されるため、センサに加わる応力は FRP 積層板とは異なる。そのため、センサより得られる値に対して FRP 積層板と同じ取り扱いをすることが出来るとは限らず、詳細な検討が必要となる。

[†] 原稿受理 平成 16 年 5 月 10 日 Received May 10, 2004

* 正 会 員 大阪市立大学大学院工学研究科機械物理専攻 〒558-8585 大阪市住吉区杉本, Dept. of Mech. & Physical Eng., Osaka City Univ., Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585

** 大阪市立大学大学院 〒558-8585 大阪市住吉区杉本, Graduate Student, Osaka City Univ., Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585

そこで本論文では, FW 成形 FRP に FBG 光ファイバセンサを埋め込み, 硬化過程および疲労試験におけるセンサのひずみ測定能力を, ひずみの値だけでなくセンサからの反射スペクトルも観察する事により詳細に検証した. さらに, 反射スペクトル形状を用いた新しい損傷評価手法を提案し, その有効性を検討した.

2 材料および実験方法

2.1 光ファイバセンサ

本研究では, FBG センサを用いてひずみ測定を行った. Fig. 1 に FBG センサの構造を示す. 図中に, 横軸を波長とした光スペクトルの概念図も示している. FBG センサのブラッグ格子は, 回折格子を通した紫外線レーザーを照射して, 周期的にコアの屈折率が変化するように作られたものである. そのため, センサ部の機械的強度は他の部分と変らない. 本研究で用いた FBG センサのセンサ部長さは 5mm, ファイバ直径は 0.125mm である.

センサ部に広帯域光を入射する (Fig. 1 (a)) と, ブラッグ格子においてブラッグ回折が生じ, 格子間隔に応じた中心波長 (ブラッグ波長) を持つ狭帯域光が反射する (Fig. 1 (b)). このセンサ部に軸方向ひずみが生じると格子間隔が変化し, ブラッグ波長が変化する. したがって, このブラッグ波長の変化を計測することにより, ひずみ量を測定することが可能となる. 格子間隔とブラッグ波長は線形関係を持つため, ブラッグシフト量 $\Delta\lambda$ は軸方向ひずみに対して線形に変化する. また, $\Delta\lambda$ は温度シフト ΔT に対しても線形に変化する. $\Delta\lambda$ と ε_3 , ΔT の関係は, 以下の式で表す事が出来る.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \left[1 - \frac{n_0^2}{2} \{ p_{12} - \nu_s (p_{11} + p_{12}) \} \right] (\varepsilon_3 - \alpha_s \Delta T) + \left(\alpha_s + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \right) \Delta T \quad (1)$$

ここで, p_{11} , p_{12} はポッケルス定数, ν_s は光ファイバ (シリカガラス) のポアソン比, n_0 は真空中の屈折率, α_s は光ファイバの熱膨張係数, λ_0 は初期のブラッグ波長である. 本研究で用いた FBG センサに関しては, 式 (1) に材料定数を代入することにより以下の式が得られた.

Fig. 1. Schematic view of an FBG sensor.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 0.7368 \times (\varepsilon_3 - 0.5 \times 10^{-6} \times \Delta T) + 6.9032 \times 10^{-6} \times \Delta T \quad (2)$$

本研究では, FBG センサからブラッグ波長を得るために FBG-IS (Micron Optics, Inc.) システムを用いた. FBG-IS システムは, FBG センサから反射した光のブラッグ波長の値を, Fabry-Perot 可変波長フィルタによって検出するシステムである (Fig. 2 (a)). FBG-IS システムは高速な測定をするために, 反射スペクトルを記録しない. そのため, 反射スペクトルの測定には光スペクトラムアナライザ (Optical spectrum analyzer: OSA), 広帯域 SLD (Super luminescence diode) そして光方向性結合器から構成された OSA システムを用いた (Fig. 2 (b)). 得られたブラッグ波長より, 式 (2) を用いてひずみ ε_3 を計算した. また, ひずみを求めるためには温度変化 ΔT を知る必要があることから, FW 成形パイプ試験片表面に貼り付けた熱電対を用いて FW 成形パイプの温度を測定した.

2.2 材料および成形法

本研究では, マトリックスにエポキシ樹脂, 強化繊維に E ガラス繊維 (株日本板硝子) を用いて, パイプ形状の試験片を FW 成形法にて成形した. エポキシ樹脂は, 主剤エピコート 807 と硬化剤エピキュ W (共にジャパニエポキシレジン(株)) を 1:0.27 の重量混合比で混合し

Fig. 2. Strain acquisition and analysis system for FBG sensors.

Fig. 3. Filament winding system with embedded fiber optic sensors.

た、巻き構成は、 ± 45 度ヘリカル巻き 4 層を内層、 ± 5 度パラレル巻き 4 層を外層とした。

Fig. 3 に示すような、本研究室で設計・製造された FW 成形機を用いて、アルミニウム製のマンドレルに繊維を巻き付けることにより、FW 成形パイプを作製した。樹脂は、10 分間真空チャンバにて脱泡を行った後、FW 成形機の含浸槽に充填した。繊維をこの含浸槽に通すことによって樹脂を含浸させた。ヘリカル巻き 4 層の巻きつけを行った後、一旦繊維の巻きつけを停止して、センサ部の被覆を取り除いた FBG センサをセットした。光ファイバの導線部分はシリコン保護チューブを通してパイプ端部から引き出し、マンドレルに巻き取った。その後、パラレル層の巻きつけを行った。巻きつけ終了後、シリコンテープを巻きつけることによって余分な樹脂を取り除いた。

巻きつけの終わったパイプを炉に設置し、埋め込まれた光ファイバセンサをセンシングシステムに接続して、硬化させた。硬化温度パターンは、第一昇温過程（室温 $\rightarrow$ 100 $^{\circ}\text{C}$ 、30 分）、第一定温過程（100 $^{\circ}\text{C}$ 、2 時間）、第二昇温過程（100 $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ 175 $^{\circ}\text{C}$ 、45 分）、第二定温過程（175 $^{\circ}\text{C}$ 、4 時間）、そして自然冷却過程の五つのプロセスである。FW 成形パイプの硬化モニタリングは、自然冷却により温度が室温に低下するまで行った。成形後、FW 成形パイプをマンドレルから取り外し、埋め込まれた光ファイバセンサが破損しないように注意して FW 成形パイプの両端をカットした。

3 成形モニタリング

内部ひずみ測定は、FBG-IS システムを、反射スペクトルの測定には、OSA システムを用いた。Fig. 4 に、硬化過程において FBG センサによって測定した代表的なひずみ履歴と温度履歴を示す。図から分かるように、硬化開始時から第一定温過程までのひずみ出力には、不安定な変化が見られる。これは、樹脂の粘度が低いために光ファイバセンサが樹脂に完全に拘束されないことによると思われる。第二昇温過程ではひずみは単調増加している。ひずみの増加開始は温度上昇よりやや遅れる傾向にあるが、これは昇温開始時の樹脂粘度がセンサを拘束するほど高くないためであると思われる。第二定温過程開始時において圧縮ひずみが急激に増加し、その後徐々に増加して一定のひずみ値に収束した。

Fig. 4. Histories of strain and temperature during cure.

第二定温過程におけるひずみの振る舞いについて考察するために、樹脂単体に同じ温度履歴を与えて硬化させたときの対数イオン粘度を誘電率測定システム (Eumetric 100A Micromet Instruments, Inc.) を用いて測定した。対数イオン粘度は樹脂の誘電特性であるが、機械的粘度に対応することが報告されている。¹⁶⁾

Fig. 5 に、第二定温過程付近のひずみ履歴を樹脂の対数イオン粘度とともに示す。図中の対数イオン粘度の変化から、第二昇温過程において急激に樹脂粘度が上昇していることが分かる。よって、急激な圧縮ひずみの増加は、樹脂の粘度が硬化とともに急激に上昇してセンサが樹脂によって拘束され、樹脂の硬化収縮が検出されたのではないかと予想される。センサが拘束されるタイミングは、強化繊維が拘束されるタイミングを示唆する値として有益であると考えられる。図からも分かるように、急激な圧縮ひずみ増加以降のひずみの振る舞いは、対数イオン粘度の振る舞いと定性的に一致している。また、対数イオン粘度の値の収束は樹脂の硬化終了を意味するため、第二定温過程におけるひずみの変化を監視することによって、硬化終了の判定が可能であると考えられる。

次に、硬化過程におけるひずみ測定精度について検討するため、FBG センサからの反射スペクトルについて調べる。Fig. 6 に、硬化過程において FBG センサによって測定された反射スペクトルを、初期時 (a: 0 時間後)、第二定温過程終了時 (b: 7.25 時間後)、冷却過程途中

Fig. 5. Histories of strain and log ion viscosity (LIV) during cure.

Fig. 6. Spectra reflected from the FBG sensor during cure.

(c: 10 時間後), 冷却終了後 (d: 15 時間後) のそれぞれについて示す. 図より, 冷却開始前まではスペクトルは単一ピークを持つ狭帯域スペクトルであったが, 冷却中に二つのピークを持つスペクトル形状に変化することがわかる. この原因としては, FBG センサ部が不均一に変形したことが考えられる. Fig. 7 に, FBG センサ部に不均一分布が生じた場合の反射スペクトル形状に関する概念図を示す. 図には, 二つの異なる材料にセンサが接し, それによりセンサ部に値の異なるひずみ分布が存在する場合, それぞれのひずみに応じた中心波長のスペクトルを持つ光が反射し, 結果として反射スペクトルのピークが二つとなる様子を描いている. つまり, 冷却過程後の反射スペクトルのピークが二つに分かれた原因としては, FW 成形 FRP においては樹脂リッチ部が存在し, その結果冷却過程において生じる熱残留応力がセンサ部の長さに沿って不均一なひずみ分布を誘起したことが考えられる. なお, 本研究では, 大きい方のピーク値より得られるひずみをひずみ値とした.

以上のことから, 埋め込み FBG センサを用いて硬化過程におけるひずみ履歴を取得することにより, センサが樹脂により拘束されるタイミングの取得, 硬化終了の判定そして熱残留ひずみの測定が可能であることが分かった.

4 ヘルスモニタリング

4.1 試験方法

ヘルスモニタリングについても, 硬化モニタリングと同じセンサシステムを用いた. Fig. 8 に疲労試験に用いた試験片寸法を示す. 長さは, 300mm, 内径は 15mm, 厚さは約 1.5mm であった. 光ファイバの埋め込み位置は, パイプ端から 150mm, すなわち中央部とした. パイプの軸方向に負荷を加えるために, エポキシ系接着剤を用いて負荷ジグをパイプ両端の内面に接着した.

Fig. 7. Schematics of spectrum reflected from an FBG sensor which is stretched by non-uniform strain distribution.

Fig. 8. Dimensions of specimen for fatigue tests.

疲労試験は, 油圧式材料試験機 (FastTrack 8800, Instron, Inc.) を用いて, 荷重振幅 2 ~ 12kN, 周期 0.5Hz のサイン波状の負荷波形を与えて行った. FBG センサによるひずみ測定は, FBG-IS を用いて行った. また, 試験片表面に電気抵抗式ひずみゲージを接着し, FBG センサによる測定と同時に表面ひずみの取得も行った. 2000 サイクル毎に, 荷重とひずみ値を 30 秒間取得した. そしていったん試験を停止し, ひずみ 1500×10^{-6} のひずみを与えて OSA システムを用いて反射スペクトルの取り込みを行った.

4.2 ひずみ測定

Fig. 9 に疲労試験の初期サイクルにおいて, FBG センサおよびひずみゲージによって測定されたひずみを示す. 横軸は, 疲労試験開始時を 0 秒とした時間である. 図中の FBG センサにより測定されたひずみ値は, 室温無負荷時のひずみが 0 となるようにシフトしたものである. 図より, FBG センサの出力と電気抵抗式ひずみゲージの出力がよく一致していることが分かる. これより, 埋め込み FBG センサによって精度よく疲労負荷時の内部ひずみ測定が可能であることが分かった.

材料に損傷が生じた場合は剛性が低下するため, ヤング率をパラメータとして損傷を評価する手法がよく用いられる. 本研究では, 応力と FBG-IS システムを用いて取得したひずみ関係から, 疲労試験中のヤング率を計算した. Fig. 10 に, 初期ヤング率で正規化した正規化ヤング率と疲労回数の関係を示す. 図より, 疲労回数の増加によって, 正規化ヤング率はほとんど変わらないことが分かる. この結果からは, 疲労負荷過程における損傷の進展はほとんど見られない.

Fig. 9. Strain measured with FBG sensor and strain gauge during the initial cycles of fatigue test.

Fig. 10. Relationship between normalized Young's modulus and fatigue cycle.

4・3 相互相関関数を用いた検討

疲労試験中の損傷に関しては、繰返し数の増加とともに、試験片の平行層に端部からクラックが生じ、その数が増加しつつ約 20 000 サイクルでクラックがセンサ部付近に生じたのが表面観察により確認された。36 000 サイクル負荷後の断面写真から、平行層のクラックは表面から平行／ヘルカル層界面に達し、そこで停止していることが分かった。ヘルカル層にもマトリクスクラックが生じたが、平行／ヘルカル層に層間く離は生じていなかった。ここで、Fig. 11 に OSA システムを用いて測定した反射スペクトルの形状を示す。縦軸は、スペクトルの最大値で正規化されている。図より、0 サイクル時の反射スペクトルと、センサ近傍にクラックが生じた 36 000 サイクル時の反射スペクトルの形状が変化していることが分かる。このことは、硬化モニタリングの節において議論したように、センサ部のひずみ分布が変化したことを示している。この分布変化の原因としては、疲労試験中に発生するクラックが考えられる。したがって、反射スペクトルの形状変化を調べることで、クラックが繰返し数の増加とともに変化する現象を捉えることが可能になると予想される。

このような反射スペクトルの形状の変化に与える損傷の影響については、CFRP クロスプライ積層板に生じるトランスバースクラック等に関して既に詳細な報告がなされており^{12), 13)} スペクトルの半値幅を用いた検討が行われている。しかしながら硬化モニタリングの項でも述べたように、FW 成形 FRP に埋め込まれた FBG センサに関しては無損傷状態で既にひずみ分布が不均一であり、スペクトルの半値幅への損傷の影響と材料のメゾスコピックな不均一性の影響を分離して議論することは困難である。

そこで本研究では、損傷の FBG センサへの影響を見積もる手法として、反射スペクトルの形状の変化そのものを定量化するために、相互相関関数を導入した。相互相関関数は二種類の信号の相関性を表す関数である。参照信号を $p_r(t)$ 、測定信号を $p_m(t)$ とすれば、相互相関関数は

$$C(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} p_r(t) p_m(t-\tau) dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} p_r(t)^2 dt} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} p_m(t)^2 dt}} \quad (3)$$

(a) 0 cycle

(b) 36,000 cycles

Fig. 11. Spectra reflected from FBG sensor during fatigue test.

と表すことが出来る。 τ は両時系列信号間の時間遅れである。相互相関関数の取りうる値は 0 ～ 1 であり、その最大値 $C_{\max}$ を相関係数と呼ぶ。 $C_{\max} = 1$ のときに信号は一致する。

本研究では参照スペクトルを $p_r(\lambda)$ 、測定スペクトルを $p_m(\lambda)$ とし、積分範囲を C バンド (λ_a : 1530nm - λ_b : 1565nm) として以下の式で相互相関関数を計算した。

$$C(\lambda_d) = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} p_r(t) p_m(\lambda - \lambda_d) d\lambda}{\sqrt{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} p_r(t)^2 d\lambda} \sqrt{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} p_m(\lambda)^2 d\lambda}} \quad (4)$$

式 (4) において、 λ_d は波長シフトを表す。センサ周囲に損傷が生じていない場合、ひずみ分布形状はあまり変化しないために反射スペクトル形状は Fig. 11 (a) の形状をほぼ保ったまま、ひずみの変化に対応して波長がシフトする。すなわち、 $C_{\max}$ を与えるは変化するが $C_{\max}$ の変化は小さい。一方損傷発生後では、Fig. 11 (b) に示されているように反射スペクトル形状が大きく変化するため、 $C_{\max}$ は大きく減少する。これより、損傷によるひずみ分布形状の大きな変化を $C_{\max}$ によって見積もることが可能である。

疲労試験より得られた反射スペクトルから相互相関関数を計算し、それより相関係数 $C_{\max}$ を求めた。Fig. 12 に、相関係数と繰返し数の関係を示す。また、Fig. 10 で示した正規化ヤング率も同時に示す。図に示すように、20 000 サイクルまでは $C_{\max}$ はほぼ一定であったが、24 000

Fig. 12. Relationship between normalized Young's modulus and fatigue cycle.

サイクル以降は大きく減少した。これは損傷の発生によってFBG センサが損傷の影響を受け、そのスペクトル形状が疲労回数の増加とともに大きく変化していくことを示している。一方、正規化ヤング率はほぼ一定であり、 $C_{\max}$ を測定することにより、ひずみ測定だけでは不可能な損傷のモニタリングが可能であることが分かった。

5 結 言

本研究では、FBG 光ファイバセンサをFW ヘリカル/パラレル GFRP パイプに埋め込み、硬化および疲労負荷におけるヘルスモニタリングを試みた。硬化時においては、硬化収縮および熱収縮ひずみが測定され、センサが拘束されるタイミングの取得、硬化終了の判定そして熱残留ひずみの測定が可能であることが分かった。その後成形された試験片について疲労試験を行い、疲労試験においてもひずみが正確に測定されることを確認した。さらに、反射スペクトル形状について新たに相互相関関数を導入し、相関係数で評価する事によって、損傷がセンサに与える影響を定量的に見積もることが出来た。以上より、埋め込みFBG 光ファイバセンサを用いることにより、成形および運用時においてFW FRP の内部ひずみの正確な取得が可能であることと、それに加えて運用時の損傷モニタリングが可能であることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) T. Fukuda and T. Kosaka, "Encyclopedia of Smart Materials", p.291, (2002) John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 2) S. Kitade, T. Fukuda and K. Osaka, US-Japan Workshop on Smart Materials and Structures, 283 (1996).
- 3) T. Liu, G. F. Fernando, Z. Y. Zhang and K. T. V. Grattan, Sensors and Actuators, **80**, 208 (2000).
- 4) 津田 浩, 武田真一, 卜部 啓, 高橋 淳, 岸 輝雄, 日本複合材料学会誌, **26**, 121 (2000).
- 5) A. L. Kalamkarov, S. B. Fitzgerald and D. O. Mac-Donald, Composites : Part B, **30**, 167 (1999).
- 6) 村山英晶, 影山和郎, 成瀬 央, 島田明佳, 鶴沢 潔, 日本複合材料学会誌, **28**, 176 (2002).
- 7) F. Knowles, B. E. Jones, C. M. France and S. Purdy, Sensors and Actuators A : Physical, **68**, 320 (1998).
- 8) X. Tao, L. Tang, W. C. Du and C. L. Choy, Compos. Sci. and Tech., **60**, 657 (2000).
- 9) Y. J. Rao, Opt. Lasers Eng., **31**, 297 (1999).
- 10) H. K. Kang, J. S. Park, D. H. Kang, C. U. Kim, C. S. Hong and C. G. Kim, Smart Mater. Struct., **12**, 1 (2003).
- 11) S. E. Watkins, G. W. Sanders, F. Akhavan and K. Chandrasekhara, Smart Mater. Struct., **11**, 489 (2002).
- 12) Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka and N. Takeda, Smart Mater. Struct., **9**, 832 (2000).
- 13) S. Takeda, Y. Okabe, T. Yamamoto and N. Takeda, Compos. Sci. Tech., **63**, 1885 (2003).
- 14) K. Osaka, T. Kosaka, Y. Asano and T. Fukuda, MSRI-STP2, 105 (2001).
- 15) T. Kosaka, K. Osaka, A. Bando and T. Fukuda, Proc. JSME/ASME International Conference on Materials and Processing 2002, 378 (20002).
- 16) J. Mijovic, J. M. Kenny, A. Maffezzoli, A. Trivisano, F. Bellucci and L. Nicolais, Composites Science and Technology, **49**, 277 (1993).