J044023

光ファイバ屈折率センサを用いたFRP積層板の成形モニタリング

高坂 達郎^{*1}, 松本 明大, 梶川 拓矢, 忽那 篤, 楠川 量啓

Molding process monitoring of FRP laminates by fiber-optic index sensors

Tatsuro KOSAKA^{*1}, Akihiro MATSUMOTO, Takuya KAJIKAWA, Atsushi KUTSUNA
and Kazuhiro KUSUKAWAKochi Univ. Tech. Dept. of Systems Engineering
Miyanokuchi 185, Tosayamada, Kami, Kochi, 782-8502 Japan

In the present paper, process monitoring of GFRP laminates during a hot-press molding was conducted by fiber-optic index sensors. From the measured optical power, it appeared that the transverse molding pressure of 0.5MPa applied to optical fibers did not affect the sensor outputs. It was also found that resin flow which covered the sensing part was clearly indicated as sudden fall of the reflected optical intensity. The refractive index curves obtained from the sensor outputs showed that large fluctuation existed in the sensor signal due to scattering from air-voids in resin. The fluctuation disappeared within 20 minutes because the voids were vacuumed. The trend of index curve turned from decrease to increase because of proceeding of cure reaction and then became constant when cure reaction finished. From these results, it appeared that the embedded refractive index sensor could detect resin flow and void vacuuming as well as degree of cure.

Key Words : Smart Material, Composite Material, Sensor, Optical Fiber Sensor, Process Monitoring

1. 結 言

FRP 構造物の大型・複雑形状化, そして大量生産品への複合材料の適用に伴い, 形状精度, 品質の安定性, そして成形効率を向上させた成形技術の確立が求められている. 特に強化材や成形温度の不均一分布によって生じる硬化進展の空間不均一性や成形残留応力分布は FRP 構造物の品質に影響を与えるため, 成形条件の最適化が必要となる. それを実現するためには, FRP 成形において樹脂硬化度や成形ひずみの分布を知る必要があり, 埋め込み可能な成形モニタリングセンサを用いたリアルタイム成形モニタリング技術の研究が多く行われている⁽¹⁾. 中でも光ファイバセンサは FRP との複合性に優れており, 成形モニタリングの有力な手法として期待されている.

光ファイバ成形モニタリングセンサとしては, 分光計センサ^{(2) (4)}, ひずみセンサ^{(5) (7)}, 屈折率センサ^{(8) (11)}など多くの提案が成されている. 筆者らは, 埋め込みシングルモード光ファイバによって樹脂の硬化度の定量的な測定が可能であることを示してきた⁽¹¹⁾. しかしながら, それを複合材料成形に応用する場合は成形圧力の負荷やボイドの発生および移動などを伴うため, それらが母材樹脂の硬化度測定に影響を与えることが考えられる. そこで本研究では, 光ファイバ屈折率測定法を FRP 積層板のホットプレス成形に適用し, 得られたセンサ出力に関して考察を行った.

2. 光ファイバセンサおよび実験方法

2・1 光ファイバ屈折率測定法

図 1 に, 光ファイバを用いた樹脂の屈折率測定法の概略を示す. 光源から出た光はサーキュレータを通り, センサ用ファイバに入射する. 樹脂に浸されたセンサ用ファイバの端面において, 樹脂と光ファイバの屈折率の違

^{*1} 正員, 高知工科大学 (〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185)

E-mail: kosaka.tatsuro@kochi-tech.ac.jp

いからフレネル反射が生じる。反射光は再びサーキュレータを通して光検出器に戻って検出される。途中経路、主としてコネクタにおける反射とサーキュレータにおける漏れ光が端面以外からの戻り光となる。この戻り光の光量 I_b を考慮した反射率 R は、以下の式で表される。

$$R = \frac{I - I_b}{I_i} = \frac{(n_g - n)^2}{(n_g + n)^2} \quad (1)$$

ここで I は検出される光強度、 I_i はセンサ部への入射光強度、 n_g は光ファイバの屈折率、 n はメディアの屈折率である。メディアとして測定する樹脂と参照用メディアの二つについて測定を行い、得られる 2 つの関係式を連立して解くことで以下の屈折率への変換式を得る⁽¹⁾。

$$\Delta n = \frac{b_1(a_1^2 b_2(b_1 + b_2) + a_2^2 b_1^2 v \pm a_1(b_1 + b_2)) - a_1^2 b_2^2 + a_2^2 b_1^2 v}{a_1^2(b_1^2 - b_2^2) - a_2^2 b_1^2 v} \sqrt{\quad} \quad (2)$$

$$a_1 = n_g + n_{air}, a_2 = n_g - n_{air}, b_1 = n_g + n_s, b_2 = n_g - n_s, v = \Delta I / I_{air} \quad (3)$$

ここで Δn は基準屈折率からの屈折率変化、 n_s は樹脂の基準屈折率、 n_{air} は参照用の空気屈折率であり、 ΔI は基準光強度からの光量変化、 I_{air} は空気をメディアとして測定することで得られる参照光強度である。

Fig. 1 Summary of refractive-index measurement method using an optical fiber.

2・2 材料と実験方法

厚さ $120\mu\text{m}$ の GFRP プリプレグ (三菱レイヨン GE352G135SB) を 12 枚一方向に積層し、端部を平面切断した光ファイバを繊維方向に埋め込んで、ホットプレス成形を行った。図 2 に試験片の寸法および光ファイバの配置を示す。本研究では二本の光ファイバを用い、一方の光ファイバは積層の中央 (センサ 1)、もう一方はプリプレグの無い空間 (センサ 2) に配置した。これは加圧によって流動する樹脂のみの屈折率測定を行うためである。図 3 に実験システムの概略を示す。ボイドの生成を防ぐために積層したプリプレグを真空バッグで包み、真空吸引を行った。また、温度測定のために熱電対を埋め込んだ。成形では室温から 70 分で 140°C まで加熱し、その後 3 時間温度を保持して硬化させ、その後自然冷却した。さらに 60°C または 90°C に達した時に 0.5MPa の成形圧力を加えて、成形終了まで保持した。なお、 60°C での加圧が推奨の成形条件である。

光源には広帯域の SLD を用い、また 2 つの光検出器によって二本のセンサからの反射光を同時に測定した。光ファイバをプリプレグに挟み込む前と真空パック後、そしてホットプレス装置への設置前のそれぞれのタイミングで光量測定を行った。これらの測定を行った理由は、埋め込み時に光ファイバに生じる曲げの光出力への影響を確認するためである。さらに、成形中は過熱から冷却まで連続的に光量と温度の測定を行った。

Fig. 2 Locations of optical fibers and dimensions of the test piece.

Fig. 3 The experimental system for process monitoring of FRP laminates.

3. 実験結果および考察

本実験では初期の反射光量が光ファイバを埋め込む前の反射光量と変わらなかったため、埋め込みによる光減衰の影響は見られないと判断した。図 4 に 60°C で加圧する成形条件において、成形中に得られた温度とセンサからの反射光出力を示す。図より、成形開始後 1174 秒で加圧を開始しても、どちらのセンサも反射光量に変化が見られないことが分かる。これより、0.5MPa の加圧条件では圧力が光出力に及ぼす影響は小さいことが分かった。しかし、FRP に埋めたセンサ 1 には 1800 秒において反射光量が断続的に上昇する応答が見られた。その後、センサ 1 の出力は 1918 秒において最大値を示した後、急減少した。まず、これら二つの特徴的な応答について考察する。

Fig. 4 Time histories of optical outputs and temperature during hot-press molding (pressed at 60°C).

本実験では埋め込みおよび加圧による光量変化が無かったため、1918 秒までセンサ 1 の端面の状態に変化が無い。すなわち、端面は空気に接しており、外光の入射が無い限りセンサ 1 の反射光量は上昇することは無い。しかしながらセンサ 1 の反射光量に断続的な上昇が見られたということは、外光の入射があったということ意味する。この現象は次のように説明できる。埋め込み時にはファイバ端に隙間があるが、加熱によってゲル化した樹脂が加圧と真空吸引によって流動して光ファイバ端面に近づく。端面と樹脂の距離が小さい時、光ファイバから漏れた光が空気と樹脂の界面で反射し、その光が再び光ファイバのコアに入射することによって、反射光量が増加するのである。よって、反射光量の断続的な上昇はセンサの誤作動ではなく、樹脂流動によって生じる現象であると言える。一方、反射光量の急減少については、反射率の大きさから明らかに光ファイバ端面に接するメディアが空気から樹脂に変化したことを意味している。すなわち、このタイミングで光ファイバ端面が樹脂に覆われたことが分かる。実験結果から、光ファイバ端面が樹脂に覆われる時間は、加圧タイミングから遅れることが分かった。センサ 2 の出力が急減少するタイミングがセンサ 1 より遅れるのは、樹脂がより多くの距離を流れる必要があるためである。

次に、光ファイバ端面が樹脂に覆われた後のセンサ出力について議論する。図 5 に光量が急激に減少してからの屈折率変化 Δn の振る舞いを示す。図より、両センサの屈折率には最初には大きな変動が見られるが、2700 秒には収まることが分かる。このような変動が生じる理由としては、成形プロセスの進展とともに変動が見られなくなることから、端部付近に存在するボイドからの散乱光が光ファイバに再入射していることが考えられる。すなわち、本センサを用いることによって、ボイドの存在とその移動を定性的にモニタリングすることが可能であることが示唆される。図 5 より、2700 秒後にどちらのセンサとも光出力は最小値を示し、その後増加して一定値に達することが分かった。これは樹脂の硬化過程において見られる典型的な屈折率センサの応答であり⁽¹¹⁾、本センサを用いてホットプレス成形におけるプリプレグの硬化反応を定量的にモニタリングできることが分かる。

Fig. 5 Relationships between refractive index variations, temperature and curing time (pressed at 60°C).

最後に、加圧タイミングの違いがセンサ出力に及ぼす影響を考察する。図 6 に、60°C と 90°C のそれぞれの温度で加圧した場合の成形において測定された屈折率変化を示す。90°C で加圧した場合は、加圧直後に光量が急減少して、ファイバ端面が樹脂に覆われたことが分かった。これは加圧時の樹脂粘度が 90°C の場合は 60°C に比べて低いためであると思われる。図 6 から、2700 秒までのセンサ応答には 60°C 加圧と 90°C 加圧で違いがみられるが、これはセンサ端部でのボイドの動きが異なるためであると考えられる。それ以後の屈折率変化はどちらのセンサも同様になり、加圧のタイミングによらず定量的な硬化進展モニタリングが可能であることが分かった。

Fig. 6 Refractive-index curves and temperature curves during hot-press molding (pressed at 60°C and 90°C).

4. 結 語

本研究では、樹脂の硬化モニタリング用に開発された光ファイバ屈折率測定法を、GFRP プリプレグを用いた積層板のホットプレス成形に応用した。その結果、以下の知見を得られた。

1. センサの設置法を工夫すれば、0.5MPaの成形圧はセンサ応答に全く影響を及ぼさない。
2. 急減少するセンサ応答から、樹脂の流動性の急激な上昇（ゲル化）を知ることができる。
3. ゲル化以降の屈折率変化の変動、安定性を見ることにより、ボイドの発生と移動を定性的に知ることができる。
4. 加圧タイミングによらず、センサ応答から硬化進展度合いを定量的に知ることができる。

以上より、光ファイバ屈折率測定法を用いることにより、プリプレグを用いた成形において多くの重要な情報（ゲル化、ボイド、硬化度）を推測または測定できることが分かった。今後はこれらの情報、特にゲル化とボイドの測定について定量化を目指していきたい。

文 献

- (1) Kosaka, T., "Cure and Health Monitoring", *Smart Materials*, CRC Press, Edited by Mel Schwartz, (2009), pp.12-1-6
- (2) Powell, G. R., Crosby, P. A., Waters, D. N., France, C. M., Spooncer, R. C. and Fernando, G. F., *Smart Materials and Structures*, 7(4), (1998), pp.557-568.
- (3) Chailleux, E., Salvia, M., Jaffrezic -Renault, N., Matejec, V., Kasik, I., *Smart Materials and Structures*, 10(2), (2001), pp.194-202.
- (4) Kuang, K. S. C., and Cantwell, W. J., *Smart Materials and Structures*, 11(6), (2002), pp.840-847.
- (5) Okabe, Y., Yashiro, S., Tsuji, R., Mizutani, T. and Takeda, N., *Composites Part A*, 33(7), (2002), pp.991-999.
- (6) Montanini, R. and D'Acquisto, L., *Smart Materials and Structures*, 16(5), (2007), 1718-1726.
- (7) 高坂達郎, 逢坂勝彦, 澤田吉裕, *材料*, 60(5), (2011), pp.432-438.
- (8) Woerdeman, D.L., Spoorer, J.K., Flynn, K.M. and Parnas, R.S., *Polymer Composites*, 18(1), (1997), pp.133-150.
- (9) Afromowitz, M.A. and Lam, K.Y., *Sensors and Actuators*, A21-23, (1990), pp.1107-1110.
- (10) Liu, Y. M., Ganesh, C., Steele, J. P. H., and Jones, J. E., *Journal of Composite Materials*, 31(1), (1997), pp.87-102.
- (11) 高坂達郎, 逢坂勝彦, 澤田吉裕, *材料*, 59(5), (2010), pp.391-397.

謝 辞

本研究は科研費（22560088）の助成を受けたものである。