建築・土木分野における ファイバブラッググレーティング(FBG)センサの応用

岩城 英朗

清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

Applications of Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor in Building and Civil Infrastructure

Hideaki IWAKI

Institute of Technology, Shimizu Corporation, 3-4-17, Etchu-jima, Koto-ku, Tokyo 135-8530

(Received February 15, 2005)

Applications of Fiber Bragg Grating (FBG) sensor in building and civil infrastructure are reviewed. In Japan, subsequent to the Kobe earthquake and the "Shinkansen" tunnel accident, research and development of sensing system for building and civil infrastructure is being actively pursued. FBG sensor is considered to be promising sensor in this regard due to its high efficiency in these applications. As an example, FBG sensors installed on an actual building is illustrated. In addition, the problems currently faced are discussed and examined.

Key Words: Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor, Optical Fiber Sensor, Building, Civil Infrastructure

1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分、兵庫県南部地域において発生した「阪神・淡路大震災」は、死者・行方不明者6,436人、負傷者43,792人、家屋全半壊約240,000棟以上といった未曾有の被害をもたらした。さらに本震災においては、多数のビル、道路橋脚、鉄道などの建物や社会基盤施設に対しても甚大な被害が見られたが、これらの中では被災直後、一見して異常なしと診断されたにもかかわらず、以後の詳細診断により、壁や耐火被覆の下に深刻な損傷が発見され、改修や立て替えを余儀なくされた事例が少なからずあった点が特徴的であった。

また、1999年6月27日には、山陽新幹線福岡トンネルにおいて、コンクリート製の内壁が剥落し走行中の列車を直撃するという事故が発生した。剥落したコンクリート塊は幅最大約2 m、高さ最大約65 cm、厚さ最大約50 cmと非常に大きな物であった。幸い人身事故には至らなかったが、社会基盤の安全性を大きく懸念させる重大な事故であったと言わざるを得ない。

建物、社会基盤施設といった建築・土木構造物の各部位にセンサを実装して、損傷、劣化を検知する感覚器官(あるいは神経)として機能させるといった研究は以前から行われていた。特に北米においては1990年代初頭、道路、橋梁などの社会基盤施設の老朽化の問題に直面して

いたため、効果的な補修手法の開発とあわせて、効率的な維持管理手法の開発が急務とされていた。そのため、構造物にセンサを実装し、これらから得られる情報(計測値)から構造体の健全性を診断する手法、すなわち構造ヘルスマモニタリングの研究開発は他国に先駆けて活発であった。日本においてはこれら震災、事故などの経験が研究開発を加速させる契機になったことは間違いない¹⁾。

これらを背景として現在、建物、社会基盤施設を対象として、すなわち建築・土木分野において、センサ等を用いて継続的な損傷検知、維持管理を行うシステムの構築がさかんに検討され、既に一部では実装、運用されつつある。本稿では、特にセンサ素子としてFBGセンサを活用した国内の応用事例について解説する。

2. 建築・土木分野におけるFBGセンサの適用手法

2.1 FBGセンサ

光ファイバセンサが持つ高感度、優れた長期安定性などといった利点は、長期間に亘り計測を安定して行う必要がある建築・土木分野において有望と考えられている。現在、様々な検知原理に基づく光ファイバセンサの適用検討が行われているが、ファイバブラッググレーティング(FBG)をセンサ素子としたFBGセンサは、高い感度と、長期の使用および外乱からの安定性を併せ持つひ

ずみセンサおよび温度センサとして特に適用が期待されている。

FBGセンサに対するひずみ量および温度変化による反射光ピーク波長(ブラッグ波長) λ_B の変化量 $\Delta\lambda_B$ は以下(1)式のように表すことができる。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\left(\frac{d\Lambda}{dT} \right) \frac{1}{\Lambda} + \left(\frac{dn}{dT} \right) \frac{1}{n} \right] \Delta T + (1 - P_e) \varepsilon \quad (1)$$

(ΔT : 温度変動, P_e : 実効光弾性係数, ε : 印加ひずみ)

一般に石英系光ファイバの実効光弾性係数 P_e は約0.22であるため, 光ファイバの軸方向(FBGの長手方向)に加わるひずみに対する $\Delta\lambda_B$ (ひずみ感度)は約1.2 pm/ μstrain と求められる。また, 温度変動による $\Delta\lambda_B$ (温度感度)は, 光ファイバの線膨張係数(グレーティング間隔の変化)と, 屈折率の温度変化の双方に依存するが, 石英系光ファイバの線膨張係数は約 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ であり, 屈折率の温度変化量は約 $6.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (波長1,550 nm帯)であるため, 約11 pm/ $^\circ\text{C}$ と求められる²⁾。

2.2 計測システム

FBGセンサと計測機器の接続においては, 異なるブラッグ波長をもつFBGセンサを1本の光ファイバに直列に配置し, Fig. 1のような波長多重を利用した計測システムを構成することができる。これは, 多数のセンサを実装する場合が多い建築・土木分野において, 配線量の削減が可能となる大きな利点である。

さらに, 光通信分野で広く用いている広帯域光源, 波長計あるいは光スペクトラムアナライザといった汎用計測機器を本システムに用いることにより, システム全体の安定性および低コスト化が期待できる。加えて, サンプリング周波数数十Hz~数千Hz程度の高速波長検出が可能なFBGセンサ用計測器(Fig. 2)³⁾が製品化, 市販されている。これらは実験室内のみならず, 使用法が比較的簡便なことも相まって屋外現場での計測などにおいても広く使用されている。

2.3 FBGセンサの実装

FBGセンサは通常直径約250 μm の光ファイバ素線と同様の形状のため, そのまま建物, 社会基盤施設に実装する際には不意の断線など, 破損する可能性が非常に高い。そこで, FBGセンサを金属箔や樹脂フィルムに現場実装前にあらかじめ貼付し, 容易かつ確実な現場実装を目指したFBGひずみ計⁴⁾が開発されている。また, 温度変化

Fig. 1 Example of FBG-based sensing system.

Fig. 2 Example of FBG Interrogation System. (FBG-IS, Micron Optics Inc., USA).

による誤差を較正するため, 外部からの応力(軸方向)を緩和するスリットを施した金属箔を用いたFBG温度計などもある⁴⁾。

また, 直接FBGセンサで検知可能なひずみ, 温度といった物理量にとどまらずに, 変位, 加速度, 圧力などを検知可能なように変換した, FBG変位計(Fig. 3)⁴⁻⁶⁾, FBG加速度計(Fig. 4)^{7,8)}, FBG圧力計⁷⁾, FBG張力計⁹⁾, FBG水位計¹⁰⁾なども開発されている。

3. 応用(適用事例)

3.1 建築・土木分野への適用状況

建築・土木分野におけるFBGセンサの適用は, 主にビルなどの建物を対象とした建築分野においては後述の事例などを除いて大半が, ビルの柱, 梁などを模した部材にFBGセンサを貼付, 埋め込みを行い, これら部材に対する荷重試験を行うなどといった実験レベルに留まっている^{11,12)}。

一方, 主に橋梁, トンネルなどの社会基盤施設を対象

Fig. 3 FBG-based displacement sensor module.

Fig. 4 FBG-based accelerometer module.

とした土木分野においても実験レベルでの適用事例が多いが、一部ではトンネル掘削時の地盤変位計測といった工事中の施工管理に適用した事例¹³⁻¹⁵⁾や、急崖斜面の地すべり監視システム¹⁶⁾、橋梁上を通過する車両重量を算出するシステム¹⁷⁾など、実際の構造物への適用も行われつつある。

3.2 実際の建物への応用

実際の建物に対しては、鉄骨造12F建てビル(Fig. 5)にFBGセンサを実装した事例が挙げられる¹⁸⁾。

同ビルは通常の耐震構造とは異なり、Fig. 6に示すように建物各所(柱と梁の交差部)に制震ダンパと呼ばれる極低降伏点鋼製のエネルギー吸収部材を用いた制震構造である。すなわち、同ビルは地震などの大きな外力を受けた場合、外力エネルギーを制震ダンパが主体構造に先立って吸収し、主体構造の損傷を抑える設計となっている。

建物に実装したセンサによって、地震などの大きな外力に対する損傷や、長期の経年劣化を検知するためには、センサの配置およびセンサの種類(何を検知するか)の選定が重要であるが、制震構造を採用したビルの場合、これら制震ダンパの挙動(健全性)がビル全体に損傷、

Fig. 5 Exterior view of building with FBG sensors installed.

(a)

(b)

Fig. 6 Overview of the building structure. (a) Configuration of passive damper. (b) Schematic diagram of passive damper.

劣化が及んでいるか否かを診断する指標となる。したがって、同ビルにおいては、Fig. 7のように制震ダンパの対角にFBG変位計を設置し、常時計測を実施することとしている。

センサ設置(2001年)以後、幸いにして同ビルは大規模な地震等の被災には至っていない。したがって地震発生時(震度III)においてもFig. 8のようにFBG変位計からの計測値は軽微に留まっているため、損傷、劣化を評価する段階ではないが、継続的にビル全体の状態を監視(モニタリング)するシステムが、FBGセンサを用いて実現されていることが示されている。

4. 課題・検討

上記のように、徐々に建築・土木分野でのFBGセンサの適用は広がりつつあるが、一方で検討すべき課題は多い。

まず、FBGセンサを適用する場合のコストが高い点が挙げられる。

現状、FBGセンサ素子の価格はひずみゲージと比べかなり高額である。したがって、従来ひずみゲージを適用していた計測対象においては、これらの置き換えは難しい。さらに、他方式の光ファイバセンサとの比較におい

Fig. 7 Configuration of FBG-based displacement sensors mounted on passive damper.

Fig. 8 Sample output of FBG-based displacement sensors mounted on passive damper during earthquake.

でも、たとえばブリルアン散乱を活用した光ファイバ分布ひずみ計測システムの場合、センサ素子は光通信用ファイバと同等であることからFBGセンサよりも安価に入手が可能である。したがって、建築・土木分野で多く想定される施工中の品質管理(施工計測)においては、工事期間中のみのセンサ使用であるため、高価でかつ再利用が困難なセンサの適用可能性は少ないと云わざるを得ない。

しかし、FBGセンサに使用する計測機器は他方式と比較し概ね安価であり、光通信分野の拡大に伴って今後も低価格化が期待できるため、センサ素子自体の低価格化も併せて進めば、適用が拡大する可能性はある。また、FBGセンサの反射光ピーク波長の変化のみを検知する手法のほかに、建築・土木構造物の部材(鋼材、コンクリート、FRPなど)に発生するひび割れ等の局所変形、疲労に対してFBGセンサからの反射光スペクトル形状から損傷、劣化解析を行う検討¹⁹⁻²²⁾や、反射光の強度差を利用して、前述の波長多重計測システムでは分離が難しい複数のFBGセンサから出力を検知するアプローチ²³⁾などが現在提案されている。これらは、従来の計測手法では困難あるいは不可能であった、「FBGセンサでなくては計測しえない」手法の開発であるため、これらがコスト差を超えた適用の拡大に繋がる糸口ともなりうる。

次に、FBGセンサを実装する場合の固定方法にも課題

がある。

現在、FBGセンサを計測対象に直接固定する場合や、前述のモジュール化においては、接着固定が一般的であるが、難接着対象への実装手法の開発や、接着のばらつき、不具合の回避といった課題は多い。

さらに、FBGセンサは光ファイバ素線と同様に外傷ひび割れ進展による破断を回避するために紫外線硬化樹脂による保護被覆がなされているが、FBGセンサにひずみ変化が生じた場合にガラス面と被覆層の間にすべりが生じ、FBGセンサからの反射光ピーク波長変動値と実際のひずみ変化量に隔たりが生じるといった懸念がある。

そこで、紫外線硬化樹脂よりも密着性および耐熱性に優れたポリイミド樹脂を被覆材に用いたFBGセンサが開発されている。計測対象のひずみ変化に対して従来の紫外線硬化樹脂を用いたFBGセンサよりも良好なセンサ特性が得られている²⁴⁾。

さらに、金属膜を被覆材に利用したFBGセンサが現在開発されつつある。金属膜を用いることにより、FBGセンサの対象物、あるいは計測モジュール部品への半田付けが可能となるため、センサの長期使用における安定性が期待できるとされている。

Fig. 9の例では、被膜として金属膜(Ti/Ni/Au)をDCスパッタ法により形成しており、さらにFBGセンサ素子両端に固定金具をあらかじめ半田付けし、計測対象への固定、モジュール化をより容易とした設計としている。また本例においても引張強度試験、センサ特性試験の結果から、従来のFBGセンサに比べ良好な結果が得られたことが確認されている²⁵⁾。

5. まとめ

本稿では、建築、土木分野におけるFBGセンサの適用手法および応用事例を、主に日本建築学会および土木学会における研究発表から示した。FBGセンサの開発から10年以上を経過し、いくつかの実例はみられるが、適用におけるコストの問題や、建物や社会基盤施設にFBGセンサを適用した場合に、長期に亘っても安定して計測可能かどうかといった信頼性の検討など課題は多い。このためFBGセンサおよび計測機器を製作するメーカーのみならず、実際に適用を行うユーザーにおいても、地道でかつ協調した研究開発を進めていくことが重要と考える。

Fig. 9 Exterior view of "metalized" FBG sensor module.

参考文献

- 1) A. Mita: *Proc. Second International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford Univ. (1999) p. 56.
- 2) Y. J. Rao: *Measurement Science and Technology* **8** (1997) 355.
- 3) C. Miller, T. Li, J. Miller, F. Bao, and K. Hsu: *Laser Focus World*, Mar. 1998.
- 4) 岩城 英朗, 山川 裕司, 柴 慶治: 第51回理論応用力学講演会梗概集 2001年1月 p. 537.
- 5) 小野 紘一, 杉浦 邦征, 大島 義信, 森田 真幸: 土木学会第55回年次学術講演会 (2000年9月) p. III-A328.
- 6) 藤橋 一彦, 藤川 富夫, 前田 泰男, 平田 洋一, 柏井 義夫, 上原 幹夫, 小松 宏至: 土木学会第59回年次学術講演会 (2004年9月) p. 317.
- 7) 三田 彰, 片岡 俊一: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 2000年9月 p. 771.
- 8) 長井 望, 三田 彰: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 2001年9月 p. 213.
- 9) 西村 好恵, 遠藤 太嘉志, 吉田 幸司, 菅井 栄一, 青木 徹, 山賀 一徳: 土木学会第57回年次学術講演会 (2002年9月) p. 1427.
- 10) 山賀 一徳, 高橋 守, 照屋 英雄, 古川 敏広, 遠藤 太嘉志, 西村 好恵: 土木学会第59回年次学術講演会 (2004年9月) p. 371.
- 11) 田中 清, 佐々木 康人, 佐藤 幸博: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 2000年9月 p. 931.
- 12) 福田 顕議, 森田 高市, 田村 昌仁, 勅使川原 正臣: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 2000年9月 p. 491.
- 13) 大島 義信, 小野 紘一, 杉浦 邦征, 前浦 義人: 土木学会第56回年次学術講演会 (2001年10月) p. 366.
- 14) 鳥越 寿彦, 秋山 泰敏, 吉田 幸美: 土木学会第57回年次学術講演会 (2002年9月) p. 575.
- 15) 鳥越 寿彦, 秋山 泰敏: 土木学会第57回年次学術講演会 (2002年9月) p. 579.
- 16) 菅井 栄一, 吉田 幸司, 青木 徹, 山賀 一徳, 遠藤 太嘉志, 西村 好恵: 土木学会第57回年次学術講演会 (2002年9月) p. 1431.
- 17) 小林 裕介, 三木 千壽: 土木学会第58回年次学術講演会 (2003年9月) p. 795.
- 18) 岩城 英朗, 岡田 敬一, 柴 慶治: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) 2002年9月 p. 523.
- 19) 岩城 英朗, 武田 展雄: 土木学会第58回年次学術講演会 (2003年9月) p. 691.
- 20) 山田 聖志, 中澤 博之, 深津 尚人, 小宮 巖: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) 2002年9月 p. 843.
- 21) 山田 聖志, 田口 孝, 中澤 博之, 平本 隆: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 2004年8月 p. 945.
- 22) 山田 聖志, 中澤 博之, 平本 隆, 小宮 巖: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 2004年8月 p. 907.
- 23) 共 放鳴, 高 栄麗, 舟田 幸太郎, 板倉 賢一: 土木学会第58回年次学術講演会 (2003年9月) p. 357.
- 24) 鈴木 茂, 栃谷 元, 白石 恵子, 森下 裕一, 伊藤 三男, 牟田 健一, 田畑 光博, 菅井 栄一, 照屋 英雄: 1999年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会.
- 25) 川崎 信幸, 八木 賢一, 森田 和章, 香月 史朗, 岩城 英朗, 柴 慶治: 2004年電子情報通信学会総合大会 (2004年3月) p. 585.

レーザーワード

ファイバブラッググレーティング (FBG) センサ (Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor)

シングルモード光ファイバに紫外レーザーを露光させることにより作製した, 屈折率が周期的に異なる部分(グレーティング)をひずみセンサおよび温度センサ素子として利用したもの. 同素子に対して, 光ファイバに沿って光を入射すると, 特定の波長の光のみが反射するという特性を有する. 同反射光波長がグレーティングの間隔お

よび屈折率変化に依って変動することから, 光ファイバ軸方向のひずみ変化およびファイバに対する温度変化を検知するセンサとして機能する. 異なるグレーティング周期の素子を用いて1本の光ファイバに複数のセンサを配置する波長多重が容易であり, 広帯域波長光源, 波長計などを用いて高い感度を有するセンサシステムを構成できる. (岩城 英朗)