

# 光ファイバセンシングによる広域社会基盤施設 の高精度変状監視システムの開発

熊谷 幸樹<sup>1</sup>・田村 琢之<sup>2</sup>・塩谷 智基<sup>3</sup>・上明戸 昇<sup>4</sup>

<sup>1</sup>飛鳥建設(株) 建設事業本部 企画統括部 (〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1 KSP R&D棟2F)

<sup>2</sup>飛鳥建設(株) 建設事業本部 エンジニアリング事業推進部 (同上)

<sup>3</sup>京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区 京都大学桂 C1-2-236)

<sup>4</sup>㈱建設環境研究所 道路環境部 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-23-2)

道路や鉄道等の広域社会基盤施設を適切な維持管理により延命化するためには、構造物に生じた損傷や変状の発生位置とその程度を迅速にかつ正確に把握することが重要である。本報では、特長の異なる2つの光ファイバセンシング技術である、TDM方式FBG技術とBOTDR技術を統合運用することにより開発した、広域社会基盤施設のヘルスマonitoringのための高精度変状監視システムについて報告する。

キーワード 社会基盤施設, 維持管理, ヘルスマonitoring, 光ファイバセンシング

## 1. はじめに

道路や鉄道等の広域社会基盤施設の延命化のための維持管理を適切かつ効果的に進めるためには、構造物に生じている損傷や変状の発生位置とその程度を迅速にかつ正確に把握することが重要である。延命化のための構造物のヘルスマonitoringに用いられる代表的な光ファイバセンシング技術としては、BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) 技術と FBG (Fiber Bragg Grating) 技術が挙げられる。BOTDR 技術は、光ファイバ上に生じるひずみを 10km 以上の長距離で連続的に計測できる特長がある。しかしながら、ひずみ測定の再現性は、最大 $\pm 100\mu$  であり、長大トンネル等の巨視的なひずみ分布の Monitoring に用いられることが多い<sup>1)</sup>。一方、FBG 技術は、光ファイバ上に配置された FBG の位置におけるひずみを $\pm 5\mu$  の精度で計測できる特長がある<sup>2)</sup>。また、時間分割多重化 (TDM) 方式の FBG 技術を用いることで、1本の光ファイバ上に最大 100 点の FBG を配置し計測することができる。筆者らは、2つの光ファイバセンシング技術を統合運用することにより、最大延長 9km の大規模構造物全体のひずみ分布を、誤差 $\pm 100\mu$  以下の高精度で長期間計測可能な監視システムを開発した。本報では、開発した高精度変状監視システムの概要を示し、高精度なひずみ分布を得るための解析手法の理論的検証と室内試験結果について報告する。

## 2. 高精度変状監視システムの概要

表-1 に示す光ファイバセンシング技術の特徴から明らかのように、分布荷重や多くの集中荷重を受ける構造物上のひずみ分布を計測する場合、BOTDR 技術または FBG 技術の一方の技術のみでは、ひずみ分布全体を正確には計測できない。本システムは、この課題を解決するため、両技術を統合運用することにより高精度で連続的なひずみ計測値を得ることを目的としている。

表-1 光ファイバセンシング技術の特徴

	BOTDR 方式	FBG 方式
計測原理	光ファイバに生じるひずみを、ブリルアン散乱光の波長の変化として計測	FBG 素子に生じるひずみを、ブラッグ波長の変化として計測
ひずみ計測位置	光ファイバ上の全ての位置	光ファイバ上の FBG 素子の位置
計測精度	$\pm 100\mu$ (再現性)	$\pm 5\mu$
信号伝送距離	最大 80km	最大 9km

図-1 に、本システムの概要を示す。FBG 素子が書き込まれた 1本の光ファイバを計測対象構造物に設置し、制御用 PC で光スイッチを自動で切替えることにより、両技術によるひずみ計測を交互に行う。制御用 PC 上で、

TDM方式FBG技術により計測された高精度で離散的なひずみデータを用いて、BOTDR技術により計測された連続的なひずみデータを補正することによって、対象構造物全域で、より精度の高いひずみ分布を求める。

### 3. 高精度なひずみ分布を得るための解析方法

#### (1) ひずみ分布が連続的に変化する条件でのBOTDR計測値の誤差の理論的検証

本変状監視システムを用いて両技術の計測データから高精度なひずみ分布を得るためには、まずFBG、BOTDRのそれぞれの技術による計測誤差の大きさや発現形態などのひずみ計測値の特性を明らかにする必要がある。BOTDR技術による計測では、散乱光を発生させるパルス光は幅を持つため、ひずみ分布が光ファイバの長さ方向で変化する場合、パルス光の幅に依存する誤差が発生すると考えられている<sup>3)</sup>。この計測誤差の程度を把握するため、BOTDR技術によるひずみ計測のシミュレーションを実施した。

ブリルアン散乱光は、理論上、ローレンツ関数で表される。光ファイバにひずみが与えられたとき、スペクトルのピークは与えられたひずみに応じてシフトする。一般に、BOTDR計測における誤差 $\pm 100\mu$ は、再現性を示しているが、これは周波数分解能に支配される。周波数分解能は5MHz程度であり、ひずみで $100\mu$ に相当している。一方、入射光は光ファイバの長手方向のある幅をもって伝搬するが、観測されるスペクトルは、入射光の幅によって決定される範囲の反射光の合成スペクトルである。スペクトル $g_B(\nu)$ は(1)式で表される。

$$g_B(\nu) = \int_z^{z+l} \frac{h}{1 + (\nu - \nu_B)^2 / (w/2)^2} dz \quad (1)$$

ここで、

- $z$  : 光ファイバ上の位置
- $l$  : 入射光の幅によって決定される幅
- $\nu_B$  : スペクトルのピークを示す周波数
- $w$  : 半値全幅
- $h$  : ブリルアン散乱光のパワー最大値

図-2に示すシミュレーション結果は、図-3に示すひ

ずみ分布を持つ光ファイバに対してパルス光が入射し、Aの位置からCの位置に移動したときの、0.1mきざみの観測スペクトルの変化を表したものである。 $h$ ,  $w$ ,  $l$ はそれぞれ1, 100MHz, 2.0mとしている。図-2のように、観測スペクトルの形状は、観測光が存在する範囲のひずみ分布によって変化するため、スペクトルのピーク周波数から得られるひずみは、上記の範囲で実際に生じているひずみとは異なる。このことから、周波数分解能に依存する誤差以外の誤差が発生する可能性があることが分かった。

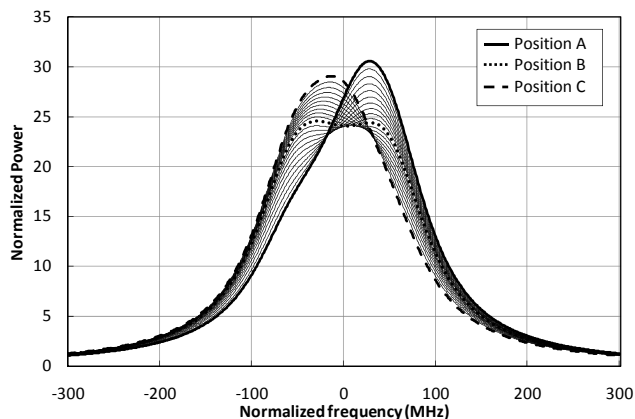


図-2 入射光の移動に伴う観測スペクトルの変化

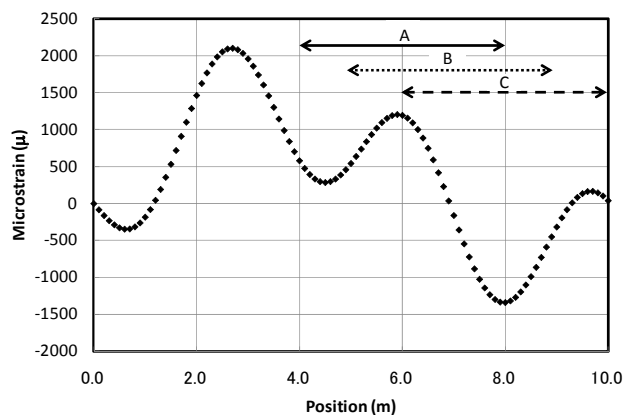


図-3 想定したひずみ分布

#### (2) シミュレーションによる解析方法の有効性の確認

次に、高精度なひずみ分布を得るための解析手法の検討を行なった。解析は、誤差が小さなFBG計測値を制

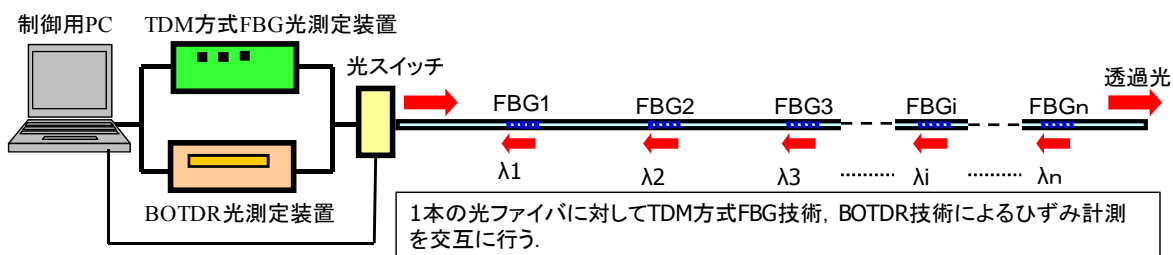


図-1 高精度変状監視システムの概要

約条件として BOTDR 計測値の最適化を行った。

まず最初に、BOTDR のシミュレーションデータに対し、試行的に 12 次の多項式を目的関数とし、FBG 計測値に BOTDR 計測値の 100 倍の重みを与え、最小二乗法により目的関数を求めることとした。本解析手法の適用によるシミュレーションは、以下の手順により実施した。

- ① 長さ 10m の構造物が変形した際のひずみ分布を仮定し、これに対して BOTDR 計測を行った場合のひずみ分布を計算で求めた。また、FBG 計測のひずみは 2m の間隔で配置した FBG 素子の位置での値とした。
- ② FBG 計測のひずみデータと BOTDR 計測のひずみデータに対し本解析手法を適用し、得られたひずみ分布と解析前の BOTDR 計測のひずみ分布を比較した。解析条件として、ひずみ分布全体を 1 つの多項式で近似するため、仮定したひずみ分布の形状を考慮し 12 次の多項式を目的関数とした。また、FBG 計測のひずみデータに与える重みは BOTDR 計測のひずみデータの 100 倍とした。

この結果、図-4 に示すように、BOTDR 計算値のひずみ分布の極値点付近に生じている最大 300 $\mu$  の誤差は、本解析手法の適用により 100 $\mu$  程度まで低減することを確認した。

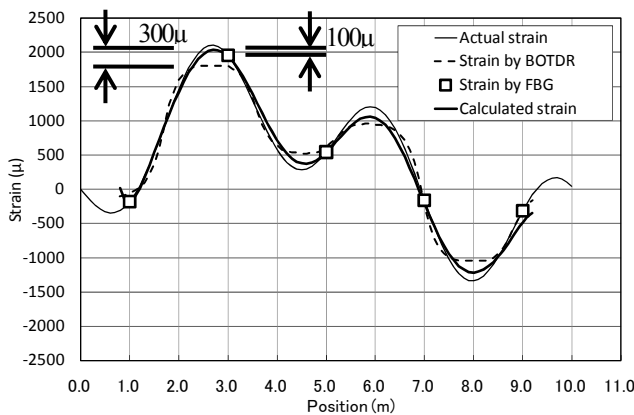


図-4 解析結果

### (3) 室内実験による解析方法の検証

解析方法の有効性を検証するため、室内実験結果に本解析手法を適用した。図-5 に実験装置の概要を、写真-1 に実験状況を示す。12m の長さの H 型鋼 (100×100×6×8) のフランジの中央に、写真-2 に示す光ファイバセンサとひずみゲージを接着し、スパン長を 10m として H 型鋼中央のひずみが 500 $\mu$  となるよう 3 点曲げ荷重を行った。なお、光ファイバセンサは、実際の建設構造物に設置し長期的なモニタリングが可能となるよう、FRP で被覆し 5mm×2mm の矩形に成形した構造のセンサを開発した。このときのひずみゲージによる計測値を基準とし、光ファイバ計測値を比較した。なお、実構造物では計測範囲が長距離となる場合があり、計測範囲全

体の計測値に多項式近似を行うと、適切な次数が決定できない。そこで、計測範囲を分割し、各区間で個別に近似計算を行うことにより、各区間の多項式に適切な次数を設定できるようにした。本検討での区間距離は FBG 計測値を含む 2m とし、4 次の多項式近似とした。

図-6 にひずみ計測結果および解析結果を、図-7 にひずみゲージ位置でのひずみ計測誤差を示す。計測位置が 5.5m~9.5m の範囲では、BOTDR 計測値の誤差は 2 $\mu$ ~21 $\mu$  ともともと小さく、本解析手法による誤差の低減効果は見られない。一方、計測位置が 0.5m~4.5m の範囲では、BOTDR 計測値の誤差は 30 $\mu$ ~52 $\mu$  と比較的大きく、解析処理後は 0 $\mu$ ~27 $\mu$  と小さくなり、低減効果が見られた。なお、5m の計測位置では、BOTDR 計測値の誤差は 83 $\mu$  と大きいのが、補正に用いる FBG 計測値がこの付近にないため、本解析手法による誤差の低減効果は見られない。以上の結果から、BOTDR 計測のひずみ分布の補正に用いる FBG 素子の配置により効果は異なるものの、全体としては本解析手法により高精度なひずみ分布を求められることが明らかとなった。さらに高精度なひずみ分布を得るためには、ひずみ分布の変化点になると予測される位置の近傍に FBG 素子を密に配置することが効果的である。

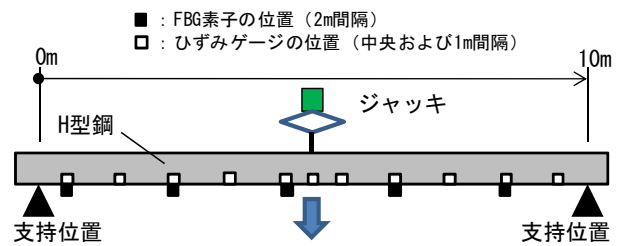


図-5 実験装置の概要



写真-1 実験状況

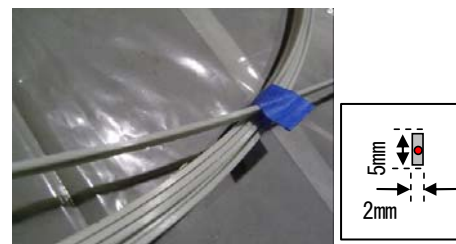


写真-2 室内試験に用いた光ファイバセンサ

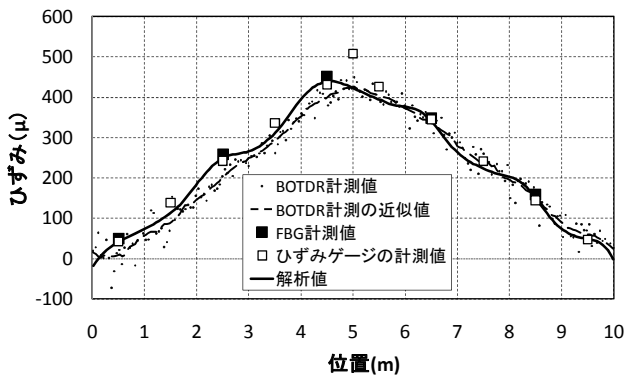


図-6 ひずみ計測結果および解析結果

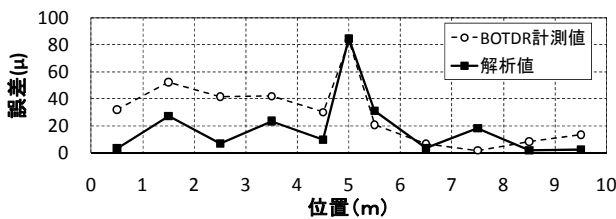


図-7 ひずみゲージ位置でのひずみ計測誤差

以上、本解析方法をひずみ実験データへ適用した結果、ひずみ計測の高精度化に有効であることが分かった。本解析方法は、区間毎に次数を固定した関数のフィッティングを行うため汎用性があり、計算にかかる時間も短時間で済む利点がある。図-8 に、区間分割後に補正計算をする場合の計算例を示す。

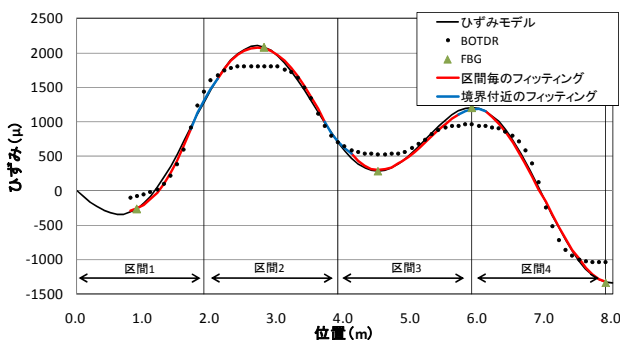


図-8 新たな解析方法による計算例

#### 4. 制御・データ処理ソフトウェアの開発

高精度変状監視システムを運用するため、以下の機能を持つソフトウェアを開発した。遠隔地からのリモート制御機能の可能性を考慮し、図-9 に示すように、制御PCと各計測装置間をVPNで接続し、遠隔地にある制御PCから各計測装置をリモート制御する構成とした。

ソフトウェアの機能：

- ① 1本の光ファイバに対し両技術の計測機器を接続し、自動交互の計測制御
- ② 計測結果をデータベース化
- ③ 解析によるデータ処理
- ④ 解析結果のグラフ表示
- ⑤ 日報、週報の自動出力機能の追加

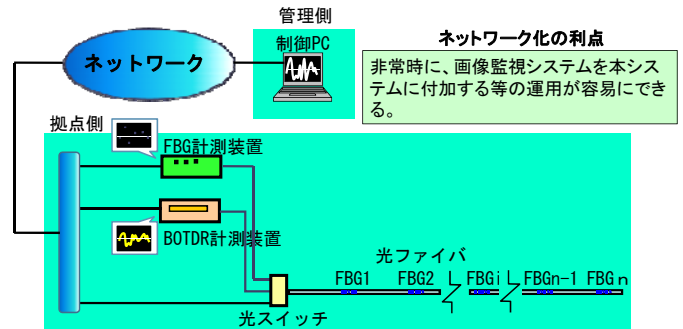


図-9 VPNを活用したリモート制御の概要

#### 5. おわりに

本システムの開発により、 $100\mu$ 以下の精度のひずみ分布計測を達成することができた。また、開発したソフトウェアと光ファイバセンサにより、実構造物への適用が可能となった。光ファイバセンサが持つ計測信号の長距離伝送性や耐久性と合わせ、高精度のひずみ分布計測を実現したことにより、長大トンネルの変状監視や鋼橋疲労のモニタリングなど、広域社会基盤施設の迅速な災害復旧や効率的な維持管理のためのモニタリングに適用していく所存である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、BOTDRの計測においては、(株)アドバンテストのご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 紀博徳, 井上好章, 山浦剛俊, 塚野正純, 村里喜久己: 実トンネルにおける光ファイバによるひずみ監視について, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, pp.130-131, 2001.
- 2) 熊谷幸樹, 田村琢之, 上明戸昇, 森山守: TDM方式FBG光ファイバセンシングによるトンネル吹付け覆工の長期健全性監視, 第43回光波センシング技術研究会講演論文集, pp.155-160, 2009.
- 3) Yasuda Kei, Naruse Hiroshi, Li Che Hsien, Tateda Mitsuhiro: Deformation of Brillouin scattered light power spectrum shape by linear strain distribution, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, Proc. of the SPIE, Vol.7503, 75036H1-4, 2009.

