

## FBG-BOTDR 統合技術における高精度ひずみ分布の解析手法の提案

|               |     |        |
|---------------|-----|--------|
| 飛島建設 技術研究所    | 正会員 | ○上明戸 昇 |
| 飛島建設 技術研究所    | 正会員 | 田村 琢之  |
| 飛島建設 技術研究所    | 正会員 | 熊谷 幸樹  |
| 京都大学大学院 工学研究科 | 正会員 | 塩谷 智基  |

### 1. はじめに

適切な維持管理により道路や鉄道等の広域社会基盤施設を延命化するには、損傷や変状の発生位置とその程度を迅速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、BOTDR 方式と FBG 方式の光ファイバセンサが挙げられる。一般に、BOTDR 技術は長距離で連続的なひずみを計測できるが計測誤差は大きく、巨視的なひずみ分布のモニタリングに用いられることが多い。一方、FBG 技術は高精度の計測を行うことができるが、離散的なセンサ配置となるため連続的なひずみの計測はできない。そのため、分布荷重や多くの集中荷重を受ける構造物に対し、BOTDR 計測または FBG 計測の一方の技術のみでは構造物全体のひずみ分布を高精度で計測することが困難である。この問題を解決するために、筆者らは FBG 計測と BOTDR 計測の統合運用による技術 (FBG-BOTDR 統合技術) を用いて高精度で連続的なひずみ分布を得るための研究開発を進めている<sup>1),2)</sup>。本報では、提案した FBG-BOTDR 統合技術における高精度ひずみ分布の解析手法の有効性を確認するため、本解析手法を用いたシミュレーションの結果と、ひずみ計測実験データに本解析手法を適用した結果について報告する。

### 2. FBG-BOTDR 統合技術による変状監視システムの概要

図 1 に FBG-BOTDR 統合技術による変状監視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、FBG 計測装置と BOTDR 計測装置を光スイッチで切替えることにより、FBG 技術によるひずみ計測と BOTDR 技術によるひずみ計測を交互に行う。FBG 計測は同じ計測波長で多点を計測できる特長を持つ時間領域多重化 (TDM) 方式 FBG センサを用いる。TDM 方式 FBG センサで計測した離散的なひずみデータを用いて BOTDR 技術で計測した連続的なひずみデータを補正することにより、高精度で連続的なひずみ分布を求める。

### 3. 解析手法の適用によるシミュレーション

BOTDR 計測では散乱光を発生させる入射パルス光が幅を持つため、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、最大で数百  $\mu$  の誤差が発生する。一方、FBG 計測は、FBG 素子の位置のひずみを数  $\mu$  の小さな誤差で計測する。両方の計測値を用いて高精度なひずみ分布を得るための解析手法として、FBG 計測のひずみデータに重みを付けた最小二乗法により BOTDR 計測で得られたひずみ分布を補正し多項式近似を行うこととした。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。

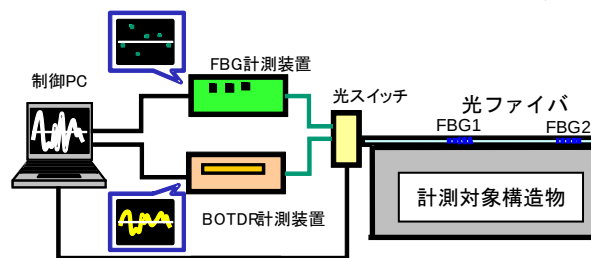


図 1 FBG-BOTDR 統合技術による変状監視システムの概要

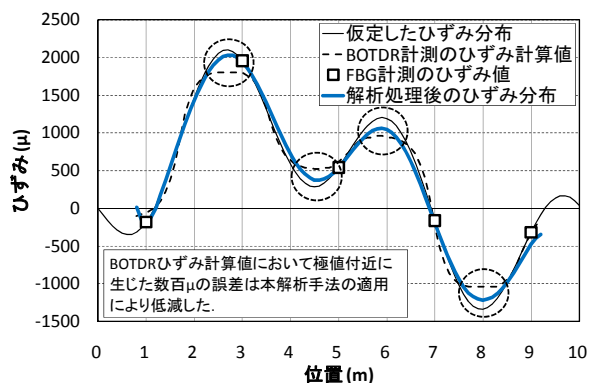


図 2 シミュレーション結果

キーワード：FBG, BOTDR, 社会基盤施設, 維持管理, 変状監視, モニタリング

連絡先：〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472 飛島建設(株)技術研究所 TEL：04-7198-7572

(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 2 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  $150\mu$  程度まで低減することを確認した。

#### 4. ひずみ計測実験データへの解析手法の適用

H 型鋼を用いたひずみ計測実験を行い、本解析手法を適用した。図 3 に実験装置の概要を示す。12m の長さの H 型鋼 (100×100×6×8) のフランジの中央にひずみゲージと光ファイバセンサを接着した。スパン長を 10m とし、H 型鋼中央のひずみが  $500\mu$  となるよう 3 点曲げ载荷を行った。このときのひずみゲージの計測値を基準とし、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 4 にひずみ計測結果および解析結果を、図 5 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  $2\mu \sim 21\mu$  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  $30\mu \sim 52\mu$  と比較的大きく、解析処理後は  $0\mu \sim 27\mu$  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無いため、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。

#### 5. まとめ

FBG-BOTDR 統合技術における高精度ひずみ分布の解析手法を用いてシミュレーションを行い、ひずみ実験データへ適用した結果、本解析手法がひずみ計測の高精度化に有効であることがわかった。今後、精度の高いひずみ分布をより適切に得るための解析手法を検討していく予定である。

#### 謝辞

本研究は、国土交通省平成 21 年度および平成 22 年度建設技術研究開発助成制度（政策課題解決型技術開発公募）による助成を受けて行われたものです。また、BOTDR 計測において(株)アドバンテストより多大な助力をいただきました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 上明戸昇, 熊谷幸樹, 田村琢之, 塩谷智基: FBG-BOTDR 技術の統合運用によるひずみ分布計測の実験的検証—ひずみ分布の計測精度向上のための基礎実験—, 第 45 回光波センシング技術研究会講演論文集別冊, LST45-5, 2010.6.
- 2) Takuyuki Tamura, Tomoki Shiotani, Koki Kumagai, Noboru Kamiakito: Hybrid Strain Monitoring System by Means of Two Different Fibre Optic Sensors, STRUCTURAL FAULTS & REPAIR 2010, 2010.6.

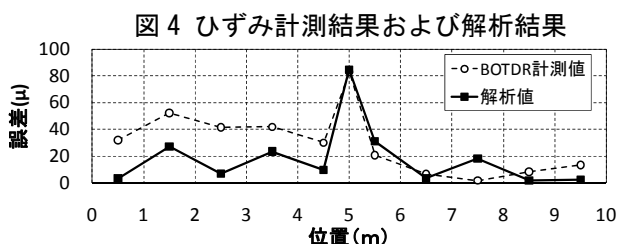
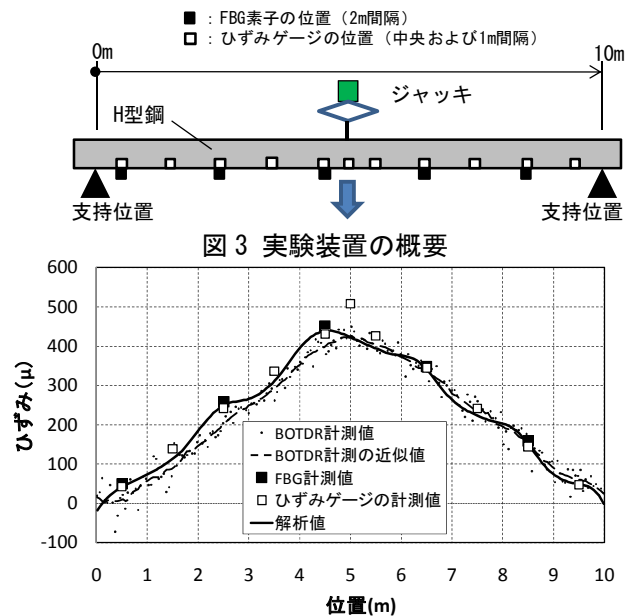


図 5 ひずみゲージ位置でのひずみ計測誤差

