

## FBG センサを用いた構造物軸直角方向の変位計測精度の検証

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 上明戸 昇

## 1. はじめに

橋梁やトンネルなど、軸方向に長い構造物の軸直角方向の変位の連続分布を把握する場合において、構造物が地中にある場合や見通しが悪い場合は、変位を直接計測することが困難なことが多い。このとき、構造物のたわみ角やひずみを、変位の既知点から連続で計測することにより、間接的に変位分布を求めることができる。ひずみの計測方法のうち、FBG 光ファイバセンシング技術は、光ファイバ上に配置された回折格子 (FBG) の位置で、数 $\mu$ 程度の誤差でひずみを計測する技術である。FBG 技術では、光ファイバ上のすべての位置のひずみを計測することはできないが、散乱光を観測する方式の光ファイバセンサに比べ、計測されるひずみの発生位置の特定が正確であり、計測精度が高いため、軸直角方向変位の分布を求める上で有利である。また、1本の光ファイバに複数の FBG を配置できるため、構造物の軸方向のひずみを連続して計測することが可能である<sup>1)</sup>。本稿では、FBG センサを用いて試作したセンサユニットにより、軸直角方向の変位の計測精度を検証した結果を報告する。

## 2. 実験概要

検証実験に用いたセンサユニットの構造を図-1 に示す。外径 60mm、長さ 8.1m の硬質ポリ塩化ビニル管 (塩ビ管、寸法呼称 VP50) を使用し、塩ビ管がたわんだ時の軸方向のひずみを計測するため、2本のロッド状の FBG センサ (断面寸法 3mm×3mm, FRP 製) を、塩ビ管の側面に、管の中心軸に対し対称となる位置に接着した。

軸直角方向の変位は、曲率の2階積分値と既知点の変位により求められるが、曲率は、軸に対称な一対のひずみを用いて(1)式より求められる<sup>2)</sup>。よって、塩ビ管表面のひずみ値から得られる曲率をスプラインで補間し、これを積分して変位を求めることとした。

$$\phi(x_i) = -\frac{\varepsilon_1(x_i) - \varepsilon_2(x_i)}{R} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_1(x)$ ,  $\varepsilon_2(x)$  は、中立軸から等距離にある一対の軸方向のひずみ、 $R$  は塩ビ管の外径である。

光ファイバセンサ内部の FBG は 2m 間隔で配置されている。計測点の間隔が変位の計測精度に与える影響を把握するため、ひずみゲージを光ファイバセンサに沿って 0.5m 間隔で設置した。このセンサユニットの両端から 5cm 内側に穴を開け、ピンを通して回転端とし、図-2 の AC 間で一定の曲率を保ちながら B の変位が 20mm となるよう、A, B, C の位置で油圧ジャッキにより変位を与えた。このときの塩ビ管両側面のひずみを、FBG センサとひずみゲージにより計測した。

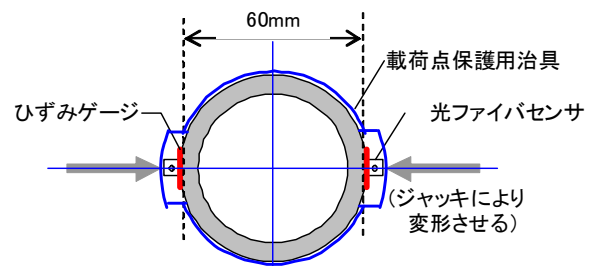


図-1 センサユニットの構造

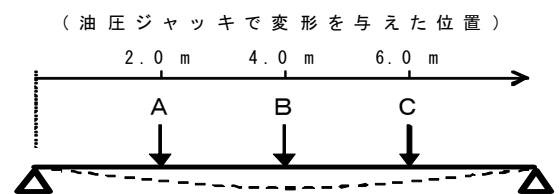
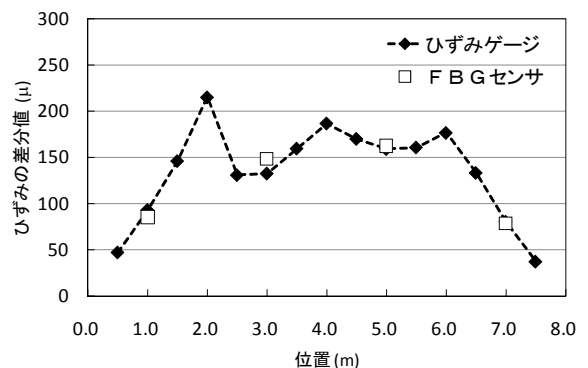


図-2 センサユニットに与えたたわみの形状

図-3 ひずみの差分値 ( $\varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x)$ )

キーワード 変位, ひずみ, 光ファイバ, FBG, 補間

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

### 3. 実験結果

ひずみゲージ, FBG センサそれぞれのひずみの差分値 ( $\varepsilon_1(x)-\varepsilon_2(x)$ ) は, 図-3 に示すように, よく整合した。よって, ひずみゲージの計測値を用いて表-1 に示す補間方法で曲率を求め, 曲率から計算した変位を, 塩ビ管に沿って 1m 間隔で配置した変位計の実測値と比較した。曲率は, 図-4 のように, 計測点の間隔が大きいケースほど, すべてのひずみ計測値を用いた曲率分布 (ケース a, b) とのずれが大きくなり, 変位の最大誤差は, 図-5 のように, ケース a とケース b で 0.4mm, ケース c で 1.2mm であるのに対し, ケース d では 4.7mm であった。

### 4. 軸直角方向の変位分布の精度

実験結果から, 長さ 8.0m のセンサユニットの中央で 20mm の変位が発生する際, 計測点の間隔を 1m 以下にすれば, 変位を 1.2mm 以下の誤差で計測できることがわかった。また, (1)式より, 塩ビ管の外径を 2 倍にすると, 誤差は半分になる。よって, VP50 より径が大きい塩ビ管に, 1.0m 間隔で FBG を配置したセンサを用いれば, 10m 程度の大きさの構造物のたわみについて, 1mm 程度の誤差で軸直角方向の変位分布を求めることが可能となる。

一方, ケース d の方法の誤差が大きくなった原因は, 図-4 のように, 補間に用いなかった計測点の曲率が補間の計算に反映されず, 曲率の計算結果が実際の曲率から大きく乖離したことだと考えられる。実験では, センサユニットをゆるやかな曲げ状態にするため, 図-2 の AC 間の曲率を一定にすることをねらいとしたが, 塩ビ管の剛性が小さいため, 実際にはジャッキの載荷点で曲率が大きく変化していた。分布荷重など, センサユニットに対する荷重の作用点が多く, 曲率の変化が緩やかな場合は, 計測点の間隔が 2.0m でも誤差は小さくなると推測される。

### 5. おわりに

本実験により, 長さ 8m のセンサユニットの, 軸直角方向の変位計測における誤差の程度を明らかにし, センサユニットが, 一般的な構造物に適用できる十分な精度を持つことを示した。計測対象が長くなれば, 誤差が大きくなる可能性があるが, 計測に求められる精度が高い場合は, ユニットの軸方向の途中で別途変位既知点を設けるなどの工夫をすれば, 軸直角方向の変位分布を求めることができると考えられる。

### 参考文献

- 1) Takuyuki TAMURA, Koki KUMAGAI, Tomoki SHIOTANI et al. : MONITORING OF TUNNEL DEFORMATION BY MEANS OF TDM BASED FBG OPTICAL FIBRE MEASUREMENT SYSTEM, Structural Faults & Repair - 2008 (CD-ROM), 2008.6
- 2) 小野紘一, 大島義信, 杉浦邦征 : 光ファイバセンサ変位計における地盤変位計測法に関する考察, 土木学会論文集, No.752 / I-66, pp.147-157, 2004.1

表-1 補間方法

| ケース | 計測点の間隔 | 補間方法     |
|-----|--------|----------|
| a   | 0.5 m  | 各区間で曲率一定 |
| b   | 0.5 m  | スプライン補間  |
| c   | 1.0 m  | スプライン補間  |
| d   | 2.0 m  | スプライン補間  |

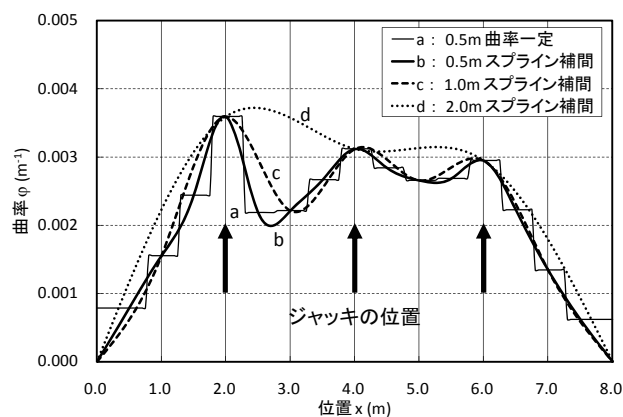


図-4 ひずみの補間による曲率分布

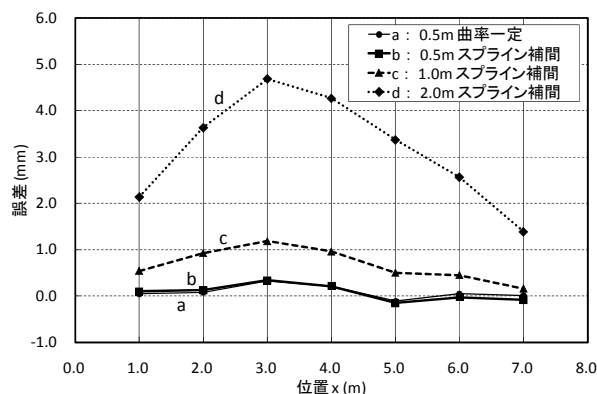


図-5 変位の誤差 (実測値との差)