

BOTDR ひずみデータを用いた B-スプライン法による梁の変位解析

港湾空港技術研究所 地盤・構造部 正会員 菅野 高弘, 田中 智宏, 小濱 英司
 NTTインフラネット (株) 正会員 ○青木 俊朗, 藤橋 一彦
 五大開発 (株) 川島 正樹, 小島 義孝

1. はじめに

ひずみゲージや光ファイバ FBG ひずみセンサを用いた計測は“点”の計測であるのに対して, 光ファイバ BOTDR ひずみセンサ¹⁾を用いた計測は“多点分布”の計測である. したがって, BOTDR センサを用いてトンネルや橋梁, 杭などのひずみ計測を行えば, 1 本の光ファイバで広範囲のひずみ分布を一度に知ることが可能となる. 一方, ひずみ量から応力度や変位量を算定して, 構造物の使用性や修復性, 安全性を評価することがあるが, ひずみ量から変位量を求めた際に, 測点数やその計算手法によっては誤差が大きくなる場合がある. そこで筆者らは, BOTDR センサによるひずみ計測で得られた多点のひずみ計測値を用いて, 梁のたわみ量を精度良く解析する手法を検討したので, 本稿で報告する.

2. B-スプライン法を用いた解析手法の概要

B-スプライン法は, スプライン計測法²⁾のうちスプライン関数を基底関数である B-スプライン (規格化された, 切断べき関数の差分商で定義される) の線形結合で表すものである. B-スプライン法を用いたスプライン計測法は, 伝達マトリクスを用いたスプライン法などとは異なり, 容易に種々の境界条件や計測値が取り込め, センサの種類に依存することなく計測値からの解析が可能である. P 次のスプライン関数は, B-スプラインを用いて式(1)のように表現できる.

$$S(x) = \alpha_0 B_{0,p+1}(x) + \alpha_1 B_{1,p+1}(x) + \cdots + \alpha_{n+p,p+1} B_{n+p,p+1}(x) \tag{1}$$

また, P 次の B-スプラインは $P-1$ 次の B-スプラインから式(2)のドブア・コックスの漸化式で計算できる.

$$B_{i,p+1}(x) = \frac{x - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} B_{i,p}(x) + \frac{\xi_{i+p+1} - x}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} B_{i+1,p}(x) \tag{2}$$

$B_{i,p+1}(x)$ を微分して高階の B-スプライン $B^{(r)}_{i,p+1}(x)$ を得る. これを用いてスプライン関数の r 階微分した関数は式(3)のように表される.

$$S^{(r)}(x) = \alpha_0 B^{(r)}_{0,p+1}(x) + \alpha_1 B^{(r)}_{1,p+1}(x) + \cdots + \alpha_{n+p-r,p+1} B^{(r)}_{n+p-r,p+1}(x) \tag{3}$$

n は節点数であり, $n+p+1$ 個の計測値および境界条件より連立一次方程式を解いて, 式(3)の係数 α を決定することによってすべての $S^{(r)}(x)$ を決定できる. 構造力学における梁の理論による各微分階数の値は, それぞれ y は変位, y' は傾斜角, y'' は曲げひずみのように各物理量と対応づけられる.

3. 実験概要

BOTDR ひずみ計測値を用いた変位解析の有効性を検討するため, 長尺体を用いた静的変形実験を行った. 実験の模式図を図-1 に示す. BOTDR センサとひずみゲージを貼付けた長尺体 (全長 14.6m の塩化ビニル管)

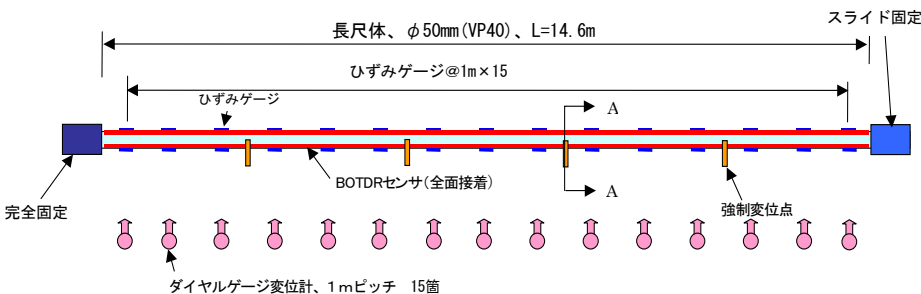


図-1 実験模式図

キーワード 変位計測, 光ファイバセンサ, B-スプライン法, BOTDR

連絡先 〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町 2-31-1-15F NTT インフラネット (株) TEL : 03-5643-5629

に水平方向に強制変形を与え、そのときのひずみ（BOTDR 及びひずみゲージ）と変位（ダイヤルゲージ）の実測値を計測した。

端部の固定条件は、片端完全固定（変位 $y = 0$ ，傾斜角 $y' = 0$ ），もう片端はスライド固定（変位 $y \neq 0$ ，傾斜角 $y' = 0$ ）の両端支持とした。変位は手動でサポートジャッキにより強制的に与え、その方向は重力の影響がないように水平面上とした。また、自重により撓んだ長尺体と床との接触による摩擦をなくするために、コロ（塩ビ単管）と板を長尺体と平行に置き、その上に長尺体を載せた。

4. 長尺体変位量の計算結果と考察

実験で得られたひずみ計測値を用いて、3 種類の変位解析手法により計算を実施し、計算変位量と実測変位量の比較を行った。3 種類の変位解析手法は前述の B-スプライン法、フーリエ近似法（フーリエ級数式のフーリエ係数を計測されたひずみ計測値から算出し、これをフーリエ級数式の 2 階積分式のフーリエ係数に用いることで変位を求める方法）、区間曲率一定法（区間ごとの曲げひずみが一定と仮定し、測点区間の変位を 2 次のスプライン関数式で補間する方法）である。

BOTDR 及びひずみゲージから得られた計測値を用いた変位計算値と、変位実測値の比較を図-2 と図-3 に示す。BOTDR のひずみ測定精度は $\pm 50 \mu$ 程度と、ひずみゲージの測定精度に比べ 1 オーダー以上大きいにも関わらず、BOTDR 及びひずみゲージから得られた計測値を用いた変位計算値は、両者とも概ね実測値と一致していることがわかる。また、BOTDR のひずみ計測値を用いた変位解析手法ごとの計算値を比較するとばらつきが比較的小さい。この理由として、BOTDR のひずみ計測値は、得られたひずみ量そのものにはばらつきが見られるが、0.1m 間隔で得た計測値を用いて計算したため、計算結果に与える影響が少なかったと考えられる。中でも B-スプライン法あるいはフーリエ近似法（近似次数 $n=10$ ）による計算値が、実測値との差が比較的小さい。フーリエ近似法による計算値の誤差が小さかった理由は、事後解析の際、ひずみ計測値及び変位実測値を最も良く再現できる近似次数を試行錯誤の上、決定したためである。近似次数の値によっては、求まる変位計算値が大きく影響を受けるため、最適な近似次数を予め決定することができない。そのため、リアルタイム解析の場合には、計測値と境界条件のみで変位量算出が可能な B-スプライン法が適していると考えられる。

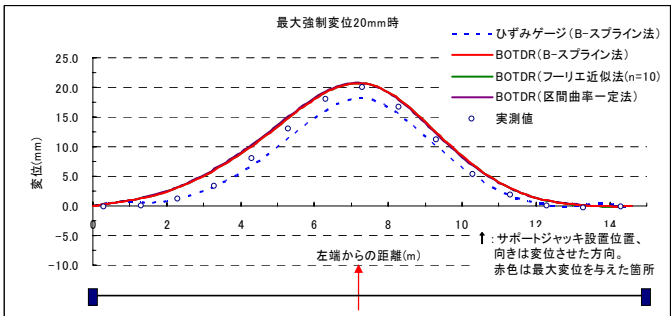


図-2 長尺体変位量の比較(モード1)

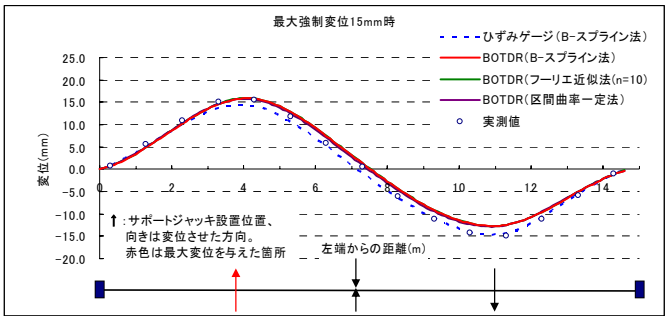


図-3 長尺体変位量の比較(モード2)

5. まとめ

長尺体を用いた静的変形実験で得られた BOTDR ひずみ計測値を用いて、種々の変位解析により算出した計算変位量と実測変位量の比較検討を行った。その結果、計測値と境界条件のみで変位量算出が可能な B-スプライン法により、比較的精度が良い変位解析結果量が得られることがわかった。今後は、電氣的ノイズや雷に強く遠隔計測が容易にできる光ファイバ計測の特性を活かして、地すべり計測および地中構造物の変位計測システムとして実用化を行う予定である。

【謝辞】 本検討の遂行にあたり、国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所のご協力を得た。末筆ながら関係各位に深謝の意を表します。

【参考文献】 1)倉嶋利雄，堀口常雄，立田光廣：ブリルアン散乱光を応用した分布型光ファイバセンサ，電子情報通信学会論文誌(C-II)，Vol. J74-C-II，No. 5，pp. 467-476，1991。 2)小島義孝，大熊俊明，川島正樹，大塚悟：スプライン関数を用いた長体状態量計測法，日本地すべり学会誌，第 44 巻，第 6 号，pp. 11-19，2008。