

光ファイバ分布センサを用いた長大斜張橋モニタリング

(計測精度および安定性・耐久性の検証)

清水建設 正会員 ○岩城 英朗

1. はじめに

筆者らは、長大PC斜張橋の施工時管理から完成後の維持管理まで一貫して担うことが可能な構造ヘルスマニタリングシステムとして、光ファイバ分布センサ(B-OTDR)の大規模適用を行ってきた¹⁾²⁾。

光ファイバセンサは、高い安定性および耐久性を有するセンサ素子として、多くの適用が行われてきたが、実際に使用した環境での計測精度の評価や、長期間の安定性、耐久性を検証した例は少ない。

そこで本報では、長大PC斜張橋における実際の計測記録から、これらの検討を行った結果を報告する。

2. 光ファイバ分布センサの特徴

光ファイバに対して高出力・狭パルス幅のレーザ光を入射すると、後方散乱と呼ばれる反射光が得られる。その中のブリルアン散乱光は、光ファイバに加わるひずみ、温度によって波長が変化する特徴があり、反射光を時間分割して受光する時間領域解析技術(Optical Time Domain Reflectometry (OTDR))と組み合わせると、光ファイバを敷設した全域のひずみ、温度の計測が可能な光ファイバ分布センサ(ブリルアンOTDR(B-OTDR))が実現できる³⁾。

B-OTDR方式では、光ファイバの位置ごとにブリルアン散乱光が得られる。ブリルアン散乱光は周波数 ν_B でピークとなるローレンツ型のスペクトル光となり、その光強度 $V(\nu)$ は、

$$V(\nu) = \frac{(\frac{\Delta\nu_B}{2})^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\frac{\Delta\nu_B}{2})^2} \cdot V_S \quad (1)$$

のように示される。ここで $\Delta\nu_B$ はブリルアン散乱光のスペクトル実効幅、 V_S はブリルアン散乱光のピーク光強度であり、周波数 ν_B の精度がひずみ計測精度に比例する。

すなわち、ブリルアン散乱光スペクトルに対して、実効値 V_N のノイズが重畳しているとすると、このノイズによる ν_B のばらつき $\delta\nu_B$ は、

$$\delta\nu_B = \frac{\Delta\nu_B}{\sqrt{2\frac{V_S}{V_N}}} \quad (2)$$

と示される⁴⁾。

また、光ファイバの伝送損失は、光ファイバに沿った V_S の傾きで示すことができる。

3. 光ファイバ分布センサの評価

B-OTDR方式における計測精度は、基準とする通信用光ファイバに対するひずみ計測結果のばらつき(連続100データの標準偏差)を元に、 $\pm 40[\mu\epsilon]$ がメーカー仕様として規定されている⁵⁾。

しかし、実際の計測では、光ファイバセンサの構造や材質、および敷設状況、さらに環境変化でひずみ計測結果は一定ではないため、ばらつきが増加してしまい、見かけ上ひずみ誤差が増大するという結果となる。そのため、実環境における計測精度を求めるために、光ファイバセンサの各々の計測点におけるブリルアン散乱光スペクトルのピーク光強度の平均値を V_S とし、ばらつきを $2V_N$ 、さらに実効スペクトル幅の平均値を $\Delta\nu_B$ として式(2)に適用する。

また、長期にわたる安定性、耐久性の評価は、 V_S および光ファイバセンサの伝送損失の経年変化に注目する。すなわち、 V_S の低下および伝送損失の悪化を光ファイバセンサおよび計測機器の障害、劣化の兆候と捉える。

4. 長大斜張橋における光ファイバセンサの適用

(1) ひずみ計測精度の評価

長大PC斜張橋の主桁コンクリート中に埋設した光ファイバセンサのひずみ分布計測結果および散乱光強度、散乱光スペクトル実効幅を図-1に示す。

基準とする通信用光ファイバ、光ファイバひずみセンサ(単体で室内試験)および現場適用下の各々におけるひずみ計測結果のばらつきから求めたひずみ誤差、および $V_S, V_N, \Delta\nu_B$ と、これらを式(2)に適用した結果 $\delta\nu_B$ を表-1に示す。

光ファイバひずみセンサのひずみ誤差は、室内試験、

キーワード: モニタリング, 長大橋, 光ファイバセンサ, B-OTDR, 維持管理

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 TEL 03-3820-6512

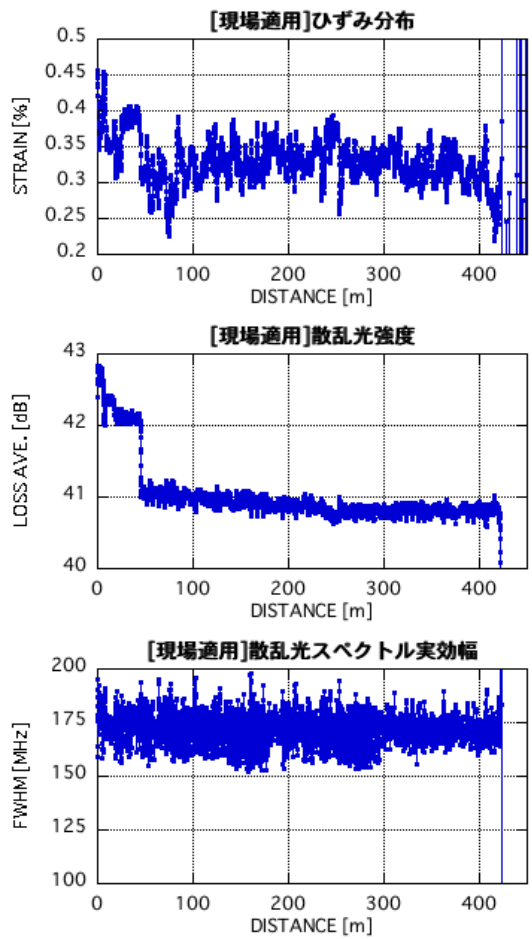


図-1 光ファイバセンサ計測結果例（現場適用）

表-1 光ファイバセンサの精度			
条件	基準値	室内試験	現場適用
ひずみ誤差 [$\mu\epsilon$]	33	77	229
V_S [dB]	40.615	40.282	41.064
$2V_N$ [dB]	0.241	0.244	0.371
$\Delta\nu_B$ [MHz]	171.91	185.37	173.76
$\delta\nu_B$ [MHz]	28.24	30.64	35.16

現場適用下ともに基準とする通信用光ファイバのひずみ誤差，およびメーカー規定値に比べて大きく悪化している．これは前述のとおり，ひずみ計測値が一定ではないことが原因である．

一方，式 (2) によって求めた計測精度 $\delta\nu_B$ は，室内試験，現場適用下のいずれも通信用光ファイバに比べ大きな差はない．

(2) 安定性・耐久性の検討

長大PC斜張橋の主桁において，光ファイバひずみセンサによるひずみ計測を行った記録を図-2に示す．計測期間全般にわたり光ファイバセンサの破損はなく，前項で検討したばらつきを含んで計測値が推移してい

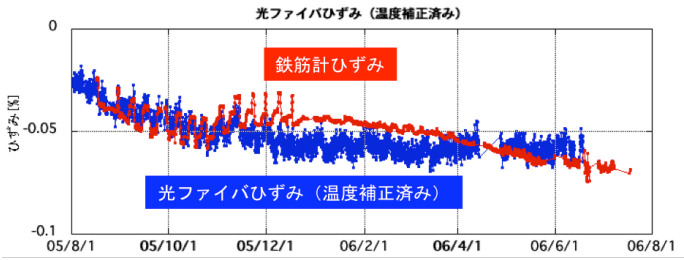


図-2 光ファイバセンサによる長期ひずみ計測例

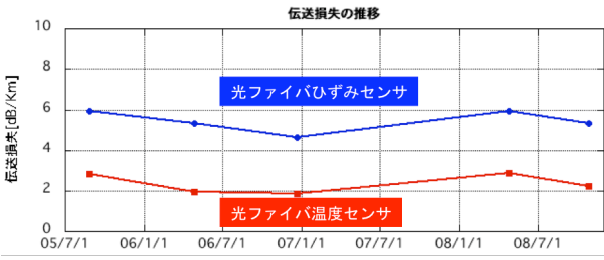


図-3 光ファイバセンサの伝送損失の推移

る．さらに，同位置に設置した鉄筋計ひずみ値と同傾向の推移を示している．

また，図-3に示すように，光ファイバセンサの伝送損失はセンサ設置当初からの4～6[dB/Km]と一定であり，光ファイバセンサの劣化の兆候は認められない．

5. まとめ

長大PC斜張橋における光ファイバセンサの計測記録から，計測精度の検証および安定性，耐久性の検討を行ったところ，現場適用環境下においても計測精度の悪化はみられず，かつセンサ設置後3年余を経過しても，安定性，耐久性のいずれにも問題は生じていないことを確認した．

参考文献

- 1) 岩城英朗, 稲田裕, 若原敏裕, 光ファイバ分布ひずみセンサ (B-OTDR) を用いた長大斜張橋施工時モニタリング, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp805-806, 2007.09
- 2) 岩城英朗, 稲田裕, 若原敏裕, 光ファイバ分布センサを用いた長大斜張橋モニタリング, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp61-62, 2008.09
- 3) 清水薫, 堀口常雄, 小山田弥平, 倉嶋利雄, 自己ヘテロダイン検波法を用いたブリルアン OTDR と光ファイバ歪分布/温度分布測定への応用, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. CS93-26, pp.9-16, 1993.05
- 4) 堀口常雄, 倉嶋利雄, 立田光廣, ブリルアン分光による光ファイバのひずみ分布測定, 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol. J73-B-I, No.2, pp.144-152, 1990.02
- 5) 内山晴義, 坂入良幸, 野崎威志, 新検波方式を用いた光ファイバ歪み分布測定器の製品化, ANDO 技報, Vol. 72, pp.53-61, 2002.10