

BOCDR 方式分布型光ファイバーセンサによるひずみ計測

—光ファイバー組み込み型グラウンドアンカーでの現場検証—

リテックエンジニアリング(株) 正会員 ○早坂洋太

鹿島建設(株) 正会員 松本健太郎 今井道男

横河電機(株) 古川 靖 手塚信一郎 松浦 聡

1. はじめに

光ファイバーセンサのなかでもブリルアン散乱光を利用した分布型光ファイバーセンサは、光ファイバーのどこでもひずみが計測でき、ひずみ分布データ（位置 vs ひずみ）を得られる。こうした分布型センサの性能を特徴づけるパラメータとして、空間分解能がある。空間分解能は、計測されるひずみがどのくらいの範囲から影響を受けているかを示し、長さの単位で示される。ひずみゲージのゲージ長（基線長）に相当するもので、空間分解能が短い（高い）ほど、より詳細なひずみ変化を捉えることができる。

これまで、高い空間分解能を達成するには、両端から光を入射する方式をとる必要があった。筆者らは、片端からの光の入射のみで測定できる新しい BOCDR 方式を開発している。本方式によれば、これまでと同じ光ファイバーを用いて、計測装置を交換することで高い空間分解能を実現できる。本稿では、既に施工済みの光ファイバー組み込み型グラウンドアンカーを用いて本方式の適用性（精度）を検証した結果を報告する。

2. 計測方法の概要

(1) 分布型光ファイバーセンサ

光ファイバー内で生じるブリルアン散乱光の周波数は、ひずみに依存することが知られている。ブリルアン散乱光を利用した分布型光ファイバーセンサの分類の一例を図-1 に示す¹⁾。横方向に光ファイバーの接続方法（片端・両端接続）を、縦方向に散乱発生位置の同定方法（相関・時間領域）を示す。BOTDR（図-2, Brillouin Optical Time Domain Reflectometry）では、片端接続でパルス光を入射し、後方ブリルアン散乱光の帰還時間から位置を同定する。その原理的な空間分解能（1 m）や計測時間の限界を越えるため、両端から入射したふたつの光の相互作用を利用する BOFDA（図-3, Brillouin Optical Correlation Domain Analysis）が研究され、数 cm レベルの空間分解能と高速計測が達成された。

(2) BOCDR 方式

BOCDR（Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry）²⁾のシステム構成を図-4 に示す。BOFDA と同等の空間分解能を、片端からの接続によって実現するものである。入射光は周波数変調されており、その周波数に応じた任意の一点（相関ピーク）におけるブリルアン散乱光を観測できる。BOTDR と同様の光ファイバー構成（片端接続）に対して、計測装置を交換することで、数 cm レベルの空間分解能でひずみ分布を計測できる³⁾。

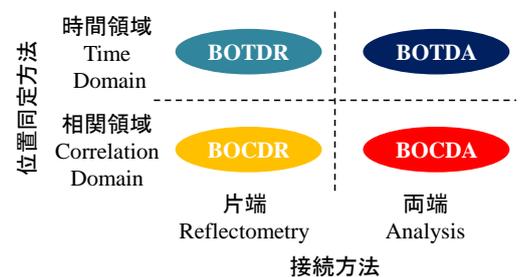


図-1 分布型光ファイバーセンサ

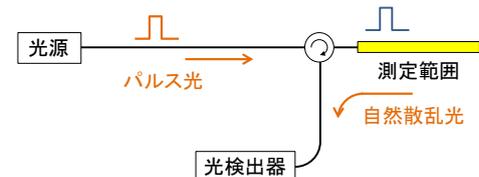


図-2 BOTDR のシステム構成

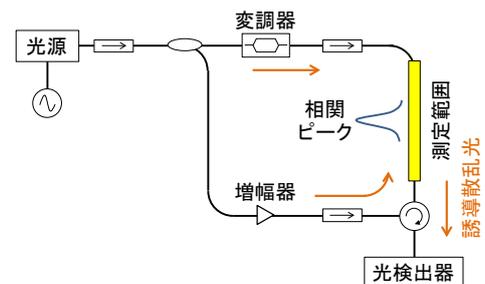


図-3 BOFDA のシステム構成

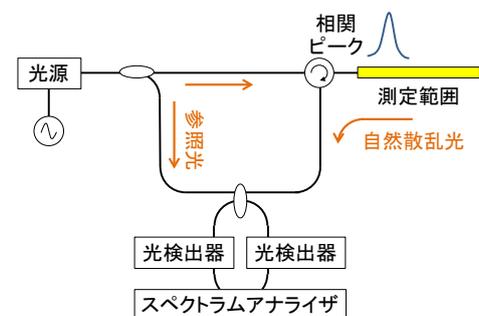


図-4 BOCDR のシステム構成

キーワード 光ファイバーセンサ, ひずみ測定, ひずみ分布, 散乱光

連絡先 〒107-0052 東京都港区赤坂 6-4-2 リテックエンジニアリング(株) TEL 03-6229-6851

3. 検証実験

(1) 施工済グラウンドアンカー

2017年夏に、法面補強グラウンドアンカーの一部に光ファイバー組み込み型より線（図-5）を施工済みである⁴⁾。施工中の緊張力管理で用いた光ファイバーは、施工後に約100 m 延伸して現場詰所にて計測ができる。法面の状況を写真-1に、計測の状況を写真-2にそれぞれ示す。

(2) ひずみ分布計測

はじめに、施工中同様にBOTDR（空間分解能1 m）によってひずみ分布計測を実施した。緊張力導入直前を初期値として、緊張力に換算した結果を図-6に示す。施工から1年半経過後も計測が可能で、大きな緊張力の変動がないことを確認できた。

次に、BOCDRによって空間分解能20 cmと5 cmでひずみ分布計測を実施した。ひずみに依存するブリルアン散乱周波数シフトの結果を、前述のBOTDRの結果とともに図-7に示す。BOCDRでは空間分解能が高いために、より線のよりピッチ（約20 cmピッチ）に由来すると思われる周期的な変動がみられるが、BOTDRと同様の傾向を得ることができた。BOCDRは空間分解能を高める一方で、検出光が弱いため、端部（12 m付近）からの反射光によって計測できない箇所がみられると懸念されたが、そうしたことは生じなかった。

4. おわりに

BOTDRで緊張力管理されている光ファイバーに対して、BOCDRの計測装置に繋ぎ替えて計測を行った。グラウンドアンカーのような対象は片端からの接続が必須であり、これまでよりも高い空間分解能を実現するBOCDRによって、さらに詳細な緊張力変動の予兆などを把握できる可能性があり、今後の一層の開発が期待される。

謝辞

光ファイバー組み込み式グラウンドアンカーについては、鹿島建設(株)・住友電気工業(株)・(株)エスイーの共同研究によって行われました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Hartog, A. H. (2017). An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. CRC Press.
- 2) Mizuno, Y., Zou, W., He, Z., & Hotate, K. (2008). Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR). Optics express, 16(16), 12148-12153.
- 3) 三浦悟, 今井道男, 手塚信一郎, 古川靖, 松浦聡(2018). BOCDR方式分布型光ファイバーセンサによるひずみ計測—コンクリート梁試験体での検証実験—, 土木学会第73回年次学術講演会, CS9-013, pp.25-26.
- 4) 曾我部直樹, 今井道男, 中上晋志, 早川道洋(2018). 光ファイバを用いたPC張力計測技術のグラウンドアンカーへの適用, 第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp.405-410.

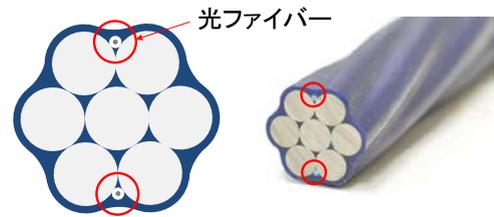


図-5 光ファイバー組み込み型より線



写真-1 法面補強グラウンドアンカー



写真-2 計測状況

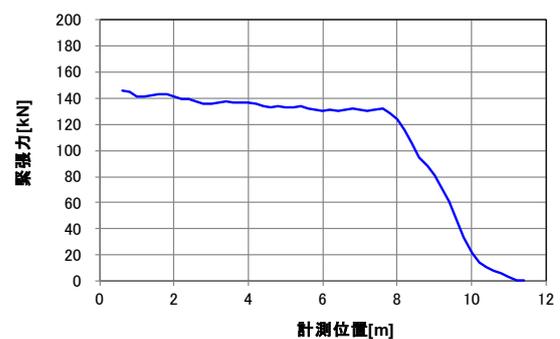


図-6 計測結果 (BOTDR)

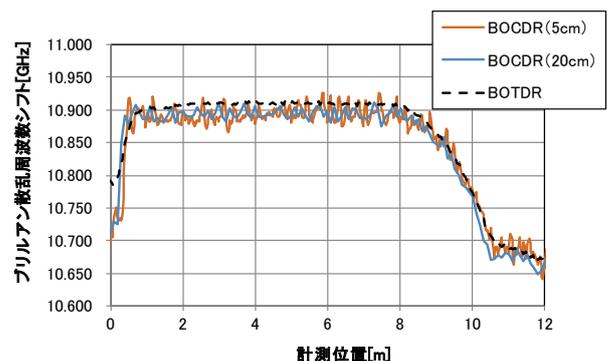


図-7 計測結果 (BOCDR と BOTDR)