

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—

鹿島建設(株) 正会員 ○三浦 悟 今井道男
横河電機(株) 手塚信一郎 古川 靖 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、光ファイバーに沿って位置的に連続するひずみ分布データを得ることができる。こうした分布型光ファイバー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、得られるひずみがどのくらいの範囲から影響を受けるかを示し、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。本稿では、片端からの光の入射のみで測定できる方法を、RC部材の加力実験への適用により実用可能性を検証した結果について報告する。

2. 計測方法の概要

(1) 分布型光ファイバーセンサ

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には、いくつかの方式がある¹⁾。その分類の一例を図-1に示す。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(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(1m)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関を利用する方法(BOCDA(図-2))が開発され、数cmレベルの空間分解能と高速計測が達成された。BOCDR²⁾は、片端からの接続が簡易な構成によって、同等の性能を実現しようとするものである。

(2) BOCDR 方式

BOCDRのシステム構成を図-3に示す。入射光は周波数変調されており、任意の一点(相関ピーク)からの後方ブリルアン散乱光のみ参照光との周波数差が常に一定となる。そのため、スペクトラムアナライザ(周波数分析器)では相関ピークで発生した後方散乱光が支配的に観測され、信号強度が最大となる周波数としてブリルアン周波数(発生位置のひずみに比例)を得ることができる。また、変調周波数を変えることによって、相関ピークの位置や空間分解能の長さを任意に変更できる。

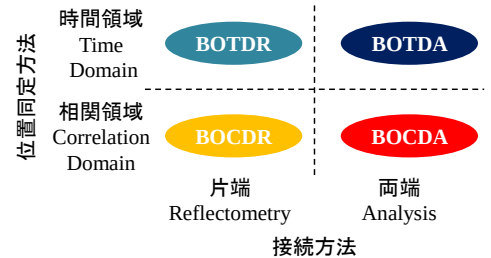


図-1 分布型光ファイバーセンサ

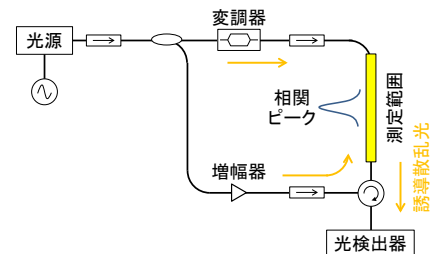


図-2 BOCDAのシステム構成

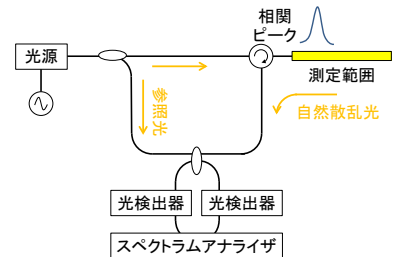


図-3 BOCDRのシステム構成

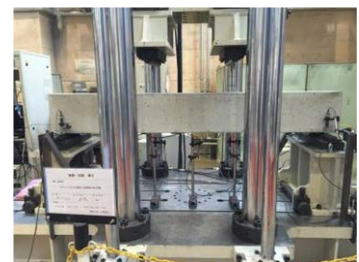


写真-1 試験状況

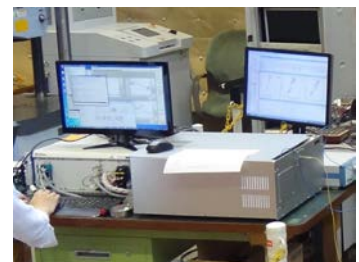


写真-2 BOCDRプロトタイプ機

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 〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL042-489-6264

3. 検証実験

(1) 試験体

鉄筋コンクリートの梁試験体（ $200 \times 400 \times 2,200\text{mm}$ ）を製作し、四点曲げによる静的加力試験ならびに動的加力試験を実施した（写真-1；支間長 $2,000\text{mm}$ ，等曲げ区間 600mm ）。光ファイバーセンサは、試験体内部には主筋に沿って埋め込み、試験体下面にはエポキシ接着剤により全長にわたって固定した。

(2) 静的加力試験

静的加力試験では、荷重を保持した状態で空間分解能約 5cm のBOCDRによりひずみ分布を計測した（写真-2）。各荷重での試験体表面のひずみ分布計測結果を図-4～7に示す。局部的ひずみ変化から、ひび割れの本数や幅が増えている様子が確認できる。写真-3に試験後の試験体下端面中央部の様子を示す。ひび割れがゲージ部を横切らない限り、ひずみゲージ（ゲージ長 60mm ）ではひび割れを検知できない（写真内の④位置）。一方、分布型光ファイバーセンサであればすべてのひび割れを検知することができる。

(3) 動的加力試験

動的加力試験については、荷重 $26 \pm 24\text{kN}$ で加振（ $2 \sim 3\text{Hz}$ ）させた状態で空間分解能 30cm のBOCDRにより試験体内部中央位置の動的ひずみを計測した（約 52Hz サンプルング）。計測結果を図-8に示す。両端接続方式³⁾に比べばらつきが大きく、加振レベルが精度に比べて大きくないため、ひずみゲージ（ 200Hz サンプルング）には及ばないが、ひずみ変動を動的にとらえることができた。

4. おわりに

センサケーブルを内部と表面に設置した鉄筋コンクリート梁試験体による加力試験を実施し、片側接続のみで高い空間分解能を実現するBOCDRを適用した。その結果、精度的な改善の余地があるものの、コンクリート表面と内部のひずみ分布ならびに動的ひずみを得ることができた。片端接続は、両端接続よりも現場実装の点で大いに有利であり、今後の一層の開発が期待される。

謝辞

本研究は JST 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) シーズ育成事業 (AS2525002H) 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, 松浦聡, 熊谷芳宏 (2017). 光ファイバーセンサによる動的ひずみ分布データ処理方法の研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会, CS14-009, pp.17-18.

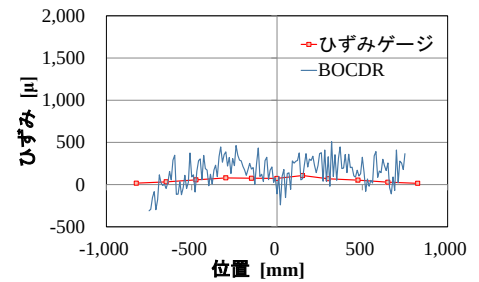


図-4 ひずみ分布 (20kN)

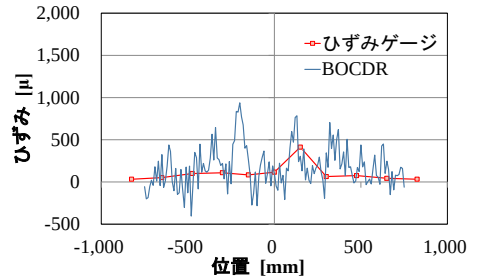


図-5 ひずみ分布 (30kN)

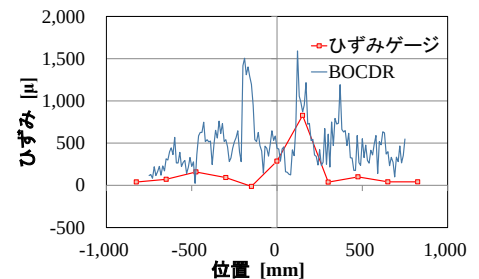


図-6 ひずみ分布 (40kN)

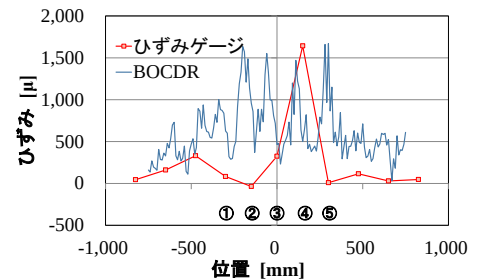


図-7 ひずみ分布 (50kN)

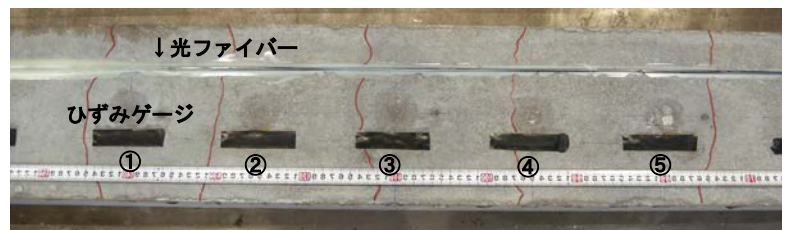


写真-3 実験後の試験体中央部下端面の状況

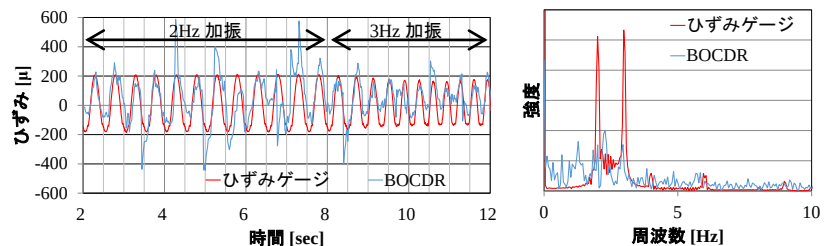


図-8 動的ひずみ (左；経時変化, 右；フーリエスペクトル)