

## PNC-OFDR 方式を用いた分布型光ファイバセンサによる静・動ひずみ計測

鹿島建設(株) 正会員 ○吉村雄一 青鹿弘行 今井道男

フェロー会員 川端淳一

島根大学 非会員 三宅大樹 谷村大輝 張 超 伊藤文彦

### 1. はじめに

構造物や地盤内部のひずみや温度を計測する分布型光ファイバセンサは近年、レイリー散乱光を活用した高精度計測（精度 $\pm 1\mu\epsilon$ ）が行われ、施工管理の合理化を目的としたトンネルの覆工コンクリートにおける充填検知や沈設するコンクリート製ケーソン函体の変形・ひび割れのモニタリングへの適用が進められている<sup>1)</sup>。レイリー散乱光を利用する計測において、mm～数 cm の優れた空間分解能を得る方式としてレイリー OFDR<sup>2)</sup>（Optical frequency domain reflectometry 以下 OFDR）があるが、光源の性能によって計測距離の制約（数 10m 程度に留まる）を受けることから、構造物評価への適用にあたり対象が限られる。一方、信号処理により計測可能な距離を伸長する PNC-OFDR<sup>3)</sup>（Phase noise compensated optical frequency domain reflectometry 以下 PNC-OFDR）はこれまで、ひずみ計測における性能は明らかでなかったが、その特長から建設分野における要求性能を満たす有力な方式として実用が期待できる。今回はひずみ計測性能の把握を目的に、PNC-OFDR 方式を用いた分布型光ファイバセンサによる静・動ひずみの計測を実施した。

### 2. 計測概要

#### 2.1 PNC-OFDR 方式におけるひずみの出力

本方式におけるひずみの出力について図-1 に示す。光ファイバに波長を変調（掃引）した連続光（レーザーの中心波長:1545nm, 掃引幅 15nm）を入力して光ファイバ内で生じるレイリー散乱光を検出し、信号処理を実施して各区間におけるレイリー散乱光のスペクトルを出力する。ひずみはスペクトル波形のシフト量に比例することから、実際の計測ではデータを 2 回取得し、一方で得た参照用スペクトルともう一方の測定用スペクトルとの相互相関からひずみを算出する。計測時間は 1 回当たり 2ms であり、図-2 に示すように入力光の波長掃引に応じてデータの取得間隔を選択し、静ひずみと 1 秒以内の動的な変化である動ひずみの計測を行った。

#### 2.2 一軸引張試験における静ひずみの計測

光ファイバを 2 点で固定し、光ファイバ軸方向に引っ張る一軸引張試験を実施した。ファイバ入力端から 138～139m 位置に引張を与える区間を設け、区間長を 40cm とした。なお、評価用ファイバには素線ファイバ（直径 250 $\mu\text{m}$ , 全長 140m）を使用した。同区間に引張ひずみを 10 $\mu\epsilon$  ずつ与え、引張前後にデータ取得を行い静ひずみの計測を行った。

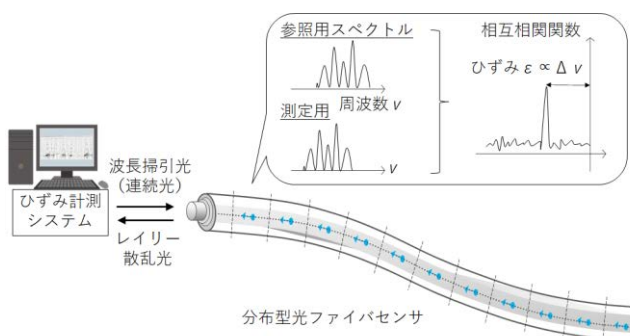


図-1 OFDR (PNC-OFDR) 方式におけるひずみの出力

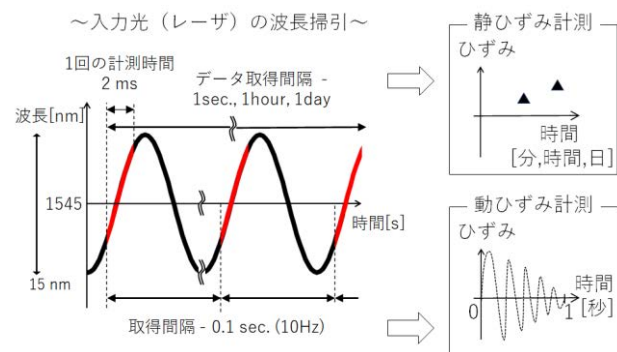


図-2 静・動ひずみ計測におけるデータ取得

キーワード 光ファイバ, OFDR, ひずみ, 振動, センサ

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 TEL 042-485-1111

## 2.3 光ファイバ上を歩行した際に生じる動ひずみの計測

屋内環境にて床タイル上に光ファイバケーブル（直径3mm, 全長25m）を直線状に敷き、全長にわたってテープで固定した。cm オーダの範囲で動的な変化を観察する目的で光ファイバケーブル上を終端方向に向かって歩行し、ケーブルに作用する動ひずみを0.1秒間隔（10Hz）で計測した。

## 3. ひずみ計測の結果

### 3.1 静ひずみの計測結果

一軸引張試験にて得られた静ひずみの分布を図-3に示す。横軸はファイバ入力端からの距離を示しており、計測点間隔を10cmに設定して静ひずみの分布を出力した。40cmの引張区間で10 $\mu\epsilon$ ～最大90 $\mu\epsilon$ まで段階的にひずみが増大し、一様な分布が得られていることから本方式の $\mu\epsilon$ オーダの計測精度が確認できる。与えたひずみとの差は平均18%であり、被覆の伸縮や固定方法による伝達率の差異と考えられる。

### 3.2 動ひずみの計測結果

光ファイバケーブル上を歩行した際に得られた動ひずみの分布を図-4に示す。横軸は時間、縦軸は距離を示し、動ひずみをコンター図として表示している。空間分解能を0.5cmに設定して0.1秒間隔で動ひずみを出力した。ケーブル終端方向への歩行と同時に動ひずみが確認でき、最大ひずみは400 $\mu\epsilon$ 程度であった。その一部である図-5（図-4点線枠部分）に着目すると歩行者の靴のサイズ（29cm）同等の区間に作用するひずみや、つま先とかかと側でひずみの向きが異なる様子が可視化された。cmオーダの空間分解能で変化するひずみを捉える本方式の計測性能を確認した。

## 4. まとめ

PNC-OFDR方式を用いた分布型光ファイバセンサについて計測性能の把握を目的に、一軸引張試験における静ひずみとファイバ上を歩行した際の動ひずみの計測を実施した。その結果、 $\mu\epsilon$ オーダの計測精度と実時間データの取得性能を兼備するひずみ計測手法として現場適用への可能性を確認した。今後、実用に向けた取組みとともに新規応用を進める。

### 参考文献

- 1) 小林ら: 光ファイバを用いたセンシング技術のコンクリート構造物への実装, コンクリート工学, 60, 1, pp.78-83, 2022.
- 2) Mark Froggatt et al.: High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter, Applied Optics, 37,10,1735-1740, 1998.
- 3) F. Ito et al.: Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation, J. Lightwave Technology, 30, 8,1015~1024,2012

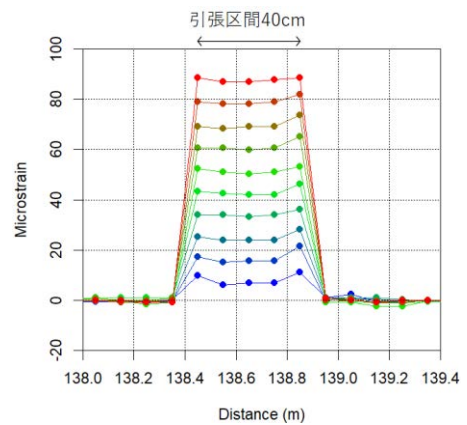


図-3 一軸引張試験における静ひずみの分布（空間分解能10cm）

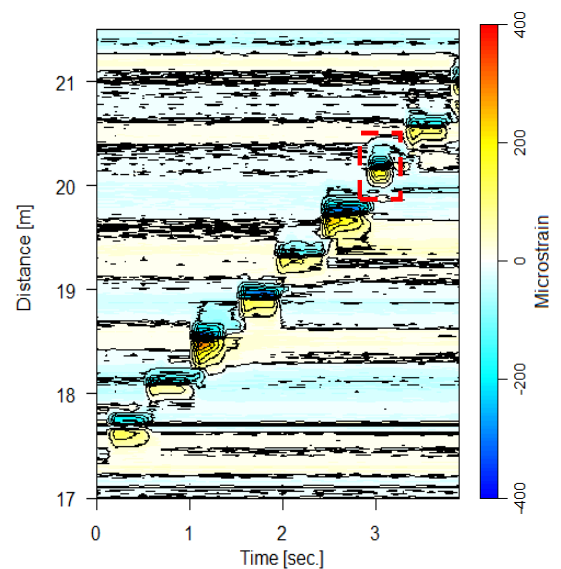


図-4 光ファイバケーブル上を歩行した際の動ひずみの分布（空間分解能0.5cm, サンプルング周波数10Hz）

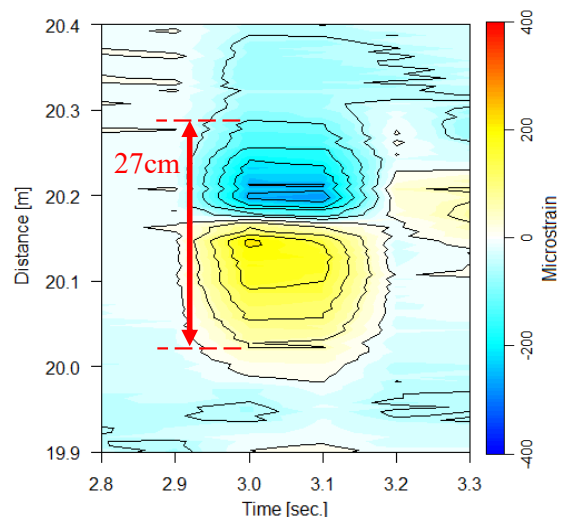


図-5 点線枠部分（図-4）の拡大図