

高精度光ファイバセンサを用いたひずみ・変位計測の検証実験

鹿島建設(株) 正会員 今井道男 川端淳一 久保田光太郎 辻 良祐 永谷英基 ○笹倉 剛
リテックエンジニアリング(株) 小柳津悠

1. はじめに

分布型光ファイバセンサは、光ファイバそのものがセンサとして機能するため、光ファイバ全長に沿った物理変化（ひずみや温度）を捉えることができる。これまで、その特長から建設分野においても様々な試みがなされたが、その展開は一部に留まっている。近年、展開における課題のひとつであった計測精度の向上が進んできた結果、単なるひずみ計測だけでなく、変位計測の手段としても期待できるようになった。本稿では、新しい高精度光ファイバセンサを用いた基礎実験を通じて、そのひずみ計測の性能に加えて、変位計測について検証したので報告する。

2. 分布型光ファイバセンサ

(1) 散乱光による方式の違い

光ファイバ内に光を入射すると、すべての箇所では散乱光が生じる（図-1）。これらの散乱光は、通信用途においては光信号が減衰する原因となるが、そのスペクトルには様々な情報が含まれている（表-1）。ラマン散乱光の強度は温度に依存することから、温度分布計測に広く利用されている。ブリルアン散乱光の波長はひずみに依存することから、ひび割れ検知¹⁾やPCケーブル張力管理²⁾などに利用されている。レイリー散乱光は、光の波長よりも小さい粒子によって発生するもので、光ファイバを構成する分子のミクロな密度や組成の揺らぎによるものである。この僅かな揺らぎは光ファイバごとに固有のランダムなパターンを有し、与えられたひずみによって条件を満たす特定の波長のみを反射することとなる。ラマンやブリルアンと異なり、分子振動など動的な現象によるものではないため、非常に高い精度を得られることが大きな特長である³⁾。

(2) 高精度計測による変位計測

レイリー散乱によれば、非常に高精度なひずみ分布計測が実現でき、光ファイバセンサの適用対象が大きく広がる可能性がある。例えば、ある程度の剛性を有する部材に光ファイバを長手方向に固定すると、その部材に生じた曲げ変形によるひずみを得られる（図-2）。つまり、得られた曲げひずみから変形を算出することができる。そのため、光ファイバをパイプに固定して地中に埋設すれば、高精度な分布計測によって既存技術にない傾斜計や沈下計が実現できる（図-3）。これまでも、ブリルアン散乱を用いて同様の試みがなされてきたが、十分な精度を得るには至っていない⁴⁾。

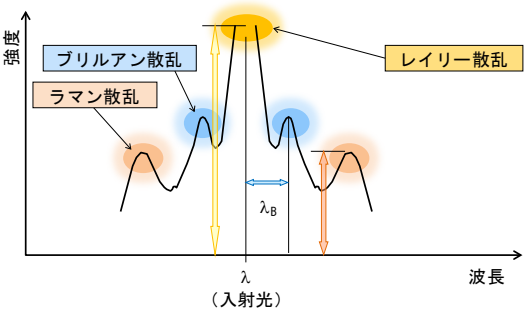


図-1 後方散乱光のスペクトル

表-1 計測方式の比較

	ラマン	ブリルアン	レイリー
要因	分子振動	分子振動による音響波	粒子による散乱
原理	強度が温度に依存	波長がひずみと温度に依存	強度が密度などに依存
計測物理量	温度変化	ひずみ変化(温度変化)	ひずみ変化(温度変化)
特徴	強度の相対的な変化から温度変化算出 ひずみ影響を受けない	波長(絶対量)からひずみ変化を算出 温度影響を受ける	強度の相対的な変化からひずみ変化算出 温度影響を受ける
使用ファイバ	主に MMF	主に SMF	主に SMF
計測方式例(接続)	ROTDR(片端)	BOTDR(片端) BOTDA(両端) BOCDA(両端)	COTDR(片端) OFDR(片端)

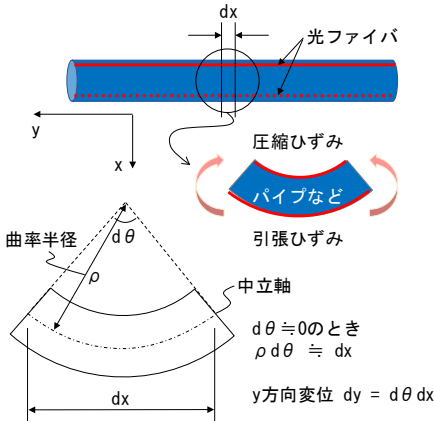


図-2 光ファイバセンサによる変位計測

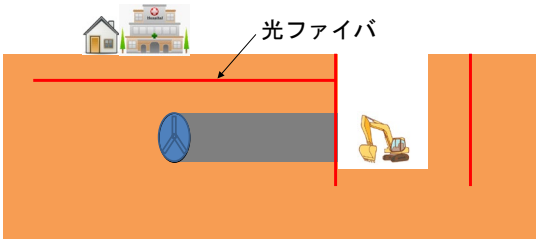


図-3 変位計測の適用イメージ

キーワード：光ファイバセンサ、歪分布、変位測定、レイリー散乱

連絡先 〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11 鹿島建設（株） 土木管理本部 TEL 03-5544-0642

3. 気中での変位実験

(1) 実験方法

全長 24m のアルミ角パイプ（断面 $80 \times 40\text{mm}$ 、4m 長 $\times$ 6 本）を単管パイプで組み立てた架台に載せ、パイプ表面（上面と側面）には 2 本の光ファイバを長手方向に全長接着した。計測器側のパイプ端部（原点位置）は、パイプの回転や変位がゼロになるよう固定した。10m 位置の高さを段階的に変えながら（ $\Delta=16, 32, 48\text{mm}$ ）、既存技術（空間分解能 200mm）とレイリー方式（同 20mm）でひずみ分布を計測した。実験の構成を図-4 に、その様子を写真-1 に示す。

(2) 実験結果

既存技術（ブリルアン方式）およびレイリー方式によるひずみ分布の計測結果を図-5～6 に示す。変位を 48mm 与えたときの結果である。両方式ともに、上面と側面の曲げによるひずみが正負反転している様子がわかる。また、それぞれ 10m 位置を中心にひずみの局所的な変化を確認できる。レイリー方式では、ひずみのピーク値が既存技術よりも大きい。これは、空間分解能の違いによる。さらに、計測精度の違いにより、レイリー方式ではひずみのばらつきが既存技術より小さい。ひずみがほとんど生じていない範囲（20～24m）におけるひずみの標準偏差は、レイリー方式では約 0.7μ であった。

パイプの上側と側面のひずみの差から曲げひずみを求め、計測器側の端部から積分することで、変形量を算出した。その結果を図-7 および 8 に示す。既存技術によれば、10m 地点では 4.4, 9.7, 13.0mm とわずかな変位に留まる。また、ひずみのばらつきが大きいことから積分誤差が変位計算に影響を与え、遠端の 24m 位置で最大 12mm を示している（ $\Delta=32\text{mm}$ 時点）。本来この位置は変位 0mm である。一方、レイリー方式では、10m 位置の変位は 16.1, 31.9, 48.2mm と変化し、段階的な変位 Δ を忠実に再現していることが分かる。また、24m 位置での変位はほぼ 0mm であった。

4. おわりに

建設構造物の挙動把握手段のひとつとして、高精度光ファイバセンサの更なる展開が期待できる。レイリー方式による変位計測を実験的に検証し、十分な精度が達成できることを確認した。地中変位計測への適用にあたっては、対象に応じた実装方法など解決すべき課題があるが、実用化に向けて更なる検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 今井道男, 一宮利通, 露木健一郎, 早坂洋太, 太田伸之: 光ファイバセンサによる 10 年間の PC 橋梁ひび割れモニタリング, 土木学会論文集 A1, 75(1), 17-25, 2019
- 2) 大窪一正, 今井道男, 曾我部直樹, 中上晋志, 千桐一芳, 二羽淳一郎: 緊張管理・維持管理に適用可能な光ファイバを用いた PC 張力分布計測技術の開発, 土木学会論文集 E2, 76(1), 41-54, 2020
- 3) Kishida, K., Yamauchi, Y., & Guzik, A.: Study of optical fibers strain-temperature sensitivities using hybrid Brillouin-Rayleigh System, Photonic sensors, 4(1), 1-11, 2014
- 4) 山中広大, 大西正洋, 今井道男, 氏家光晴, 片桐信: 地盤永久変位に伴う埋設管路損傷個所の検知方法に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 56, 1-37, 2014

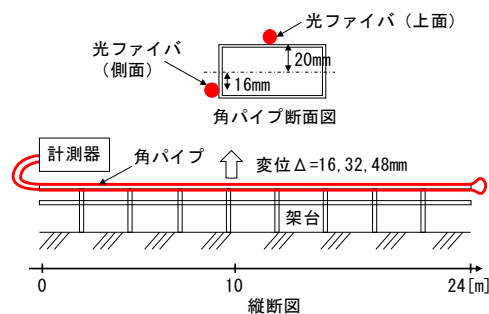


図-4 変位実験の構成



写真-1 変位実験の様子

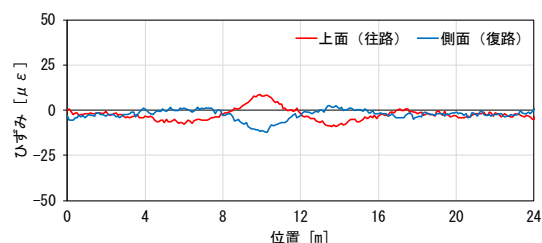


図-5 ひずみ分布計測結果（既存技術）

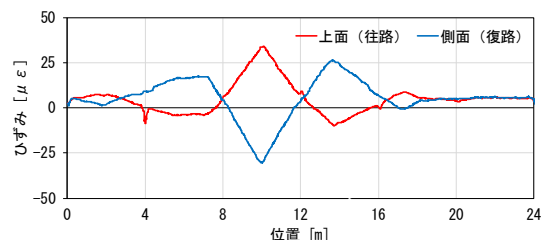


図-6 ひずみ分布計測結果（レイリー方式）

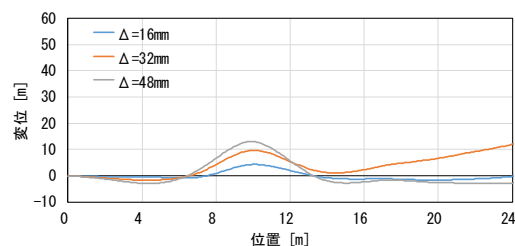


図-7 変位算出結果（既存技術）

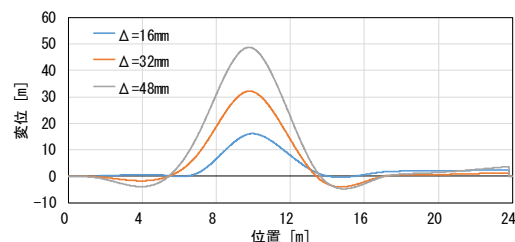


図-8 変位算出結果（レイリー方式）