

## (45) レーザー光とプラスチック光ファイバーを用いた多点鉛直変位計測手法の検討

杉井 良平<sup>1</sup>・荒瀬 航<sup>2</sup>・芥川 真一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 ライト工業（株） 西日本支社（〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-16-8）

E-mail: r-sugii@raito.co.jp

<sup>2</sup>正会員 ショーボンド建設（株） 近畿圏支社（〒536-0022 大阪府大阪市城東区永田 3-12-15）

<sup>3</sup>正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科 市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）

レーザー光とプラスチック光ファイバーを用いた多点鉛直変位計測手法の施工現場への適用性を検証することを目的とし、本手法を用いて模擬的な地表面沈下量を計測した。その結果、レーザー光源から計測位置の距離が 40.0m～60.8m の範囲では、計測値は実際に与えた変位量に対し、絶対値として±5mm の誤差を持つが、相対変位は 2 mm程度の精度で計測可能であることが確認された。この結果は、本手法がこれまで計測施工が行われなかったような中小規模工事を対象とした、簡易で廉価な計測システムとして用いることができる可能性を示唆する。

**Key Words:** laser beam, plastic optical fiber, multi-point vertical displacement measurement

### 1. はじめに

土木工事においては、施工と同時に施工中の安全確保・設計の妥当性の検証を目的とし、構造物や地盤・斜面の挙動の計測が行われる場合がある。例えば計測される要素が変位の場合、施工中の管理基準値は mm オーダーで設定される場合が多い<sup>例えは1),2)</sup>。この精度で変位を計測しようとする場合に用いられる機器として、電子レベル、水盛式沈下計、トータルステーション、レーザー距離計などが挙げられる<sup>1)</sup>。これらの計測機器は、信頼性は高いものの費用の問題から、計測施工が行われる施工現場は経費に余裕のある大規模工事に限られている傾向がある。伊藤ら<sup>3)</sup>は工事中の斜面崩壊による労働災害は、請負金額・工期・作業人数がいずれも小さな中小規模工事での被災がほとんどを占めていることを理由に、簡易で廉価な計測施工のシステムの必要性を指摘している。

ここで、Akutagawa・Machijima<sup>4)</sup>によって、社会インフラ全般の計測システムの低コスト化を目的に、プラスチック光ファイバー<sup>5)</sup>（以下、POF という）から構成されるセンサーを用いた計測手法が検討されていることに着目する。この手法では、計測対象の状況の変化を光情報（強度や色合い）の変化としてPOFで捉え、得られた光情報の変化を専用のデータロガーにより数値化すること

を基本概念としている。著者らは、この手法をさらに低コスト化するために、光情報の処理用データロガーをスマートフォンなどの携帯端末に置き換え、画像解析によりPOFが捉えた光情報を数値化する研究を行っている<sup>6)</sup>。本稿では、POFと携帯端末を用いた新しい計測手法の一例として、建設現場等において墨出し作業に用いられているレーザー墨出し器を併用した多点鉛直変位計測について検討した内容を述べる。

### 2. レーザー光を用いた多点鉛直変位計測の概要

図-1 にレーザー光を用いた多点鉛直変位計測の概念図を示す。レーザー光の照射装置は、廉価な計測システムを構築するために、市販されているレーザー墨出し器（レーザー波長 515～532nm：緑色）を用いる。レーザー墨出し器のレーザー光は面状に照射されるが、図-1 に示すように、鉛直方向にも照射距離に応じた幅をもっている。この時、一般にレーザー光の強度は中央部ほど強い分布となる。計測の初期状態としてレーザー光の中央部の高さにPOFが断面を光源に向けて設置されているとすると、POFが設置されている地盤が沈下した場合、POFが捉える光の強度は $I_0$ から $I(r)$ に減少することにな

る。本手法は、このような計測を多点で行い、捉えたレーザー光の強度の変化を光情報処理アプリケーションをインストールしたスマートフォンにより計測し、地盤の変位量を特定しようとするものである。

なお、現行の光情報処理アプリケーションは Android OS において使用が可能であり、1~900 点の同時計測が可能である。光情報処理アプリケーションでは光の強度として、赤 (R)・緑 (G)・青 (B) の三原色の成分の値を計測可能であり、それぞれ 0~255 の値をとる。本研究ではこのうち緑 (G) の成分のみを取り扱い、光強度  $G$  として定義する。

### 3. 室内実験

#### (1) 実験方法

本章では、POF の鉛直変位に依存するレーザー光の強度の分布を明らかにするために実施した室内実験について述べる。実験装置の構成を図-2 に、実験状況と光情報処理アプリケーションの稼働画面を写真-1 に示す。POF を 0.168mm/秒の速度で上下動させる変位装置を作成し、POF を水平方向に照射されているレーザー光を鉛直方向に通過させた。この際に POF が捉える光強度  $G$  と変位量の間関係を求めた。実験は照明を消した状態で室内で行い、計測間隔は 1 秒毎とした。レーザー光源から POF までの距離  $z$  は 10m~70m (10m 間隔) の 7 ケースとした。図-2 に示すように、1 本の POF の一端が断面をレーザー光源に向けた状態で変位装置に固定されており、もう一端の断面が遮光ボックス内で携帯端末の外部接続カメラで撮影されている。写真-1 (b) では、外部接続カメラが撮影している POF の断面が表示されている。本実験では、写真-1 (b) 中の黄色の正方形が光情報の計測領域として設定されており、この範囲の光情報の平均値が記録される。実験で使用した POF は東レ社製の POF (PGU-CD1001-22-E) であり、コアおよびクラッドの直径は 1.0mm、被覆も含めた直径は 2.2mm である。使用したレーザー光源は山真製鋸社製のレーザー墨出し器 (GLZ-3、波長: 532nm)、携帯端末は Xiaomi 社製のスマートフォン (M1910F4S) である。外部接続カメラは Andonstar 社製のデジタル顕微鏡 (A1) を使用

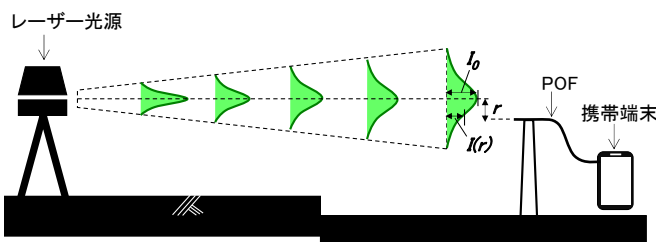


図-1 レーザー光を用いた鉛直変位計測の概念図

した。

#### (2) 実験結果・考察

図-3 に代表ケースの変位と光強度  $G$  の関係を示す。いずれのケースにおいても光強度  $G$  は、中央で最大値をとる左右対称の分布となることが確認された。この他のケースについても概ね同様の傾向が得られている。

ここでは、光強度  $G$  の分布の近似式化を試みる。光源からの距離  $z$  におけるレーザー光の強度分布は一般的にガウス関数で表され、レーザー光の中央からの距離  $r$  の位置の光の強度  $I(r)$  は式 (1) で得られる<sup>8)</sup>。

$$I(r) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-2 \cdot r^2}{w(z)^2}\right) \quad (1)$$

ここに、 $I_0$  : レーザー光の中央部の光の強度、 $w(z)$  : 光の強度が  $I_0$  の  $1/e^2$  (13.5%) となるレーザー光の中央部からの距離である。ここで、各ケースの実測値から、 $I_0$  と  $w(z)$  を抽出する。抽出例を図-3 ( $z = 30m$ ) に示す。なお、 $w(z)$  は左右の平均値としている。抽出した値を用いて光強度  $G$  を、 $r$  を変数とする関数で表したものが図-3 において近似値として示す曲線であり、各ケースの実測値と近似値は概ね整合している。図-4 に各ケースで抽出した  $w(z)$  と距離  $z$  の関係を示す。図-4 によると、 $w(z)$  と距離  $z$  は概ね比例関係にある傾向が認められ、図-4 中に示す近似式が得られる。

本実験で用いたレーザー墨出し器を計測に用いる場合、各距離  $z$  における  $I_0$  は、現場の照度や湿度等により変化することが予想される。一方、図-4 で示される  $w(z)$  と距離  $z$  の関係は不変であると仮定すると、ある計測点における  $I_0$  と距離  $z$  が既知である場合、POF が得る光強度  $G$  ( $I(r)$ ) と式 (1) を変形した式 (2) から、現状の変位

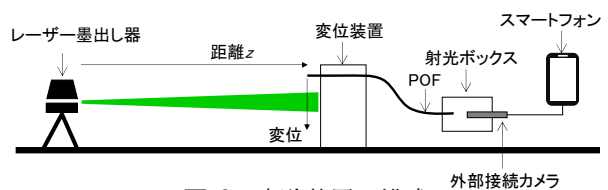
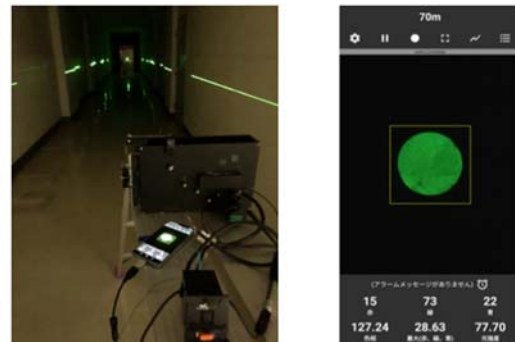


図-2 実験装置の構成



(a) レーザー光の照射状況 (b) 携帯端末の画面

写真-1 実験の実施状況

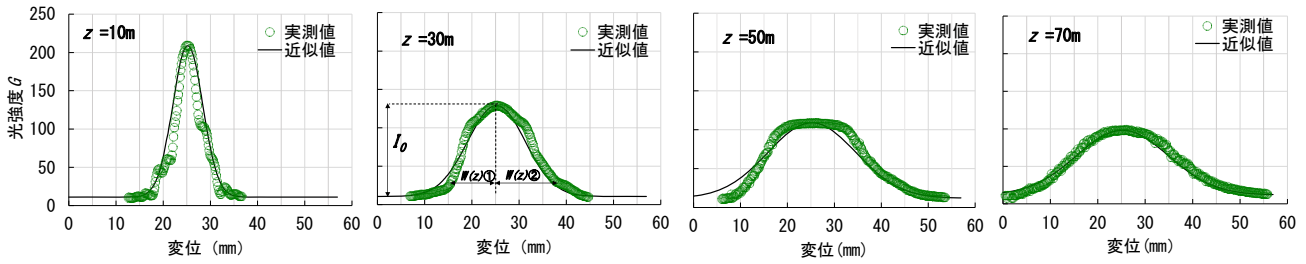


図-3 室内実験における変位と光強度  $G$  の関係

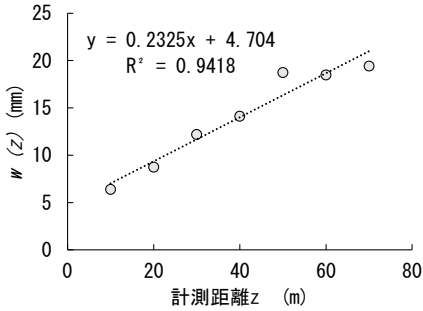


図-4  $w(z)$  とレーザー光源からの距離  $z$  の関係

量 (距離  $r$ ) を求めることができる可能性がある。

$$r = \sqrt{\log \frac{I(r)}{I_0} \cdot \frac{w(z)^2}{-2}} \quad (2)$$

## 4. 室外実験 (多点計測)

### (1) 実験方法

本章では、室外実験において、式 (2) を用いて光強度  $G$  から変位量を求めた結果について述べる。実験は夜間の屋外において、25本の三脚にPOFを取り付け、図-5に示す配置で同時鉛直変位計測を行った。光源から計測位置までの距離  $z$  は 40.0m~60.8m である。三脚の高さを所定の量ずつ減らすことで、広範囲の地表面沈下を模擬的に作り出し、各計測位置のPOFが捉える光強度  $G$  を計測した。三脚頭部の計測部には上・中・下の3本のPOFを10mm間隔で装着した(写真-2 A・B)。三脚の高さは、中段のPOFが得る光強度が概ね最大となる位置を初期状態とし、各ステップで全てのPOFを2mmずつ、合計28mm減じた。光強度の計測は、各ステップで全ての三脚の高さ調整が完了した後に1分間(5秒間隔)計測した。基本的な計測システムの構成・機材の仕様は前章の実験と同様である。写真-2 C・DにPOFの集約部と携帯端末に表示された各POFの断面の状況を示す。ここでは各POFの断面の位置に記憶領域が設定され、各POFの光強度  $G$  が計測される。

### (2) 実験結果・考察

図-6に実験で得られた代表計測点 (Line1-Row1) の変

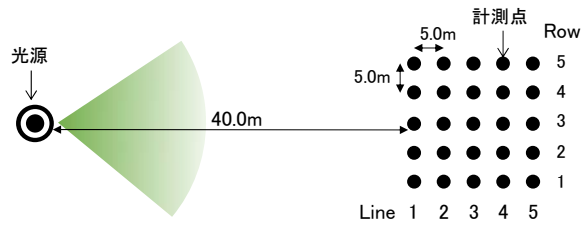


図-5 室外実験の計測点配置図

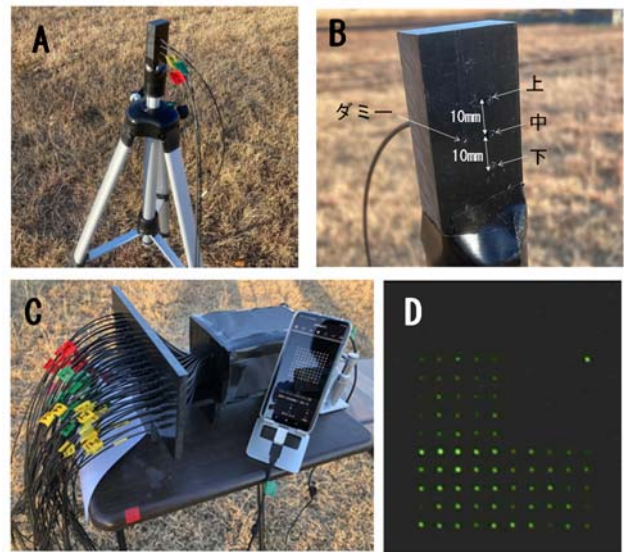


写真-2 A: POF を取り付けた三脚, B: 三脚頭部の POF 取り付け部, C: POF の集約部, D: 外部接続カメラで撮影される POF の断面。

位量と光強度  $G$  の関係を示す。各計測点の中段の計測結果をみると変位が増加するにつれ光強度  $G$  は最大値に近い値から減少していく。上段の計測結果をみると変位が増加するにつれて光強度  $G$  は徐々に増加した後に減少に転じる。上段の光強度が最初に増加傾向を示すことから、変位が下方に向かっていることが計測値から判断できる。下段の計測結果をみると、中段の計測結果よりも低い値から減少した後に概ね一定の値を示す。変位量が 8~10mm を超過すると下段の POF がレーザー光の幅から逸脱し光強度  $G$  が変化しなくなったものと考えられる。

実験で得られた光強度  $G$  と式 (2) を用いて算出した変位量と実際の変位量の関係の代表例を図-7に示す。算出にあたっては、各ステップで計測された中段の値の平均値を用いている。図-7によると各計測点の計算値

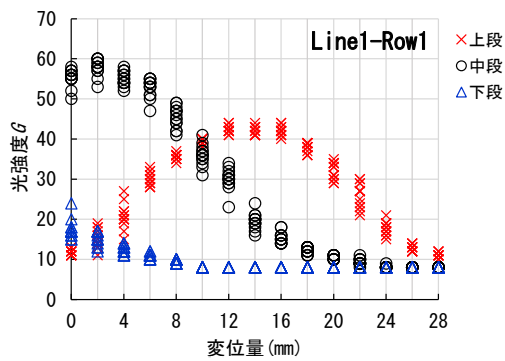


図-6 計測点 (Line1-Row1) の変位量と光強度  $G$

は実際に与えた 2mm ずつの変位に応じて増加していく。ただし、計算値の絶対値は真値に対して $\pm 5\text{mm}$ 程度の誤差を持つ。この傾向は Line2・3・4 においても同様である。図-7 において示す例では特に Line1-Row4 の誤差が大きい。この全体がスライドするような誤差の原因の一つとして POF の初期位置の設定誤差が挙げられる。

#### 4. まとめ

本手法を用いて模擬的な地表面沈下量を計測したところ、光源から計測位置の距離が 40.0m~60.8m の範囲では、計測値は実際に与えた変位量に対し、絶対値としては $\pm 5\text{mm}$ の誤差を持つが、相対変位は 2mm 程度の精度で計測可能であることが確認された。従来手法と比較すると計測精度は劣るものの、特殊な機器を用いないため、導入コストは従来手法の 1/10 以下に低減される。このため、これまで計測施工が行われなかったような中小規模工事を対象とした簡易で廉価な計測システムとして利用できる可能性が考えられる。また、センサーとして用いる POF が一本の場合には計測可能な変位量の幅はレーザー光の幅の範囲内に限られるが、室外実験で示したように複数の POF を設置することにより、計測可能な変位量の幅を広げることが可能である。また、本実験では鉛直変位を対象としたが、レーザー光の照射角度を変更することで任意の方向の変位を計測することも可能である。

今後の課題として太陽光の影響下での計測方法の検討が挙げられる。本実験は太陽光の影響を受けない室内や夜間の室外で行った。太陽光はレーザー光の光強度  $G$  を計測する際の外乱要因となることが予想され、この影響を低減させる方法を検討していく予定である。

**謝辞：**光情報処理アプリケーションソフトは日本学術振興会、科学研究費基盤(B)「土砂災害の予知モニタリングを従来の 1/10 以下のコストで実現できる方法の開発」(課題番号 20H02243, 2020~2022 年度)の支援を得て開発しました。ここに記して感謝いた

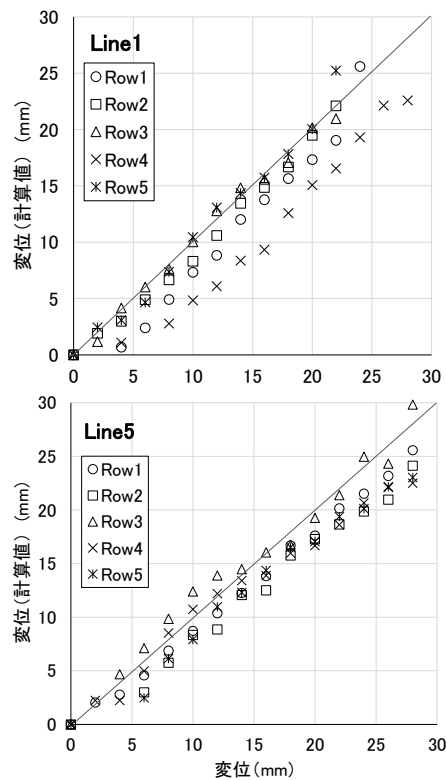


図-7 実際に与えた変位量と光強度  $G$  から計算した変位量

します。

#### 参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：都市近接施工ガイドライン，pp. 参 1-6-参 1-30, 2016.
- 2) 斜面防災対策技術協会：地すべり対策便覧，pp. 402-407, 2014.
- 3) 伊藤和也，武山峰典，豊澤康男・佐野哲也：レーザーと光センサーを利用した 2 次元変位計測システムの開発と切土斜面の動態観測への適用，土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 2, pp. 502-515, 2007.
- 4) Akutagawa, S., Machijima, Y.: A new optical fiber sensor for reading RGB intensities of light returning from an observation point in geo-materials, *Proc. of the 49<sup>th</sup> US Rock Mechanics/Geotechnical Symposium, American Rock Mechanics Association*, pp. 1-7, 2015.
- 5) 小池康博：プラスチック光ファイバー，*NEW GLASS*, Vol. 25, No. 1, pp. 20-23, 2010.
- 6) 芥川真一，井上雅之，林 稔，松村匡樹，土本真史：プラスチック製光ファイバーセンサーとスマートフォンアプリを用いた斜面モニタリングの低コスト化の実現に向けた研究，*Kansai Geo-Symposium 2020*, Vol. 8, pp. 209-214, 2020.
- 7) 杉井良平，芥川真一，井上雅之，佐々木拓海：プラスチック光ファイバーとモバイル機器を利用した斜面計測手法の基礎研究，令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，CS9-37, 2021.
- 8) 國分泰雄：先端光エレクトロニクスシリーズ 6 光波工学，pp. 76-80, pp. 215-219.