

# 論文 光ファイバ計測(B-OTDR)における距離分解能向上策の性能評価

福呂 篤史<sup>\*1</sup>・鳥越 寿彦<sup>\*2</sup>・水口 裕之<sup>\*3</sup>・上田隆雄<sup>\*4</sup>

**要旨:** 光ファイバセンサを用いた計測は、コンクリート構造物など、構造物全体をリアルタイムに監視できるモニタリング技術として注目されている。しかし、ある長さより短い距離を計測すると、多くの誤差が含まれてしまうため適用可能最小距離という下限の計測距離が存在する。本研究では、滑車を用いて、従来の適用可能最小距離より短い距離の計測の可能性について、標準的な計測方法と室内実験で比較検討を行った。その後、実構造物に適用できるかどうかの現場検証を行った。その結果、標準の計測方法と同程度の性能があることが分かり、また現場においても十分適用できることが確認できた。

**キーワード:** 光ファイバ計測, 光ファイバセンサ, B-OTDR, 適用可能最小距離, 滑車

## 1. はじめに

二十一世紀、我が国では既に多くのコンクリート構造物が造られており、新規構造物の建造が減少する中で、新規構造物はもとより、既設構造物をいかに長期間使用できるようにするかが問題となってくる。そのためには、日常のメンテナンスが必要不可欠である。そこで、遠隔操作により構造物全体をリアルタイムに監視することができる光ファイバセンサによる計測法が開発され注目されている。光ファイバ計測(B-OTDR)は主にひずみや温度を計測することを目的としており、構造物の変位やコンクリートのひび割れ等を早期発見することが期待できるモニタリング技術である。

しかし、光ファイバ計測(B-OTDR)の問題点の一つとして、適用可能最小距離が挙げられる。適用可能最小距離とは、ある長さより短い距離を計測すると、計測値に多くの誤差が含まれてしまう下限の計測距離のことである。したがって、適用可能最小距離より短い距離は計測不可とされている。例えば、自動計測によって監視する場合、2km の計測では 3.24m が適用可能最

小距離となる。このため、橋桁側面や目地開き部、地下トンネル内空部等の計測距離が十分確保できない場所は正確に計測することができず、構造物全体の挙動を把握することが困難となる。

本研究では、滑車を用いて光ファイバセンサを往復させると、同じ計測距離でもセンサ長を2倍にできるため、標準的な方法では計測できなかった適用可能最小距離より短い距離を計測できると考えた。図-1 に滑車を使用した計測の概念図を示す。この滑車を用いた計測方法の性能を評価するために、室内実験および現場検証を行い、滑車を用いた方法の適否の調査と現場への適用性を検討した。

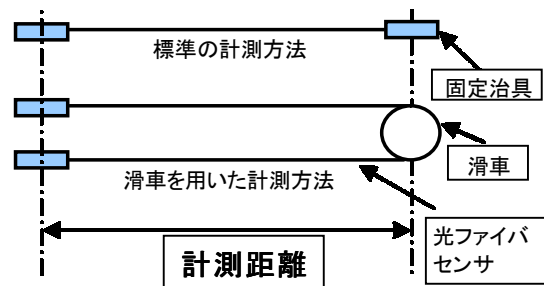


図-1 滑車を用いた計測方法の概念図

\*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学大学院 工学研究科マクロ制御工学専攻 (正会員)

\*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 (正会員)

\*4 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (正会員)

## 2. 光ファイバ計測 (B-OTDR) の概要

### 2.1 B-OTDR

光ファイバ計測では光ファイバケーブルをセンサとして用いることで、ひずみや温度を計測することができる。中でも B-OTDR はケーブル長手方向に生じるひずみを連続かつ長距離計測することができるため、地盤や構造物の形状変化を計測するのに用いられている。表-1 に今回の実験において設定した計測仕様を示す。

表-1 B-OTDR 計測仕様

計測精度	$\pm 40 \times 10^{-6}$	
距離レンジ	2km	
ひずみ計測範囲	約 $-15000 \times 10^{-6} \sim 15000 \times 10^{-6}$	
読み取り分解能	距離	10cm
	ひずみ	$1 \times 10^{-6}$
距離分解能	1m	
パルス幅	10ns	
ダイナミックレンジ	2dB	
距離確度	$\pm(2.0 \times 10^{-5} \times \text{距離レンジ} (\text{m}) + 2.2) \text{m}$	

### 2.2 適用可能最小距離

光ファイバ計測(B-OTDR)を行う場合、適用可能最小距離という問題が生じる。適用可能最小距離とは、ある長さより短い距離を計測すると、計測値に多くの誤差が含まれてしまう下限の計測距離のことである。この値は、光ファイバ計測(B-OTDR)の性能である「距離分解能」と「距離確度」の和によって決定される。

距離分解能は光ファイバケーブルの内部を通る光の速度にパルス幅を乗じて、1/2 した値である。これ以下では、計測距離が 1 パルス幅より小さくなり、計測対象外のひずみも読み取ることになる。

距離角度とは表示される計測地点と実際の計測地点との誤差のことである。図-2 に距離確度のイメージ図を示す。光ファイバ計測(B-OTDR)では稀に図-2 のように表示される計測地点がシフトすることがある。光ファイバ計測では、ひずみの算出に、ある基準点との相対ひずみを基に管理している。そのため、計測距離が計測角度以下の場合に、計測地点がシフトしてしまうと、多くの誤差が生じて

しまう可能性がある。手動計測の場合は距離角度を補正できるため、考慮する必要はないが、自動計測の場合は考慮する必要がある。

したがって、計測距離を決定するときには「距離分解能」と「距離角度」を考慮した計測距離を選定する必要がある。

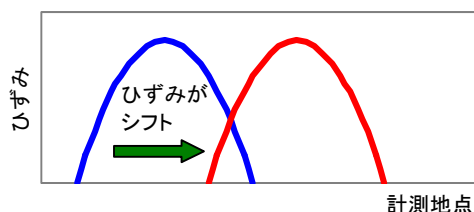


図-2 計測確度の概念図

## 3 室内実験

### 3.1 実験計画

滑車による計測方法の性能を評価するためには、以下の 2 項目を検証する必要がある。

- (1)滑車を用いた計測方法（以下滑車法と書く）と標準的な計測方法（以下標準法と書く）の精度の比較
- (2)適用可能最小より短い距離、つまり標準法では計測できない距離における、滑車法による計測精度

2 項目を検証するために、温度一定の室内で次の 2 段階に分けて実験を行った。(1)を検証する実験を室内実験 A、(2)を室内実験 B とした。

室内実験は手動計測で行ったため、適用可能最小距離は計測角度を考慮する必要はなく、1 m となる。

### 3.2 実験装置

図-3 に室内実験において使用した実験装置の概要を示す。実験装置の土台に H 鋼を用い、その上に金属プレートを 2ヶ所配置した。プレート上には固定治具および滑車を固定し光ファイバセンサを設置した。光ファイバセンサは、標準センサ（現在使われている標準的な方法で、両端を固定治具で固定したセンサ）1本と滑車センサ（滑車を用いたセンサ）を 1本の計 2本のセンサを取り付けた。また、金属プレート的一方は固定部とし、もう一方は可動部として、土

台に平行にのみ動かせるようにした。この移動量はダイヤルゲージで 0.01mm まで読み取れるようにした。なお、金属プレートは取り外しができるため、計測長は自由に変えられるようにした。

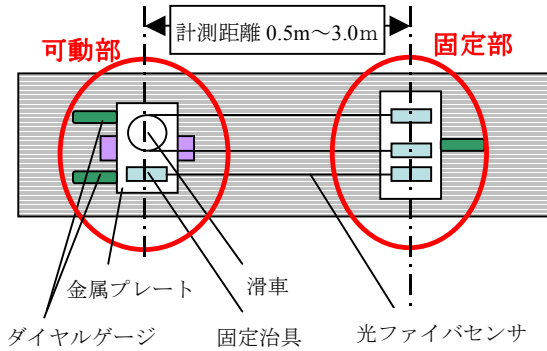


図-3 室内実験装置の概要

光ファイバセンサは計測用に改良された B-OTDR 計測用薄肉センサを用いた。このセンサは、図-4 に示すように、光ファイバ心線を耐久性や計測精度を向上させる目的で金属や樹脂(ポリエチレン)で補強したセンサである。

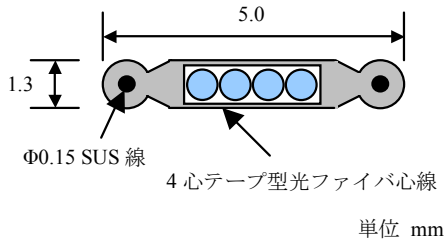


図-4 B-OTDR計測用薄肉センサ断面

滑車の半径は光ファイバセンサの中を通るレーザー光が漏洩しない曲率半径である 30mm (直径 60mm) とし、材質は硬質プラスチックのものをを使用した。図-5 に滑車図を示す。

### 3.3 室内実験の方法

室内実験 A は、滑車法と標準法の精度の比較をするために行った。計測距離は適用可能最小距離 1.0m より長い 2.0m とした。可動部の金属プレートを動かし、両方の光ファイバセンサに変位を与えた。金属プレートは 0.50mm ピッチで 4.00mm まで引張方向に移動させた。このとき、

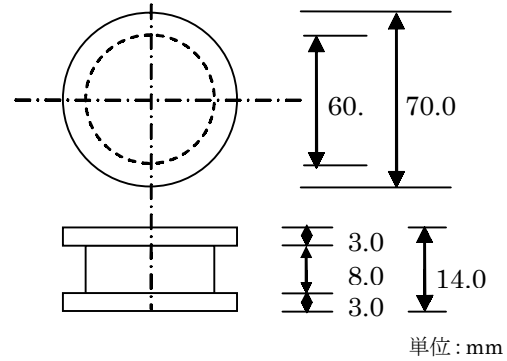


図-5 滑車図

与えた変位を光ファイバセンサで計測し、それをひずみで読み取り計測値とした。また、センサ長と金属プレートの移動量 (ダイヤルゲージ) から算出したひずみを基準値とした。基準値を真の値として扱い、計測値と基準値の差から各センサの性能を評価した。

室内実験 B は、適用可能最小距離より短い距離、つまり標準法では計測できない距離において、滑車法による計測精度を検討するために行い、計測距離を適用可能最小距離 1.0m より短い 0.80m とした。金属プレートは 0.20mm ピッチで 1.6mm まで引張方向に移動させた。室内実験 B も実験 A と同様に基準値を求め、計測値と基準値の差から、性能を評価した。

## 4. 室内実験結果及びその考察

### 4.1 室内実験 A

図-6、図-7 は室内実験 A の実験結果を示す。これらの図を見ると、標準法および滑車法とも計測値と基準値には大きな差がないことが分かる。表-2 に基準値と計測値の差を示す。この表を見ると、標準法の基準値と計測値の差の最大値は  $114 \times 10^{-6}$ 、滑車センサは  $128 \times 10^{-6}$  となっている。このように、適用可能最小距離より長い距離の計測では、滑車を用いた計測方法は従来の計測方法と同程度の精度を得られることが分かる。なお、図-6、図-7 の基準値の傾きと計測値の傾きが若干異なっている。これは、変位が内部の光ファイバ心線に完全に伝わらなかった可能性が考えられる。

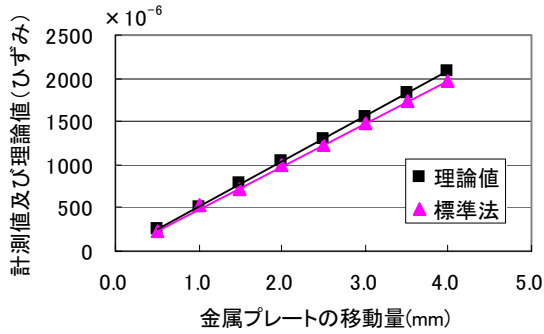


図-6 室内実験Aでの標準法による計測結果

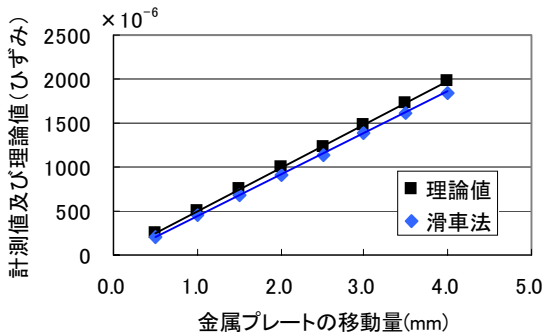


図-7 室内実験Aでの滑車法による計測結果

表-2 室内実験 A での基準値と計測値の差

金属プレートの移動量 (mm)	理論値と計測値の差(ひずみ) $\times 10^{-6}$	
	標準法	滑車法
0.5	39	47
1.0	-1	41
1.5	57	63
2.0	52	72
2.5	68	100
3.0	74	99
3.5	95	107
4.0	114	128

#### 4.2 室内実験 B

図-8, 図-9 は室内実験 B での標準法及び滑車法の実験結果を示す。表-3 は室内実験 B での基準値と計測値の差を示す。図-8, 図-9 に見られるように、標準法は基準値と計測値の傾きが大きく異なっていることが分かる。しかし、滑車法では基準値と計測値の差は小さくなっている。これは、標準法では適用可能最小距離より短い計測距離では正確に計測することができず、多くの誤差が含まれることが示されている。

一方、滑車法は精度が高く計測することができ、室内実験 A と同程度の精度であることが示されている。したがって、滑車を用いることで、標準の計測方法では計測できなかった適用可能最小計測距離よりも短い距離でも精度高く計測できることになる。

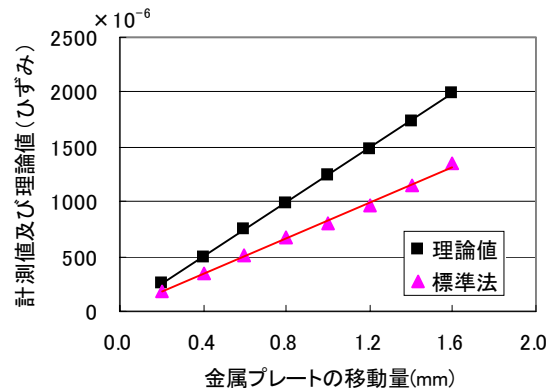


図-8 室内実験Bでの標準法による計測結果

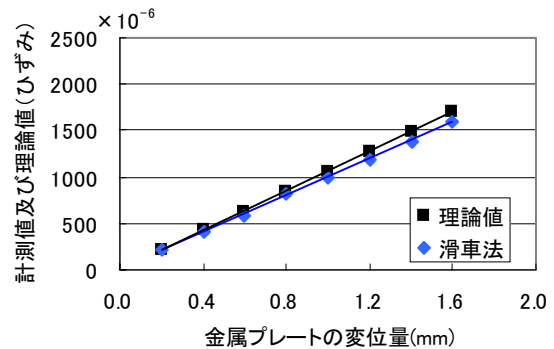


図-9 室内実験Bでの滑車法による計測結果

表-3 室内実験 B での基準値と計測値の差

金属プレートの移動量 (mm)	計測値と理論値の差(ひずみ) $\times 10^{-6}$	
	標準法	滑車法
0.2	61	-6
0.4	142	24
0.6	240	46
0.8	310	22
1.0	429	59
1.2	523	85
1.4	590	97
1.6	629	98

## 5. 現場検証

### 5.1 現場検証の方法

室内実験によって、滑車法は標準法と同じ精度で計測できることが分かった。そこで、地下トンネル内で現場検証を行った。地下トンネル近傍では立坑の構築工事のための薬剤注入が予定されていたため、地盤が変化し、トンネルが変形する可能性があった。そこで、工事によるトンネルの変形を光ファイバ計測で監視を行った。図-10 は工事位置と内空変位センサ設置場所を示す。図のⅠ～Ⅶは断面変化を計測する内空変位センサの設置場所である。工事の影響が最も大きい場所を断面Ⅳとした。断面Ⅰは工事による予想影響範囲外に設置して、季節変化に伴うトンネルの挙動の監視を行った。30分毎に計測を行い、9ヶ月に渡ってトンネル変形の監視を行った。

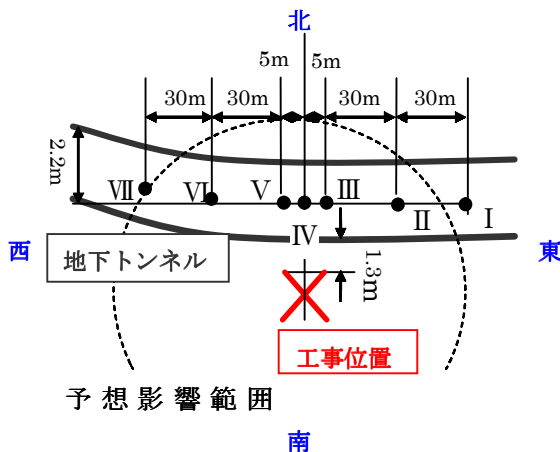


図-10 工事位置及び内空変位センサ設置場所

図-11 にトンネルの断面を示す。トンネルの内空変位を調べるために水平方向と鉛直方向が直角になるように設置した。現場検証は自動計測で行うため、適用可能最小距離は3.2mとなった。水平、鉛直共に適用可能最小距離より短いため、滑車法で計測を行った。また、トンネルの長さ方向の変形の計測も行った。長さ方向変位センサはトンネル上下部と北側、南側に各1本ずつ、計4本設置した。図-12 に地下トンネル内壁に取りつけた滑車写真を示す。

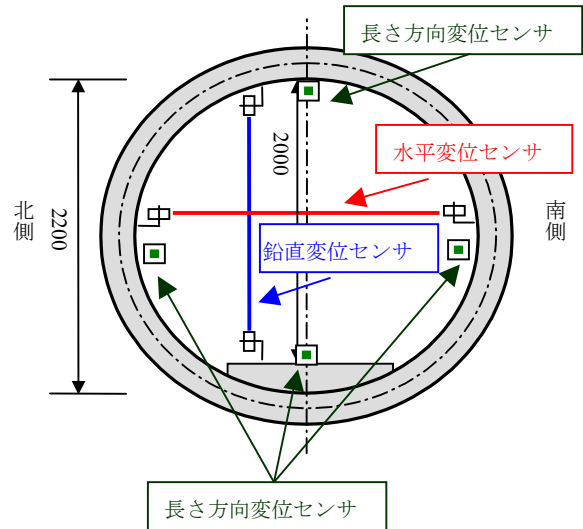


図-11 トンネル断面



図-12 滑車写真

## 5.2 検証結果

### 5.2.1 内空変位

図-13、図-14 に断面Ⅳおよび断面Ⅰの内空変位を示す。図-13 は最も影響が大きいと考えられる断面Ⅳの内空変位の図である。図-13を見ると、計測開始から約50日付近で地下トンネルの鉛直方向と水平方向が急激に変化していることが見て取れる。数値は鉛直方向がプラスに水平方向がマイナスの値を示している。これは立坑構築工事の薬剤注入の時期と一致する。したがって、この変形は薬剤注入時の注入圧によって生じたものと考えられる。図-14 は工事による影響がないと考えられる断面Ⅰの内空変位の図である。地下水の影響により緩やかに曲線を描いていることが分かる。したがって、図-13の急激な変形は工事によって生じたものとほぼ断定できる。

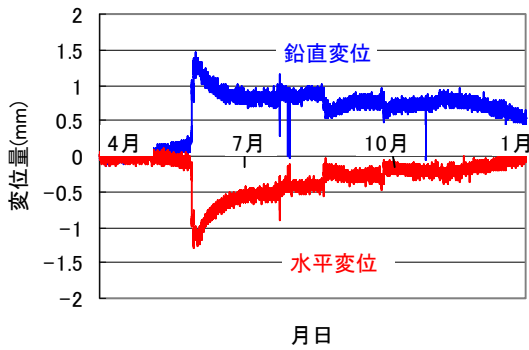


図-13 断面IVの内空変位

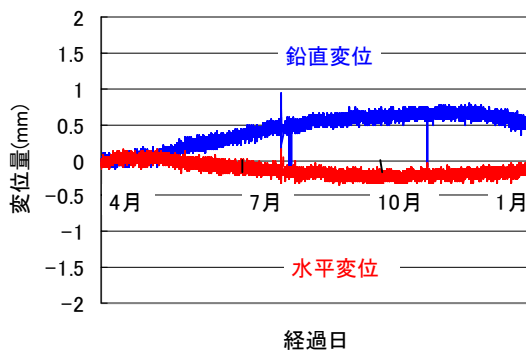


図-14 断面Iの内空変位

### 5.2.2 長さ方向の変位

図-15, 図-16 に断面IVの長さ方向変位を示す。図-15, 図-16 は最も影響が大きいと考えられる断面IVの長さ方向の変位の図である。図を見ると、断面変位と同様に、上部および北側が急激に変化していることが分かる。両者ともひずみはプラスとなっており、トンネル上部および北側には引張力が働いていることになる。

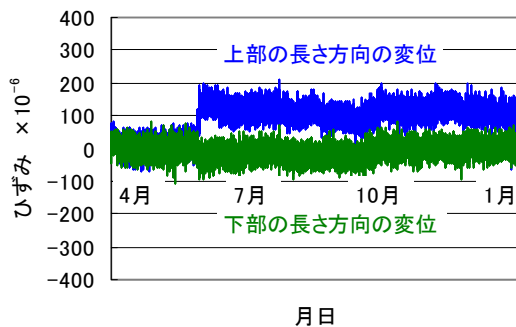


図-15 断面IVの上部, 下部の長さ方向の変位

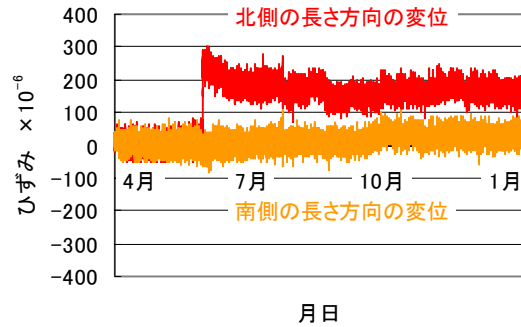


図-16 断面IVの北側, 南側の長さ方向の変位

### 5.2.3 工事後の地下トンネル調査

地下トンネルが変形したため、内部調査を行った。上部および北側に長さ方向のひびわれが入っていた。これは、トンネル上部および北側に引張力が働き、ひびわれが発生したと考えられる。内部調査の結果は計測結果と一致した。滑車法は、適用可能最小距離以下でも、高精度で計測できることを確認できた。したがって、地下トンネル等内径が限定される線状構造物において、提供できることが分かった。

## 6. まとめ

- (1)滑車を用いた計測方法は、標準の方法と同程度の精度で計測できた。
- (2)滑車を用いた計測方法は、本実験の結果では、従来の適用可能最小距離 1/2 程度までの短い距離でも十分な計測精度があることが分かった。
- (3)滑車を用いた計測地下トンネルの内空変位を計測すると、トンネルの変形を十分な精度で監視することができた。したがって、滑車を用いた計測方法は、十分実用レベルであると判断できる。

## 参考文献

- 1)安藤電気(株式会社),光ファイバ歪みアナライザ取扱説明書
- 2)土木学会メンテナンス工学連合小委員会,社会基盤メンテナンス工学,pp184-186,2004
- 3)谷川恭雄,コンクリート構造物の非破壊検査・診断方法,pp9-pp12,2004