

光ファイバケーブルセンサによる切羽先行変位計測の基礎実験

大成建設株式会社 正会員 ○坂井 一雄 赤木 俊文
東亜エルメス株式会社 田中 茂 堀留 知徳

1. 背景と目的

脆弱な地山条件下でのトンネル工事や、都市部で周辺構造物や地表面に対する影響監視が求められるトンネル工事では、切羽到達前の地山挙動を計測して、できるだけ早期に対策を講ずることが必要になる場合がある。この目的で、しばしばトンネル坑内から計測器を設置する方法で、切羽先行変位計測が実施される¹⁾。しかし、従来手法では、傾斜センサを使用するため鉛直方向の沈下や隆起だけが計測対象であった。大土被りトンネルで、鉛直方向応力よりも水平方向応力が卓越する場合や、岩盤物性の異方性が顕著な場合には、切羽通過後変位と同様に切羽先行変位も、沈下よりも水平変位が支配的になる場合がある。このような事例に対応することを目的に、多点でケーブル延長方向のひずみを計測することが可能な光ファイバケーブルセンサを複数本組み合わせる事により、ケーブル全体の曲げひずみを評価して、先端部からの鉛直および水平変位量を同時に評価できる計測システムの研究開発を進めている。本報告では、採用した光ファイバの測定方式について概説し、切羽先行変位評価を目的とした計測器械の構成とそれを用いた室内曲げ試験の結果を示す。

2. 光ファイバ測定方式

代表的な光ファイバセンサの一つである FBG(Fiber Bragg Grating)センサは、ひずみを精度良く測定できるセンサとして広く実用化されている。一般的に用いられる WDM(Wavelength Division Multiplexing)や TDM(Time Division Multiplexing)方式は、FBG センサ部だけの単点の測定技術であった。しかし光ファイバケーブル全長に渡ってグレーティングが施された AGF(All Grating Fiber)と、1mm 以下の高い位置分解能を達成できる測定方式 OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)が開発されてきた²⁾。表-1 に OFDR 方式の特徴を示す。ケーブル全長にわたり、高分解能・高精度でのひずみを測定することができるため、mm 単位での評価が必要な山岳トンネルの切羽先行変位計測にも適用することが可能であると考えた。

3. 計測器械の構成

計測器械は切羽から前方に打設した長尺鋼管内に設置することを想定した。AGF は全長にわたってグレーティングが施工されるため、BOTDR などの分布型計測に用いられる光ファイバケーブルよりも高価である。そこで、鋼管内に設置した AGF を回収でき、再計測が可能な設置形態を考案した。図-1 に計測器械断面図を示す。AGF を貼り付けた PVC 平板を 4 組準備し、それらを角パイプの内側よりパッカシステムと一緒に挿入する。計測時にはパッカを加圧拡張させることにより、光ファイバを角パイプ内側に押し付けて、地山および鋼管から充填材を

表-1 OFDR 方式の特徴と切羽先行変位計測への適用性比較

	FBG	BOTDR	OFDR
	単点型計測	分布型計測	
計測精度(ひずみ)	±1με	±20με	±1με
計測レンジ	±10000με	±7500με	±10000με
空間分解能	既知点での計測を対象	1m	1mm以下
計測時間	瞬時	5~10分程度	瞬時
計測可能長	1点	5km	~20m程度
切羽先行変位計測への適用性	局所的な位置におけるひずみ計測であるため、変位評価が困難	空間分解能の課題があり、微小区間のひずみを累積する変位評価が困難	通常施工される長尺鋼管先受け工長であれば、高い精度と空間分解能を達成できるため、切羽先行変位の評価が可能

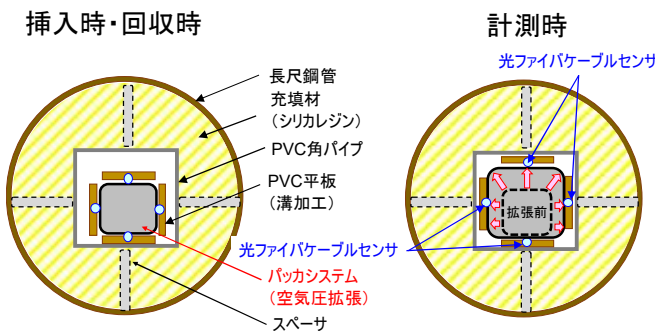


図-1 光ファイバ切羽先行変位計測器械の断面図

キーワード 山岳トンネル 切羽先行変位計測 光ファイバ OFDR

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設株式会社技術センター TEL045-814-7221

介して伝わる角パイプの変形量を計測する。計測完了後にパッカを減圧することで、角パイプ内のパッカおよび平板を回収できる。切羽先行変位計測では、計測器械の先端部の変位を不変、また計測器端末部の変位は坑内測量により既知であるとし、初期値取得時からの AGF の形状変化を切羽先行変位として評価する (図-2)。

4. 室内曲げ試験

図-1 の器械断面図のうち長尺鋼管および充填材を除く、光ファイバ切羽先行変位計測器械を 9m の延長で試作し、曲げ変位測定試験を実施した (図-3)。運搬や設置施工性を考慮して、PVC 角パイプおよびパッカは 3m の部材をそれぞれ鋼製ソケットとジョイントで接続した。AGF 貼付け箇所には溝加工を施した PVC 平板は、3m の部材を予め接続した状態でセンサの貼付け作業を実施し、一体の部材とした。

図-4 と図-5 に試験結果のうち、中間部 (変位モード A) および端末部 (変位モード B) に鉛直および水平方向に、同時に 10mm ずつ 50mm まで変位を付与した時の結果を示す。変位量は上下および左右のセンサで計測した部材延長方向のひずみから、鉛直および水平方向の曲率を求め、2 回積分することにより算出した。この時、計測器先端は不動点、端末側は変位量既知であると仮定した。光ファイバによる変位の測定間隔は試行的に 6mm (9m で 1500 点の計測) とした。両図に示すように、両変位モード共に、外部変位計で計測された変形モードを十分に測定できている。ただし、変位モード A では、鉛直方向で変位計 2~5 にかけて全体的に値が小さく、変位計 4 の位置で最大 5mm の乖離が見られた。試験後の観察結果から、パッカ挿入時の固定不足によって、鉛直方向に向かい合う 2 枚の PVC 平板が水平方向の 2 枚よりも断面内でずれが大きくなり、正しく角パイプの曲率を評価できなかったことが乖離の原因の一つであると推察された。

5. まとめ

鉛直・水平方向の切羽先行変位を同時に取得可能な光ファイバケーブルセンサを用いた切羽先行変位計測システムを考案し、試作機で室内曲げ変位測定試験を実施した。鉛直、水平変位ともに高精度な評価が可能であることを確認した。今後、山岳トンネルでの現場計測試験を実施して、設置施工性や回収・再設置の実現性を確認したいと考えている。

参考文献

- 1) 坂井他：都市部山岳トンネルにおける切羽先行変位を用いた計測管理手法、第 44 回岩盤ソポ講演集, pp. 92-97, 2016.
- 2) 田仲他：OFDR 方式を用いた FBG センサによる高位置分解能計測の適用性の検討、第 65 回年講, pp. 363-364, 2010.

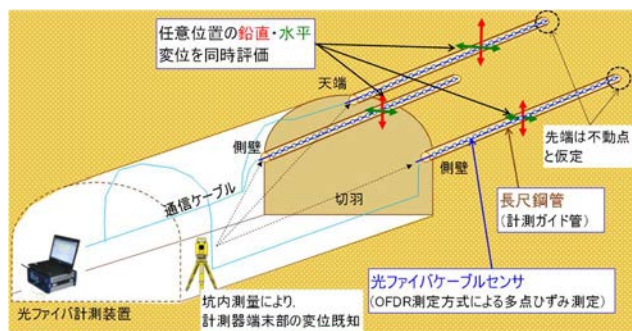


図-2 光ファイバケーブルセンサによる切羽先行変位計測の概念図

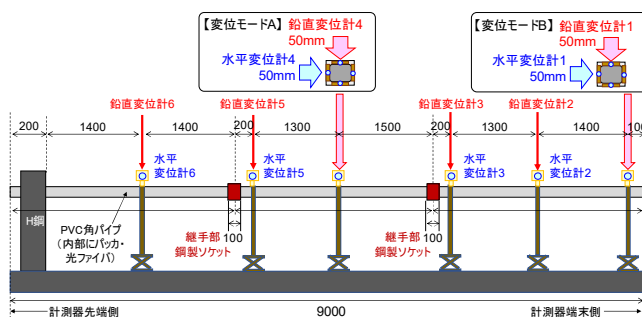


図-3 曲げ変位測定の全体図と試験条件

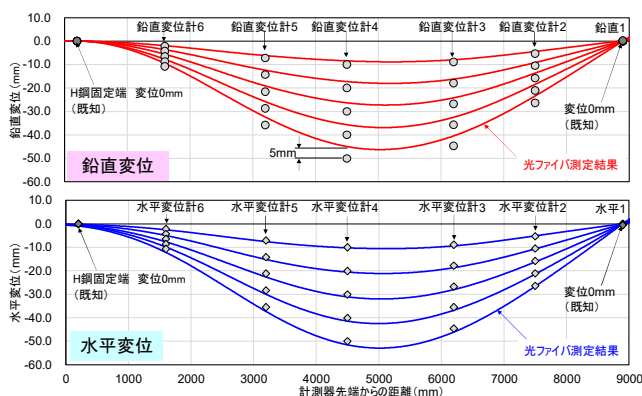


図-4 曲げ変位測定試験の結果【変形モード A】

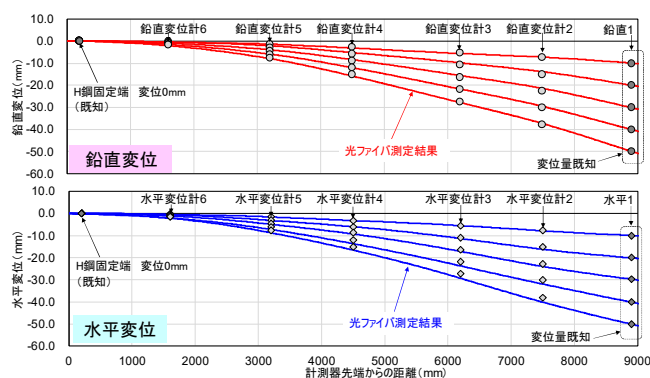


図-5 曲げ変位測定試験の結果【変形モード B】