

光ファイバーを用いた 切羽前方変位の低コスト・リアルタイム モニタリング装置の試作

寺嶋 将¹・張 海華²・辻村 幸治³・芥川 真一⁴

¹非会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
125t127t@stu.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
haihua_1314@hotmail.com

³正会員 株式会社 エス・ケー・ラボ 代表取締役 (〒547-0012 大阪市平野区長吉六反3丁目17-29-E)
tsujimura@sk-lab.com

⁴正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 教授 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
cadax@kobe-u.ac.jp

現在、計測装置の高度化が進展する一方、建設工事中の事故による人的被害は存在し続けている。この原因として、①計測装置が非常に高価格であり、変状が予想される箇所全てに常時設置することは不可能であること、②変状発生から情報伝達が遅く、避難等の判断に至るまで時間を要することなどが考えられ、そのため突発的・予測不能事態には対応が困難である。特にトンネル切羽では、多数の作業員が作業を行っており、情報伝達の迅速化が急務である。これらの問題を解決するために、本研究では切羽前方の変位を低コスト・リアルタイムでモニタリングする計測装置に関する基礎的検討を行ったのでその概要を報告する。

Key Words : device measuring displacement , ahead of a tunnel face, optical fiber

1. はじめに

トンネル工事において施工中に切羽の前方変位を計測することは、トンネルの品質・安全及び経済性の向上を目指す上で極めて重要となる。しかし、現在、一般的に使用されている地中変位計は、高度化・データ管理の進化・IT化が進展する一方で、建設工事中の事故による人的被害は存在し続けているという問題を持つ。

この原因として、計測装置が精度に比例し高価格であるため、変状が予想される全ての箇所に常時設置することがコストの制約上、不可能であることが挙げられる。また、計測装置が変状を感知してから情報が伝達されるまでに時間を要し、避難等の判断に至るまでの時間が遅くなってしまうことが考えられる。そして、これらの原因から、突発的または予測不能事態には対応が困難であり、被害が存在し続けていることがわかる。

特にトンネル切羽では、異常出水等による突発的崩壊や切羽崩落などの危険現象の可能性が潜在的に存在する

ため、そこで作業する人員の安全確保のためには、情報伝達の迅速化が急務である。

本報では、これらの問題を解決する切羽前方の変位を低コスト・リアルタイムでモニタリングする新しい計測装置の原型についての模擬実験を行ったので、その概要について紹介する。

2. OSV技術について

問題を解決するために本研究ではOSV (On Site Visualization) ^{1)~9)}という考えに基づいて研究を進めた。OSVとは、工事の安全対策の一環として、現場で起きた計測結果による情報を光の色の変化により視覚的にリアルタイムに表示するシステムであり、これを用いることで、図-1に示すように現地で安全及び危険情報を表示する概念である。これにより事故の原因が発生しても作業員がそれに気付く確率が上がることによって、対策や退避等の

表-1 光ファイバー仕様¹⁹⁾

型番	材質	ファイバー径 (mm)	最小曲げ半径 (mm)	使用温度範囲 (℃)
DB-1000	プラスチック	10	20	-40~+70

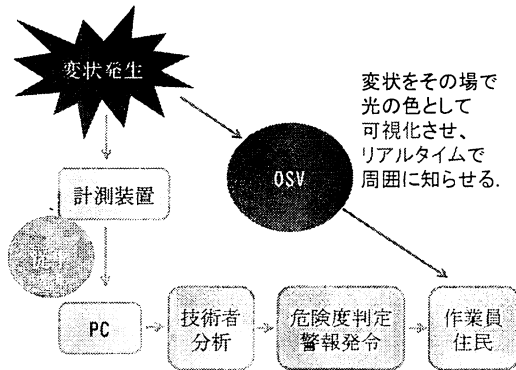


図-1 従来とOSV概念を適用した場合の警戒・避難システムの流れ

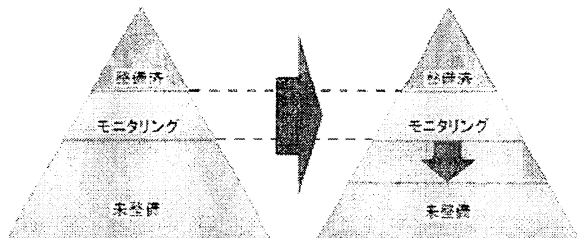


図-2 OSV概念による効果

行動を起こすことにより未然に被害を防ぐ可能性が高くなることが期待できる。また、作業位置での情報の表示によって、従来必要であった、観測システムを縮小することができ、さらに、情報の伝達に時間的な遅れはほとんどなく、確実に情報を伝えることができる。管理面においては、情報が作業位置に可視化されることで効率的な管理が可能となり、作業に活かすことで施工の最適化が行われ、コストに余裕が出ると考えられる。また、コストの縮減が可能になれば、図-2に示すように従来の方法では予算不足のため観測できなかった危険地域に対して、新たな計測を行うことが可能になり、突発的事故に対しても対応可能になる。

3. 光ファイバーを用いた新たな地中変位計の概要

ここで、OSV概念に基づき、光ファイバーの先端に表示される光の色の変化により計測点の変位をリアルタイムに計測する装置を試作した。なお、今回用いる光ファイバーは、高速通信回線等で用いられるガラスファイバーと比較して安価で、曲げに強いプラスチックファイバーを用い、光ファイバーの先端で表示される光の有無・色のみを利用する。なお、本研究で用いた光ファイバーの仕様を表-1に示す。

計測装置は図-3に示すように設置され、最奥の固定点Fと計測点Aの間に生じる相対変位を検知し、その大きさが光の色として切羽で見えている光ファイバーの断面（観測点O）に表示されるようにするものである。固定点には電源と白色光源を置き、この光を1本目の光ファイバー（FからAまで）に送りこむ。計測点A付近でファイバーはいったん途切れており、2本目の光ファイバー（AからOまで）が1mm程度のギャップの後におかれている。このギャップには複数の色を有し、光を透過することができるカラーフィルターが置かれており、それは装置外部にある移動物体に取り付けられているため、地盤に変形が生じ、それに応じて移動物体が動いた場合に、カラーフィルターをすこしずつ引きずり出すことになる。この変位によるカラーフィルターのずれによって、1本目の光ファイバーで届けられた白色光に色をつけ、それを2本目の光ファイバーに送りこむことができる。したがって、その最後の断面が露出している切羽において、FA間に生じている相対変位の大きさが、図-4に示すように光の色の変化として視認できるようになっている。

すなわち、フィルターの色の幅を設定することで、観測部の光の色からその時点での計測点の地山変位量を計測することができる。したがって、切羽前方の地山変位量をリアルタイムに観測できることがいえ、突発的事故に対しても作業員が避難等の対応を取ることが可能であると考えられる。

カラーフィルターにおいて用いる色の数やそれぞれの色の幅を適切に決めることで、対象としている地山の許容ひずみを十分に考慮したうえで、切羽前方の安全性を作業員が光の色として確認できることになる。

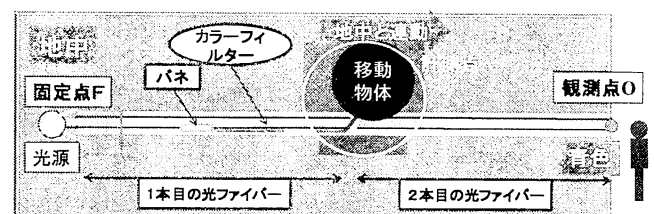


図-3 変位計の全体図

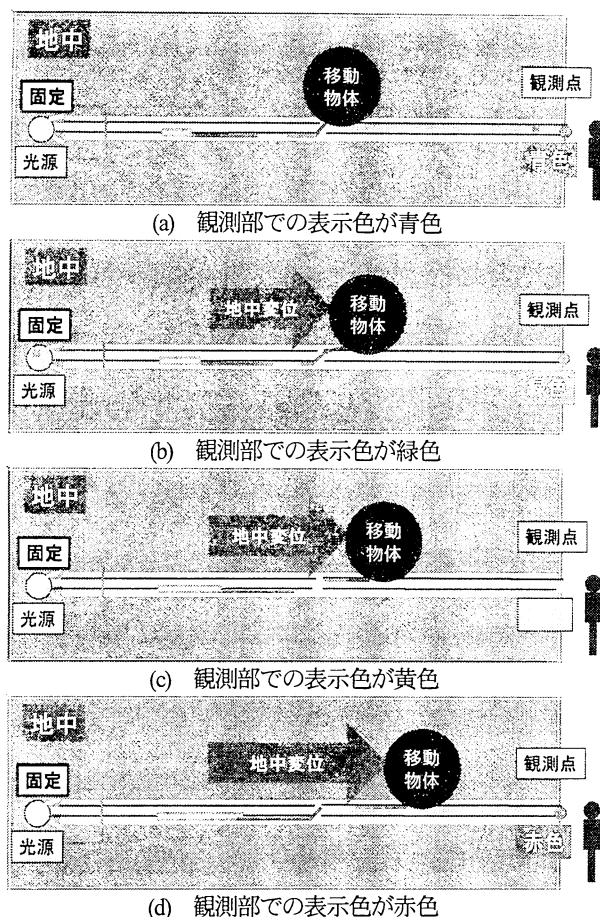


図4 計測部の変位量と観測部での表示色の関係

また、本研究での変位計はシンプルな構造であり、切羽の安全対策として行われる長尺先受け工や鏡ボルト等の補助工法と同方向に設置されるため、今後補助工法に併せての設置を検討することにより設置を簡易化することが望まれる。なお、切羽は条件の悪い地山を除いて1日に約4～5m掘削されるが、新しい切羽が計測点Aに到達するまでの間は、2本目の光ファイバーは切断されてもその都度、新しい切断面にFA間で生じている変位を表示していることになる。即ち、掘削によってAO部のファイバーを何度でも切断できることを意味する。これは、掘削作業を円滑に進め、かつ常に切羽奥側の状況を把握できるという意味で非常に重要なことである。図-5に示すように装置奥側の固定点Fは掘削進行に伴う影響を受けず固定されており、一定以上の掘削が進み切羽で見える断面が1本目のファイバーのものになった段階で、そこで表示される光は白色となるため、そのタイミングをもって、装置が役割を終えたことを確認できる。さらに掘削が進み電源と光源の場所まで到達する時点で、それらを回収し再利用することも可能である。

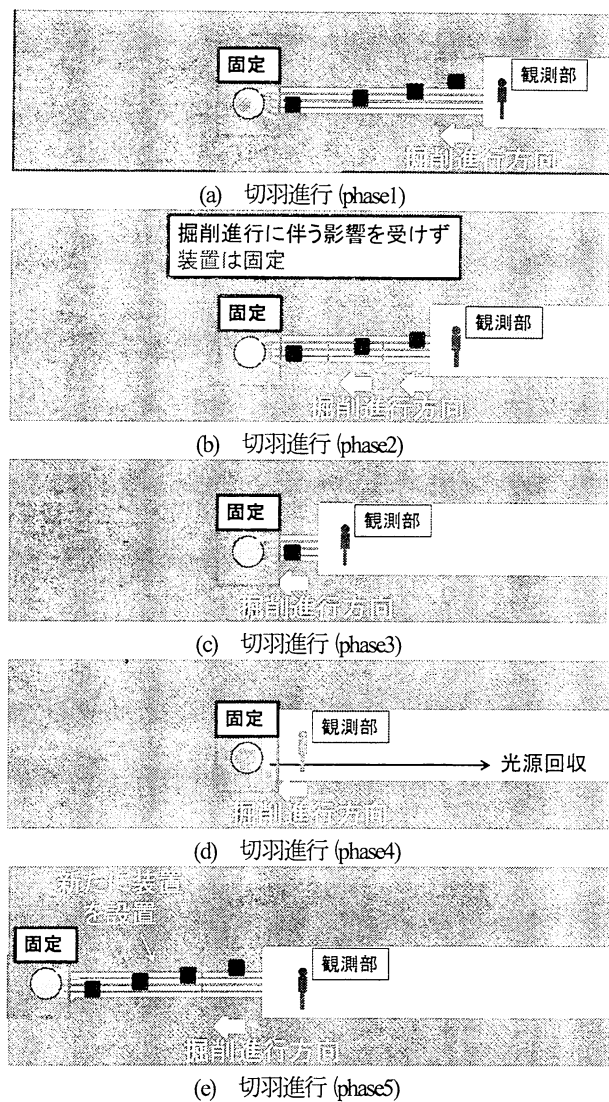


図5 切羽進行と装置使用イメージ

4. 箱形装置による簡易基礎実験

(1) 実験装置の概要

ここでは、トンネル切羽周辺の部分的な領域（図-6に示す）で生じている崩壊を疑似的に模擬するため、箱形の装置に入れた土砂を用意した。

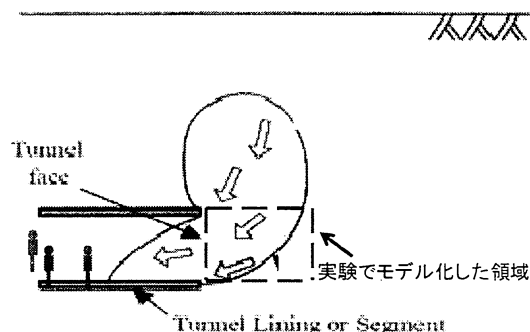


図6 トンネル切羽周辺で生じる崩壊と実験でモデル化した領域の位置関係

次に箱の1面に強制変位を与えることによって切羽前方の土砂に変形を生じさせる簡単な実験を行うこととした。

写真-1に示すように内寸90×90×90(cm)の強度が十分高い箱を用意した。この箱の1面は下辺を蝶番によって固定し、上辺を写真-2に示すようにワイヤーによって固定することで板を傾斜可能にした。

また、地中変位計は写真-3に示すように高さ40cmの位置に固定し、土を高さ80cmの位置まで締め固めた状態で準備した。

次にこのワイヤーをカットすることで板の固定を外し、段階的に板を傾斜させることで箱の中で締め固めた土を崩壊させた。この時の観測部での色の変化を確認することにより、装置の動作確認を行った。

計測点は4つ用意し、傾斜する板から10cm、25cm、40cm、60cmの位置に移動物体を設置し、それぞれ移動物体1、2、3、4と名付けた。光ファイバーはデータ1個を計測・表示するのに2本（一つのルート）必要であるため、この設定では四つのルートに2本ずつ、すなわち計8本の光ファイバーが使われたことになる。

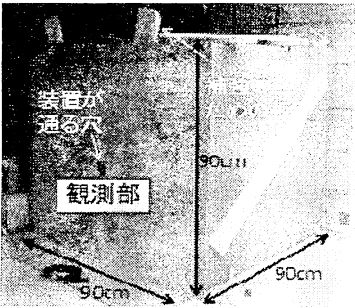


写真-1 実験装置の全体図

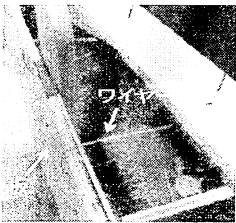


写真-2 ワイヤーによる箱の固定

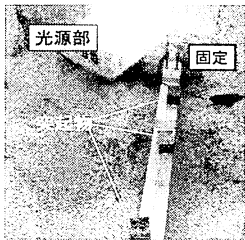


写真-3 装置固定の様子

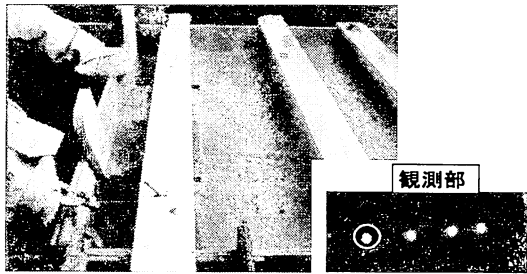
また観測部から見える光を左から観測部 1、2、3、4と名付けた。移動物体の番号と観測部の番号は対応させた。例えば移動物体 1 が動くとき観測部 1 の光ファイバーの色が、変化し、移動物体の変位状況を表示する。

(2) 実験の結果と考察

写真-2 のワイヤーを切り、板をゆっくりと傾けることによって、締め固めた土を崩壊させた。そして、その時の観測部での光の色の変化を確認した。

ここで観測部での色の変化とその時の締め固めた土の崩壊の様子を写真-4に示す。

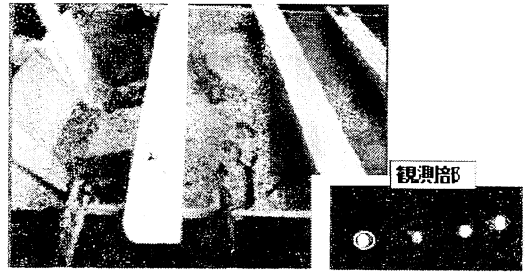
写真-4に示すように、締め固めた土の移動に伴って、観測部の光の色の変化を捉えることができた。しかし、今回の実験では装置の設置位置での実際の変位量とその時点での光の色に対する変位量が正確な値を示しているかどうかは判断できない。



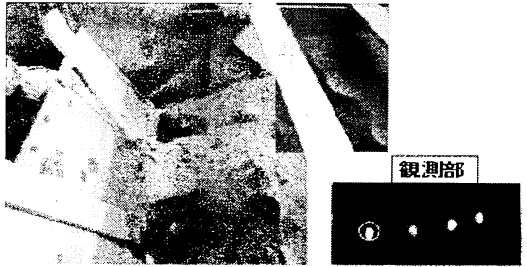
(a) 観測部1の光の色が青色



(b) 観測部1の光の色が緑色



(c) 観測部1の光の色が黄色



(d) 観測部1の光の色が赤色

写真-4 崩壊の様子と観測部での表示色

また、今回の実験では移動物体として土の動きに対して抵抗となる突起物を設置しただけだが、実際の装置では一般的に土と連動させるために用いられている数種類の方式を検討したうえで決めていきたいと考えている。

5. まとめ

本研究では、切羽前方の変位を低コスト・リアルタイムにモニタリングする新しい計測装置を提案した。この装置を使うメリットは、1)切羽前方の状態が常に作業員に可視化されること、及び2)光ファイバーを切断しながら掘削作業をそのまま続けることができること、にある。従って、この変位計を用いれば緊急時の迅速な対応が可能となる作業環境を整備することができる。今後は実用化レベルの装置を開発するために計測部の連動性・装置の耐久性等の様々な問題を検討していきたい。

参考文献

- 1) 芥川真一, 高野晃佑, 竹中嗣人: 相対変位を光の色に変えて表示する装置の開発と斜面変位モニタリングの一例, 第 62 回土木学会年次学術講演会, 3-015, pp.29-30, 広島, 2007.
- 2) 芥川真一, 高野晃佑, 森翔矢, 金子勝, トンネル掘削工事の安全管理に関する一提案, トンネル工学報告集, 第 17 巻, pp.163-166, 2007.
- 3) 芥川真一, 高野晃佑, 森翔矢, 金子勝, 高木加乃, 光る変位計の開発とその岩盤工学における適用の可能性について, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.427-432, 2008.
- 4) S. Akutagawa; Light emitting deformation sensor and its application to geotechnical problems, *Proceedings of EIT-JSCE Joint International Symposium*, pp.1-4, 2009.
- 5) S. Akutagawa; S. Mori; A.Kusui; M. Nomura; New concept for rock structure monitoring by light emitting sensors, *Proceedings of 2009 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering*, pp.347-356, 2009.
- 6) S. Akutagawa; A. Kusui; M. Nomura; Light emitting sensors as new visual tool for rock structure monitoring, *Proceedings of EUROCK 2010, Lausanne*, pp.609-612, 2010.
- 7) S. Akutagawa; On Site Visualization as a New Paradigm for Field Measurement in Rock Engineering, *Proceedings of the 6th Asian Rock Mechanics Symposium*, New Delhi, pp.KN34-KN45, 2010.
- 8) S. Nakamura; R. Abe; S. Akutagawa; A. Takahashi; A. Kusui; Final Report, Special Assistance for Project Implementation (SAPI) applying the monitoring method by On Site Visualization at Delhi Metro construction sites, *SAPI for Delhi Metro Phase II Project utilizing Japanese ODA, Japan International Cooperation Agency (JICA)*, March to June, 2010.
- 9) 芥川真一, 南裕輔, 山地宏志, 羽馬徹, 廣嶋孝也, 野澤忠明, 地盤補強材のための光る変位計の開発, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.427-432, 2011.
- 10) 旭化成イーマテリアルズ株式会社
<http://www.asahi-kasei.co.jp/ake-mate/pof/jp/product/single-core.html>

(2012. 9. 3 受付)

DEVELOPMENT OF A LOW-COST DEVICE MEASURING DISPLACEMENT AHEAD OF A TUNNEL FACE USING OPTICAL FIBER

Masashi TERASHIMA, Haihua Zhang, Koji TSUJIMURA and
Shinichi AKUTAGAWA

A new device is proposed for simultaneous monitoring and presentation of its results to improve safety for tunnel workers. The device is designed to measure relative displacement between two points F and A ahead of a tunnel face. F is a point supposed be un-influenced by excavation. A is a point between F and an observation point O which is on a tunnel face. The relative displacement between F and A is processed by an uniquely designed switch made of optical fibers and color filter, so that the state of deformation A is always shown by color of light for tunnel workers. The advantage of the device is also that part of the measurement set up made of optical fibers can be cut during excavation without losing its function.