

計測結果見える化技術（OSV）の開発と適用

Development and Application of On Site Visualization for Safety Management

山田 浩幸*1 増田 丑太郎*2 高田 篤*2
Hiroyuki Yamada Ushitaro Masuda Atsushi Takada
市川 裕祐*2 宮本 武司*2
Yuusuke Ichikawa Takeshi Miyamoto

要旨

本報告の「OSV (On Site Visualization)」は、工事の安全対策の一環として、計測結果に基づく危険度を光の色の変化によりリアルタイムに表示するシステムを用いることで、現地で安全および危険情報を表示する概念である。

従来の計測管理では、観測機器により測定された変位、応力、ひずみ等を計測室の管理用コンピュータによりデータ整理あるいはグラフ化し、専門的な知識を有する計測担当者が安全度を判断し、必要な場合には警報を発信している。しかしながら、これらの計測管理システムの課題としては、計測後、危険度を判断し警報を出すまでのタイムラグやシステム構築に多額の費用を要することが挙げられる。

これに対して、OSV により「計測結果の見える化」を図ることで、予め定められた危険度の判定区分に対応した色の表示に基づき、「だれでも」、「いつでも」、「どこでも」自ら判断することができる。本報告では、OSV 技術の1つである「光る変位計」を実際の山岳トンネル工事の現場において安全管理手法として適用した事例を紹介する。

キーワード：山岳トンネル 安全対策 計測管理 OSV 光る変位計 内空変位 地すべり LEDS

1. はじめに

近年、トンネル工事などの地下工事においては、安全性が全体的に向上してはいるが、突発的に崩落事故が発生している。本報告では、作業員が視覚的に認知できる現場計測＋安全管理の新しい方法（計測結果の見える化）として開発した「光る変位計：LEDS」の現場適用例を紹介する。

この新しいセンサは、持ち運びや取り付けが簡単で、変形の大きさによって、フルカラー発光ダイオード（LED）の光の色が変わるものであり、安全が危惧される箇所（地山が悪い場合の切羽周辺や、吹付けコンクリート変状箇所など）に取り付けておくことにより、変状の進行状態を視覚的に判断できる。1つ目の適用事例（穂別トンネル西工事）は、土被り 300m を超える大土被り脆弱地山において切羽や変状部分における安全管理の目的で「トンネル用光る変位計」を適用したものである。2つ目の適用事例（出流原工事）は、長大法面を有する山岳トンネル坑口部において、法面の安全管理として「斜面用光る変位計」を適用したものである。

2. OSVの概要

2.1 OSVの概念

OSV(On Site Visualization)は、計測結果を外部に設け

た判断プロセスを経由することなく、その場で危険度として外部表示するシステム・概念である（以下、OSV と称す）。

従来手法では、計測機器で変位や応力、ひずみを計測すると、そのデータは現地もしくはいくつかの観測地点を集約した計測室に多心ケーブルなどにより伝送される。そのデータは電話回線や光ファイバー網を介して管理事務所に送信され、管理者はそれら全体を俯瞰しながら最適と考えられる判断を行う。その測定結果は、変位が管理基準値を超えた場合に回転灯を回したり、警報を発するような種々の工夫が行われている。

一方、OSV は、観測地点で危険度を直接的に色の変化で表示することにより自律的に危険信号を発するので、従来手法による計測システムに比較して伝送費、サーバー費などが不要な分、安価に防災システムを構築できる利点がある。したがって、これまで予算不足で観測ができなかった危険地域に対して新たな観測をすることが可能となる。

OSV 装置のコストダウン化を実現できれば、これまでよりも格段に広範囲のモニタリングが可能となる。

また、OSV は、可視化される安全・危険情報の監視者人数を飛躍的に増大させることが可能となるため、様々な形態の異常を早期に発見し、事故を防止できるとともに、人的被害などを最小限に抑えることができる可能性を秘めている。

*1 土木事業本部 企画部 *2 東京本店 土木部

2.2 変位表示センサーLEDSの概要

簡易で表現力豊かなデバイスとして、フルカラーLEDを用いた光デバイスに変位計などを取り付け、OSVの基本ツールとしての開発に着手した。

LEDs (Light Emitting Deformation Sensor) は、様々な地盤、岩盤挙動のうち、軸方向変位を観測、表示するツールである (以下、LEDs と称す)。

図1にLEDsの基本システム(変位の測定と表示)を示す。

フルカラーLEDは、青・緑・赤の3色を同時に発することができ、それぞれの電流量を調節することで、3色の度合いを調整することが可能であり、組み合わせによりあらゆる色を点灯させることができるデバイスである。

LEDsの変位スイッチはそのストロークと発色を自由に設定することが可能である。図2に白色を含め7色表示で常時(白色)から伸び、縮みそれぞれ5mm×3段階で表示を行うパターン例を示す。

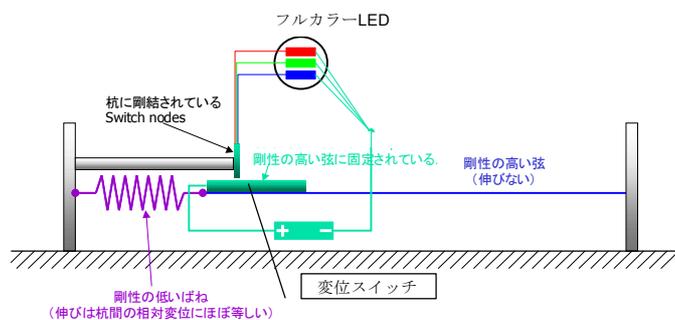


図1 LEDSの基本システム¹⁾

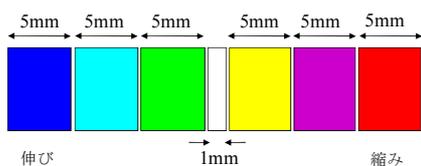


図2 LEDSの光色と変位セッティングの例

今回開発したLEDsは、トンネル内空の伸び・縮みなどの変形に対して十分な硬さをもったケーブルに10cm間隔でLEDを取り付け、任意2点間の距離の変化をLEDの光の色に変換させることとした。例えば、普段は青系色に設定し、変形が大きくなり危険度が高まるにつれて段階的に赤系色に変化させることができる(写真1)。

このことにより、トンネル工事における作業空間の危険度を作業員にリアルタイムで視覚的に認識させることができる。なお、変形の量と光の色の関係は予め定められた危険度の判定区分に応じて、自由に設定して製作することが可能である。



写真1 変位の大きさにより色が変わる「光る変位計」

2.3 LEDSの適用性検証

2.3.1 単一剛体ブロックの移動

写真2のように、縦180cm、横90cmのパネルを用意し、それらを鉛直方向から30°傾かせた状態で固定、左から順に、測点A、B、C、Dとする。それらの変位計(LEDs)を設置し、左から順に、変位計1、2、3とする。ここで、各色のレンジは、白から他の色に変化する際のみ1mmで、他の色の間は10mmとした。

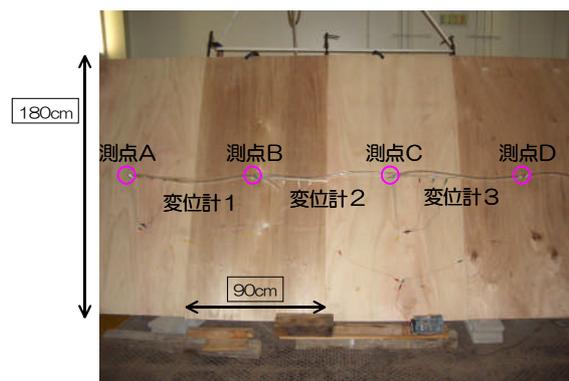


写真2 室内実験斜面の概要

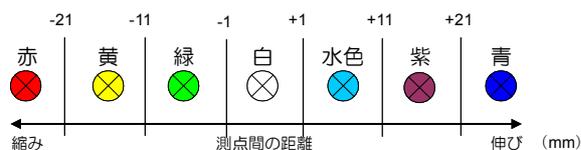
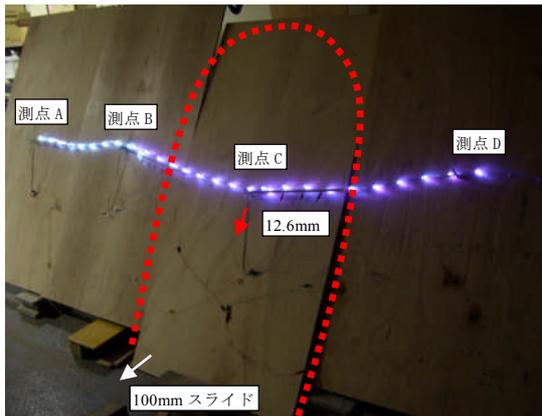


図3 室内実験におけるLEDsのセッティング^{1),5)}

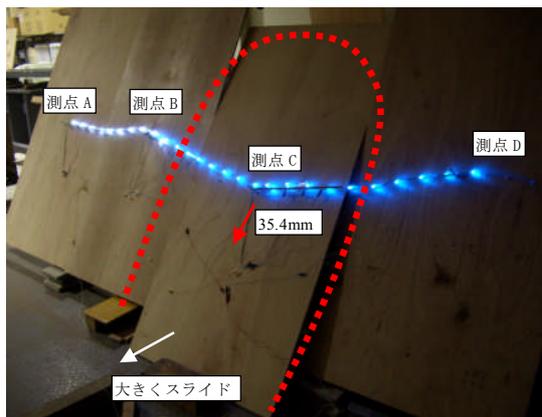
測点Cを設けたパネルの下端を前方方向に50mm移動する。このとき、剛体移動したものとすると変位計2、3は1.4mm伸びることになる。その結果、変位計は水色に変化した。

次に、写真3に示すように、測点Cをさらに50mmスライドさせ、変位量を100mmとすると、変位計は合計12.6mm伸び、表示色は紫色になる。さらにパネルを移動していくと、変位計は35.4mm伸び、表示色は青色となった。

このように、変位量(伸び)に応じて設定した変位量に応じてLEDsの表示色が変わることを確認した。

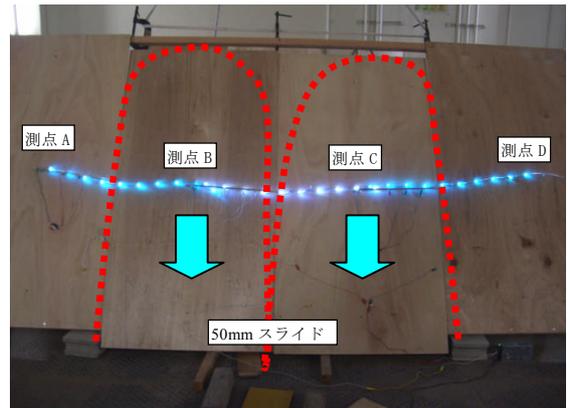


(a) 発光色 紫色/12.6mm

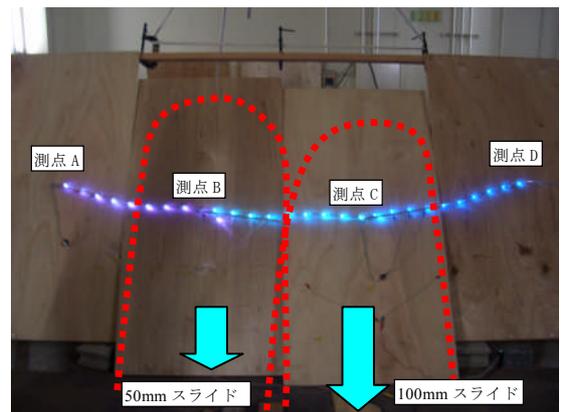


(b) 発光色 青色/35.4mm

写真3 単一剛体ブロックの移動実験^{1),5)}



(a) 同調した移動



(b) 異なった移動

写真4 複数剛体ブロックの移動実験^{1),5)}

2.3.2 複数剛体ブロックの移動

次に崩壊が予想される斜面に対して多測線を配置して全体の挙動を検出しようとするモデルとして、複数の剛体ブロックが個々に移動した崩壊をモデル化した。

単体剛体ブロックの時と同様に、測点B、Cに関してパネルの下端を前方方向に50mmスライドさせると変位計1、3が水色に変色する。さらに、測点Bを50mm、Cを100mmスライドさせると写真4に示すとおり、変位計1が紫、2が水色、3が青に変色した。

本実験により、剛体ブロックが連動して移動するような場合でも各ブロックの移動量および移動量に差が生じていることを光の色の変化で表現できることが確認できた。

以上の単体剛体ブロックと複数剛体ブロックの室内実験結果より、変位量に応じて当初設定した表示色に発光することが確認できた。伸びや縮みという単純な変位モードはもとより、複数剛体のブロックの移動に伴う表示色の変化により、例えば、地すべりの発生が懸念される斜面において、LEDsを網目上に配置することにより、どの位置で変位が生じているかを光の色より認識することが可能となり、面的な管理を行うことができる。したがって、初期のすべり発生箇所の特定ができることとなる。

3. トンネル坑内における適用

3.1 適用現場の概要

穂別トンネルは全長 $L=4,323\text{m}$ の山岳トンネル工事であり、その内、西工事では西側の延長 $L=1,951\text{m}$ をNATMで施工した。土被りの大きい区間(土被り300m以上)において写真5のような蛇紋岩(塊状、葉片状)が出現し、200mmを越える大きな変位を生じながらも、変位制御型二重支保を導入することで掘削を完了した。



写真5 切羽状況(蛇紋岩)^{3),6)}

本トンネルでは、特に初期変位（60～100mm/日）が大きく、掘削初期における安全管理が課題となっていた。

表1に工事概要をまとめ、写真6に掘削状況を示す。

表1 工事概要

工事名称	北海道横断自動車道 穂別トンネル西工事
工事場所	北海道勇払郡むかわ町穂別長和
工期	平成18年3月～平成21年3月（その1）
	平成21年3月～平成23年10月（その2）
発注者	東日本高速道路㈱
施工者	鴻池・飛島特定建設工事共同企業体
工事内容	延長 L=1,951m（道路土工L=12m含む）
	断面 掘削断面積A=85.0㎡（DⅠ）、130㎡（EⅡ）
	施工法 NATM
	掘削方式 発破工法、機械掘削（EⅡ）
	掘削工法 EⅠ、EⅡパター（上半先進ベンチカット工法） （EⅡは最善管理型二重支保構造） CⅡ、DⅠ、DⅡ、DⅢパター （補助ベンチ付き全断面工法）
補助工法	天端安定対策：長尺鋼管フォアパイル（坑口） 長尺リング補強工（EⅡ） 注入式フォアボリング
	鏡面の安定対策：長尺鏡ボルト、核残し 長尺鏡補強工（EⅡ）
	脚部の安定対策：脚部補強ボルト、仮インポート



写真6 施工状況^{3),6)}

3.2 トンネル計測における管理上の課題

トンネルの標準工法である NATM では、切羽作業の制約から、支保構築後に測点を設け、地山の性状に応じて10～30m間隔で計測工A（天端沈下、内空変位）や計測工B（地中変位、支保応力測定）を実施して、その結果を参考に施工を進めていくのが一般的であるが、以下のような課題がある。

- ①脆弱な地山では、初期に大きな変形を生じ地山崩壊に至る懸念があるが、掘削作業の制約により、測点の設置が支保構築後となり、正確な初期変位を把握できない。
- ②自動計測以外の一般的な計測では、計測担当者が事務所のパソコンでデータ処理し、評価するため、掘削直後の挙動の変化を切羽でリアルタイムに判断できない。
- ③計測工Bに関しては設置費用が高価であり、計測工Aの

ように頻繁には設置できない。

- ④切羽には作業に必要な照明はあるが、一般的には暗く、機械騒音が大きいというのに、作業員は耳栓をしているため、通常の会話が困難である。

3.3 光る変位計による安全管理上の効果

光る変位計にはLEDSが装着されており、動きを感じたその瞬間にその大きさに応じて異なる光の色を発する。

想定される変位量に応じて発光色を設定することにより、工事現場などにおける周辺地盤の安全度、危険度をリアルタイムで光の色の変化として表示することができる。

光る変位計の現場での適用効果は以下のとおりである。

- ①設置・撤去が容易であるため、掘削直後に切羽近傍で変位計測を再開できる。
- ②変位量に応じて色が変化するため、掘削直後の切羽の危険性を作業員が目視で直接確認でき、機械騒音が大きく通話しにくい切羽作業の安全性が飛躍的に向上する。
- ③初期設定により伸び、縮みどちらの変形についても対応することができる。

3.4 現場適用に向けた試験施工

2007年度に製作したLEDS(V.1)を現場に設置した様子を写真7に示す。

この試験施工においては、坑内の電源から変圧器によって12Vに降圧した電源をLEDSに連結した。この方法でも測定は可能であるが、電源の準備に手間がかかるという課題があった。また、LEDS(V.1)はプロトタイプとして製作したものであったため、測定ワイヤにピアノ線を使用したのが、トンネルでの適用を考慮すれば改良が必要と考えられた。

LEDS(V.1)による試験施工において考えられた改良点は以下のとおりである。

- ①電源に関しては、切羽進行とともに移動する必要があるため、計器設置の利便性を考えると、バッテリー式が望ましい。
- ②電源をバッテリー式とする場合、電池の準備等できるだけ手間をかけない手法がのぞましい。
- ③測定ワイヤにピアノ線を使用しているが、トンネルの変形は伸び・縮みの両方向が考えられ、特に縮みの場合はワイヤがたるみ正確な変位量を測定できない懸念がある。
- ④測定ワイヤの温度変化による伸び・縮みを極力小さくして、温度の影響を防止する必要がある。
- ⑤切羽近傍での設置作業となるため、安全面からより簡易に設置する必要がある。
- ⑥初期設定を容易に行うため、微調整ができる機能を持たせることが望ましい。



(a) 電源の取り付け



(b) 縫い返し部分に設置した様子

写真7 2007年度に作成したLEDS(V.1)の設置状況⁴⁾

通常は変形の大小を目視で判断することが困難であるが、このような変位を「光の色という見える情報」に置き換えて原位置に表示することは安全管理上重要な意味を持つ。実験室および実トンネルでの試行を通し、光る変位計を適用することで変位の現状を現場関係者が確認しながら作業できる環境を整備することが可能となることを確認できた。この管理方法をさらに効率化、合理化することによりトンネル工事における新しい安全管理システムの構築が可能となると考えられる。



写真8 縫返し箇所に取り付けたLEDS(V.2)⁴⁾

これらの改良点に対して2008年度にLEDS(V.2)を製作し、写真8に示すとおり、トンネル内の別の個所に設置した。

現場適用に向けた工夫は以下のとおりである。

- ①LEDS 本体をプラスチック系材料とし、電池式にすることで設置作業が簡易となり、小型の充電式電池を約1日ごとに交換することとした。
- ②LEDの点灯方式を「点滅」とし、電池の持続時間が長くなるようにした。
- ③測定ワイヤにシリコンマンガン線を用いることで、温度の影響を軽減した。
- ④変位量が非常に大きくなり装置の計測範囲を超えてしまう場合には、バネを簡易に追加して取り付けることにより、容易に計測範囲を広げることができるようにした。
- ⑤設置用のフックを設けて微調整用のネジを取り付けることにより、初期色の調整を容易とした。

以上の工夫により、装置の利便性が飛躍的に向上した。

写真9は変位が大きく、吹付けコンクリートに変位が発生した箇所にLEDSを取り付け、変形の増大がないかどうかを監視している様子である。また、写真10は切羽周辺に複数個のLEDSを設置し、安全性を確認している例である。変形量の規模が小さい(mmから数cmオーダー)の場合、

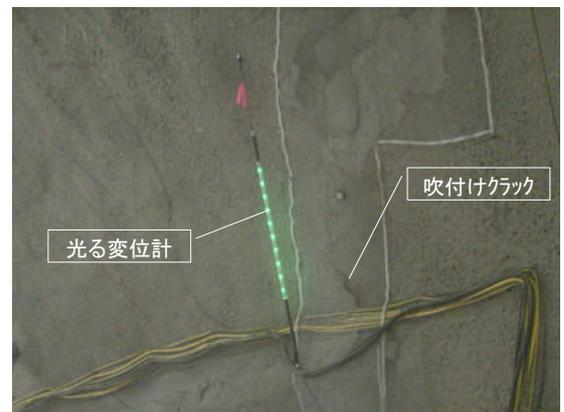


写真9 変状部に設置したLEDS(V.2)⁴⁾

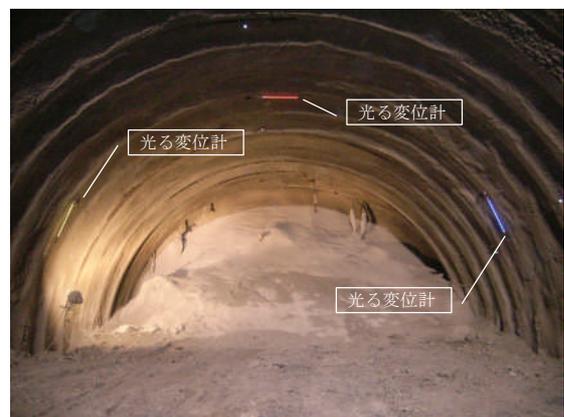


写真10 切羽における設置状況^{3), 4), 8)}

4. トンネル坑口斜面における適用

4.1 適用現場の概要

出流原工事（出流原トンネル）は、上下線2本の山岳トンネル（NATM）からなり、トンネル坑口部に法高約50mの長大法面が近接し、斜面安定対策として法枠工やアンカー工が施工されていた。この長大法面の法尻と平行にトンネルを掘削するため、掘削時の緩みに伴う斜面への悪影響が懸念されていた。表2に工事概要をまとめた。

4.2 坑口斜面計測における管理上の課題

山岳トンネルの坑口は斜面を切土して設置されることが多く、必要な斜面安定対策工が計画される。施工時の法面の安定性を確認するために、切土後に地すべり伸縮計や傾斜計といった計測機器を用いて計測された変位量を事務所で処理して、変位速度により管理することが一般的である。

しかしながら、斜面の計測管理においては以下のような課題がある。

- ①計測結果は、計測担当者が現場で測定した変位データを事務所のパソコンで処理して評価する必要があるため、斜面の安定性を作業員が現地で即時に判断できない。
- ②トンネル坑口での斜面崩壊や地すべりが発生すると、トンネル工事は中断を余儀なくされ、工事の工程管理に大きな影響を及ぼす。
- ③最近のゲリラ豪雨発生時や梅雨時の継続した降雨に伴い、時々刻々と状態が変化する場合、斜面安定性の評価は難しく、自動計測は可能だとしても、設置に多額の費用がかかる。

4.3 光る変位計による安全管理

写真11, 12に示す現場へ適用した斜面管理用「光る変位計」は、フルカラー発光ダイオード（LED）を使い、指向性を考慮してLEDを配置することにより、変位量の大きさに応じて光の色を変化させ、危険度を作業員へ認識させることができる装置である。対象斜面に設置した任意の2点間に生じる相対変位（伸び）に対応し、LEDの発光の色を変化させる仕組みとなっている。

また、トンネル坑口部坑内に斜面のLEDと同調させて点灯する観測用のLEDを設置することで、昼間の見にくい時間帯にも確実に確認できるように工夫した。

本装置の特長は、以下のとおりである。

- ①変位量に応じて色が変わるため、施工時の斜面の安定性を「いつでも」、「どこでも」、「誰でも」目視でリアルタイムに確認できる。そのため、安全性が飛躍的に高まる。

表2 工事概要

工事名称	北関東自動車道出流原工事（出流原トンネル）	
工事場所	栃木県佐野市寺久保町～出流原町	
工期	2006.12.23～2010.11.19	
発注者	東日本高速道路株式会社 関東支社	
施工者	（株）鴻池組・（株）本間組・矢作建設工業（株） 特定建設工事共同企業体	
工事内容	延長	上り線L=279.0m 下り線L=188.0m
	断面	・上り線：内空A=68.7㎡、掘削A=87.1㎡ ・下り線：内空A=77.7㎡、掘削A=98.5㎡
	施工法	NATM
	掘削方式	発破工法、機械掘削
	掘削工法	DIIIa、E-K ^{*1} パターン（上半先進ベンチカット工法） DIパターン（補助ベンチ付き全断面掘削）
	補助工法	・深層混合改良

注1) E-Kは耐震検討パターン



写真11 トンネル施工状況⁹⁾

- ②対象となる斜面上で簡単に設置、移動することができ、知りたい場所の変位が容易に確認できる。
- ③電源は電池仕様とし、繰り返し充電可能であるため、特別な電線は不要である。
- ④計器や電池は完全防水仕様となっており、集中豪雨時や計測した降雨時でも確認が可能である。
- ⑤トンネルの掘削作業に支障がない位置に、斜面のLEDと同調したモニター用のLEDを設置することで、坑内作業員にも斜面の安定性が確認できる（写真13、写真14）。
- ⑥山岳トンネル工事は一般に昼夜で作業を行うが、夜間であっても作業員自身が光の色で斜面の安定性を目視で確認できるため、不測の事態の発生が回避できる。
- ⑦施工中の安全管理技術としてだけでなく、メンテナンスや防災分野における監視・計測技術としての実用化により、将来的には多岐にわたる応用が期待される。

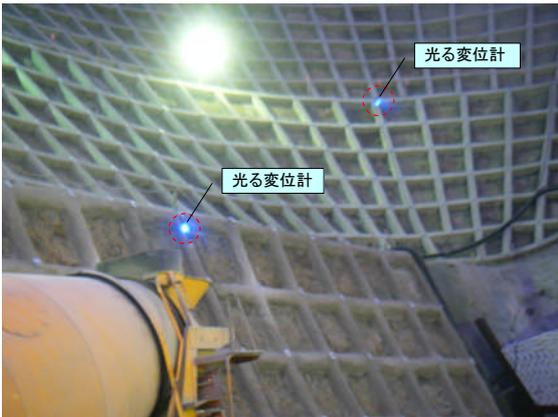


写真12 光る変位計設置状況 (夜間) 9)



写真13 坑内モニター設置状況 (初期色 青色) 9)

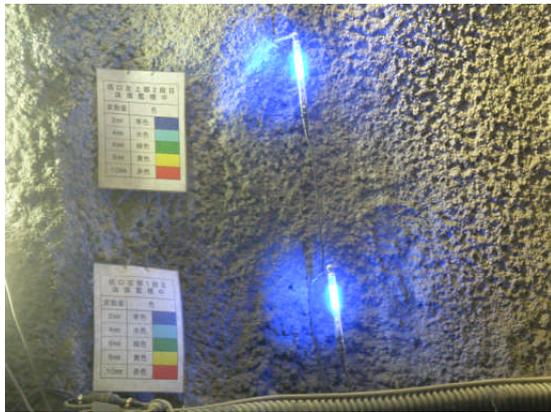


写真14 坑内モニター設置状況 (初期色 青色) 9)

5. おわりに

今回、計測結果の見える化技術 (OSV) という新しい概念から、「計測」と「視覚的な結果の表示」の両機能を兼ね備えた「光る変位計:LEDS」の開発、適用について報告した。

LEDSは簡易な構造により変位を光により可視化するツールである。この装置をトンネル工事や法面工事のような作

業現場に適用することで、24時間体制の変位計測をおこなうことができる。その結果、変位が発生した場合に、遅れ時間ゼロで周辺の作業員に情報を開示することができる。

この場合の情報の流れ (Deformationから右回りでCitizenへ) を、通常の流れ (Deformationから左回りでCitizenへ) と対比して図4に示す。すなわち、これまでは専門的な知識を有する管理者が計測結果を分析評価した上で警告していたために、直接作業を行う作業員や被害を被る一般市民への情報伝達に時間がかかっていたが、OSV技術を用いれば、変位が色の変化として直接的に表示されるためリアルタイムで伝達できることを意味している。

また、これまでのデータ処理方法と異なり、現場での動きをその場所に光の色によって表示することにより、誰にでも分かりやすい現状把握、および緊急時の迅速な対応が可能となり、安全な作業環境を整備することができる。

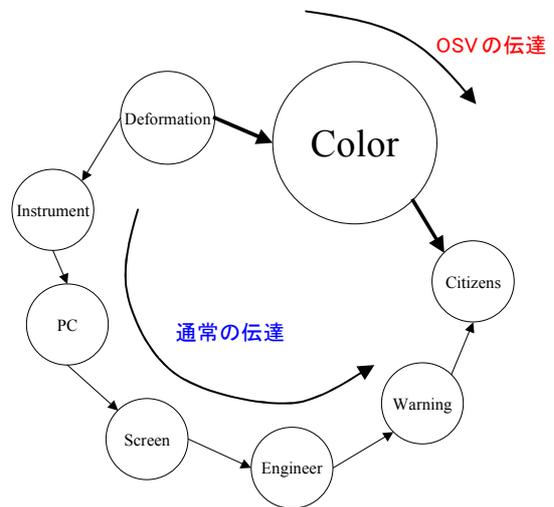


図4 光る変位計による情報伝達プロセスの合理化 1), 4)

一方、社会貢献の観点から、危険な斜面近傍に住む住民あるいは道路利用者などに警報を発することを可能とするものであり、公助による情報提供が未完成的な地域あるいは情報伝達の途絶により危険に曝される地域の住民や道路利用者にとっては、自助的活動を支援する有効なツールとなり得るものである。

OSV を実現するセンサーとしては、今回報告した光る変位計 (LEDS) の他に以下のセンサーの開発が進んでいる。

①光る表示計 (LEC: Light Emitting Converter)

「任意の計測データを光の色に変える」装置である。

すなわち、計測センサーが取り込んだデータを、事前に設定した管理基準値の大きさに応じて異なる光の色として情報発信できるデータコンバータである。

②光る傾斜計 (LEIS: Light Emitting Inclination Sensor)

「傾斜挙動とその方向を観測、表示する」ツールである。

傾斜測定方法には、振り子や液圧変化など種々の測定方法が考えられ、これとLEDを組み合わせてLEISを実現する。

さらに、レーザーを用いた方法や鏡を用いた手法などの研究開発も進められている。

写真15にLECの表示状況を示し、写真16にLEISの基本システムを示す。

当社は、今後もトンネルなどの地下工事をはじめとし、斜面、橋梁などの明かりの工事においても光る計測装置を用いた計測システムの適用や検証を実施していきたいと考えている。



写真 15 LEC 発光状況

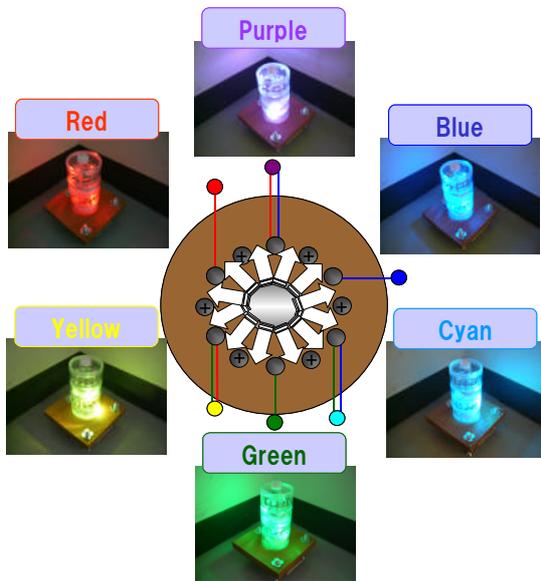


写真 16 光る傾斜計 LEIS 発光状況（傾斜方向で異なる発光）⁵⁾

した芥川教授に深く感謝いたします。また、OSVの現地適用にあたり新技術へのご理解と試験設置する現場をご提供頂くとともに、ご指導頂きましたNEXCO東日本株式会社の関係各位の皆様に紙面を借りて深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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、2008.1
- 2) Shinichi Akutagawa, Hiroyuki Yamada：Visualization of Tunnel Risks by use of Light Emitting Deformation Sensors、FIRST CHINA-JAPAN WORKSHOP ON TUNNELLING SAFETY & RISK、Aug. 28-29、2009
- 3) 山田浩幸、高橋俊長、大村修一、高田篤：大土被り蛇紋岩地山における最善管理型二重支保の設計と施工、土木学会 トンネル工学報告集、pp. 81-88、2009.11
- 4) 芥川真一、森翔矢、大村修一、山田浩幸：トンネル掘削工事中の安全管理における光る変位計の適用例、トンネル工学研究論文、pp. 23-28、2009.11
- 5) 芥川真一、野村貢、山田浩幸、片山辰雄：On Site Data Visualization の概念と岩盤工学における適用可能性について、岩盤力学に関するシンポジウム、pp. 151-156、2010.1
- 6) 山田浩幸、高橋俊長、大村修一、高田篤、芥川真一：大土被り蛇紋岩地山における安全管理のための新技術適用に関する一考察、土木学会第65回年次学術講演概要集、pp. 97-98、2010.9
- 7) S. Akutagawa, H. Yamada, M. Nomura, C. Izumi, R. Abe：ON SITE VISUALIZATION AND ITS APPLICATION TO GEOTECHNICAL ENGINEERING PROBLEMS、第30回西日本岩盤工学シンポジウム、pp. 7-14、2010.9
- 8) 山田浩幸、高橋俊長、大村修一、高田篤：大土被り脆弱地山（蛇紋岩）における山岳トンネルの施工報告、第30回西日本岩盤工学シンポジウム、pp. 89-96、2010.9
- 9) 宮本武司、今井恵史、市川裕祐、山田浩幸：採石場跡地の軟弱埋戻し地山における山岳トンネルの設計と施工、第66回施工体験発表会、pp. 41-48、2010.11

謝辞

2010年1月にOSV技術の研究開発と普及を目的として、OSV研究会（会長：神戸大学大学院工学研究科 芥川真一教授）が設立され、産・官・学の各メンバーが「光る計測装置の開発・改良と実社会への適用」にむけた検討を実施している。当社は同研究会に加入しており、本稿2.3節の内容は、開発段階における成果の一部である。ご指導頂きま