

# 山岳トンネルの切羽崩落予測システム

## 切羽ウォッチャー

小泉 悠・伊達 健介・横田 泰宏

「切羽ウォッチャー」(以下「本システム」という)とは、トンネルの切羽の変状を多点で高精度に計測し、切羽崩落を事前に予測して警報を発することで、トンネル現場の安全性向上に寄与するシステムである。本報告では、本システムの概要について述べ、本システムの適用により、切羽崩落の発生を未然に回避した事例を紹介する。さらに、3方向レーザ変位計及び再帰性反射塗料を本システムに導入することで、計測可能距離の長距離化・計測の高精度化を達成できたので、このシステム改良の成果について報告する。  
キーワード：トンネル、切羽、崩落、押出し変位、レーザ変位計、再帰性反射塗料

### 1. はじめに

山岳トンネル工事において、特に地質不良部における掘削直後の切羽は、崩落の危険性が高く、安全管理の観点から、切羽面の挙動を常時監視することが重要である。本システムは、トンネルの切羽の変状を多点で高精度に計測し、崩落を事前に予測して警報を発することで、トンネル現場の安全性向上に寄与するシステムである。警報を受けて、切羽の崩落を防ぐ対策を講じたり、作業員を切羽から退避させたりすることが可能となる。本報告では、本システムの適用事例を紹介するとともに、今般、3方向レーザ変位計と再帰性反射塗料を新規導入し、計測可能距離の長距離化・計測の高精度化を達成したので、このシステム改良の成果について報告する。

### 2. 切羽崩落予測システムの概要

本システムでは、トンネルの切羽後方に取り付けたレーザ変位計により、切羽の押出し変位を連続的に計測する(図-1)。計測データから、変位速度(1分当たりの変位量)や崩落に至るまでの予測時間等の二次データが算出される。累積変位や変位速度が事前に設定した管理基準値を超過すると、パトライトが点滅し、トンネル坑内で警報が発される。これらの計測データ、二次データ、警報は、現場詰所や事務所、工事担当者の携帯電話に伝送することも可能である。

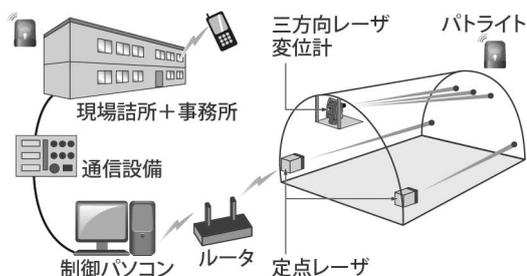
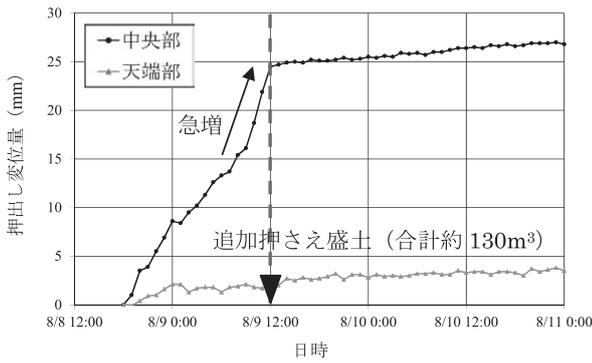


図-1 切羽崩落予測システムの構成

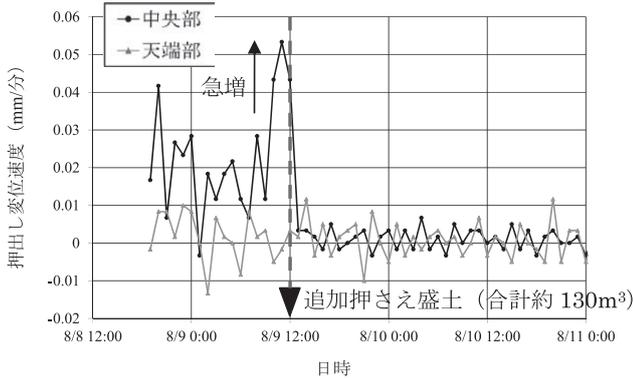
### 3. 切羽崩落予測システムの適用事例

2013年8月以来、本システムを北の峰トンネル(北海道富良野市、工事名：旭川十勝道路 富良野市 北の峰トンネル(仮称)工事)の起終点の両切羽を対象に適用中である。起点側の地質は、主として一軸圧縮強度2.5 MPa以下の軟質な泥岩である。一方の終点側の地質は、一軸圧縮強度10～20 MPa程度の溶結凝灰岩と未固結な扇状地堆積物(土砂)が主体である。本現場では、切羽の天端部1ヶ所、中央部1ヶ所の計2ヶ所を対象に、押出し変位を連続的に計測し、切羽崩落の予測を実施してきた。

終点側坑口から959mの位置で、2014年8月8日から8月10日にかけて、本システムにより計測された切羽の押出し変位データを図-2に示す。また、変位速度(1分当たりの変位量)のデータを図-3に示す。このとき現場では、切羽全面に扇状地堆積物の土砂層が観察され、切羽の不安定化が懸念されていた。そこで、長尺鋼管鏡ボルト(長さ12.5m、24本、シリカレジン注入)、鏡増し吹き付けコンクリート

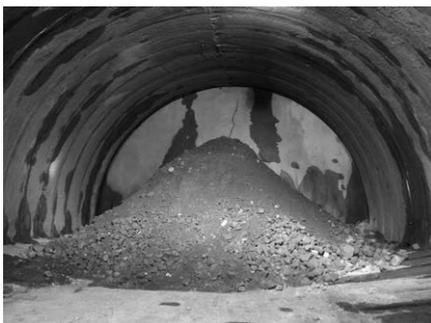


図一 2 押し出し変位量の経時変化



図一 3 押し出し変位速度の経時変化

(100 mm), 押さえ盛土 (約 65 m<sup>3</sup>) を施工した上で、夏季休暇に入るところであった。しかし、8月9日の早朝、事務所に居た職員が、本システムの表示画面上で切羽中央部での変位が急増し変位速度が著しく大きくなっていることを確認した。その旨を現場に居た職員に伝え、切羽を点検したところ、鏡吹き付けコンクリートにクラックが発生していた。そこで、同日の正午頃、追加の押さえ盛土 (約 65 m<sup>3</sup>, 合計約 130 m<sup>3</sup>) を施工 (写真一 1) することで、押し出し変位の増大を抑制した。押さえ盛土を施工する直前の3時間で、変位速度は急増しており、無対策であった場合、切羽崩落が発生する可能性があったと考えられる。なお、現場職員は、スマートデバイスやノート PC 等からイン



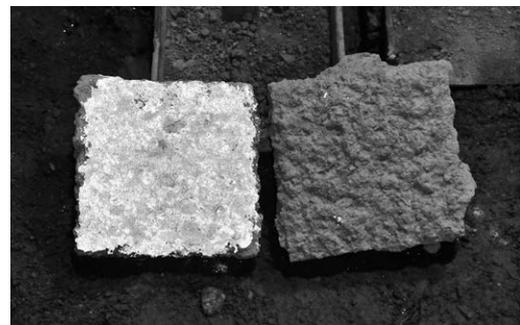
写真一 1 追加押さえ盛土 (合計約 130m<sup>3</sup>) の施工後状況

ターネットを介して本システムにアクセスすることで、押し出し変位が急増しないことを、休暇中も常時監視した。以上のように、本システムにより切羽監視を行うことで、切羽崩落の予兆を的確に捉え、崩落に至る前に必要な対策を講じることができる。

#### 4. 切羽崩落予測システムの改良と精度検証試験の結果

本システムの課題として、掘削に伴って切羽が進行し、切羽～レーザ変位計間の距離が伸びることで、押し出し変位が計測不能となり、計測精度が低下することが挙げられる。そのため、測定に際しては、切羽の進行に応じて定期的にシステムを切羽付近へ移設する「盛り替え作業」を実施する必要がある。この盛り替え作業の回数を低減すべく、計測可能距離の長距離化が求められていた。そこで、より光量の強い3方向レーザ変位計と、切羽に照射されるレーザ光の反射を促進させる再帰性反射塗料を本システムに導入し、精度の向上を図ることとした。以下、3方向レーザ変位計と再帰性反射塗料を導入した本システムを「本システム (改良版)」という。

再帰性反射塗料による本システムの精度向上の効果を評価するために、トンネル坑内で精度検証試験を実施した。写真一 2 に示すように、再帰性反射塗料を塗布した吹き付けコンクリート供試体、塗布しない供試体を準備し、新たに導入した3方向レーザ変位計と供試体との距離を 30 m から 10 m ずつ、最終的に 180 m まで離しながら、各距離で 30 個の距離データを取得した。

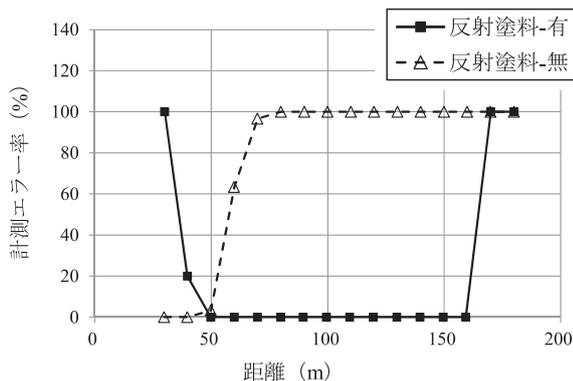


写真一 2 再帰性反射塗料を塗布した供試体 (左) と塗布しない供試体 (右)

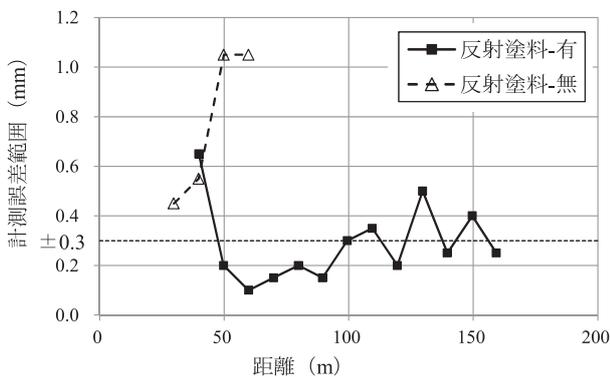
計測エラー率 (30 データのうち、距離計測が正しく行われなかった割合) と、計測距離の関係を図一 4 に示す。反射塗料を塗布しない場合、距離 60 m から計測エラー率が上昇し、距離 80 m 以上で計測エラー率 100% となった。これに対し、反射塗料を塗布した

供試体では、距離 160 m まで計測可能であった。なお、距離 30 ~ 40 m では、反射塗料によってレーザ光の反射が強くなり過ぎ、計測不能となることも分かった。

次に、計測誤差範囲 ((距離最大値 - 距離最小値) / 2) と、計測距離の関係を図一 5 に示す。データは若干不規則な動きを示すものの、反射塗料を塗布することで計測誤差範囲が距離 100 m 程度まで ±0.3 mm 以下に抑制されることが分かった。



図一 4 計測エラー率と距離の関係



図一 5 計測誤差範囲と距離の関係

以上、±0.3 mm 以下での計測可能距離が 2 倍以上 (40 m から 100 m) となることで、高精度な計測を行うために必要な盛り替え作業の回数が半分以下に低減できる。また、計測可能距離が伸びることで、システムが発破の飛び石によって破損することも回避できる。

### 5. 改良版 切羽崩落予測システムの適用事例

本システム (改良版) を、三田坂トンネル (三重県伊賀市、工事名：一般国道 422 号三田坂バイパス道路改良 (三田坂トンネル (仮称)) 工事) の貫通 100 m 手前の坑口部で適用した。2014 年 7 月末、切羽から 40 m 後方に、新規導入した 3 方向レーザ変位計 (写真一 3) を含む計測システムを据え付け (写真一 4)、

監視を維持した。先述した北の峰トンネルで生じたような顕著な押し出し変位は生じることなく、2014 年 9 月 12 日、無事貫通を迎えた。なお、反射塗料の塗布に際しては、長さ 2 m の棒を用い、切羽から離れて安全に塗布できるように工夫した (写真一 5)。また、システム据え付けから切羽が 50 m 進行した時点で、盛り替え作業 1 回を行った。



写真一 3 3 方向レーザ変位計



写真一 4 切羽ウォッチャーの据え付け状況



写真一 5 再帰性反射塗料の切羽への塗布状況

### 6. おわりに

本報告では、トンネルの切羽の変状を多点で計測し、切羽崩落を予測する本システムの概要を述べ、切羽崩落を未然に回避した北の峰トンネルでの適用事例を紹介した。さらに、本システムに 3 方向レーザ変位計と再帰性反射塗料を導入することで、計測可能距離

の長距離化・計測の高精度化を図り、トンネル坑内で実施した試験により、その有効性を検証した。その結果、 $\pm 0.3$  mm 以下での計測可能距離が2倍以上（40 m から 100 m）となることが確認でき、本システム（改良版）を適用した三田坂トンネルでは、課題としていた盛り替え作業の回数を半分以下に低減することができた。今後、本システムを全国の山岳トンネル現場で積極的に活用し、山岳トンネル工事の安全性向上に努める所存である。

### 謝 辞

本システムに新たに導入した3方向レーザ変位計は、明治コンサルタント(株)、(株)レクザムと共同で開発したものです。再帰性反射塗料は、(公財)鉄道総合技術研究所、(株)小松プロセスと共同で開発したものです。関係各社の皆様に心より感謝申し上げます。

J C M A

#### [筆者紹介]

小泉 悠 (こいずみ ゆう)

鹿島建設(株) 技術研究所 岩盤・地下水グループ  
研究員



伊達 健介 (だて けんすけ)

鹿島建設(株) 技術研究所 岩盤・地下水グループ  
上席研究員



横田 泰宏 (よこた やすひろ)

鹿島建設(株) 技術研究所 岩盤・地下水グループ  
主任研究員

