

山岳トンネルにおける 切羽変状可視化システムの開発

佐藤 裕考¹・市川 晃央²・林 稔³・橋村 義人⁴・芥川 真一⁵

¹正会員 株式会社竹中土木 技術・生産本部 技術部（〒136-8570 東京都江東区新砂1-1-1）

E-mail:sato-hr@takenaka-doboku.co.jp

²正会員 株式会社竹中土木 技術・生産本部 技術部（〒136-8570 東京都江東区新砂1-1-1）

E-mail: ichikawa-a@takenaka-doboku.co.jp

³正会員 株式会社演算工房（〒602-8268 京都府京都市上京区智恵光院通中立売下ル山里町237-3）

E-mail:hayashi@enzan-k.com

⁴正会員 計測技研株式会社（〒660-0803 兵庫県尼崎市長州本通1-14-1）

E-mail:hashimura.yoshito@keisokugiken.co.jp

⁵正会員 神戸大学大学院 工学研究科（〒657-0013 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1）

E-mail: cadax@kobe-u.ac.jp

脆弱地山での切羽押出しの挙動が、レーザー距離計を用いた切羽の計測で捉えられることを確認し、切羽の肌落ちや崩落、崩壊を事前に予測できる可能性を確認した。また、この予測を利用して、切羽のリアルタイムな押出し挙動から、鏡面ヘマーキングすることにより直接的な警報を可視化情報として発信する。同時にAR技術を活用し、実際の切羽映像と切羽の変位状況（切羽の不安定部）をウェアラブル端末やPC等の端末機器へリアルタイムに表示して可視化させるFace Condition Viewer（切羽変状可視化システム）を開発した。切羽の変位状況をリアルタイムに把握することで、切羽直近で作業している者に対して退避の指示や注意喚起を促すことができ、切羽作業の安全性を向上させることが示唆された。

Key Words : safety improvement, tunnel face monitoring, tunnel face extrusion, real-time, visualization

1. はじめに

山岳トンネルの施工において、岩盤掘削のため重機による掘削作業のほか、穿孔した発破孔に爆薬を装填する作業や岩盤を支える鋼製支保工を建込む作業、コンクリートで吹付けた後で岩盤へロックボルトを打ち込む作業など、切羽に作業員が近づく作業が多く行われるため、切羽面からの落石等の肌落ちや崩落、崩壊による労働災害がたびたび発生している。肌落ち災害では、6%が死亡し、42%が休業一ヶ月以上となっており、発生した場合の重篤度が高くなっている。平成30年1月に改正された「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」¹⁾に記載されている肌落ち防止対策の選定表を表-1に示す。肌落ち防止対策は、切羽での肌落ちのリスクを低減させるもので様々な対策が存在し、現在も新たな対策の考案、既存対策の改善が行われている。

表-1 肌落ち防止対策の選定¹⁾

肌落ち防止対策	地山等級等による肌落ち防止対策の適否				湧水対策としての効果	施工性(施工の容易さ)	その他	
	IV、B	III、C	II、D	I、E			変状観察を行う場合の相性	人体防護性の高さ
鏡吹付け	△	○	◎	◎	○*	◎	◎	△
鏡ボルト	△	△	○	◎	○	△	×	△
浮石落し	◎	◎	◎	△	◎	◎	△	△
水抜き・さぐり穿孔	○	○	◎	◎	◎	○	×	×
切羽変位計測	×	△	◎	◎	×	○	◎	×
設備的防護対策	△	△	△	△	△	△	△	○

注：◎：最良、○：良、△：可能、×：不適

○*：水抜き対策を併用することで良。

通常、切羽の安定度は、現場職員や現場作業員、切羽監視員などが目視で観察することにより確認している。しかしながら、目視による確認では、現場職員などの経験に依存する部分が多く、切羽の不安定箇所の見落としから、肌落ちや崩落、崩壊などにつながる恐れがある。そこで、道路トンネルの地山等級D、E（鉄道トンネル

の地山等級Ⅱ、Ⅰ)の軟弱地山では、時間依存性による切羽の押し出し後に肌落ちや崩落、崩壊が起きる可能性が高いことから、切羽の変位計測が有効とされている。切羽の変位計測には、レーザー距離計による計測技術²⁾や画像処理技術を利用した切羽の監視⁹⁾などがあり、切羽の押し出し挙動を捉える技術の開発が進んでいる。そこで、切羽の不安定箇所を速やかに直接的に知らせることが切羽直近で作業している者を退避させるために重要となる。

今回、切羽の変位状況(切羽の不安定部)をリアルタイムに可視化させるFace Condition Viewer(切羽変状可視化システム)を開発した(特許出願中)。本報告は、山岳トンネル工事において、レーザー距離計を用いた切羽の押し出し挙動を捉えた事例を示すとともに、開発した技術の概要について報告する。

2. 切羽の押し出し挙動を捉えた事例

山岳トンネルの切羽近傍において、レーザー距離計を使用し切羽の計測を行った。レーザー距離計による切羽の計測状況を写真-1に、レーザー距離計の計測点を写真-2に示す。このレーザー距離計は、水平方向にレーザー光を照射し、約1.0m間隔で照射点までの距離をノンプリズムで複数点計測している。このように切羽を計

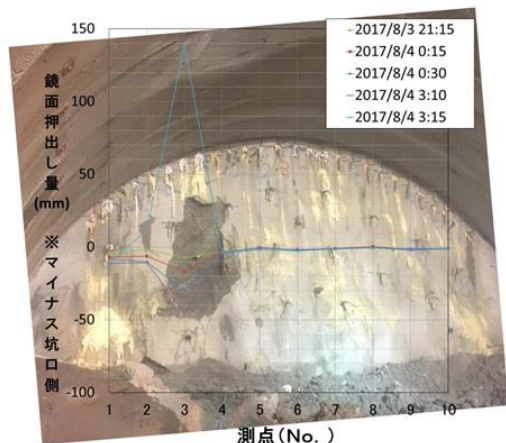
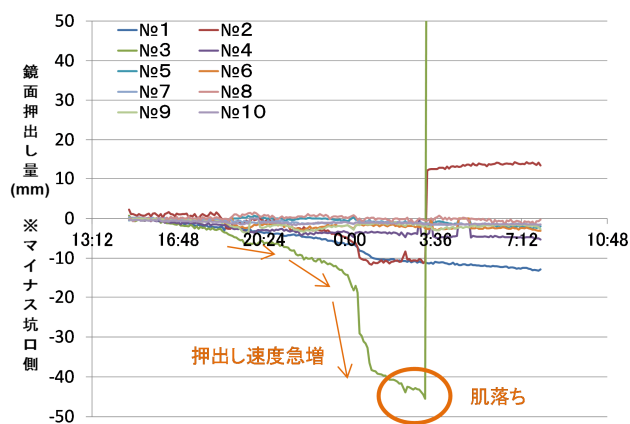


図-1 肌落ち前後の計測結果と切羽写真

測することで、切羽の押し出し量をリアルタイムに計測する。本トンネルの地質は、脆弱化した泥岩が主体で軟質な凝灰岩が挟在する地山であり、機械掘削にて施工している。肌落ち前後の計測結果および切羽写真を図-1に示す。測点No.3の押し出し速度が24.1mm/h程度と急激に増加した後、押し出し量が45.5mmに達し、肌落ちを確認した。次に、崩壊時の計測結果および切羽写真を図-2に示す。



写真-1 レーザー距離計による切羽の計測状況

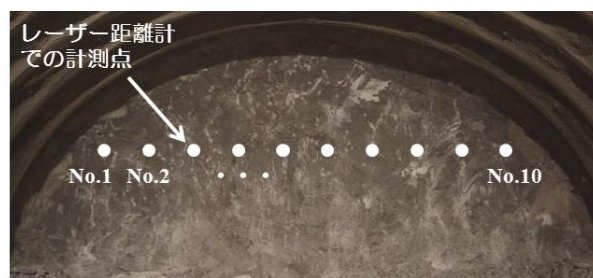


写真-2 レーザー距離計での計測点

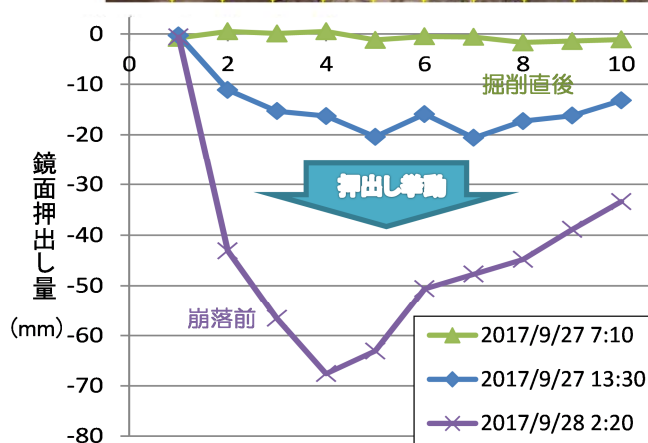
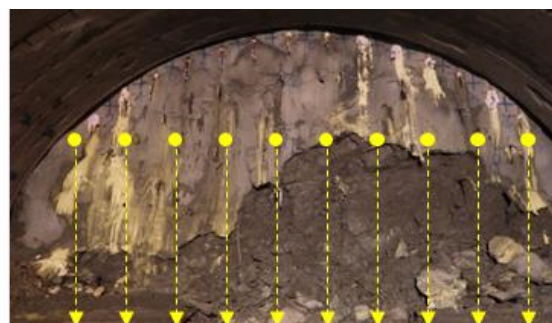


図-2 崩壊時の計測結果と切羽写真

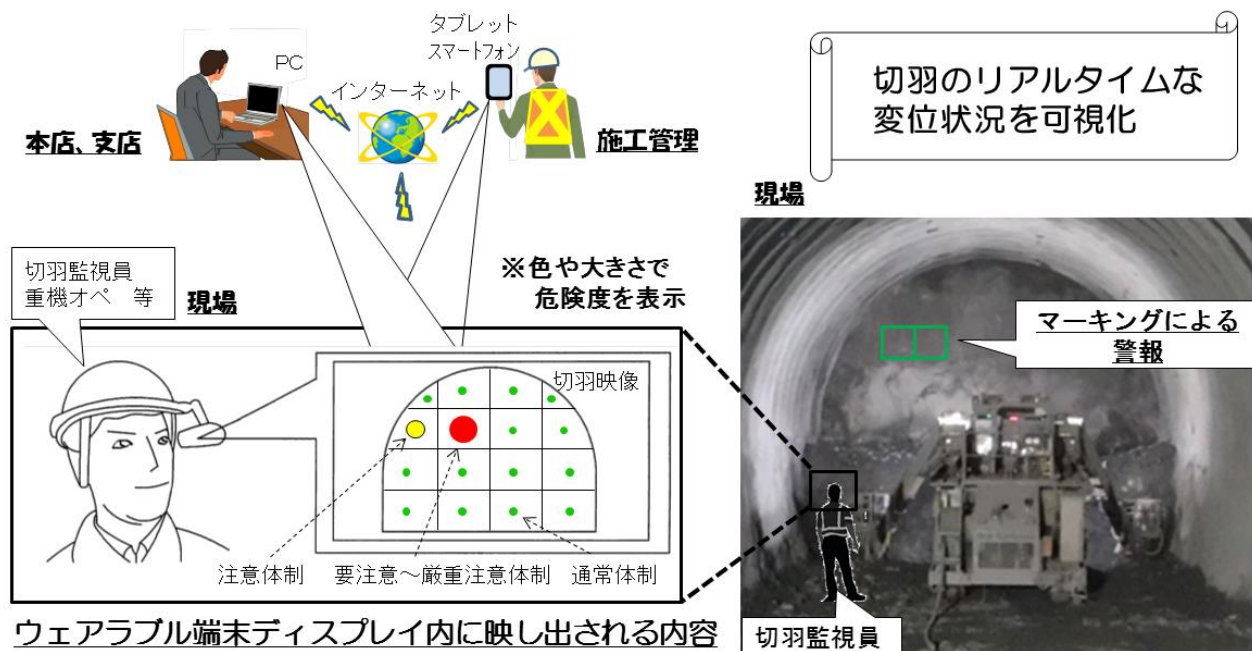


図-3 Face Condition Viewer（切羽変状可視化システム）の概要

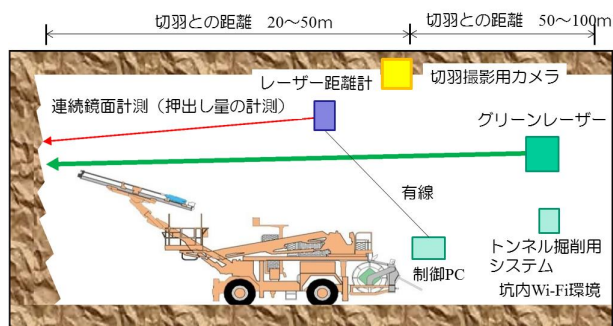


図-4 坑内に配置している機器

掘削直後（緑色）から経時的に切羽鏡面が押出しを生じ、押出し量が最大100mm程度で崩壊した。このように、時間依存性による切羽の押出しを有する軟弱地山掘削時は、切羽が不安定化する可能性があり挙動を定量的に把握し、事前に対策を講じることが不安定現象に対するリスク低減となる。これらの計測実績より、軟弱地山での切羽押出しの挙動を捉えられることが確認され、管理基準値（押出し量、押出し速度）を策定することで、切羽の肌落ちや崩落、崩壊を事前に予測できる可能性を確認した。そこで、この予測を使用し、トンネル工事関係者全員に切羽の変位状況（切羽の不安定部）をリアルタイムに発信することで、切羽作業の安全性を向上させることができると考えた。

3. 切羽作業の安全性向上についての開発

著者らは、レーザー距離計を使用した切羽の計測から肌落ちや崩落、崩壊を事前に予測できることを利用して、



写真-3 現場適用時の機器配置状況

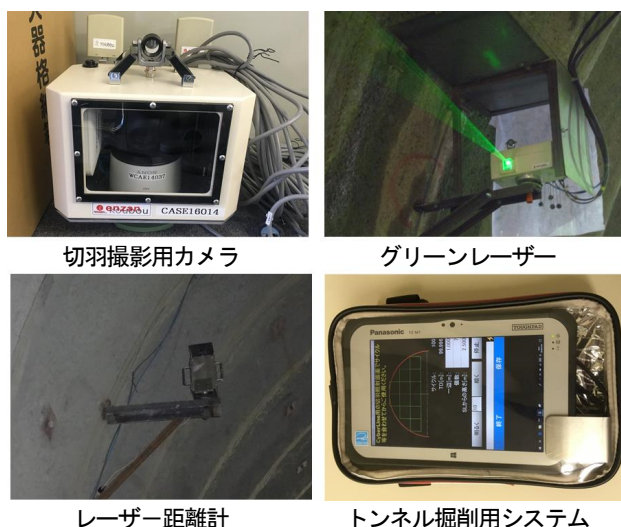


写真-4 機器拡大写真

切羽のリアルタイムな変位状況（切羽の不安定部）を鏡面へマーキングすることにより直接的な警報を可視化情報として発信する。同時にAR技術を活用したウェアラブル端末（スカウター型や透過式メガネ型）に表示して可視化させるFace Condition Viewer（切羽変位可視化システム）を開発した。Face Condition Viewerの概要を図-3に、坑内機器配置図を図-4に、現場適用時の機器配置状況を写真-3に、機器拡大写真を写真-4にそれぞれ示す。使用する機器は、切羽計測用のレーザー距離計と制御PC、マーキングすることで警報を可視化情報として発信するグリーンレーザー、切羽の映像撮影用カメラ、これらを統括するトンネル掘削用システムで構成される。グリーンレーザーとは、緑の光を高速回転で照射することで切羽に任意形状を描画するものである。マーキングによる不安定部の明示状況を写真-5に示す。レーザー距離計で連続的に鏡面の押出し量の計測を行い、管理レベルを超過した計測点の周辺をグリーンレーザーで鏡面へ直接マーキングし、切羽の不安定部を切羽直近で作業している全員に対して可視化させる。

次に、実際の切羽監視状況とウェアラブル端末使用状況を写真-6に、ウェアラブル端末に映し出される映像を写真-7に、管理レベルの一般的な考え方を図-5にそれぞれ示す。レーザー距離計で計測している変位データは管理レベルの一般的な考え方に基づいて、通常体制：緑色、注意体制：黄色、要注意～嚴重注意体制：赤色の三段階に分類した。また、ウェアラブル端末（スカウター型や透過式メガネ型）に、切羽撮影用カメラで撮影した実際の切羽映像と切羽のリアルタイムな変位状況（切羽の不安定部）を管理レベルに応じて可視化させた。なお、警告灯や警報音、パイブレーターによる警報発信も可能である。この端末は、使用する人の視界や作業の妨げにならないものを選定した。本技術は、インターネットを介することで、切羽監視員や作業者などの現場だけでなく、坑内外の事務所や本社、支店でも、スマートフォンやタブレット、PC等の端末機器で切羽状況を確認できる。よって、切羽に常にいることのできない現場職員やトンネル工事関係者全員が切羽のリアルタイムな変位状況（切羽の不安定部）を把握可能な技術である。

本開発が目指す構図を図-6に示す。切羽の変位状況（切羽の不安定部）をトンネル工事関係者全員がリアルタイムに把握することで、事務所や本社、支店のトンネル技術者が切羽の崩壊危険度を判断し、予防保全的に切羽の安定化対策を講じることができる。さらに、このようなウェアラブル端末を切羽監視員や作業者などが装着し、従来の目視による監視と本システムを併用して切羽を監視することにより、切羽直近で作業している者に対して退避の指示や注意喚起を促すことができ、切羽の肌落ちや崩落、崩壊に対する安全性を向上させることが可

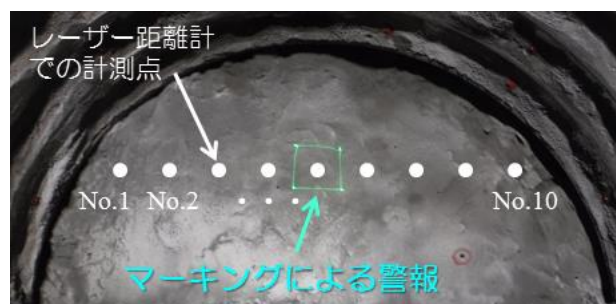


写真-5 マーキングによる不安定部の明示



写真-6 切羽監視状況とウェアラブル端末使用状況

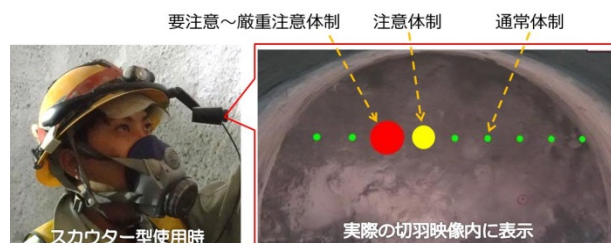


写真-7 ウェアラブル端末に映し出される映像
(緑：通常体制，黄：注意体制，赤：要注意～嚴重注意体制)

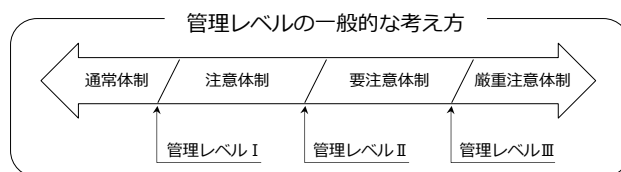


図-5 管理レベルの一般的な考え方⁵⁾

能である。ただし、当技術は地山等級や坑内環境などを考慮して適用し、従来の監視に加え補助的役割で併用することが望ましい。

4. まとめと展望

脆弱地山での切羽押出しの挙動が、レーザー距離計を用いた切羽の計測で捉えられることを確認し、管理基準値（押出し量、押出し速度）を策定することで、切羽の肌落ちや崩落、崩壊を事前に予測できる可能性を確認した。また、切羽のリアルタイムな押出し挙動から鏡面へマーキングすることにより直接的な警報を可視化情報として発信する。同時にAR技術を活用し、実際の切羽映像と切羽の変位状況（切羽の不安定部）をウェアラブル端末やPC等の端末機器へリアルタイムに表示して可視化させる技術を開発した。この技術は、切羽の変位状況（切羽の不安定部）をトンネル工事関係者全員がリアルタイムに把握することで、事務所や本社、支店のトンネル技術者が切羽の崩壊危険度を判断し、予防保全的に切羽の安定化対策を講じることができる。さらに、このようなウェアラブル端末を切羽監視員や作業員などが装着し、従来の目視による監視に加え本システムを併用して切羽を監視することにより、切羽直近で作業している者に対して退避の指示や注意喚起を促すことができ、切羽の肌落ちや崩落、崩壊に対する安全性を向上させることが示唆された。

さらにこのシステムは、レーザー距離計や3Dレーザースキャナー、ビデオカメラなど切羽挙動を捉える技術と併用することが可能で、広く切羽作業の安全性が向上することを期待される。

本技術は、福井県のトンネル現場にてシステムの有効性を実証済みであり、今後も押出し性を有する脆弱地山等での適用を検討している。なお、山岳トンネルだけに限らず、様々な現場でこのような可視化を用いた技術に

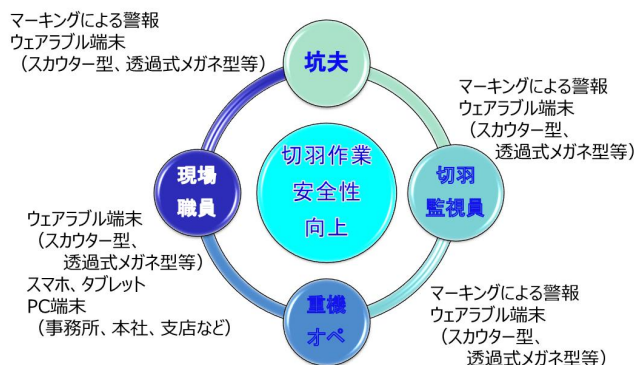


図-6 本開発が目指す構図

よる安全性の向上に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン，2018.1.
- 2) 熊谷幸樹，寺島佳宏，吉田良勝：切羽安全監視システムの開発と不良地山での試験適用，土木学会第66回年次学術講演会講演概要集，VI-327，pp.653-654，2011.
- 3) 横田泰宏，山本拓治：多点式高精度レーザー距離計によるトンネル切羽変位計測，地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1271-1272，2012.
- 4) 藤岡大輔，中村隆史，西山哲，中岡健一：画像処理技術を利用したリアルタイム切羽監視システムの開発，第45回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.55-60，2018.
- 5) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，p.129，2009.

(2018.8.10 受付)

DEVELOPMENT OF A VISUALIZATION SYSTEM FOR TUNNEL FACE DEFORMATION IN MOUNTAIN TUNNEL

Hironori SATO, Akio ICHIKAWA, Minoru HAYASHI, Yoshito HASHIMURA
and Shinichi AKUTAGAWA

We have developed an alarm transmission method applicable in the mountain tunnel works, which in advance sends notification of the possible falling debris, and collapse of the face. This technology directly marks the periphery of the measurement points with a green laser in real-time when the displacement behavior of the face measured with a high-precision laser rangefinder, exceeds the standard reference value. It simultaneously captures the actual face image with a camera and combines it with the displacement data of the face, thereby displaying the actual displacement state of the tunnel face on the wearable terminals in real-time. In addition, it is possible to send images to PCs, smartphones, tablets, etc., or send warning signals such as indicator lights, sounds and vibrations through the internet.

In the mountain tunneling works, there are many occasions when workers have to approach the face of the tunnel. Although the placement of facing guards is mandatory based on Japanese guideline, it is difficult to visually grasp the cracks on the tunnel face and predict the possible collapse. Under such circumstances, the current technology provides immediate notification to the workers of the displacement state of the face, thus improving the safety against the falling debris and collapse of the face.