

山岳トンネル工事における切羽監視の新技術

Face Condition Viewer（商標出願中）切羽変状可視化システムの開発

佐藤 裕考・市川 晃央・芥川 真一

山岳トンネル工事において、切羽面からの肌落ちや崩落、崩壊の兆候を事前に予測し、ICTを活用することで切羽の崩壊危険度を知らせる警報発信手法 Face Condition Viewer（切羽変状可視化システム）（以下「本システム」という）を開発した。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。切羽の崩壊危険度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。

キーワード：山岳トンネル、安全性の向上、切羽の監視、切羽の押出し、可視化、リアルタイム

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。

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), 3)}や画像処理技術を利用した切羽

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					湧水対策等（土の改良）	掘削（掘削）の適否	その他	
	IV、B	III、C	II、D	I、E				掘削（掘削）の適否	掘削（掘削）の適否
鏡吹付け	△	○	◎	◎	◎*	◎	◎	◎	△
鏡ボルト	△	△	○	◎	○	△	△	×	△
浮石落し	◎	◎	◎	△	◎	◎	△	△	△
水抜き・さぐり	○	○	◎	◎	◎	○	×	×	×
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。

の監視などがあり、切羽の押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わかりやすく伝え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。

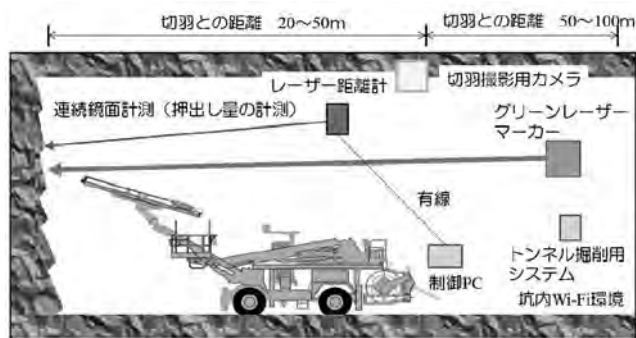
今回、切羽面からの肌落ちや崩落、崩壊の兆候を事前に予測し、ICTを活用することで切羽の崩壊危険度を知らせる警報発信手法本システムを開発した（特許出願中）。本稿では、開発した技術の概要について報告する。

2. 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、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本システムを開発した。坑内機器配置図を図－1に、現場適用時の機器配置状況を写真－1に、本システムの概要を図－2に、機器拡大写真を写真－2にそれぞれ示す。使用する

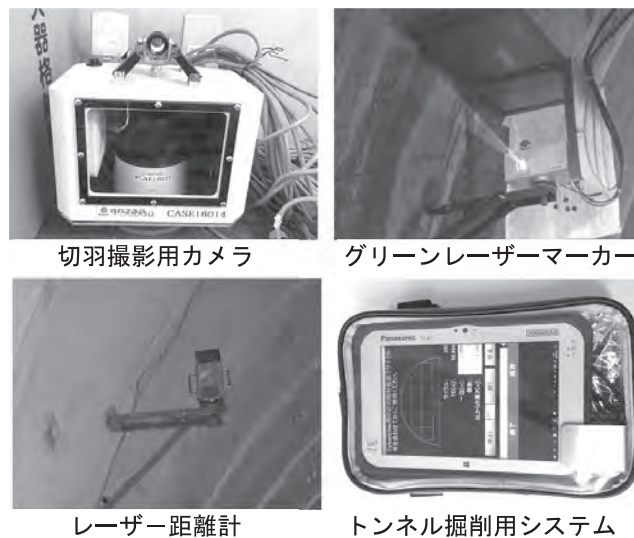
機器は、切羽計測用のレーザー距離計と制御 PC、マーキングすることで警報を可視化情報として発信するグリーンレーザーマーカ、切羽の映像撮影用カメラ、これらを統括するトンネル掘削用システムで構成される。グリーンレーザーマーカとは、緑の光を高速回転で照射することで切羽に任意形状を描画するものである。切羽の崩壊危険度を知らせる警報発信手法の1つ目として、マーキングによる不安定部の明示状況を写真－3に示す。レーザー距離計で連続的に鏡面の押出し量の計測を行い、管理レベルを超過した計測点の周辺をグリーンレーザーマーカで鏡面へ直接マーキングし、切羽の不安定部を切羽直近で作業している全員に対して可視化させる。



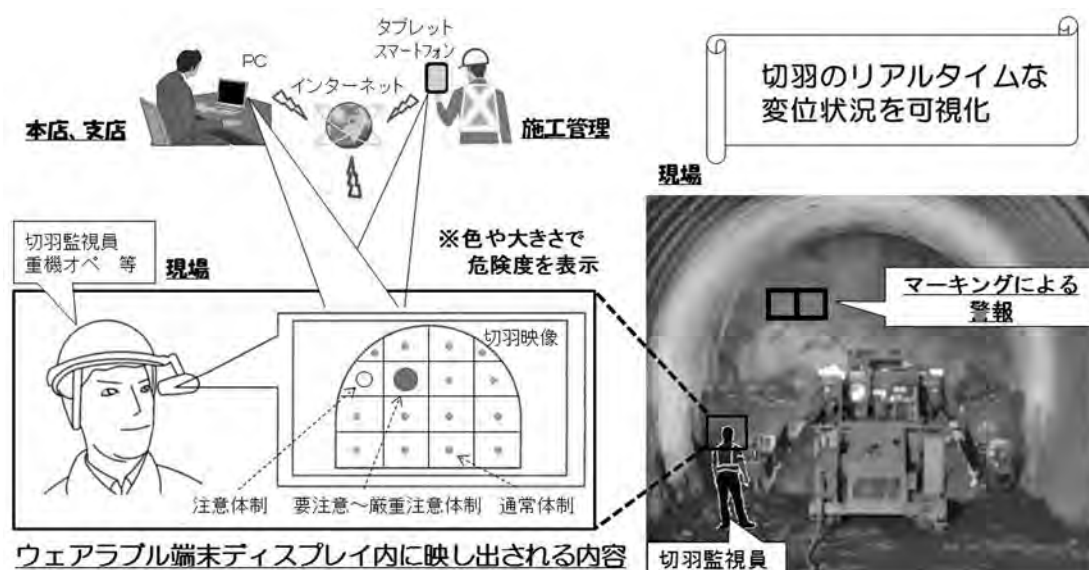
図－1 坑内に配置している機器³⁾



写真－1 現場適用時の機器配置状況³⁾



写真－2 機器拡大写真³⁾



図－2 本システムの概要³⁾

写真-3 マーキングによる不安定部の明示³⁾

次に、切羽の崩壊危険度を知らせる警報発信手法の2つ目として、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-4に、ウェアラブル端末に映し出される映像を写真-5に、管理レベルの一般的な考え方⁴⁾を図-3にそれぞれ示す。ウェアラブル端末（スカウター型や透過式メガネ型）を使用し、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崩壊危険度を管理レベルに応じて可視化さ

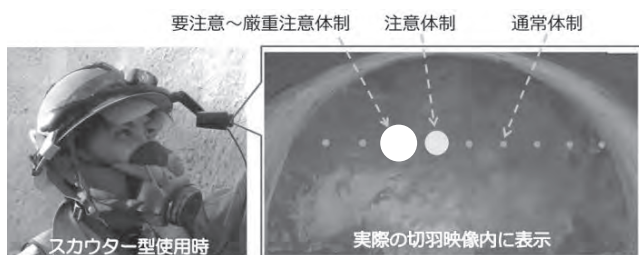
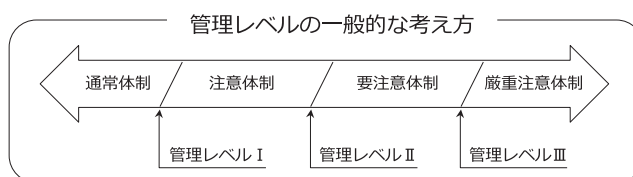
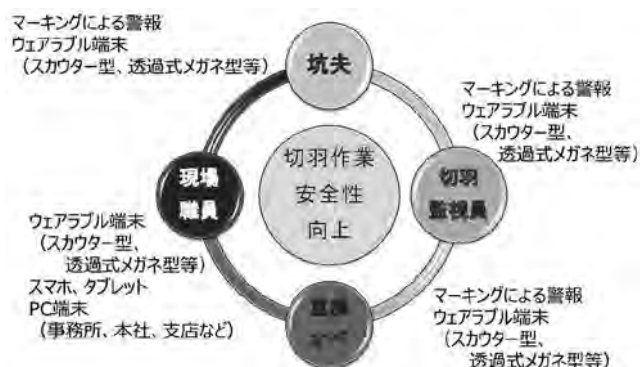
写真-4 切羽監視状況とウェアラブル端末使用状況³⁾

写真-5 ウェアラブル端末に映し出される映像³⁾
 (小丸：通常体制，中丸：注意体制，大丸：要注意～嚴重注意体制)

せた。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，崩壊危険度の表示は，切羽をメッシュ状に分割した任意箇所へ三段階の色分けと円のサイズで知らせる。また，警告灯や警報音，バ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，切羽監視員や作業員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-4に示す。切羽の変位状況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。

図-3 管理レベルの一般的な考え方⁴⁾図-4 本開発が目指す構図³⁾

3. おわりに

山岳トンネル工事において、切羽面からの肌落ちや崩落、崩壊の兆候を事前に予測し、ICTを活用することで切羽の崩壊危険度を知らせる警報発信手法を開発した。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技術である。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ができ、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。

さらに本システムは、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が期待される。

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

た技術による安全性の向上に貢献していきたいと考えている。

J C M A

《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) 佐藤裕考，市川晃央，林稔，藤原伸輝，芥川真一：トンネル工事関係者全員がリアルタイムに切羽状況を把握可能な技術の開発，土木学会第73回年次学術講演会講演概要集，VI-054，pp.107-108，2018.
- 3) 佐藤裕考，市川晃央，林稔，橋村義人，芥川真一：山岳トンネルにおける切羽変位可視化システムの開発，第28回トンネル工学研究発表会，2018.11.（投稿中）
- 4) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，p.129，2009.

【筆者紹介】

佐藤 裕考（さとう ひろのり）
（株）竹中土木
技術・生産本部 技術部



市川 晃央（いちかわ あきお）
（株）竹中土木
技術・生産本部 技術部
課長



芥川 真一（あくたがわ しんいち）
神戸大学大学院
工学研究科 市民工学専攻

