

画像認識による切羽の落石検知・警報装置 の開発

谷 卓也^{1*}・古賀 快尚¹・早坂 翼²・本間 直樹²

¹大成建設株式会社 本社技術センター（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬344-1）

²日興電気通信株式会社（〒141-0032 東京都品川区大崎3丁目6-17）

*E-mail: takuya.tani@sakura.taisei.co.jp

著者らは、切羽監視人の傍らに設置した高感度カメラおよび高性能パソコンによるリアルタイムの画像処理により、災害につながる切羽（地盤）の崩落の予兆である小石や吹付けコンクリート片の落下をいち早く捉え、落下物が動き出してから0.1秒以内に警報を与えることで作業員を危険箇所から迅速に待避させる装置を開発した。この装置は誤った警報を出さないよう、画像認識により人や機械の動きを落石と間違えない処理により、高い信頼性を確保している。

本警報装置は山岳トンネルの現場に導入され、監視人と機械の2つの目による切羽の監視により監視人の負担を低減する他、切羽における作業員の安全確保に貢献している。

Key Words : tunnel face monitoring, security for tunneling work, high-speed photography, image recognition

1. はじめに

山岳トンネル工事では、切羽周辺において作業員が施工の段階に応じて様々な作業を行っている。その中でも、硬岩地山を掘削するための発破の準備や、掘削後に周囲の岩盤を支えるための鋼アーチ支保工の設置では、作業員が切羽に数分から数十分程度、近づいて作業を行う必要がある。実際、この切羽作業中に岩盤の亀裂や地質の脆弱部の影響を受けて、落石や吹付けコンクリート等の落下（以降、「肌落ち」と称する）が生じることがあるが、この肌落ちによる被災の場合、他の要因による被災と比較して死亡や休業一ヶ月以上といった重篤な災害になる傾向のあることが報告されている¹⁾。

切羽における作業については、施工機械の遠隔操作や自動化により無人で行う技術の開発も進められているものの、現状では全ての現場に適用できる技術レベルには至っていない。実際の切羽作業においては、写真-1に示すように切羽直近で作業する作業員の安全を確保するために、鏡吹付けを行い、作業員の上方に落石防護マットの設置を行う等の対策を行っている。さらに、切羽の異常（危険）の発生を察知して、いち早く作業員に警報して待避できるよう専任の切羽監視人を配置している。

著者らは、このような作業環境下で切羽監視人の負担を軽減するとともに、肌落ち等の危険時に切羽の作業員に対して確実な退避を促す切羽監視装置の開発を行った。



写真-1 切羽における作業状況

この装置は、切羽監視員の傍らで機械の目により切羽の肌落ちを捉え、発生から0.1秒以内にこれを光と音で警報するものである。本論文では、開発に注力した課題と、開発した機器の機能と特徴、特に画像認識技術について詳述し、現場導入時に確認した課題と今後の展望についてまとめる。

2. 落石検知・警報装置の開発

(1) 開発課題と解決手法

装置の開発に当たっては、落下物検知のみの機能を有する試作機を作成し、現場実証実験を行って開発課題を

明らかにした。この実験から、主に次の3つの課題の解決が重要であることが分かった。

- ①トンネル施工現場の粉塵、高湿度、振動等の劣悪環境に耐えること。また取扱いやすい小型軽量の機器とすること
- ②どのような色の石や背景色においても、1 cm程度までの小さな落石を確実に検知し、瞬時に警報する機器とすること
- ③落石以外の動きやノイズに反応して、誤警報を発しないこと

以上の課題への解決手法および手段について概要を述べる。①の課題については、IP規格・防水保護構造及び保護等級のIP55以上で各機器の養生ケース（ハウジング）の設計を行った。その際、機器制御や画像計測に使用するPCやLED投光器等、それぞれをファンレス構造とした。②の課題については、休工中の切羽を使い、感度および解像度の異なるカメラを照度や撮影スピードを変えながら種々の大きさや色の石を模擬的に落下させて、検出に必要かつ最適な条件を把握し、設計に反映した。検出画像の背景となる切羽の吹付けコンクリートについても、濡れている場合と乾いている場合のそれぞれについて、同様の試験を実施し、設計に反映した。③については、画像認識技術の適用により解決をおこなった。

開発内容の詳細について、①および②に関する技術および装置の仕様を次節に、検知から警報までの時間に関する検討を本章(3)節に、開発に際し最も工夫を施した③の画像認識技術の内、主要な2つの技術の内容を3章に述べる。

(2) 装置の機器構成および仕様

機器の構成を図-1に示す。本装置は、主に落石検出装置と警報装置から構成される。運用に際しては、切羽の近傍（5～10m）の作業の妨げにならない位置に、照明付カメラを設置する。このカメラで撮影した映像から落下物を検知・判別し、警報を発する。トンネル内に設置した装置および正面から見た装置の外観を図-2に示す。

大きな落石や切羽の崩落の予兆となる1cm程度の小石の落石を検知できるように、カメラの解像度および1台のカメラの検知範囲を決定した。監視中は常に1秒間に40回程度の画像を撮影し、処理する。落石は連続する2画像以上のフレーム間における差分画像から、鉛直下向きの移動体を落石として検知する方法を採用し、3章で述べる誤検知を防ぐ画像認識技術を付加している。

照明は、落石を監視する範囲の照度を一定に保つためのものであり、近赤外線LEDを用いている。これにより、作業員の使用するレーザーポインタや建設機械の照明が発する光（可視光）と干渉しないようになっている。

本装置では、連続撮影された画像をリアルタイムに処

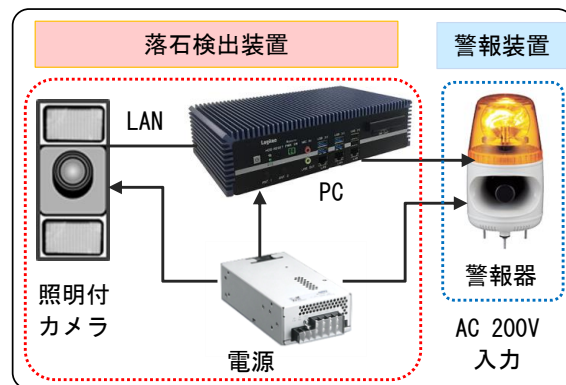


図-1 落石検知・警報装置の構成

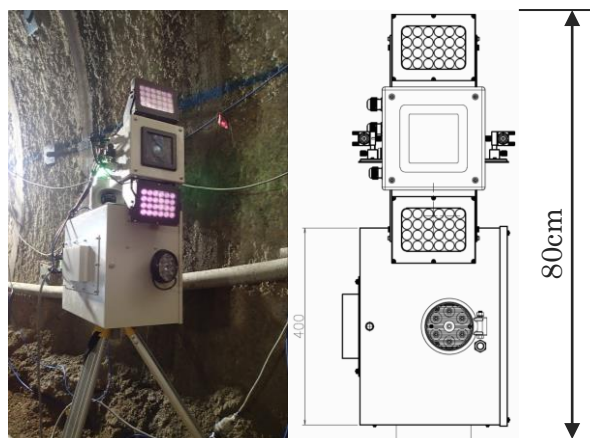


図-2 落石検知・警報装置の外観および寸法

表-1 天端傾斜計の仕様比較

筐体	BOX 型
	外形寸法 W264.2×D156.2×H66.5mm
	拡張ベイ 2.5 型ベイ ×1（内部 1）
電源電圧	DC 入力 9-36 V
質量	約 3kg
CPU	Intel Core i7-6700TE (2.4GHz 8M C4/T8 LGA1151)
メモリ	PC4-17000(DDR4-2133) SO-DIMM 8GB
SDD	SSD2.5 インチ MLC 120GB
使用環境	温度 0～50℃ 湿度 10～80% (40℃)

理するため、高性能かつ粉塵環境でも使用できるファンレスの小型PCを用いた。このPCには落石の検出に必要な撮影条件に関する情報と検出対象の情報とが記憶されている。例えば、カメラの画角、解像度や撮影速度、切羽からカメラまでの距離、検出する落石のサイズの範囲、落下速度、等である。PCの基本仕様を表-1に示す。

警報装置は、肌落ちを認識した場合、作業員に対して危険を知らせるものであり、LED警告灯からのフラッシュ光とサイレン音が発せられるようになっている。

(3) 検知から警報までの時間に関する検討

落石の発生から検知と警報までに要する時間の目標を

定め、最適な撮影速度（1秒間に撮影する画像の数）を明らかにすることにした。

まず、警報を発するまでの時間として、目標を0.1秒とした。これは、人間の反応速度を0.2秒としたとき、落石発生から待避動作まで0.3秒となることから定めたものである。落石の自由落下においては、次の式(1)と式(2)で、落石の速度と距離を表現できる。時間 t [s]、鉛直下向きの落下距離を y [m]、速度を v [m/s]、重力加速度を $g=9.8$ [m/s²]とすると、

$$v = g t \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

となる。0.3秒後の落石速度は、2.94 m/s（時速10.6 km）、落下距離が0.44 mとなる。この場合、落石や崩落の予兆となる小石の落下に対しても、警報により逃げることができ、当たらずに済む可能性がある。ここで、落石発生から検知および警報まで0.1秒で行うことが可能な撮影枚数を精査したところ、1秒間に30～50枚であることが分かった。この速度で撮影枚数を変化させても、警報の遅れや検知精度の低下が発生しないことを、模擬の落石とその検知を表示する画面を同時記録したハイスピードカメラの動画により確認した。このことから、撮影間隔を確認した撮影速度の平均である40Hzとし、常時点灯する照明ではなく撮影するタイミングに合わせて照明を点灯させるパルス式の撮影・照明装置とすることにした。この工夫により、常時点灯式の照明を採用した機器²⁾と比較して次の利点があった。

- ・パルス照明にすることでエネルギー効率が上がり、照明装置を6台から2台に低減できた。
- ・パルス照明により撮影された落石の輪郭がより明瞭に認識可能となった。
- ・PCに必要な性能が明確になったため、必要な機能とを絞り込むことで、PCも小型化できた。

これらの利点により、照明およびPCに供給する電力量が大幅に低減できたことから、電源装置を含め全体が小型化した。現在、装置はカメラやPC、電源等が一体化し、一人で持ち運び、移動ができるようになっている。

3. 画像認識による検知精度の向上

(1) 誤検知の回避方法

a) 概要

図-3に落石検知のアルゴリズムの構成を示す。落石検出においては、まずカメラで撮影された画像がリアルタ

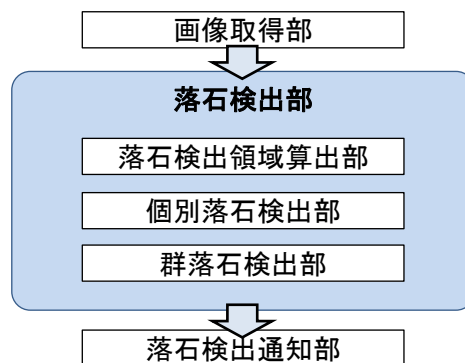


図-3 落石検知アルゴリズムの構成図

イムに画像取得部にデータとして入る。この画像データを元に落石検出を行う。最初に落石検出領域算出部において、過去の N フレーム（実際には $N=3\sim 10$ 程度）におけるフレーム間での差分画像に基づいて落石検知除外範囲を判定しながら、2つの落石検出部（個別落石と群落石）で、この除外範囲を除いた落石検出領域における落石についてのみ検出を行う。落石が検出されたならば、落石検出通知部に落石発生を通知するようにデータが発信され、警報が発せられる。この方法により、撮影した画像に作業員や建設機械が写る場合でも、その部分をあらかじめ落石検出禁止領域とすることで、誤警報無く落石のみを的確に検知・警報することが可能となる仕組みとした。

b) 落石以外の移動体の認識

落石検出の画像認識アルゴリズムは、作業員や切羽近傍の重機といった落石以外の移動体の認識を行って、その範囲以外を落石検出領域とする「落石検出領域算出部」と、落石検出領域に写る移動体を落石として認識する2種の「落石検出部」からなるが、本項では移動体の認識方法と誤検知を防ぐための処理の工夫について説明する。

落石検出領域算出部は、時系列で連続するフレーム間での差分画像に対して処理を行うことで、過去の N フレームにおける各々の差分画像から移動体エリアを抽出し、各々の移動体エリアの集合範囲以外の領域を落石検出領域とする処理を行う。落石候補を検出する領域をリアルタイムに算出する方法について、図-4を用いて説明する。過去 N フレーム分の画像（図-4上段）に対して、時系列で連続した二つのフレームの差分画像を生成し（図-4中段）、閾値による2値化処理を行うことで各々の差分画像から移動体の領域を抽出する。図-4では、人間が一方の腕を挙げる様子を示しており、移動体エリアとしては主に挙げた腕の領域が抽出される。なお、ここでは挙げた腕以外の胴体、頭、他方の腕なども少しだけ動いているので、これらの部分についても移動体エリアとして抽出される。

次に、落石検出領域算出部は、移動体エリアの和集合

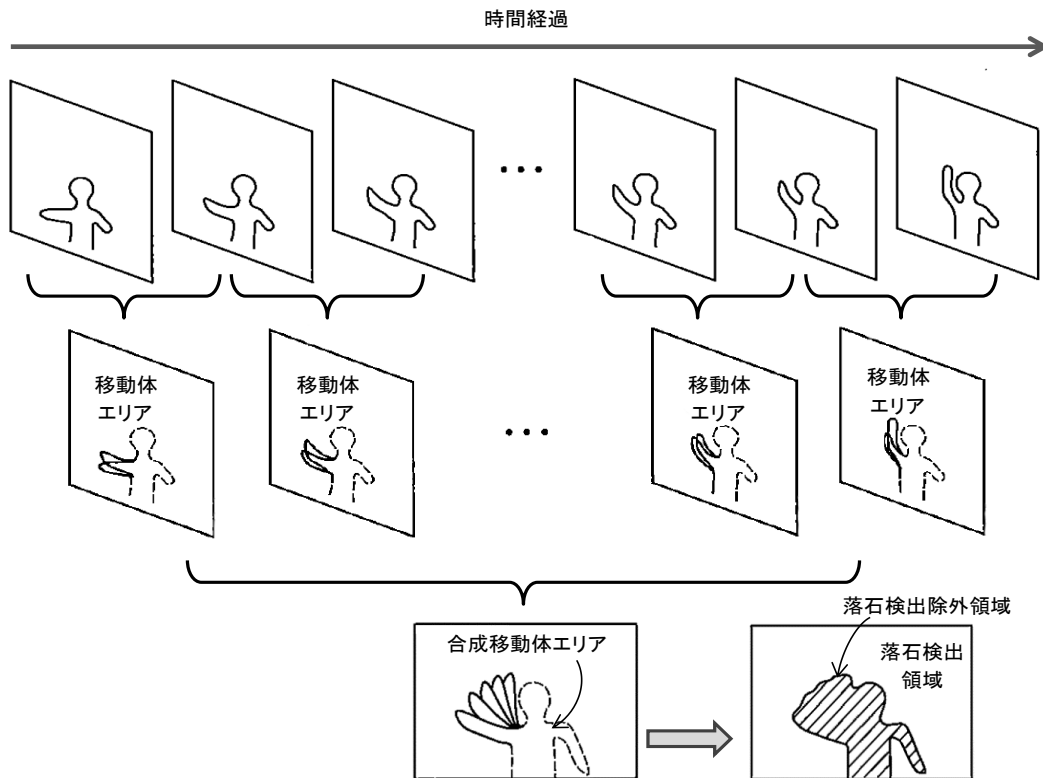


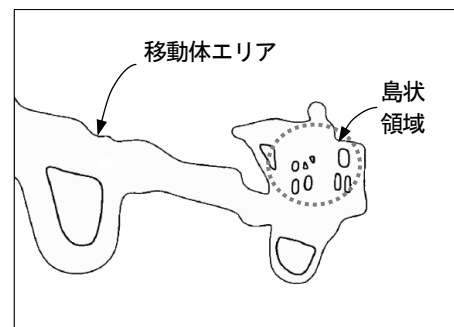
図-4 作業員や機械等の移動体の認識方法（上段：各フレーム画像、中段：差分画像、下段：領域決定画像）

である合成移動体エリア（図-4下段）を求め、繋がっている画素を一つのグループとして同じ番号を付与するラベリング処理や後述の膨張処理を行った合成移動体エリアを落石検出禁止領域とし、落石検出禁止領域以外の補領域を落石検出領域とする。図-4では、過去Nフレームの間に動かした腕の領域ならびに胴体、頭および他方の腕の領域などが主に合成移動体エリアとなる。

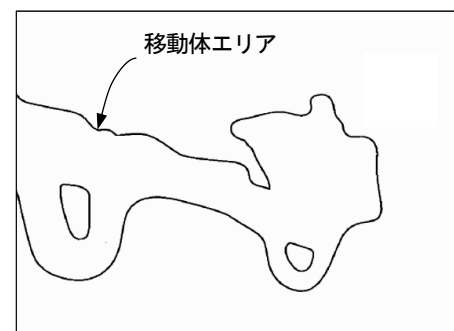
さらに、ここでは各々の移動体エリアの和集合を予め決められた範囲だけ広げる膨張処理も行い、移動体の隙間部分や過去のフレームにおいてたまたま動かなかったために移動体として検出しなかった部分を補間し、本来は落石検出禁止領域とすべきだが落石検出領域になってしまう島状の領域を図-5のように補正し、落石の誤認識の発生を抑制する。

(2) 落石の検知精度の向上

落石検出部は、落石検出領域に写る特定の一つの移動体を落石候補とし、落石候補を複数のフレームに亘って追跡することで、落石候補が真の落石であるか否かを判定する個別落石検出部を備えている。図-6を参照して、個別落石検出部の処理について説明する。図-6の上段3つの画像は、撮影された各フレームの画像イメージであり、それぞれの画像には落石が写っている。ここでは、左側から右側に時間が進んでいる。また、図-6のY軸は、鉛直下向きの距離を正として示している。図-6が示すよ



(a) 処理前



(b) 処理後

図-5 移動体エリアの膨張処理

うに、落石は時間が経過するにつれて下方に移動（自然落下）している。図-6下段は、各フレーム画像の差分画像イメージであり、それぞれの差分画像には、一組の落石候補が示されている。上方の落石候補は、移動前の落

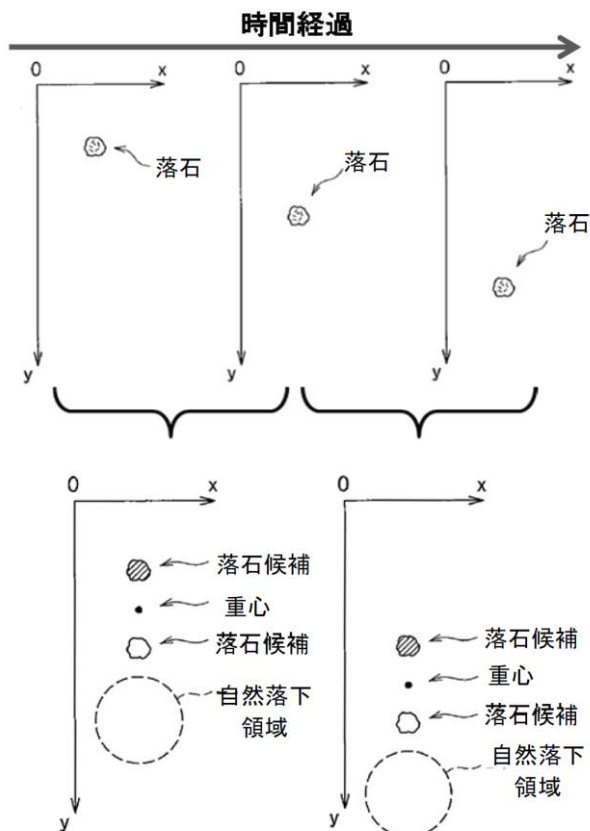


図-6 個別落石の検出方法

石に対応するものであり、また、下方の落石候補は移動後の落石に対応している。

個別落石検出部は、図-6下段の差分画像に、2つの落石候補が検出された場合、それぞれ2つの落石候補の重心の位置から算出した重心を求める。この重心は、上方と下方の落石候補の数学的な重心である。重心の算出は、落石候補の形状や面積などに基づく。次に、図-6の下段右側に示す差分画像の下方の落石候補の位置が、一つ前の差分画像で算出した自然落下の想定領域に含まれているかを判定する。自然落下領域は、落石が自然落下した場合のフレーム間の移動範囲であり、一つ前の落石候補の位置に対して、一定の角度以内でかつ一定の落差の範囲となる。そのため、自然落下領域は一つ前の落石候補の重心の概ね下方に設定される。例えば、複数フレームに亘って連続して落石候補の位置が自然落下領域に含まれる場合、当該落石候補が真の落石であると判定する。

また、落石検出部は、個別落石と同様に、落石検出領域に写る全ての移動体を落石候補とし、全ての落石候補の重心を複数のフレームに亘って追跡することで、落石候補が真の落石であるか否かを判定する群落石検出部を備えている。そのため、落石が同時に多数発生した場合にも、真の落石を検出することができるので、落石の見逃しを防止することができる。



図-7 移動体の検出状況（ジャンボのブーム、湧水）

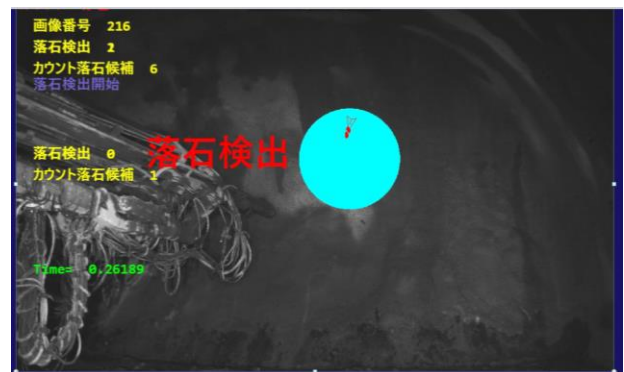


図-8 落石の検出状況

(3) 検証

以上の様な画像処理・画像認識により、移動体が正しく判定されているか、落石のみが検知されているかについて、これまで現場で取得してきた切羽近傍の画像や落石実験の映像を元に検証した。検証に当たっては、およそ50時間分の映像を使用した。ここに代表的な検証動画のキャプチャー画像を図-7および図-8に示す。

a) 移動体

ドリルジャンボのブームの先の作業架台（マンケージ）に乗った作業員と、移動中のブーム等を認識している画像を図-7に示す。図からは、ブームと作業員の他、ランダムに落下してくる湧水についても、落石とは判断せず、警報を発し無い画像認識ができていたことが確認できた。なお、図-7の中央部、赤色の線で囲われた部分は、移動体認識による落石検出禁止領域を示しており、その外側に膨張処理後の落石検出禁止領域を緑色の線で示している。右側には、湧水箇所が緑色の線で囲われているが、この領域では前述の個別の落下物についての認識処理が行われており、連続しかつ多量の水滴が落下する湧水については、落石検出禁止領域として判別できている。

図-8は落石の検出状況を示しているが、これは切羽後方（坑口側）から石を切羽に向かって投げた時の映像のキャプチャー画像である。落石は放物線を描いて切羽に当たり、その後落下し始めた直後、落石と認識されてお

り、落石を正しく認識できている。なお、ドリルジャンボは停止しており、全く動かないことから、ここでは移動体と認識されていない。

b) 落石判定時間

同じ機器構成で、落石判定までの時間を確認する室内実験を行った(図-9 参照)。これは、認識画像に落石判定時の落下位置を、同じ映像に映し込んだ定規により読み取り、その位置から、式(3)にて落石判定までの時間を算出した。式(3)は式(2)の変形により、同じ機器構成で落石判定までの時間を確認する室内実験を行った。これは、認識画像に落石判定時の落下位置を、同じ映像に映し込んだ定規により読み取り、その位置から、式(3)にて落石判定までの時間を算出した。式(2)の変形により、式(3)は次のようになる。

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} \quad (3)$$

実験の状況および、落石判定した位置の確認画像を図-9に示す。画像より読み取った検出位置は、5cmであった。これを(3)式で代入すると、落下開始から検出までの時間は0.1秒であることが分かった。

4. まとめと展望

切羽監視人とともに切羽の安全を確保する技術として、落石検知・警報装置を開発した。開発においては、確実に落石のみを検知し信頼性の高い機器となるよう、画像認識技術を適用した。画像認識技術としては、人や機械等の移動体部分を認識して落石以外の動きを誤って検知しない工夫や、落石の検知精度を高める個別落石の検知方法について述べた。

今後、本装置の普及展開を図るにあたり、現在、装置



図-9 落石判定時間の確認

の小型化を実現しているものの更なるスリム化の要求もある。そのため、現在カメラと警報装置部分を分離できる装置の開発にも取り組み、狭い作業現場においても、利便性の高い装置を提供できるようにした。さらに本年(2018年)に入り、厚生労働省の「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」が改定され³⁾、安全を技術面から支援する取り組みも加速していくと考えられる。

開発した装置については、掘削断面積や地質状況等、多様な現場の条件下においても適合した仕様とし、信頼性を確保できるよう今後も継続して実証・改善を行っていきたい。また、切羽の落石対策のみならず、山岳地帯における作業道路の法面監視への適用も進めていきたい。

参考文献

- 1) 独立行政法人労働安全衛生総合研究所編：トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案，JNOSH-TD-No.2，pp5-6，2012.
- 2) 古賀快尚，谷卓也，須藤敏明，早坂翼，本間直樹：トンネル切羽における落石を瞬時に検知・警報する装置の開発，土木学会第73回年次学術講演会，VI-019，2018.
- 3) 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（改定），2018.1.18.

DEVELOPMENT OF MONITORING SYSTEM FOR THE PREDICTION OF FALLING ROCK AND ALERT TO WORKERS AT THE TUNNEL FACE BY MEANS OF IMAGE RECOGNITION TECHNOLOGY

Takuya TANI, Yoshitaka KOGA, Tsubasa HAYASAKA and Naoki HONMA

A newly-developed face monitoring system utilizes a high-speed camera set beside the watch guard and the image recognition technology. It promptly catches fall of pebbles and flaked pieces of sprayed concrete being symptoms of possible tunnel face collapse. It gives warning within a mere 0.1 seconds after the detection of movements of falling objects and gets the construction workers to leave immediately from the dangerous spot. The effectiveness of this system in securing safety by foretelling falling rocks was verified at a mountain tunneling site. The system is now in operation in two other projects. It is clear that the system contributes to the reducing workload of the tunnel face watch guard and to securing the safety of the construction workers.