

ICT等を活用したトンネル掘削時における安全監視の効率化について

朝長 佑世¹・伊東 良二¹・今村 剛¹・

¹九州地方整備局 大分河川国道事務所 工務第二課（〒870-0820 大分県大分市西大道 1-1-71）

跡田トンネル工事（東工区）では、ICT 技術を活用した落石検知警報装置を導入し、現場実証を行っている。山岳トンネル工事では、被災のリスクが高い切羽作業が行われており、落石や吹付けコンクリートの剥落といった肌落ちの兆候を見張り、危険時にはいち早く作業員に避難を促す専業の切羽監視員が配置されている。本技術は、この監視員にとって代わる省力化技術として期待されるものである。

Key Words: 山岳トンネル, 切羽, 肌落ち, 切羽監視員, 省力化

1. 工事概要

大分 212 号跡田トンネル（延長 2,355m）新設工事は、地域高規格道路（中津日田道路）の内、三光本耶馬溪道路事業（延長 12.8 km）の一環として、東工区（延長 1,093 m）と西工区（延長 1,262m）に分けて発注されたものである。技術の実証を行う東工区は、中津市本耶馬溪町跡田地先を起点側坑口とし、道路幅員 12.0m のトンネルを発破掘削および機械掘削により施工するものである。

掘削箇所の地質は、大分県北部地方に広く分布する凝灰角礫岩を主体とした地質が確認されている。図 1 に工事箇所である跡田トンネルの位置を示す。



図 1 現場位置

2. 目的

山岳トンネルでは掘削を行う最先端部である切羽で作業を進める。切羽作業では、肌落ちと呼ばれる掘削面からの岩塊の落下や吹付けコンクリートの剥落があり、これらの落下物が作業員に当たると重篤な災害となることが多い¹⁾。現在、遠隔施工や機械化による無人化施工を

目指した技術開発が進められているものの、現状では人が立ち入らざるを得ない作業が切羽近傍で行われている。そのため、切羽作業では安全確保を目的として、近年、図 2 のように切羽全面に吹付けコンクリートを施し、作業員の上には防護マットを設置するといった対策が取られる他、肌落ちの兆候を見張り、危険時にはいち早く作業員に避難を促す、専業の切羽監視員が配置される。



図 2 切羽作業における安全対策の例

実際、監視員の仕事は、常に緊張を強いられ、集中力を要するものである。跡田トンネル工事（東工区）では、この切羽監視員に代わる技術として、ICT を活用した機械の目によって長時間継続して切羽を監視し、肌落ち時にはこれを迅速に捉えて作業員に警報を発する。この落石検知警報装置を、切羽近傍での作業に導入し、現場実証を行っている（図 3）。

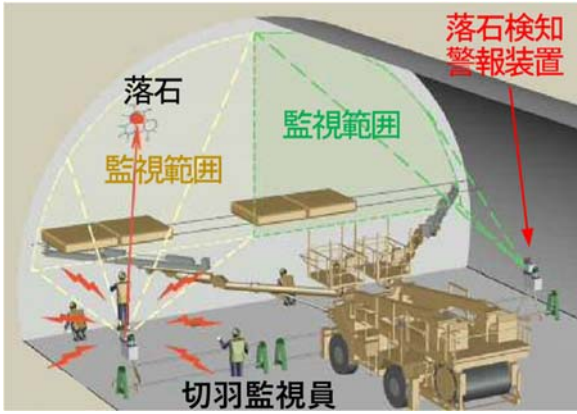


図 3 実証実験のイメージ

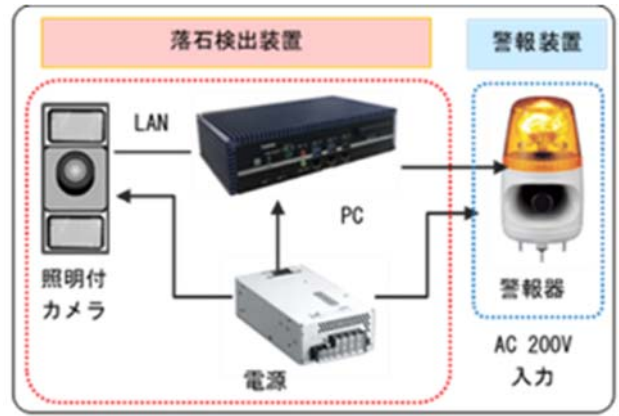


図 5 落石検知警報装置の構成

3. 落石検知警報装置の概要

落石検知警報装置を図 4 に、装置の構成を図 5 に示す。本装置は画像を取得する照明付き高速カメラ、画像を処理して検出する高性能 PC、警報装置で構成される。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設置する。カメラで撮影した映像から肌落等の落下物（1cm程度以上）を 0.1 秒以内に検知してサイレン音とフラッシュ光による警報を発する設計となっている。落下物の検出にはフレーム差分法を用いている。これは、マシンビジョンカメラで高速度（1 秒間に 50 枚程度）に撮影した画像について、連続する二つのフレーム（画像）間における差分画像から移動体を検知する方法である。

画像撮影時には監視範囲の照度を確保するため、近赤外線 LED 照明を用いている。これは、建設機械の照明光（可視光）やレーザーポインターからの光による誤作動を防ぐ工夫の一つである。

撮影された画像は、高性能 PC により連続かつ継続的に処理され、落石を認知・検出する。この PC には、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といった、落石の検出に必要な撮影情報と、検出する落石のサイズ（最大と最小）、落石速度などの検出対象情報についても記録保存されている。 **近赤外線 LED 照明**

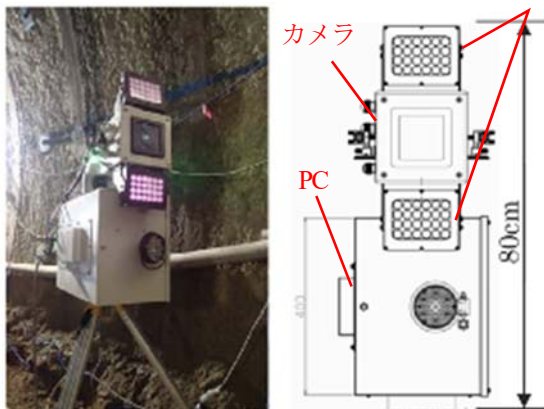


図 4 落石検知警報装置

4. 画像認識技術

4.1 落下物の認識方法

フレーム差分法による落下物の認識方法について図 6、7 を用いて説明する。撮影した連続画像において変化がない場合は、この差分画像は 0（黒）となって図 6 の上に示すようになる。一方、画像内に落石のような移動する物体が撮影された場合、差分画像は図 6 の下のよう移動体が浮かび上がる。差分結果の図には実際の移動体 1 個につき 2 個の物体が浮かび上がり、この 2 個の物体の重心を取る。自由落下ならば次の差分結果における移動体の位置は予測ができ、落下予測領域に重心が入ると落下物と判定する。（図 7）

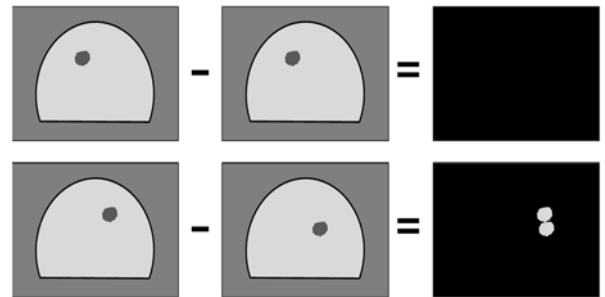


図 6 フレーム差分法による移動物体の検出

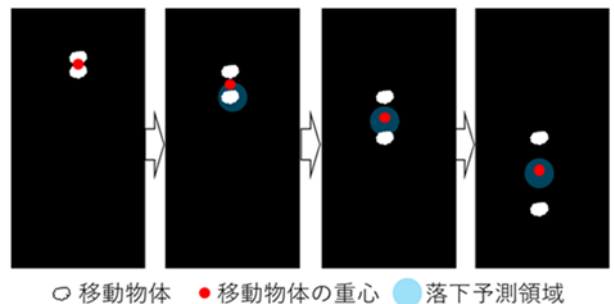


図 7 落下物の判定方法

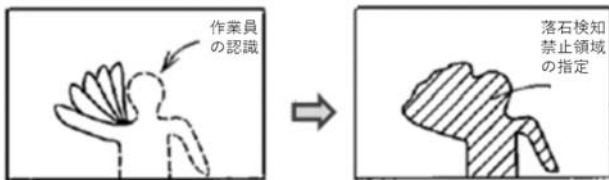


図8 落石以外の動体の認識と落石検知除外領域

4.2 落石以外の動体の認識

落石以外の動体を誤って落石と検知して警報を鳴らしてしまうと、警報の信頼性が低下し、適切な退避がなされなくなる可能性がある。そのため、リアルタイム画像処理において、真の落石とそれ以外の動きを分離できるようにしている。特に、作業員の手や体の動きは、誤認識の最も大きな要因となっているので、これを防ぐ方法について説明する。

作業員や機械のブームは、作業中は常に僅かながら動いており、動いている限り前述の差分フレーム法によりこれを検出でき、手のみを動かしても体も動くので、実際には体全体を認識することができる（図8左）。プログラム上、連続した動きをする箇所や物については、図8の右側に示すように、動いている体とその周囲を常にその領域を落石検知除外領域として指定し、この領域では落石検知を行わないようにしている。機械のブームの動きも同様に落石検知除外領域として指定することで、ブームに付随するホースの揺れを誤検知することが内容にしている。

5. 現場における実証

跡田トンネル東工区での実証について述べる。現場では、落石検知警報装置を切羽から5m以上後方の左右に各1台設置し（図9）、2台の装置で上半アーチ部全面が監視できるように、装置に付属するモニター画面の画像を参考に向きを定める（図10）。スイッチを入れて約30秒で自動的に監視が開始される。装置の稼働は、本体の状態表示灯の緑色LEDの点灯（図9右下）の確認と、監視範囲に小石等を投げて落下物を検知させることでチェックした。

装置による監視は、発破掘削による装薬・結線やあたり確認、鋼製支保工建込み、ロックボルト施工、先受け工の作業時に実施する計画である。

また、現場実証に当たっては、安全確保の効果を高めるため、警報と同時に退避行動がとれるように作業員の訓練および教育を行っている（図11）。



図9 現場に設置した落石検知警報装置（右側）



図10 装置のモニター画面



図11 作業員への装置の説明および安全教育状況



図12 落石判定時間の確認実験状況

5.1 落石判定時間

落石判定までの時間を確認する実証実験を行った(図12)。これは、装置に付属するモニター画面を録画し、模擬した落石について装置が落石判定を行った瞬間の落下位置を、同じ映像に映し込んだ定規により読取り、その位置から式(1)にて落石判定までの時間を算定するものである²⁾。式(1)は自由落下する物体の距離と時間の関係式より求めたものである。

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

tは落下し始めてからの時間、yは落下距離、gは重力加速度である。画像より読み取った検出位置は、5cmであった。これを(3)式に代入すると、落下開始から検出までの時間は0.1秒であることが確認できた。

5.2 課題

本節では、現場実証で明らかとなった課題についてまとめる。

(1) 軽量化

機器の全体の質量は20kgである。これを現場で運搬、設置、片付けを行う切羽監視員(または、作業員)にとっては、負担と感ずるようであり、さらなる軽量化もしくは、設置方法の検討が必要であることが分かった。

(2) 装置の設定方法の簡易・自動化

装置はトンネル坑内の安定した照度の条件下で開発されている。そのため、今回実証することとなった坑口付近の施工では、特に日中の天候等により監視中の切羽の明るさが変化したため、確実な落石検知および誤検知を防ぐために設定する数値パラメータの変更が頻繁に必要となった。このパラメータの設定においては、1回あたり5~20程度要する場合もあり、明るさに応じたパラメータ値の自動設定機能等の改善が必要である。

(3) 誤検知への対策

装置には、落石以外の落下物やノイズによる誤検知を防ぐ機能が搭載されている。しかし、作業員の反射チヨ

ッキやヘルメットからの反射光によりしばしば誤検知が発生した。特に、カメラに近い位置を通過した際には、誤検知することが分かった。誤検知をした際の画像を記録し、これを防ぐプログラム上の改良を行う。

(4) 検知範囲の拡張

現在、装置はトンネルの両側の端に設置することになっている。設置位置の切羽からの距離は標準5~7mとなっているトンネル掘削幅が大きい場合、また、設置が標準的な位置に行えない場合、検知範囲を超えてしまう懸念がある。そのため、監視範囲を広げるレンズの画角の拡張および照度を増強する改良も必要である。

6. まとめと展望

落石検知警報装置の現場運用による実証で、いくつかの解決すべき課題が明らかになった。さらに、跡田トンネル東工区においては、今後、発破掘削が計画されており、装葉や結線といった切羽近傍で作業が行われる。そのため今後も実証を継続し、一般の山岳トンネル工事現場でも適用できる、切羽監視員に代わることのできる技術となるよう、課題に対し改良改善を継続していく。特に、軽量化や装置の取り回しの良さについては、普及への大きな課題と考えられる。近い将来、展開される5Gの無線技術等も取り入れて、ケーブルレスの監視装置に発展することも考えられる。

また、この装置は、落石に関する情報を数値化して保存する機能と、落石発生の前後の画像保存機能を有する。施工の進捗とともに蓄積されるこれらのデータを活用し、落石の危険性の評価や、他の施工に伴う地山の挙動や事前の地質情報等を機械学習させたAIによる地山判定の効率化への取り組みについても開発が進められています。

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，pp.5-6，2012
- 2) 落石を予知・警報する切羽監視システム「T-iAlert @ Tunnel」の開発：大成建設技術センター報，No.51，2018