

合理的な対策工のための落石現象の可視化への取り組み

～トンネル切羽監視装置 T-iAlert[®] Tunnel を自然斜面へ適用～

宮永 隼太郎*¹・山上 順民*¹

Keywords : natural slope, rock fall, interframe difference method, characteristic of movement

自然斜面, 落石, フレーム差分法, 運動特性

1. はじめに

落石とは岩盤の不連続面が拡大し、岩塊や礫が剥離したり、表層堆積物、火山噴出物、固結度の低い砂礫層中の岩塊、礫が表面に浮き出して斜面より落下する現象を指す¹⁾。落石の発生には、素因と誘因の両方が深く関与している。素因は斜面の地形・地質を指し、誘因は、落石発生の引き金となる降雨・風・凍結融解・地震などを指す。落石は近接する道路や鉄道施設、走行する車両などに大きな被害を与えることがあるため、素因と誘因を明らかにし、各現場の状況に合わせた落石対策工が求められる。

落石対策工は、斜面に分布する浮石・転石の除去、コンクリート等で斜面の一部を固めるといった、落石の発生を抑止する落石予防工と、防護ネットや防護壁により斜面上で発生した落石から保全対象を保護する落石防護工に分けられる。落石予防工にあたり、落石の発生源や予想される落石のサイズに応じた設計をする必要がある。また、落石防護工にあたっては、落石のサイズや速度、到達位置を把握し、予想される運動エネルギーに耐えうる設計とする。

落石の発生源の調査では、浮石・転石の有無、斜面の形状・地質、弱層などを把握するための目視観察、計測が行われている。落石の運動特性の分析では、斜面上部からコンクリート塊を落下させる実験²⁾や数値シミュレーション³⁾が例に挙げられる。これらの事例は落石発生前後の分析や落石を模擬した研究である。落石はいつ発生するか予想が困難であることから、自然に発生する落石の運動分析を対象とした研究は進んでいない。

当社は、山岳トンネルの施工において切羽上部で発

生する落石の監視を行うトンネル切羽監視装置「T-iAlert Tunnel」⁴⁾の開発を行ってきた。今回、当装置に改良を加え、自然に発生した落石の記録と評価を目的に、山岳部の車道に面した斜面において 8 ヶ月間、落石発生時の日時と連続画像の記録を行った。落石の連続画像から、落石対策工の検討に有用である落石発生源、時期、規模、運動経路や速度などの評価を行った。本報告は「第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム」に投稿した論文⁵⁾を基に、詳細説明を加えたものである。

2. トンネル切羽監視装置 T-iAlert Tunnel

2.1 概要

トンネル切羽監視装置は山岳トンネル施工現場の切羽作業において、切羽上部で発生する落石から、切羽作業員の安全確保を目的として開発された⁴⁾。当装置は、監視中の切羽周辺において落石の発生を検出すると警報を鳴らし、切羽周辺の作業員に切羽後方への退避を促す。図-1 に当装置の構成を示す。当装置は、画像を取得するマシンビジョンカメラ (XCG-G240, ソニー製)、落石の検出をする画像処理 PC (LB-A08, ロジテック製)、警報機で構成される。切羽作業の監視の際は、切羽の 5~10m 程度後方に設置する (写真-1)。マシンビジョンカメラで取得した連続画像 (1 秒当たり 40 枚) を画像処理 PC に転送してリアルタイムで画像処理を行う。落石を検出すると警報が鳴り、切羽周辺の作業員に退避を促す仕様である。検出できる落石のサイズは 10mm 以上であり、落石発生後 0.1 秒以内に検出することができる。当装置を自然斜面の落石監視に用いて、警報の代わりに、自然に発生する落石の日時と連続画像を記録することで、落石の誘因や運動の分

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

析が可能であると考えた。そこで次節のような装置の改良を実施した。

2.2 斜面監視への適用

斜面監視の際はできるだけ広範囲を監視する必要がある

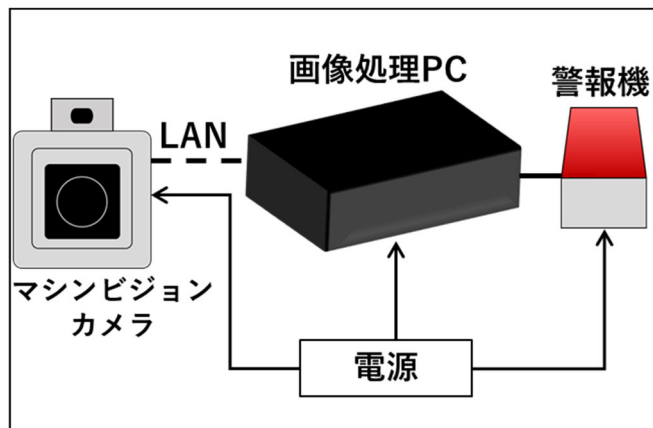


図-1 トンネル切羽監視装置の構成

Fig.1 Schematic diagram of tunnel face monitoring system



写真 1 T-iAlert Tunnel (左), 切羽監視状況 (右)

Photo.1 Photo showing an exterior view of T-iAlert Tunnel (Left) & rock fall monitoring at the tunnel face (Right)

表-1 トンネル切羽用, 斜面用の監視装置の比較

Table 1 Comparison of monitoring system at a tunnel face and on a slope

監視対象	山岳トンネル切羽	斜面
監視対象からの設置距離	5~10m	~100m
監視対象	切羽上部からの落石	斜面の落石
画素数	約240万画素	約240万画素
望遠レンズ	なし	あり
検知サイズ(直径)	約10mm以上	約150mm以上 *設置距離100mの場合
役割	落石発生時に警報, 周囲の作業員を退避させる	落石発生日時と映像を記録

あり, 必然的に斜面からの設置距離が長くなる。そのため,ズーム式レンズ (G10X16M PZFI, スペース製) を搭載し, 100m 離れた斜面の監視を可能にした。監視範囲は幅約 50m である。また, 落石検出中の連続画像を保存する機能を付加し, 後日回収して分析に用いる。検出する落石のサイズは斜面からの距離に依存する。斜面からの設置距離が 100m の場合は粒径約 150mm 以上の落石を検出できる。当装置は鉛直下向きに運動する物体を落石と判定する仕様であった。そのため, 屋外で使用する場合, 雨や雪といった落石以外の落下物を検出してしまい, 落石分析に不要な画像データが膨大に記録される懸念があった。そこで, 検出する落下物の速度に閾値を与え, 一定以上の落下速度の物体は落石と判定しない仕様とした。この仕様変更により, カメラ付近を通過する雨や雪の速度は数 10m 離れた斜面上の落石よりも, 映像内では相対的に速く見えるため検出しない。一方で, カメラから離れた位置を通過する雨や雪はサイズが小さくカメラで捉えられないので検出されない。以上により, 雨や雪の影響を除去し, 意図しない画像データの記録を予防した。山岳トンネル切羽監視用, 斜面監視用の装置の比較を表-1 に示す。

3. 斜面の落石監視

3.1 斜面状況

改良した監視装置を用いて, 自然斜面の長期間の監視実験を実施した。写真-2 に監視対象斜面の状況を示す。当斜面は過去に吹付けコンクリートによる落石予防工が実施されているが, 現在はその 3 割程度が剥がれ落ちており, 岩盤が露出している。斜面の形状は, 吹付けコンクリート部が尾根型斜面をなしている。一方, 岩盤露出部は 3 つの谷型斜面からなっている。谷型斜面 1 は吹付けコンクリート部左側の高標高部に位置し, 褐色風化した多亀裂 (亀裂間隔最大 200mm 程度) な頁岩が分布している。谷型斜面の方向は写真左下側の沢の流水が植生域から出たあたりに向いている。谷型斜面 2 は谷型斜面 1 の低標高部に位置し, ブロック状の砂岩と頁岩が分布している。この境界に幅 1m の破砕帯 (土砂状を呈する) が発達している。この破砕帯に沿って谷が形成されており, この谷の方向は河川にかかる橋を向いている。この位置には落石により破損したと思われるガードレールが確認された (写真-2 (左下))。谷型斜面 3 は吹付けコンクリート部の右側の高標高部に位置し, 褐色風化した多亀裂 (亀裂間隔最大 200mm 程度) な頁岩が分布している。谷の方向は



写真-2 落石監視を実施した斜面の状況
Photo 2 Slopes where rockfalls were monitored

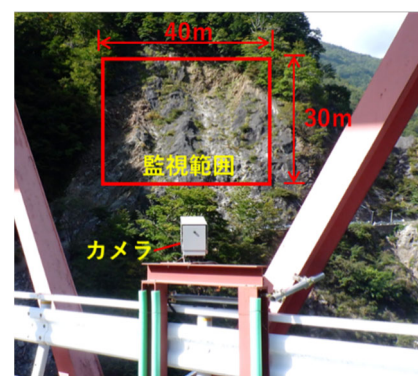


写真-3 斜面監視状況
Photo 3 Slope area where rockfalls were monitored with the camera

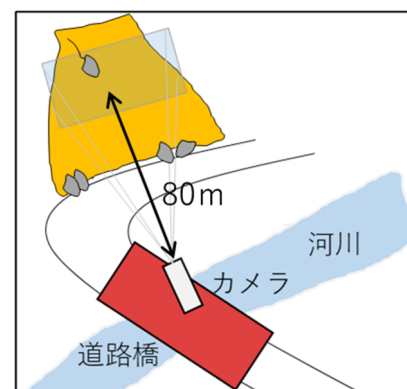


図-2 斜面とカメラの位置関係
Fig.2 Relative location of the camera to the monitored slope

写真-2（上）で吹付けコンクリートが白くなっている上下方向である。この斜面下に設置された防護ネット（高さ 1~2m）の裏側には写真-2（右下）に示す通り落石が多数確認された。

3.2 監視状況

斜面の監視は2020年12月から2021年7月の期間中、毎日、日の出から日没まで行い、落石発生時には、その日時と、発生前後 5 秒間の連続画像を記録した。ただし、夜間や悪天候時は視界不良となるため、監視は実施しなかった。装置のカメラは斜面下の河川にかかる道路橋の中央部に設置した（写真-3、図-2）。斜面とカメラの距離は約 80m であった。また、落石の誘因を分析するため、斜面近傍において気温と降水量を計測した。

4. 落石監視結果と落石挙動の分析

4.1 落石記録と降水量・気温の関係

図-3 に2021年1月1日~2021年6月30日の1日ごとの降水量と平均気温のグラフを示す。監視装置は強

い雨の間や夜間など、カメラの視界が遮られる場合は監視が行えないが、これを除く条件下で、図中の赤線が引かれた日に落石の発生を確認した。数字は落石の発生順（No.）を示す。記録された 11 回の落石のうち、2回が雨天の日に発生した（No.8,9）が、一方、その他の 9 回は前日と当日は降水が無い場合、必ずしも降水が落石の誘因となるといえるデータは得られなかった。一方で、3月末までの冬~春にかけて落石が多い特徴が見られた（No.1~9）。当該地域は冬季に積雪が見られ、図-3 中の2021年1月1日~3月1日の期間のように、平均気温が氷点下を下回る日が多く、斜面の凍結融解が落石の誘因となったことが示唆された。また、1日に複数回の落石が発生した日が見られた（No.2~4, 5~6）。落石が 1 度発生すると短い時間に再度発生しやすい可能性が示唆された。

4.2 フレーム差分法による落石の分析

落石の運動特性を分析するため、落石発生中の連続画像にフレーム差分法⁴⁾を適用した。フレーム差分法とは 2 枚以上の画像を重ね合わせて差分を取り、一致しない箇所を抽出する手法である。図-4 に分析のプロ

落石発生頻度と気候データ *赤色縦線が入った日に落石発生



図-3 落石の発生日と降水量・気温の記録 (赤色実線が落石発生日, 赤数字は発生順 No.を示す)

Fig.3 Recorded dates of rockfalls with precipitation and temperature (solid red lines indicate dates of rockfalls, red figures indicate the order of occurrence)

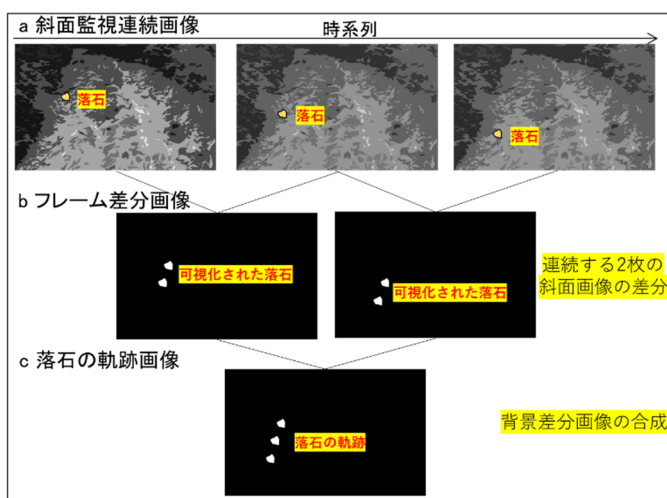


図-4 フレーム差分の手順

Fig.4 Interframe difference method

表-2 落石記録の詳細

Table 2 Details of recorded rockfalls

発生順 (No.)	日	時刻	発生源	最大粒径 [mm] (概算)
1	2021/01/03	10:48	⑤	200
2	2021/01/13	11:30	②	170
3	"	11:54	②	170
4	"	12:29	④	120
5	2021/01/18	08:03	②	170
6	"	08:51	②	150
7	2021/02/06	13:05	⑥	250
8	2021/02/19	09:48	③	170
9	2021/03/02	17:15	①	150
10	2021/05/31	10:25	⑤	170
11	2021/06/02	17:35	③	150

一を示す。図-4a は落石発生時を模擬した連続画像である。連続する 2 枚の画像の差分をとった結果が図-4b である。フレーム差分法により、動体(落石)のみが抽出される。連続するフレーム差分結果を合成したものが図-4c であり、落石の運動経路を可視化することができる。また、画像中の落石のピクセルサイズから落石の粒径が推定でき、運動経路とカメラのフレームレートから落石の速度を算出することができる。装置と斜面の距離が 80m の今回の場合、1 ピクセルあたりの粒径は約 20mm である。表-2 に落石の詳細記録、図-5 に記録された全落石の発生源と運動経路を示す。運動経路は時系列順に 3 つの図に分けて示した。図中には吹付けコンクリートと岩盤のそれぞれの地質の境界を表し、色のついた数字と軌跡が落石の発生順 (No.) とその時の落石の運動経路を示す。また、落石の発生源を ①~⑥で示した。これらの落石のうち、2つの落石の高さと速度の関係を図-6 に示す。ここでは各落石のうち、

最大粒径の落石の結果について図示する。谷型斜面 3 で発生した No.7 の落石は斜面の凹凸の影響を受けて速度の変化が大きい結果となった。速度の最大値は 14m/s 程度であった。谷型斜面 1 で発生した No.8 の落石は 7m 付近で速度が大きく変化した。速度の最大値は 11m/s 程度であった。その他の落石においても、同様の速度の変化を示し、最大速度は道路に到達する時点で 10~15m/s であり、この速度と粒径、および仮定した密度により、落石の運動エネルギーを計算すれば、落石防護工の仕様検討に利用できる可能性がある。

4.3 落石の特徴

落石の発生源は 6 つのエリアであった (図-5)。6 つのエリアの位置は、頁岩で構成される谷型斜面 1 の上部 (①)、中部 (②)、下部 (③)、砂岩で構成される谷型斜面 2 (④)、頁岩で構成される谷型斜面 3 の中部 (⑤) と右端 (⑥) である。このうち、4 回の落石 (No.2, 3, 5, 6) が②で記録された。表-2 に示した通

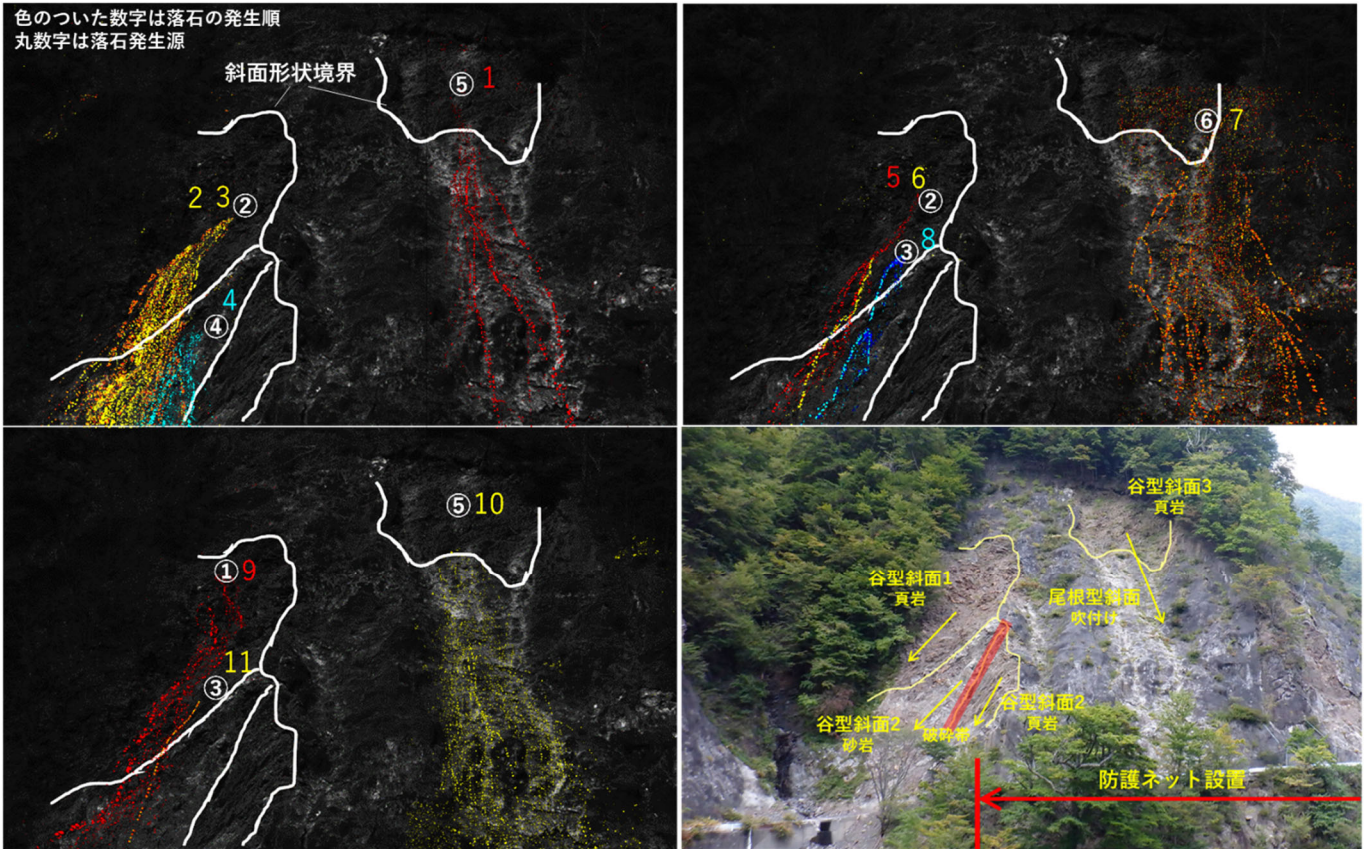


図-5 落石の運動経路 : No.1~4 (左上), No.5~8 (右上), No.9~11 (左下),
斜面の地質構造 (右下)

Fig.5 Motion path of rockfalls: No.1~4 (top left), No.5~8 (top right) and No.9~11 (bottom left).
Geological structure of the slope (bottom right)

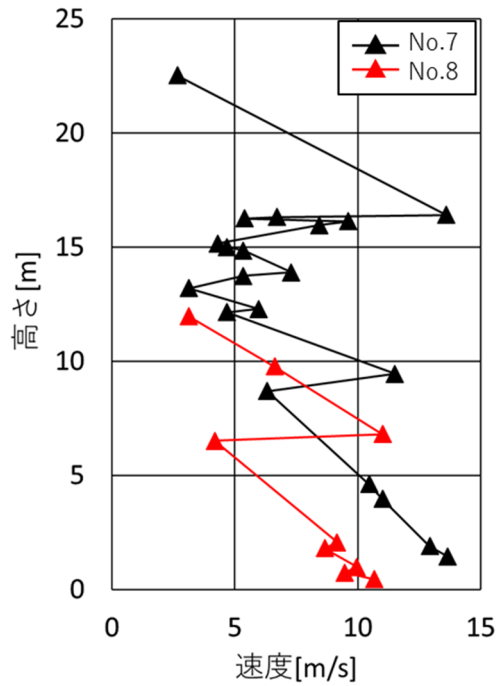


図-6 落石の速度

Fig.6 Velocities of rockfalls

り, No.3 と No.6 は, 1 回目の発生から 60 分以内に続けて 2 回落石が発生していることが分かった。落石が 1 度発生した箇所では再度 2 回目が発生する可能性があることが確認された。①~③で発生した落石は谷型斜面 1 に沿って沢側に落下し始めるが, 途中から谷型斜面 2 に移動し, この斜面に沿って落下した。④で発生した落石は谷型斜面 2 に沿って沢側に落下した。①~④の落石の通過範囲は谷型斜面 2 の範囲であった。この範囲は防護ネットが設置されておらず, 写真-2 でガードレールが破損していた区間と一致した。⑤, ⑥で発生した落石は発生源が高標高部に位置しており, かつ比較的広い範囲に落石が飛散した。これは斜面上で跳躍する回数が多いことが原因と考えられる。このことから, エリアの下部には防護ネットが設置されているが, 斜面形状によってはネットを飛び越えて車道へ到達する可能性が考えられる。また, 頁岩が分布するエリアにおいては, 一度の落石で複数の岩塊が発生する様子が見られたが, これは頁岩が多亀裂であることに起因すると考えられる。

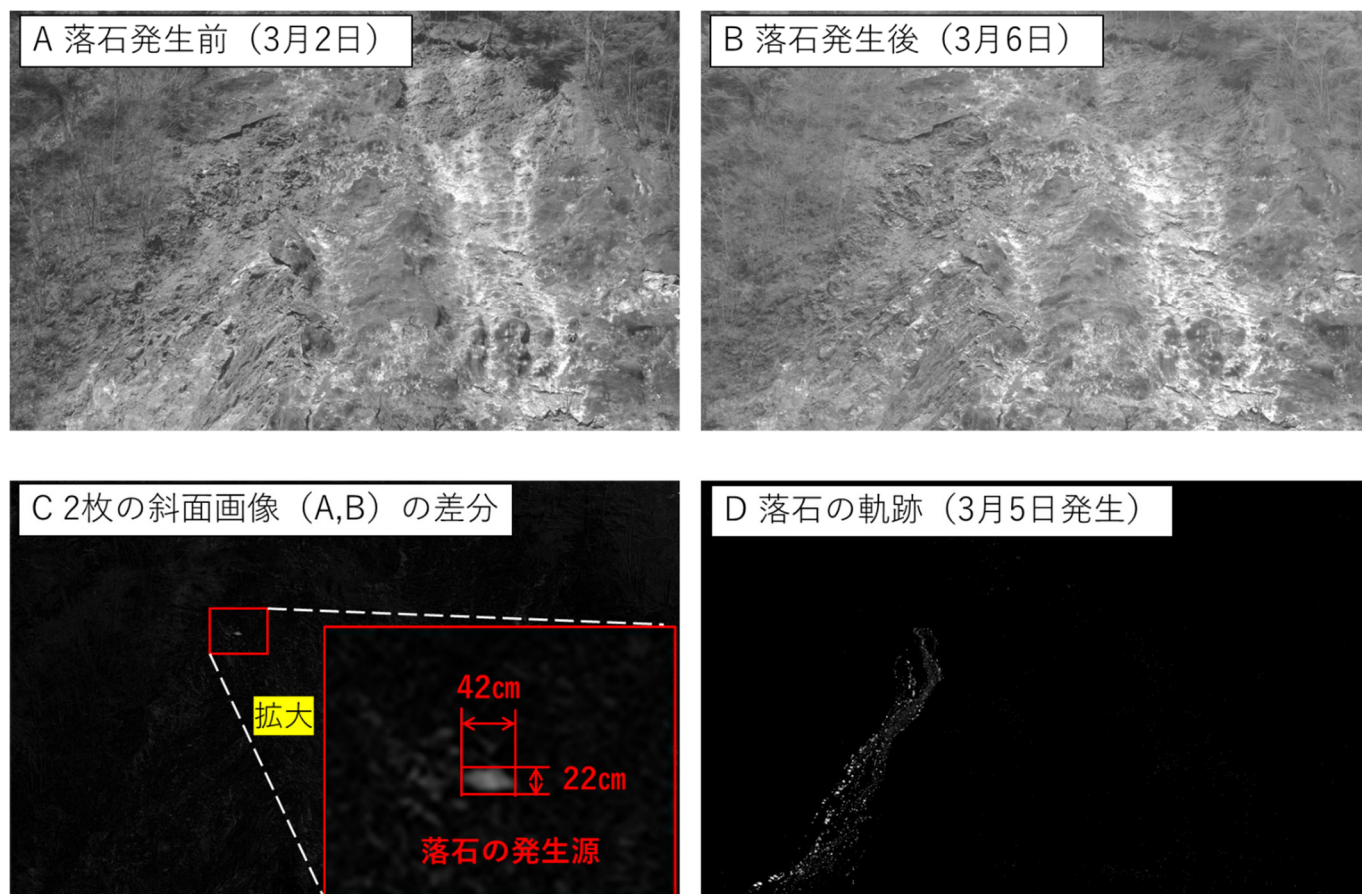


図-7 斜面画像のフレーム差分による落石発生源の抽出

Fig.7 Extraction of rockfall source by interframe differences of slope images of slope images

5. 夜間・雨天時の落石記録手法の検討

今回の斜面監視において、夜間と悪天候時は斜面監視ができないことを既に述べた。日外ほか⁹⁾では異なる時期のほぼ同じ構図の2枚の写真の差分から斜面の崩壊などの変状箇所の抽出を実施している。これにならない、異なる日時の斜面のフレーム差分を行うことで、斜面の変状を抽出し、落石の発生源を明らかにする手法を試みた。植生、地表の雪、日光の影響により斜面の見え方が異なるため、この手法は使用する斜面画像の選定に注意を要した。落石が発生する数日前(図-7A)と翌日(図-7B)の斜面画像の差分をとった結果が図-7Cである。赤枠内の白く表現されている箇所が落石発生源であり、その規模は幅400mm、高さ200mmと考えられる。この間には図-7Dに示す落石が発生しているが、この際に生じた発生源の斜面の変状箇所をフレーム差分により可視化できた。今後、リアルタイムで斜面監視ができない期間については、定期的(例えば、数時間ごと)に斜面画像を記録し、その差分から斜面変状や落石発生源を把握することで可能な限りシームレスに落石発生の有無を把握したいと考える。

6. まとめ

トンネル切羽監視装置を自然斜面の落石記録用に改良して落石の日時と連続画像を取得し、得られた落石の連続画像から落石の発生源、頻度、規模、運動特性を分析した。

その結果、今回の監視対象の斜面では凍結融解が落石の誘因になる傾向が確認できた。落石の日時とフレーム差分法を用いた分析から得られた落石の発生源やサイズなどの情報は落石予防工の検討に有効である。また、これらの情報に加え、落石の到達域と運動エネルギーは落石対策工の設計に有用である可能性がある。ただし、当システムは夜間や悪天候時の斜面監視は難しいため、前章で試行したように、一定間隔で撮影した日中の斜面画像の差分結果から、落石発生有無と発生地点を把握することで、精度の高い落石の傾向分析ができると考えられる。

今後は、地質や形状などの条件が異なる複数の斜面において落石監視の実施とデータの蓄積を継続し、落石の分析方法の改良を図りたい。そして、現状では粒径150mm以上の落石のみを検出する仕様となっており、

小規模な落石は記録されていない。今後は、より綿密な落石の記録と分析を実施するため、現在よりも解像度の高いカメラを使用し、粒径 150mm 未満の落石の記録にも努めたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会, 落石対策便覧, 丸善出版, p.6, 2018.
- 2) 右城猛, 楠本雅博, 篠原昌二, 木下賢司: 落石の運動機構に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.62, No2, pp.377-386, 2006.
- 3) 田中敬大, 前田健一, 堀耕輔, 牛渡裕二, 川瀬良司, 鈴木健太郎: 二次元個別要素法を用いた落石防護土堤の衝撃干渉性に関する数値解析, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.819~832, 2018.
- 4) 谷卓也, 古賀快尚, 青木智幸, 高市一馬: 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第51号, pp.47-1~47-8, 2018.
- 5) 宮永隼太郎, 山上順民, 谷卓也: リアルタイム写真差分解析システムを用いた自然斜面における落石の運動分析に関する研究, 第48回岩盤力学シンポジウム, pp.150-155, 2021.
- 6) 日外勝仁, 角田富士夫, 山崎秀策, 倉橋稔幸: 岩盤斜面の UAV 撮影画像における背景差分法の適用性検討, 第52回地盤工学研究発表会, pp.1937-1938, 2017.