

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

宮永隼太郎^{1*}・山上順民¹・谷卓也¹

¹大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

*E-mail: mynsnt00@pub.taisei.co.jp

斜面からの落石は近接する施設や車両に大きな被害を与える可能性があり、効果的な落石対策のためには落石の原因と特徴を把握することが重要である。筆者らは、山岳トンネル工事における切羽からの落石災害の低減を目的として落石監視システムを開発した。このシステムは 1 秒間に 40 枚の撮影画像をリアルタイムで解析し、落石を検出し警報を発する機能を有する。当システムを自然斜面における落石の記録に適用可能であると考え、システムに画像記録機能を追加し、山岳地の工事用道路に面する斜面の落石監視を約 7 か月間行った。その結果、記録された落石発生時の連続画像に対し背景差分処理を施すことで、落石対策工の設計に有効と考えられる発生源、時期、規模、運動経路や速度などが評価できたので報告する。

Key Words: rock slope, rockfall, background difference, motion characteristics

1. はじめに

日本は国土の約 7 割が山地に占められており、地形が急峻であることに加え、多雨かつ地震が頻発する地域であることから、土砂災害が頻繁に発生している。日本国内では 1982 年の土砂災害の集計以降、1 年あたりに平均 1000 件以上の土砂災害が報告されている¹⁾。2018 年には日本全国で 3,459 件の土砂災害が報告され、集計開始以降、最も件数が多い年であった。土砂災害の誘因はおもに豪雨や台風によるもので、他には積雪と融雪、地震等があげられる。土砂災害は大きく、地すべり、土石流、斜面・盛土崩壊、岩盤崩壊・落石に分けられており、土砂災害発生件数の約 1 割は落石が占めるという報告がある²⁾。

落石は近接する道路や鉄道施設、走行する車両等に大きな被害を与えることがあり、各現場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。落石予防工の実施の際は、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、落石防護工の実施の際は、落石の到達位置を把握し、予想される運動エネルギーに耐える設計とする。落石の調査の際は、発生源の特定の場合、浮石・転石の存在や斜面の形状・地質、斜面の弱部を把握するための目視観察や計測、解析が行わ

れている。落石の運動特性の分析には、斜面上部からコンクリート塊を落下させる実験³⁾や数値シミュレーション⁴⁾が用いられている。UAV を利用して撮影した時期の異なる同一斜面の画像差分をとることで、落石発生箇所や規模の分析を行う例⁵⁾もある。しかし、これらの調査方法では自然に発生した落石の正確な発生日時や発生源、規模等を分析することはできない。

筆者らは、山岳トンネルの施工において切羽上部で発生する落石からの切羽作業員の安全確保を目的として、落石監視装置の開発と適用を行ってきた⁶⁾。この装置は、監視中の切羽周辺において落石発生を検出すると警報を鳴らし、切羽作業員に切羽後方への退避を促すものである。当装置を岩盤斜面における落石の記録と運動の分析に適用可能であると考え、山岳部の工事用道路に面する岩盤斜面の落石監視を約 7 ヶ月間実施した。その結果、落石対策工の検討に有用と考えられる落石発生源、時期、規模、運動経路や速度などが評価できたので報告する。

2. 落石監視装置

(1) 装置の概要

図-1 に落石監視装置の構成を示す。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)、落石を検出する画像処理 PC (LB-A08, ロジテック)、警報機で構成されている。切羽作業の監

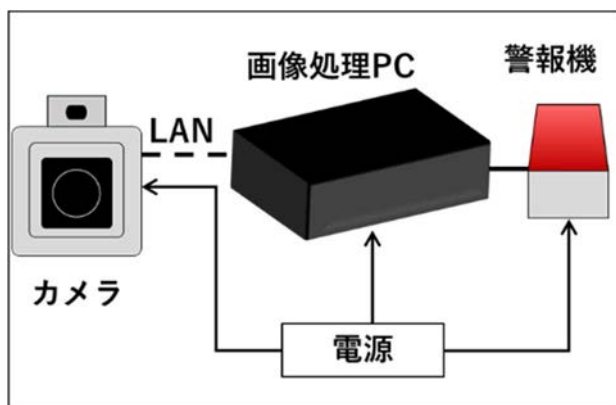


図-1 落石監視装置の構成

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い、連続画像中に落下物を検出すると警報が鳴る仕様である⁹⁾。検出する落石のサイズは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。

(2) 斜面監視への適用

斜面監視の際はトンネル切羽よりも広範囲を監視するため、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(G10X16MPZFI, スペース)を搭載し、100m離れた斜面の監視を可能にした。また、落石発生中の連続画像は後日、回収して分析するため、落石検出前後の映像を保存する機能を付加した。検出する落石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10～15cm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るため、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てしまう懸念がある。そのため、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。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である。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ることはない。

3. 斜面の落石監視

(1) 斜面状況

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20cm程度)な頁



写真-1 落石監視装置(左)、切羽監視状況(右)

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の破碎帯(土砂状を呈する)が発達している。この破碎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20cm程度)な頁岩が分布している。谷の方向は写真-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)の裏側には写真に示す通り落石が多数確認された。

(2) 監視条件

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秒間の連続画像を保存した。ただし、夜間や悪天候時は視界不良となるため、監視は実施されない。装置のカメラは斜面下の河川にかかる道路橋の中央部手すりに設置した(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、斜面近傍で気温・降水量を観測した。

4. 落石監視結果

(1) 落石記録と天候

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。落石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(発生順No.8, 9)。一方、その他の9回は前日と当日は降水が無いいため、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。当斜面が位置する地域は冬季に積雪が見られ、平均気温が氷点下を下回る日が多



写真-2 斜面の地質構造，黄色矢印は斜面の方向を示す（上），ガードレールの破損（左下），防護ネットの設置状況（右下）

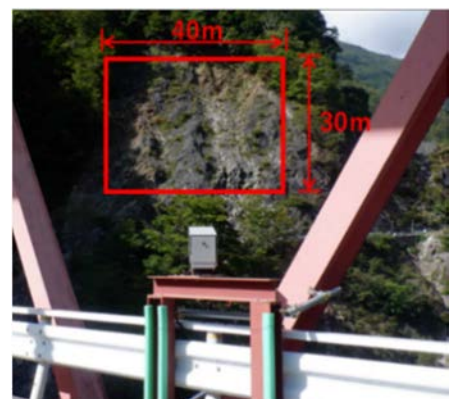


写真-3 監視状況，赤枠内が監視範囲

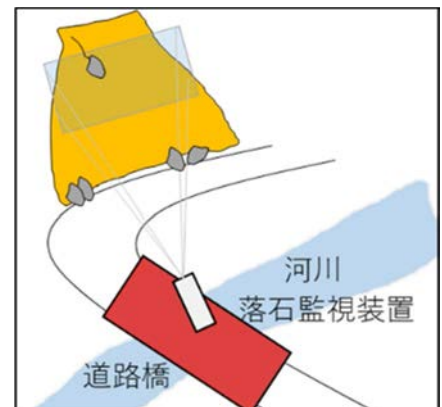


図-2 斜面とカメラの位置関係

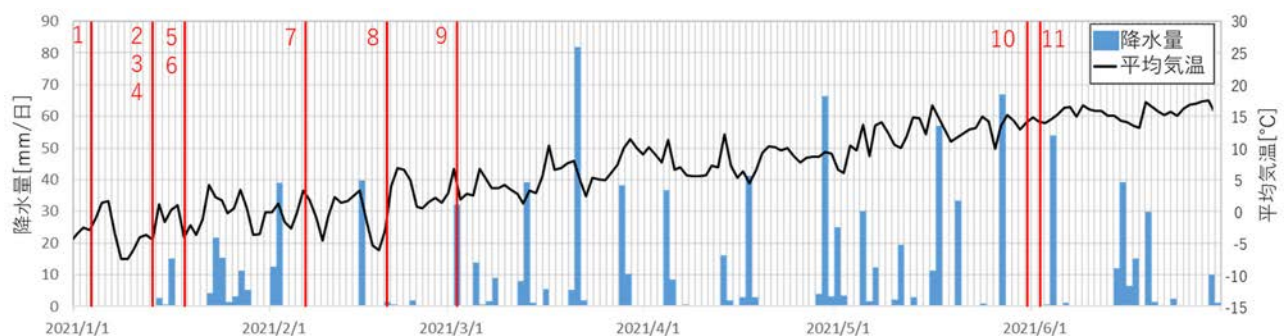


図-3 落石発生日と降水量・気温の記録（赤色縦線が落石発生日，赤字は発生順 No.を示す）

く、斜面の凍結・融解が見られる。3月上旬までに9回の落石が記録されたことから、凍結融解が落石の誘因となっている可能性が確認された。また、1日に複数回、落石が確認された。

(2) 背景差分による落石の分析

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背景差分を適用した。背景差分とは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に分析のフローを示す。図-4aは時系列順に並べた連続画像を示す。前後2枚の連続画像の背景差分をとった結果が図-4bである。背景差分により、動体（落石）のみが抽出される。連続する背景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。1ピクセルあたりの粒径は約20mmである。

表-1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

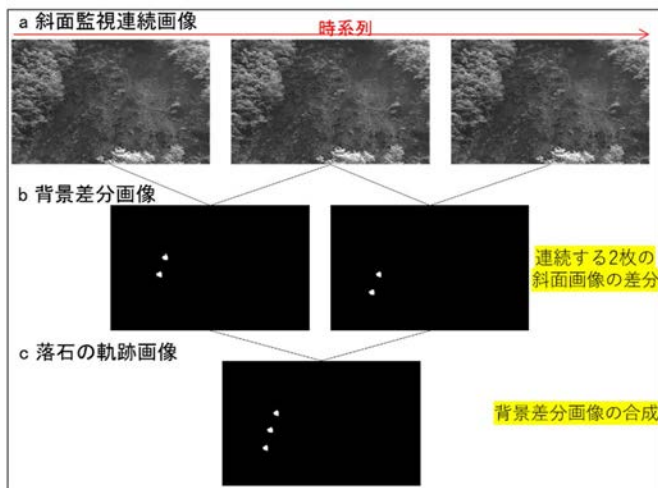


図-4 背景差分フロー

表-1 落石記録詳細

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

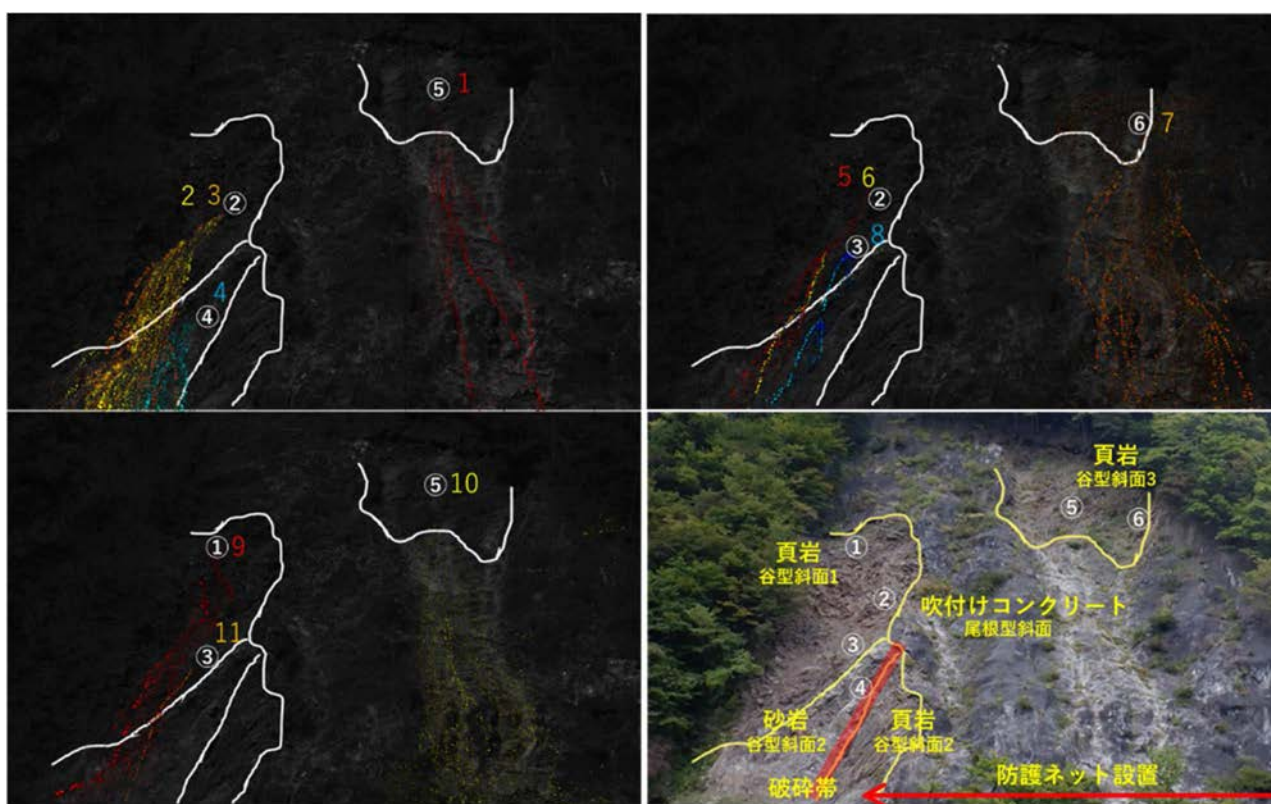


図-5 落石の発生源と運動経路：No.1～4（左上），No.5～8（右上）， No.9～11（左下），
斜面の地質構造（右下）

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 10～15m/s であった。

5. 考察と課題

(1) 落石監視結果に基づく落石の特徴

落石の発生源は 6 つのエリアであった。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（発生順 No.2, 3, 5, 6）が②で記録された。表-1 に示した通り、発生順 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、この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

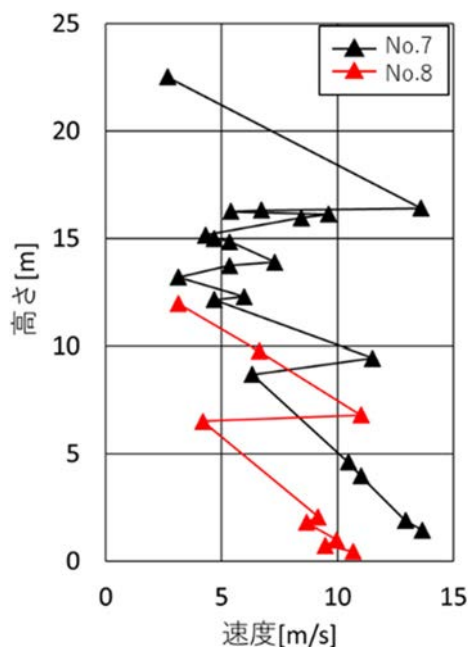


図-6 落石の速度

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。

(2) 夜間・雨天時の落石発生の把握の検討

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⁵⁾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。これにならい、異なる日時の斜面の画像差分を行うことで、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と翌日の斜面画像の差分をとった結果が図-7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40cm、高さ20cmと考えられる。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(数時間毎)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。

5. まとめ

落石監視装置を自然斜面の落石観測に適用することで、落石の発生源、頻度、規模、運動特性を分析することができた。落石発生時期と天候の関係は現状把握できなかったが、凍結融解が落石の誘因になる

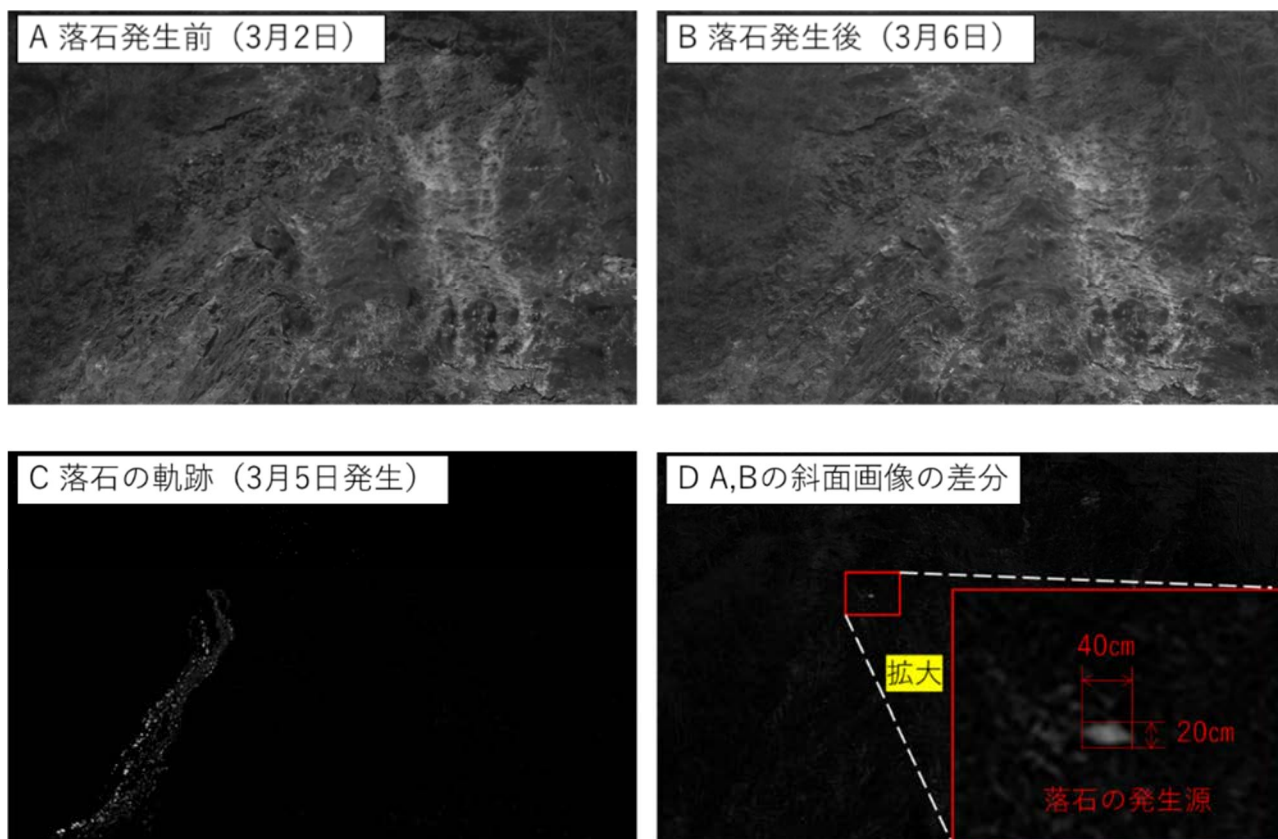


図-7 日単位の斜面画像の背景差分による落石発生源の抽出

傾向が確認できた。落石の日時と背景差分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と考えられる。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、ある一定の間隔の日中における斜面画像差分結果により、落石発生有無と発生地点の把握をするとより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。現状では粒径 10cm 以上の落石のみを検出する仕様となっており、より小規模な落石は記録されていない。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、粒径数 cm の落石の記録にも努めたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP,
https://www.mlit.go.jp/report/press/sabo02_hh_000112.html, 2020 年 12 月 23 日公開, 2021 年 9 月 1 日閲覧
- 2) 石原朋和, 川越健: 岩盤斜面の不安定岩塊の性質を明らかにする, RRR 鉄道総研報告, 2010 年 9 月号, pp.16-19, 2010.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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, 2017.
- 6) 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.

A STUDY ON ROCKFALL CHARACTERISTICS ON NATURAL SLOPES USING REAL-TIME IMAGE DEFERRECE SYSTEM

Shuntaro MIYANAGA, Masahiro YAMAGAMI, Takuya TANI

Rockfall from a slope may cause great damage to nearby facilities and passing vehicles. For effective measures against it, it is important to understand its causes and characteristics. We have developed a monitoring system to reduce rockfall disasters from the tunnel face. The system is capable of analyzing video images in real time to detect rockfall and issuing an alarm. Considering that the system may be applied to record rockfalls on slopes when an image record function is added, we monitored rockfalls on the natural slope facing a construction road for about 7 months. As a result, we could collect and evaluate effective data for the design of rockfall measures, such as source, time, scale, movement path and velocity.