

## トンネル肌落ち被害リスクを未然に低減するシステムの開発に関する基礎的研究

|         |        |     |    |
|---------|--------|-----|----|
| 山口大学大学院 | 学生会員   | ○田村 | 大智 |
| 元山口大学   | 非会員    | 津田  | 愉大 |
| 山口大学大学院 | 正会員    | 林   | 久資 |
| 熊谷組     | 正会員    | 青木  | 宏一 |
| 山口大学大学院 | フェロー会員 | 進士  | 正人 |

## 1. はじめに

山岳トンネルの建設現場では、切羽付近において掘削直後の地山の岩盤や土砂が崩れ落ちる「肌落ち」による労働災害が問題となっている。この肌落ち災害は、平成12年以降の10年間で被災者47名のうち6%にあたる3名が死亡し、36%にあたる17名が休業1ヶ月以上となるなど重篤度の高い労働災害である<sup>1)</sup>。この肌落ち災害に対して厚生労働省は「肌落ち災害防止に係るガイドライン」を取りまとめ、切羽付近での作業を行う場合には専任の切羽監視員による監視を義務付けている<sup>2)</sup>。しかしながら、監視員による監視では見落とし・見間違いなどの人的ミスが発生することが容易に予見される。加えて、熟練技術者が減少傾向にあることなどの理由から切羽監視員の補助を行い、肌落ち災害を未然に防ぐための監視システムが必要とされている。

切羽の監視に関する既存の研究としては、対象物までの距離を簡易に計測できるToF(Time-of-Flight)方式のデプスカメラや対象物の色を計測できるRGBカメラを用いた監視システムの導入が報告されている<sup>3)4)</sup>。しかし、これらの研究では岩塊の落下を検知したり、肌落ちが起こる直前のわずかな切羽の変状を検知することで被害を防止するとしているが、切羽近傍の人員を避難させるには時間が不足する。

そこで、本研究では肌落ち災害を未然に防止することを目標に、①肌落ちが起こる直前の切羽形状を計測し、機械学習により肌落ちのリスクが高い場所を判定するシステム、②肌落ちリスクが高い切羽を三次元モデル化し、それを数値解析することで肌落ちを予測するシステムの開発を目指す。ここでは基礎的研究として、まず①のうち市販のカメラを用い



図-1 切羽模型



図-2 実験概要

て肌落ちを検知するシステムと切羽形状を計測するシステムを開発し、室内実験により各システムの適用可能距離を検討した。次に、②のうち簡易写真測量から得られた三次元切羽形状を三次元数値解析モデルに適用する方法について検討を行った。

## 2. 肌落ち検知と切羽形状計測の基礎的実験

## 2-1. 実験概要

実験ではトンネル建設現場を想定し、図-1に示す切羽模型から1m～10mまで1m間隔で撮影を行う(図-2)。そして、RGBカメラによる肌落ち検知実験では、切羽模型上で2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm四方の落石模型を下方方向に滑らせて検知可能な物体の

キーワード 山岳トンネル, 肌落ち, 労働安全, 動体検知, SfM

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科 進士研究室 TEL0836-85-9332

表-1 RGB カメラによる動体検知の実験結果

|         |       |       |       |       |         |
|---------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 撮影距離    | 1m    | 2m    | 3m    | 4m    | 5m      |
| 落石模型の寸法 | 2×2cm | 2×2cm | 2×2cm | 2×2cm | 4×4cm   |
| 撮影距離    | 6m    | 7m    | 8m    | 9m    | 10m     |
| 落石模型の寸法 | 4×4cm | 4×4cm | 6×6cm | 8×8cm | 10×10cm |

表-2 デプスカメラによる動体検知の実験結果

|         |     |     |    |    |    |
|---------|-----|-----|----|----|----|
| 撮影距離    | 1m  | 2m  | 3m | 4m | 5m |
| 落石模型の厚さ | 3cm | 5cm | —  | —  | —  |

表-3 デプスカメラによる形状計測の実験結果

|          |     |     |    |    |    |
|----------|-----|-----|----|----|----|
| 撮影距離     | 1m  | 2m  | 3m | 4m | 5m |
| 計測可能な凹凸幅 | 1cm | 8cm | —  | —  | —  |

大きさを検討した。デプスカメラによる肌落ち検知実験では、切羽模型上で 10cm 四方、厚さ 1cm～8cm の落石模型を下方向に滑らせて検知可能な物体の厚さを検討した。さらに、デプスカメラによる形状計測実験では、1cm 幅の階段状の切羽模型の形状を計測し計測可能な凹凸の幅を検討した。

## 2-2. 実験に用いた切羽監視カメラ

本研究では、図-2 右上に示す Intel 製のカメラ「RealSense\_D435i」（以下、切羽監視カメラと称す）を使用する。この切羽監視カメラは、RGB カメラとアクティブステレオ方式のデプスカメラを搭載している。ここでは、RGB カメラとデプスカメラによる動体検知と、デプスカメラによる凹凸判定を行った。

## 2-3. RGB カメラによる肌落ち検知システム

ここでは、切羽監視カメラに搭載されている RGB カメラから得られた画像から移動物体を抽出し肌落ちの検知を試みる。この移動物体の抽出にはフレーム間差分法を用いる。ここで、フレームとは動画のうち 1 コマの静止画像を指し、あるフレームとその前後のフレームの計 3 枚を用いて、差分画像を 2 枚作成する。差分画像とは、RGB 画像をグレースケールに変換し、前後のフレーム間で画素ごとにグレースケール値の差を計算して、閾値を超えた画素を白色、超えていない画素を黒色とした二値画像である。この 2 枚の差分画像から白い部分が重なる箇所を抽出することで移動物体を検知する。移動物体を検知した場合は、パソコンディスプレイに「検知しました」と表示するシステムを作成した。

## 2-4. デプスカメラによる肌落ち検知システム

このシステムでは、切羽監視カメラに搭載されているデプスカメラから得られた深度データを用いて

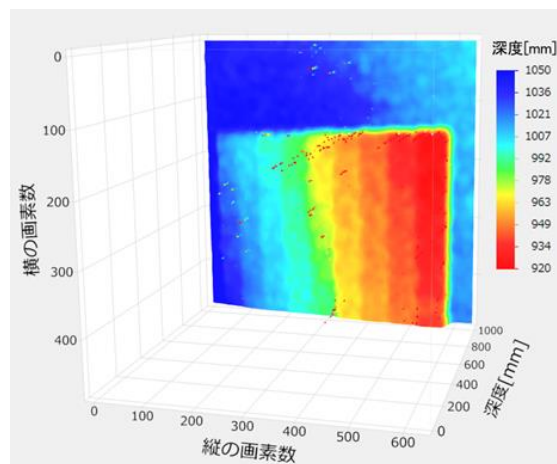


図-3 1m のケースの形状計測結果

移動物体を抽出することで肌落ちの検知を行う。深度データとは、1 枚のフレームの中で画素ごとに記録されているカメラから被写体までの 2 次元の距離データ行列式である。2-3 と同様に、この深度データを前後のフレームで画素ごとに差分計算を行い、閾値を超えた点が多く発生した時、物体が移動していると判定する。移動物体を検知した場合は、2-3 と同様にパソコンディスプレイに「検知しました」と表示するシステムを作成した。

## 2-5. デプスカメラによる切羽形状計測システム

このシステムでは、2-4 と同様にして得られた深度データを点群データとして扱うことで切羽形状の計測を行う。得られた深度データは三次元で表示し、対象物の凹凸形状を可視化する。

## 2-6. 実験結果

RGB カメラによる動体検知の実験結果を表-1 に示す。この表から明らかなように、検知可能な落石寸法は対象物までの撮影距離の 1/100 程度であることがわかる。

一方でデプスカメラによる動体検知の実験結果を表-2 に示す。対象物までの撮影距離が 1m の場合は厚さ 3cm の落石模型、2m の場合は厚さ 5cm の落石模型の落下が検知可能であるが、3m 以降では検知不可能という結果を得た。

次に切羽形状計測システムでの計測結果を表-3 に示す。また、一例として対象物までの撮影距離 1m のケースの三次元散布図を図-3 に示す。1m のケースでは 1cm の凹凸がコンターの違いで区別できる。2m の場合では、1m のケースと同様のコンター図により



図-4 写真測量の概要

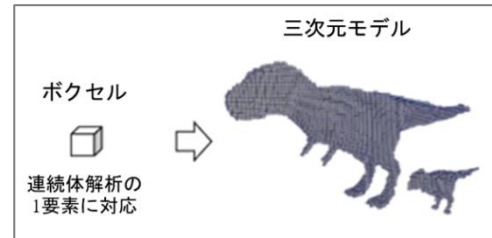


図-5 ボクセル法によるモデル作成の例

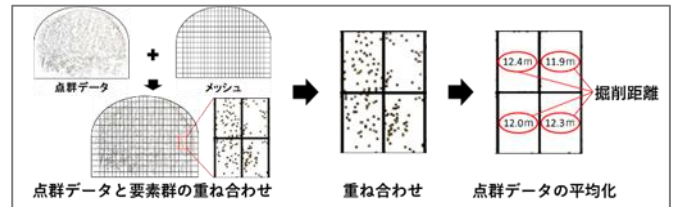


図-6 点群データと要素群の概念図

8cmの凹凸が区別可能であると判断できたが、3m以降では区別できなかった。

### 3. 切羽形状を考慮した三次元数値解析モデル

#### 3-1. 切羽形状を考慮した三次元モデルの作成手法

本章では2現場の各1断面において、切羽形状を考慮した三次元数値解析モデルの作成を試みた。トンネル名はA、Bトンネルと称す(図-4)。まず、切羽近傍においてAトンネルではデジタルスチルカメラ(SONY, DSC-HX60V, 2040万画素)を用い、Bトンネルではスマートフォンカメラ(iPhoneXR, 1200万画素)を用いた撮影を行った。次に、撮影した画像をSfM画像解析ソフトに読み込むことで三次元点群データを抽出し、点群データからボクセル法を利用し、三次元数値解析モデルを作成した。

#### 3-2. SfM画像解析ソフトの概要

本研究では、三次元の切羽形状を取得するために、Agisoft社の写真測量解析ソフトMetashapeを用いた。Metashapeは、画像の各ピクセルの色調や階調を判別し、画像同士を自動で合成する。また、重なり合う画像のペア間に共通するタイポイントを配置する作業を自動で行い、このタイポイントから数値標高モデル(DEM)の作成と点群データの三次元座標を自動的に出力することができる。

#### 3-3. ボクセル法による切羽形状のモデリング

ボクセル法は、図-5に示すように三次元対象物を要素群で表現するものである<sup>9)</sup>。本研究では三次元有限差分法数値解析コードのFLAC3Dにおけるソリッド要素とボクセルを対応させたモデルを作成した。切羽形状を考慮した三次元数値解析モデルを生成す

る具体的な方法としては、初めにトンネルや周辺地山を考慮した二次元メッシュを作成し、それを奥行き方向に引き延ばすことで地山の三次元要素群を作成する。切羽形状(凹凸)の再現には、Metashapeから抽出した切羽面の三次元点群データを使用し、切羽面の各要素に対応する奥行きを決定する。図-6に示すように点群データと切羽面の要素群の重ね合わせを行った後、各要素に含まれる点群を平均化し、各要素に対応する平均距離を決める。この奥行き距離は、対応するソリッド要素を消去(解析コード上の操作は掘削)することで、図-7に示すような切羽面の不陸を考慮した三次元数値解析モデルが生成できる。

ここでは、両トンネル共に上半部分をモデル化しているが、Aトンネルは切羽面に凹凸が多く、上半下部になだらかなスロープ状の地山が残っているモデル、Bトンネルは切羽面の凹凸が少ないモデルである。また、切羽形状を考慮するモデルと比較するために切羽の凹凸を考慮していないモデル(Cトンネル)を作成した。

#### 3-4. 切羽形状を考慮した三次元数値解析

図-7に示す3トンネルの三次元数値解析モデルによる解析結果を比較する。数値解析による比較のために、Step1として自重解析による初期地圧計算を行ったのち、Step2でそれぞれの掘削面に対してトンネルを掘削した。解析物性値は表-4に示すように地山等級DII程度<sup>9)</sup>、トンネル径は5mとした。

図-8に、切羽近傍の奥行き方向変位(切羽押出し変位)と、鉛直方向変位のコンター図を示す。切羽押出

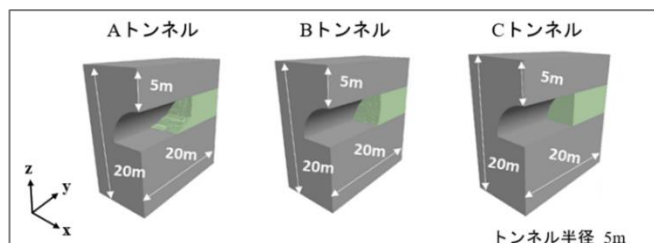


図-7 各トンネルの三次元数値解析モデル

し変位に着目すると、切羽に凹凸が少ないBトンネルと切羽形状を考慮しないCトンネルでは、切羽の中心が押出される変位傾向が見られる。一方、切羽の凹凸が目立ったAトンネルでは、凹部分と凸部分で変位量にばらつきが生じていることがわかる(図-9)。このことから、切羽の凹凸の程度によって変位傾向が異なるという結果が得られた。すなわち、鉛直方向変位の比較から、Cトンネルは均一な変位傾向であるのに対して、切羽形状を考慮したA、Bトンネルでは不均一な変位傾向が得られ、肌落ちリスクの評価の可能性が明らかとなった。

#### 4. まとめと課題

本研究では、肌落ち災害を防止するための基礎的研究として、①切羽監視カメラを用いて肌落ち検知システムと切羽形状計測システムを開発し、各システムの適用範囲を検討した。また、②切羽面の不陸を考慮した三次元数値解析モデルを作成し、数値解析によって肌落ちリスクの高い箇所が把握できるか否かを検討した。その結果、以下のことが得られた。

- ① 対象物の移動を検知、または形状を計測するための適用範囲はカメラから対象物までの距離がRGBカメラでは10m以内、デプスカメラでは2m以内であることがわかった。
- ② 三次元数値解析によって肌落ちなどの発生有無や切羽の安定性を考慮する場合は、切羽形状を考慮した数値解析モデルを用いることが好ましいことがわかった。

今後は、以下の検討を実施する予定である。

- ① 実際の現場環境において本システムを適用し、生じる問題や課題を抽出する。
- ② 岩盤割れ目や不連続面といった肌落ちの発生要因を考慮した数値解析モデルを作成する。

表-4 解析物性値

| ヤング係数 (MPa) | 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比 |
|-------------|-------------------------|-------|
| 150         | 2100                    | 0.35  |

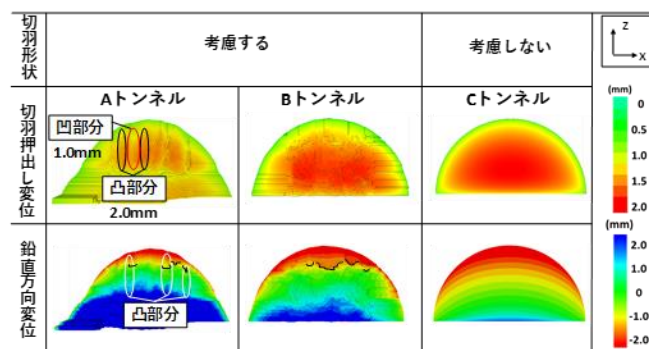


図-8 変位のコンター図

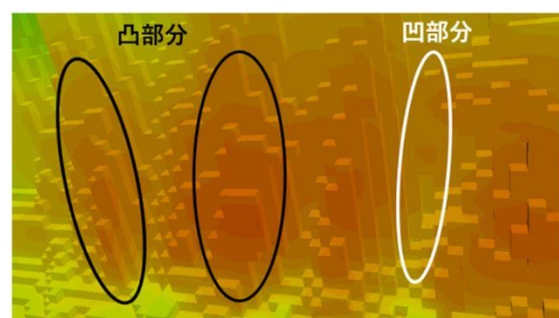


図-9 切羽押出し変位の拡大図 (A トンネル)

#### 参考文献

- 1) 労働安全衛生総合研究所：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，pp.4-8，2012.
- 2) 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について，pp.4-5，2018.
- 3) 中村隆史，西山哲，藤岡大輔：ビデオカメラを活用したトンネル切羽崩壊のモニタリング手法に関する研究，土木学会中国支部第 69 回研究発表会，VI-6，pp.383-384，2017.
- 4) 中村隆史，請関大海，塩崎正人，河村圭：デプスカメラを用いたトンネル切羽監視システムの開発における基礎研究，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，VI-735，2019.
- 5) 地層科学研究所：ボクセル法で高速三次元モデリング，<https://www.geolab.jp/column/2006/04/forefront-004.php>，(参照 2019/12/15)
- 6) 日本道路公団試験所：トンネルの標準設計に関する研究報告書「数値解析と施工実績の分析」，試験研究所資料第 350 号，pp.152，1986.