

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05005

研究課題名（和文）トンネル建設現場における肌落ち災害抑制技術の開発

研究課題名（英文）Development of technology for controlling rock fall events disasters at tunnel construction sites

研究代表者

林 久資（Hayashi, Hisashi）

山口大学・大学院創成科学研究科・助教

研究者番号：30633614

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では切羽面の形状データを3DセンサやRGBカメラを用いて取得し、その情報から肌落ち発生リスクの高い領域を特定することで、肌落ち発生以前に危険を周知し被害の発生を防ぐシステムの開発を行う。肌落ちの発生要因としては、切羽面による岩盤の割れ目や劣化、掘削による岩盤のオーバーハング、不連続面による浮き、湧水等が挙げられるが、中でも高精度に切羽形状を計測することで岩盤のオーバーハング度合いや切羽前方での不連続面の状態を推定し、それに基づく肌落ち発生リスクの高い領域の特定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、肌落ち災害による被害を低減することを目標とし、点群データを活用して肌落ち発生要因に着目した評価手法の検討を行った。本研究成果は、山岳トンネルの建設現場で生じる掘削直後の切羽付近の岩盤や土砂が崩落する「肌落ち」による労働災害の低減に資するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we develop a system to prevent damage by identifying areas with high risk of rockfall before the occurrence of rockfall by using 3D sensors and RGB cameras to acquire shape data of the face of a cut. The degree of rock overhang and the state of discontinuities in front of the face were estimated by measuring the face profile with high accuracy, and the areas at high risk of rock fall were identified based on this estimation.

研究分野：トンネル工学

キーワード：トンネル 労働安全 肌落ち 数値解析 切羽

### 1. 研究開始当初の背景

山岳トンネルの建設現場では、掘削直後の切羽付近の岩盤や土砂が崩落する「肌落ち」による労働災害が問題となっている。(独)労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所の調査によると、この肌落ち災害は、平成12年以降の10年間で47名が被災し、そのうち6%にあたる3名が死亡、36%にあたる17名が休業1ヶ月以上となっており重篤度の高い災害である。そのため、厚生労働省は「肌落ち災害防止対策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。しかしながら、監視員のみによる切羽監視では見落としや見間違いなどの人的ミスが発生することが十分想定される。加えて、熟練技術者も定年を迎え減少傾向にあることなどから、肌落ち災害を未然に防ぐために切羽監視員を補助する監視システムの開発が喫緊の開発課題となっている。

現在、切羽の監視に関するいくつかの研究が報告されており、対象物までの距離を短時間で計測できるデプスカメラや一般的なRGBカメラを用いた監視システムが提案されている。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変化を検知したりすることで被害を防止するとしているが、切羽近傍の人員を肌落ち発生以前に避難させるまでには至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究では切羽面の形状データを3DセンサやRGBカメラを用いて取得し、その情報から肌落ち発生リスクの高い領域を特定することで、肌落ち発生以前に危険を周知し被害の発生を防ぐシステムの開発を行う。肌落ちの発生要因としては、切羽面による岩盤の割れ目や劣化、掘削による岩盤のオーバーハング、不連続面による浮き、湧水等が挙げられるが、その中でも高精度に切羽形状を計測することで岩盤のオーバーハング度合いや切羽前方での不連続面の状態を推定し、それに基づく肌落ち発生リスクの高い領域の特定を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 切羽形状データ取得手法の検討

トンネル建設現場において、切羽面のオーバーハングの程度や切羽前方の不連続面の状態を評価するためには、正確に切羽面の形状を取得する必要がある。その方法として、対象物までの距離情報を取得できる3Dセンサやステレオカメラによる写真測量技術を用いて点群データを構築する方法が挙げられる。本章では、3DセンサとしてiToF(indirect Time of Flight)方式のセンサを搭載したMicrosoft社製のAzure Kinectを、写真測量技術としてAgisoft社製のMetashapeを用いた方法を挙げる。iToF方式の3Dセンサはリアルタイムでのデータ取得が可能かつ、誤差数cmの精度で計測できるが、計測距離によって誤差が大きく変化するという特徴がある。一方で、写真測量は計測距離に依存せずに誤差数cmの精度で点群データの構築が可能なものの測定時間に数分を要するという特徴がある。つまり、計測精度と切羽形状計測のための所要時間がトレードオフの関係になっている。そこでここでは、トンネル坑内の切羽面形状取得に適した手法を検討することを目標とし、トンネル建設現場において、Azure Kinectを用いた切羽形状計測を行った。また、切羽の写真を複数枚撮影し、Metashapeを用いた切羽形状計測を試みた。

#### ・3Dセンサによる形状データ取得

Azure KinectはiToF方式の3Dセンサを搭載している。iToFの3Dセンサは周期的なレーザー光を計測対象に照射し、対象に反射してセンサに戻ったレーザー光の位相のずれから対象までの距離を算出するものであり、ここではこの3Dセンサを使用し建設中のAトンネルで切羽形状データの取得を行った。本計測では、切羽近傍にトンネル建設機械を接近させ、切羽面の中央付近をセンサが垂直になるように設置した。図-1にセンサによって取得した点群距離データのうち、切羽から3m離れた地点で計測したものを示す。このコンター図は、現場でリアルタイムに得ることができ、配色はセンサからの距離に応じたコンター(手前が赤色、奥が青色)とした。図-1の白枠は、機械掘削による掘削痕であり、これらの掘削痕のような凹凸であれば切羽から3m程度の箇所から取得が可能であるこ

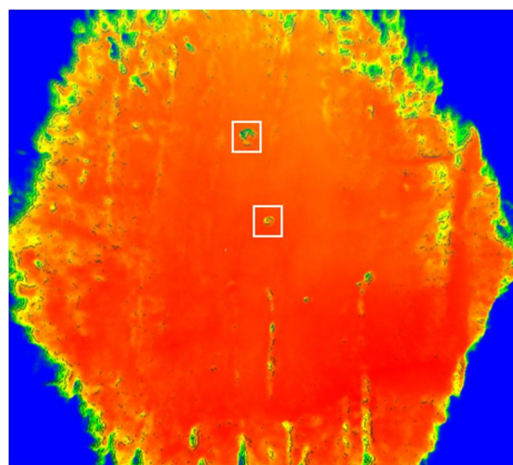


図-1 3Dセンサで取得した点群データ

とが分かる。しかしながら、切羽面からセンサをさらに離して計測を行ったところ、掘削痕の把握はできなかった。以上から iToF 方式の AzureKinect では、切羽の形状データを取得するには 3m 程度近づいて計測を行う必要があるが、切羽から 3m 地点にセンサを設置することはトンネル建設現場の作業性や安全性を考慮すると難しい。

・写真測量による形状データ取得

次に、写真測量技術を利用した切羽形状計測について言及する。写真測量では切羽面を撮影した RGB 画像から切羽形状のデータを 3D 点群データとして取得することができる。ここでは Agisoft 社製の Metashape を使用し、トンネル左右側壁近傍、中央部から撮影した 3 枚の切羽写真から切羽の 3D 点群データの構築を行った。A トンネルで撮影した 3 枚の写真から構築した 3D 点群データを図-2 に示す。この図より、掘削によって切羽面に生じた凹凸を十分に取得できていることがわかる。ちなみに、PC への写真データの読み込みから点群データの構築までには数分を要した。



図-2 Metashape で構築した点群データ

以上から、図-5 に示した AzureKinect による計測結果と図-2 に示した Metashape による計測結果を比較すると、切羽の形状データを取得する手法としては、点群データの構築に数分を要するものの、高精度な形状データを取得できる Metashape を用いた写真測量が適していることがわかった。

4. 研究成果

(1) voxel を利用したオーバーハング領域の特定

これまでにおいて、切羽面の形状を取得するまでに時間を要するものの、写真測量技術を応用した Metashape を使用する方法で高精度な形状データの取得が可能であることがわかったため、構築した点群データを用いて肌落ち発生リスクの評価を行う。肌落ち発生の要因はいくつか挙げられるが、中でもここでは岩盤のオーバーハングに着目し、オーバーハングした領域ほど肌落ち発生リスクが高いと仮定し、オーバーハングした領域の特定を行った。

具体的な手法としては、切羽面の三次元点群データを正方形要素群である voxel に変換し、隣り合う voxel の凹凸の程度によりオーバーハングを判定する。voxel への変換方法としては、図-3 に示す voxel 変換の概念図のように x-y 平面上に正方形要素群を設定して切羽面の点群データとの重ね合わせを行い、各要素に含まれる全ての点群の z 値（奥行き）を平均する。この作業はプログラミング言語 Python を用いて高速処理することで、数秒での処理が可能となった。

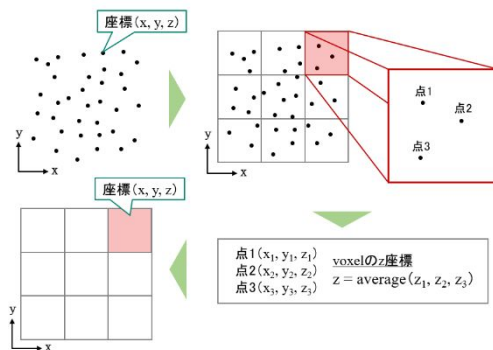


図-3 voxel 変換の概要

次に、切羽の凹凸が顕著な B トンネルにて切羽写真を撮影し、Metashape を使用して構築した点群データを図-4 に、またこの点群データを voxel に変換したものを示す。図-5 にはそれぞれの voxel 要素の中心にオーバーハングの程度によって色分けをした点を示した。配色は自由に設定をすることが可能であるが、本研究では要素が緑色の場合は 1 つ下の要素が手前にある状態（オーバーハングしていない状態）、黄色もしくは赤色の場合はオーバーハングしている状態であり、黄色が 5cm 未満、赤色が 5cm 以上のオーバーハングの度合いとした。図-6 に示すように上下に並ぶ 4 つの voxel の z 値が上から 10cm, 15cm, 19cm, 15cm であった場合、上下の差を計算すると上から -5cm, -4cm, 4cm となる。この計算結果に基づいて、色分けは上から赤、黄、緑となり、各 voxel の中心にそれぞれの色の点をプロットしている。



図-4 B トンネルの点群データ

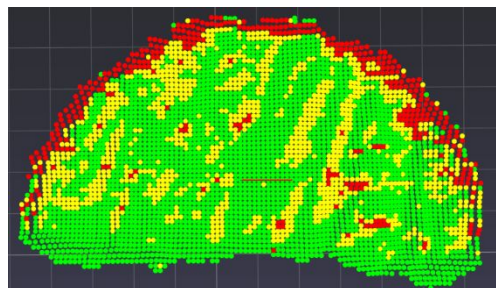


図-5 voxel 変換後の点群データ

以上より、切羽面のオーバーハング箇所の特  
定が可能となったが、この閾値については今後の検  
討が必要であり、切羽のオーバーハングによる肌  
落ちリスクについてAI や統計学的手法を用いた検  
討を行う予定である。

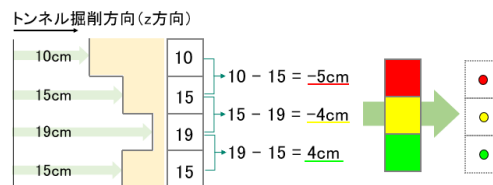


図-6 voxel の色分けの一例

## (2) 切羽前方領域における不連続面の推定

ここまでで、切羽面の点群データを voxel に変換することでオーバーハングした領域を特定することが可能となった。しかしながら、肌落ちの発生要因は岩盤のオーバーハングだけではなく、他にも様々な要因が挙げられる。特に硬岩地山の場合、切羽面を形成する不連続面がどの方向に傾斜し、不連続面同士がどのように交わって浮きを形成しているかが肌落ちの発生に大きく影響する。しかし、トンネル建設現場での切羽評価では不連続面の走向、傾斜に関する評価は行われているものの、目視による感覚的な判断のみであり、切羽前方領域における不連続面のつながりを考慮した評価は行われていないのが現状である。

そこで、写真測量技術により構築した切羽面の点群データから不連続面部分の点群を抽出し、その点群からの距離の二乗和が最小となるような平面を算出して切羽前方における不連続面の状態を推定した。

不連続面の推定にはBトンネルの切羽の点群データを使用した。ここでは、切羽に存在する不連続面のうち6つの不連続面の切羽前方における状態を推定した。まず、抽出した不連続面ごとに不連続面部分の点群の各点から距離の二乗和が最小になるような平面を算出する。次に、各点と平面との距離の二乗和が最小となるような係数  $a, b, c, d$  を最小二乗法によって算出することで、不連続面に近似する平面を推定する。

これにより、不連続面に近似する方程式が求まった。この方程式が表す平面を切羽面の点群データと重ね合わせたものを図-7に示す。図-7では切羽面を正面、横、上の三方向から見た点群を示しており、切羽前方に向けて不連続面がどう広がっているかが一目でわかる。この作業を他5つの不連続面に対しても行ったところ切羽面から約1~3m地点において不連続面の交差が確認できた。つまり、掘削を進めるにつれて、不連続面同士の交差箇所近傍において岩盤が浮いているような肌落ち発生リスクの高い箇所が切羽中央部分に現れることがわかる。

以上により、切羽面の点群データから切羽前方の不連続面の状態を推定し、肌落ち発生リスクの高い箇所を推定することができた。ここでの抽出は、6つの不連続面であったが、これ以外にも不連続面は多く存在していることから、さらに多くの肌落ちリスクの高い箇所が存在することが推察できる。

本研究では、肌落ち災害による被害を低減することを目標とし、点群データを活用して肌落ち発生要因に着目した評価手法の検討を行った。

点群データの取得手法としては、3D センサと写真測量を比較した結果、点群の構築に数分を要するものの、高精度な点群データを構築できる写真測量が適していることがわかった。次に、写真測量によって構築した点群データを使用し、肌落ち発生要因の一つである岩盤のオーバーハングに着目して、切羽面のオーバーハング領域の特定を試みた。その結果、点群データを voxel データに変換することで、オーバーハング領域を特定することができた。今後は、肌落ちリスクの高い領域と決める閾値の検討を行う予定である。

また、同様に写真測量によって構築した点群データを使用し、不連続面の点群から切羽前方の不連続面の推定を試みた。その結果、不連続面の交差箇所近傍に生じる肌落ちリスクの高い領域を推定することができた。今後は、リアルタイムでの処理を行うシステムの開発を行う予定である。

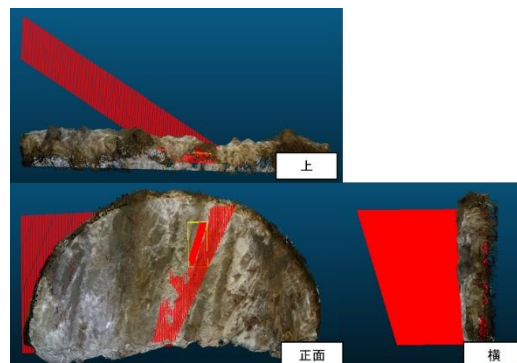


図-7 方程式が表す平面と切羽面を重ねた点群データ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 岡崎 泰幸, 林 久資, 津田 愉大, 田村 大智, 青木 宏一, 進士 正人	4. 巻 77
2. 論文標題 切羽面の凹凸に起因する肌落ちリスク評価のための解析方法の提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集F1 (トンネル工学)	6. 最初と最後の頁 92~97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejte.77.1_92	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岡崎 泰幸, 林 久資, 津田 愉大, 田村 大智, 青木 宏一, 進士 正人	4. 巻 15
2. 論文標題 トンネル切羽面の凹凸を考慮した 三次元数値解析モデルの作成とその基礎解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第15回岩の力学国内シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 317-321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田村 大智, 林 久資, 青木 宏一, 進士 正人	4. 巻 30
2. 論文標題 切羽監視システム開発のための基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 トンネル工学報告集	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田村 大智, 林 久資, 青木 宏一, 進士 正人
2. 発表標題 切羽形状測定結果に基づく肌落ち発生要因に着目したリスク評価手法の検討
3. 学会等名 第31回トンネル工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村 大智, 林 久資, 青木 宏一, 進士 正人
2. 発表標題 肌落ち発生要因に着目した肌落ち災害発生リスクを低減するシステムの開発
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村 大智, 林 久資, 青木 宏一, 進士 正人
2. 発表標題 トンネル建設現場における切羽オーバーハング領域判定システムの開発
3. 学会等名 第73回令和3年度土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村 大智, 林 久資, 青木 宏一, 進士 正人
2. 発表標題 切羽監視システム開発のための基礎的研究
3. 学会等名 第30回トンネル工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎 泰幸, 林 久資, 津田 愉大, 田村 大智, 青木 宏一, 進士 正人
2. 発表標題 トンネル切羽面の凹凸を考慮した 三次元数値解析モデルの作成とその基礎解析
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村 大智, 林 久資, 青木 宏一, 進士 正人
2. 発表標題 トンネル建設現場における肌落ち被害リスクを低減するシステムの基礎的実験
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村 大智, 津田 愉大, 林 久資, 青木 宏一, 進士 正人
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第72回2020年度土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	進士 正人  (Shinji Masato)  (40335766)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授   (15501)	
研究分担者	吉川 直孝  (Kikkawa Naotaka)  (60575140)	独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・建設安全研究グループ・上席研究員   (82629)	
研究分担者	岡崎 泰幸  (Yasuyuki Okazaki)  (50806081)	松江工業高等専門学校・環境・建設工学科・講師   (55201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------