# 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

田村 大智1・林 久資2・青木 宏一3・進士 正人4

<sup>1</sup>学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1) E-mail:a021veu@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1) E-mail:hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

> <sup>3</sup>正会員 株式会社熊谷組 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2番1号) E-mail: koaoki@ku.kumagaigumi.co.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1) E-mail:shinji@yamaguchi-u.ac.jp

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.そのため、専任の切羽監視員を配置することが義務付けられているが、熟練作業員 の減少や人的ミスの発生が懸念されるため、切羽面を監視するシステムの開発が喫緊の課題となっている. この問題に対して本研究では、肌落ちによる被害を未然に防ぐことを目標として、切羽面の肌落ち発生リ スクの高い箇所の判定が出来るシステムの開発を行った.その結果、切羽面の形状を短時間で取得し、肌 落ち発生要因のうち岩盤のオーバーハングおよび切羽前方の不連続面の状態を把握し、その情報をもとに 肌落ち発生リスクの評価を行うことができた.

Key Words: tunnel worker's safety, rock fall, point cloud, voxel, discontinuity

# 1. はじめに

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<sup>1)</sup>(図-1).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<sup>2)</sup>.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<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.

そこで、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.

# 2. 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 AzureKinect 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、AzureKinect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.

## (1) 3Dセンサによる形状データ取得

AzureKinect (図-2) 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.図-3 に計測を行っ た切羽の写真を示す.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-4).図-5 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



図-2 AzureKinect



図-3 計測したAトンネルの切羽





図-5 AzureKinectで取得した点群データ

に応じたコンター(手前が赤色,奥が青色)とした.図 -3と図-5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.

# (2) 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-6 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.

以上から、図-5に示したAzureKinectによる計測結果と 図-6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.

# 3. voxelを利用したオーバーハング領域の特定

前章において、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-7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.

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-8 に、またこの点群データを voxel に変換したものを図-9



図-6 Metashape で構築した点群データ



図-7 voxel変換の概要



図-8 Bトンネルの点群データ



図-9 voxel変換後の点群データ

トンネル掘削方向(z方向)



に示す.図-9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-10 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.

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.

#### 4. 切羽前方領域における不連続面の推定

前章では、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前章と同様に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 続面のうち図-11において着色した6つの不連続面の切羽 前方における状態を推定する.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.三次元平面の一般式を 式(1)に示す.

$$ax + by + cz + d = 0 \tag{1}$$

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,



図-11 抽出した6つの不連続面



図-12 方程式が表す平面と切羽面を重ねた点群データ



図-13 すべての平面を重ねた点群データ

不連続面に近似する平面を推定する.ここで,図-11に 赤色で示した不連続面について近似する平面を推定する. 最小二乗法により求まった平面の方程式を式(2)に示す.

$$0.514x - 0.239y - 0.824z - 30.989 = 0 \qquad (2)$$

これにより、赤色で示した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-12に示す.図-12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. すべての平面を重ね合わせた点群を図-13に示す.この 図は、切羽面を上から見た図となっており、切羽前方に おける不連続面の状態を示している.黒枠で囲った部分 に着目すると、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る.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.

# 5. まとめと今後の課題

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.

謝辞:本研究はJSPS科研費20K05005の助成を受けたものです.ここに記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 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.

(2021.8.6 受付)

# A STUDY OF RISK ASSESSMENT METHOD FOCUSING ON FACTORS CAUSING ROCK FALLS BASED ON MEASUREMENT RESULTS OF TUNNEL FACE SHAPE

# Daichi TAMURA, Hisashi HAYASHI, Koichi AOKI and Masato SHINJI

At tunnel construction sites, occupational accidents due to "rock fall," in which rock and sand near the tunnel face collapse immediately after excavation, have become a problem. However, there are concerns that the number of skilled workers will decrease and human error will occur, so the development of a system to monitor the tunnel face is an urgent issue. In this study, a system that can determine the areas of the tunnel face with a high risk of rock fall was developed, with the aim of preventing damage caused by rock fall. As a result, it was possible to obtain the shape of the tunnel face in a short time, to grasp the state of the overhang of the rock mass and the discontinuous surface in front of the tunnel face among the factors of rock fall occurrence, and to evaluate the risk of rock fall based on the information.