

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

山口大学大学院	学生会員	○田村 大智
山口大学大学院	正会員	林 久資
株式会社熊谷組	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、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¹⁾(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²⁾」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。

そのため、切羽の安全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 RGB カメラを用いた監視システムが提案されている^{3,4)}。しかし、これらの研究では岩塊の落下直後や肌落ちが起こる直前のわずかな変化を検知することで被害を防止するとしているが、切羽近傍の人員を肌落ち発生以前に退避させるまでには至っていない。

筆者らは、トンネル建設中の切羽をカメラ等で監視し、肌落ち発生リスクの高い領域に作業員が接近すると警告を出すことで、作業員に危険意識を与えると共に肌落ち発生前に人員を退避させるシステム開発を目標に研究を進めている。その基礎的研究として、切羽面のうち、オーバーハングしている箇所は肌落ちの危険性が高いと想定し、切羽面の凹凸の程

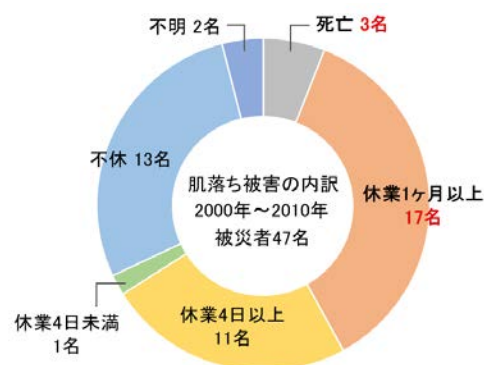
図-1 肌落ち被害の内訳¹⁾

表-1 各手法の特徴

	計測精度	所要時間
3Dセンサ	計測距離によって変化する	リアルタイム
写真測量	計測距離に依存しない	点群の構築に数分を要する

度を取得できる手法の検討を行い、切羽面のオーバーハングの程度によって肌落ち発生リスクを可視化するシステムの開発を行った。

2. 切羽面形状取得方法の検討

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考えられる。表-1 に 3D センサと写真測量技術の特徴を示す。ここでは、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なるため写真測量に劣る。一方で、写真測量は計測距離に依存せずに

キーワード 山岳トンネル, 肌落ち, 労働安全, 3D センサ, 写真測量

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 TEL0836-85-9332

誤差数 cm の精度で点群データの構築が可能なものの数分を要する。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。そこで本研究では、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。

AzureKinect は iToF 方式の 3D センサを搭載している。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-1 に計測を行った切羽の写真を、図-2 にセンサによって取得した点群距離データを示す。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-2 に示すコンターは、現場でリアルタイムに得ることができる。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。この図は切羽から 3m 離れた地点で計測したデータである。図-1 と図-2 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。

次に写真測量技術として Metashape を使用して、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点群データの構築を行った。A トンネルで撮影した切羽写真から構築した点群データを図-3 に示す。掘削によって切羽面に生じた凹凸を十分に確認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。

以上より、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。ただし、トンネル施工では掘削とともに切羽の形状が逐次変化し、



図-1 計測を行った切羽

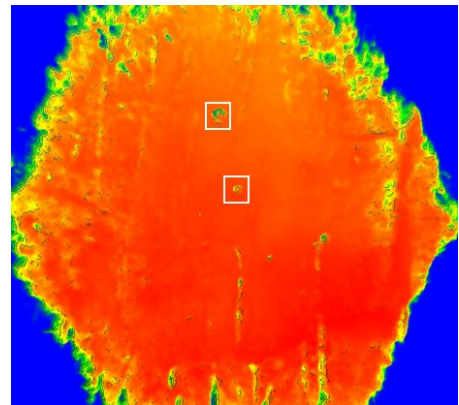


図-2 AzureKinect で取得した点群データ



図-3 Metashape で構築した点群データ (A トンネル)

掘削による切羽解放直後に作業員が近づく可能性があるため、可能な限り早く切羽面の形状データを取得する必要がある。そのため、形状データ取得の手法については今後も検討が必要であり、その他方式の 3D センサを使用して形状データを取得する手法の検討も進めていく予定である。

3. 切羽面におけるオーバーハング箇所の特定

2 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が、高精度な形状データの取得が可能な写真測量技術を応用した Metashape を使用する方法で切羽面におけるオーバーハング箇所の評価を検討する。

具体的な手法として、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 の変換方法としては、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。voxel 変換の概念図を図-4 に示す。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。

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-5 に示す。また、この点群データを voxel に変換したものを図-6 に示す。図-6 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。ここでのオーバーハングの程度とは、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る。この場合では黄色が 5cm 未満、赤色が 5cm 以上のオーバーハング度合いを示している。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。

4. まとめと今後の課題

本研究では、肌落ち発生リスクの高い箇所を未然に判別する方法として、まず切羽の形状データを取得する方法の検討を行ったところ、精度の観点から写真測量技術が適していることがわかった。そこでオーバーハング箇所の特定のために、voxel による方法を提案した。

一方で、切羽における形状データの取得はトンネル施工の性質上、リアルタイムでの計測が適しているため、さらに高速処理が可能な他方式の 3D センサの検討を今後行う予定である。また、オーバーハング程度による危険度を定める閾値についても検討が必要であり、AI や統計学的手法を用いた手法を今後検討していく予定である。

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

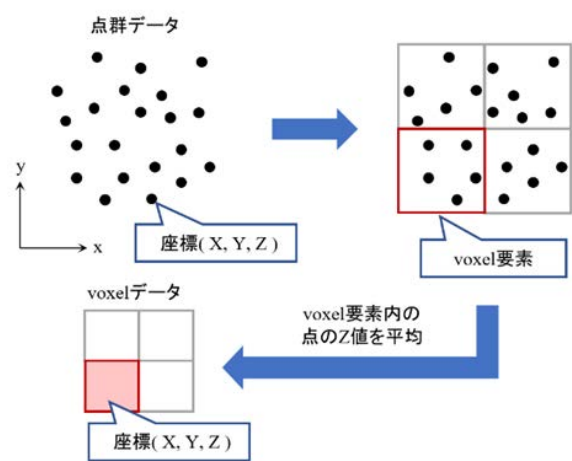


図-4 voxel 変換の概念図



図-5 Metashape で構築した点群データ (B トンネル)

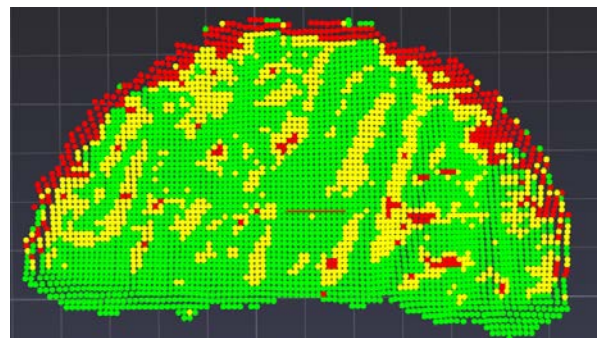


図-6 voxel に変換した点群データ

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：デブ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) 田村大智，林久資，青木宏一，進士正人：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，土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，2021.（投稿中）