

現場技術者および作業員の安全性向上に 寄与するトンネル切羽面の肌落ちリスク 領域推定のための計測手法の提案

林 久資¹

¹山口大学大学院 創成科学研究科

トンネル切羽面の岩盤の凹凸と不連続面に着目し、切羽面の三次元形状データからオーバーハングの程度と切羽前方における不連続面の状態を推定することで岩盤の状態を定量化し、肌落ちの発生有無との関係性から肌落ち発生を予測することを最終目標とした。

そのためにまず、切羽面の三次元形状を点群データとして簡便に取得する手法を検討した。また、取得した点群データを分析することで岩盤のオーバーハングの程度や切羽前方における不連続面の状態を推定する手法を検討した。特に、不連続面の予測に関しては、その切羽から次のサイクルの切羽面の評価を行うために、時間に余裕が生じるが、オーバーハングの程度の推定に関しては、その切羽面の評価を行うためリアルタイム性が求められる。そこで、リアルタイムに切羽面の三次元データを取得する手法を検討した。

キーワード：山岳トンネル、肌落ち、切羽、LiDAR

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ヶ月以上となり重篤度の高い災害といえる¹⁾(図-1)。

この災害に対して厚生労働省は「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切羽監視を義務付けている²⁾。しかしながら、切羽監視員の目視に依存した監視では、見落としや見間違いなどの人的ミスが発生しやすく、その上、判断に個人差が生じやすい。加えて、熟練の技術者が定年を迎え減少傾向にあり、肌落ちの予兆を見極めることができる人材は年々減っていくことが予想される。そのため、肌落ちによる被害を低減するには岩盤の状態をデータとして取得し、肌落ちが発生しそうな領域を定量的に判断し、発生する以前にコソク(落下しそうな岩石を予め落とす作業)やコンクリート吹付を重点的に行う等の対応が必要となる。

そこで、近年、技術者に依存しない評価方法として切羽面を撮影した画像から岩盤の風化と割目の方向・連続性を定量化し、肌落ちの発生有無との関係性を明らかにし、肌落ち発生を予測する取り組みがなされている³⁾。

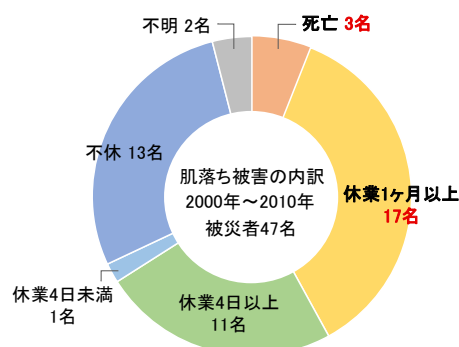


図-1 肌落ち被害の内訳

しかし、肌落ちが発生する要因としては、岩盤の風化や割目以外にも岩盤の凹凸(特にオーバーハングしている岩塊)、不連続面による浮き、湧水等が挙げられるが、これらの要因に着目して肌落ちの発生予測に成功した研究はないのが現状である。

本研究では、切羽面の岩盤の凹凸と不連続面に着目し、切羽面の三次元形状データからオーバーハングの程度と切羽前方における不連続面の状態を推定することで岩盤の状態を定量化し、肌落ちの発生有無との関係性から肌落ち発生を予測することを最終目標とした。そのためにまず、切羽面の三次元形状を点群データとして簡便に取得する手法を検討した。また、取得した点群データを分析することで岩盤のオーバーハングの程度や切羽前方における不連続面の状態を推定する手法を検討した。特に、

不連続面の予測に関しては、その切羽から次のサイクルの切羽面の評価を行うために、時間に余裕が生じるが、オーバーハングの程度の推定に関しては、その切羽面の評価を行うためリアルタイム性が求められる。そこで、リアルタイムに切羽面の三次元データを取得する手法を検討した。

2. 切羽面の三次元データを取得する手法の検討

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、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⁴⁾や対象物までの距離情報を取得できる3Dセンサによる方法が挙げられる。近年、トンネル建設現場においても情報化施工が進められており、写真測量や3Dスキャナ等の手法で切羽面の三次元データを取得し施工管理に有効活用されている。しかしながら、写真測量や3Dスキャナによる方法は点群データの構築に時間を要するため、施工のサイクルタイムが低下してしまう可能性がある。そこで、高精度かつ素早く切羽面の点群データを構築する方法を検討した。

本研究では、近年、自動車の自動運転におけるセンシング技術として採用されているLiDAR (Light Detection And Ranging) センサに着目した。この技術はレーザー光をパルス状に照射し対象物までの往復時間から距離を計測するものであり、自動運転技術では安全に自動運転を行うために自動車周辺の情報をこのセンサを用いて点群データとしてリアルタイムに取得している。このセンサを活用することでトンネル建設現場でも安全を確保できる距離からリアルタイムかつ正確に切羽形状を捉えることができるか検討した。なお、本研究では、LiDARを搭載したセンサとしてLivox社のAvia (図-2) を使用した。本研究では、Aトンネルにて切羽面および切羽周辺の計測実験を行った。ここでは、LiDARでの計測に加えて写真測量による計測も行っている。計測したAトンネルの切羽写真を図-3に示す。この切羽面では、切羽安定対策として核残しがなされており切羽中央付近が盛り上がった形状となっている。この切羽面の形状を約20m離れた地点から計測した。計測結果を図-4に示す。この図は計測した点群を表示しており、赤外線反射強度をコンター（反射強度が高いほど赤色）で示している。この点群は数十秒間の計測後すぐに得られた結果であり、後述する写真測量よりも素早く点群データを構築することができる。ここで、図-4に示した点群データから切羽付近を抽出し奥行方向距離のコンター（センサから遠くなるほど赤色）で示した点群を図-5に示す。この図を見るとトンネル中央部の核残しの形状が計測できていることがわかる。



図-2 本研究で用いた3Dセンサ (LiDAR)



図-3 計測トンネル (Aトンネル)

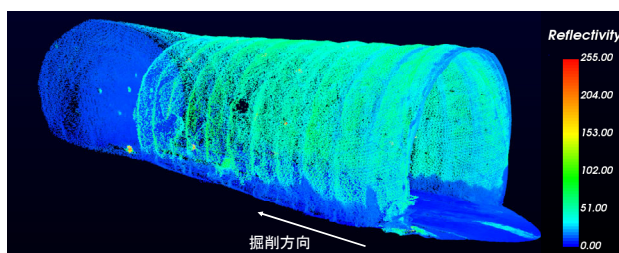


図-4 LiDARで取得した点群データ

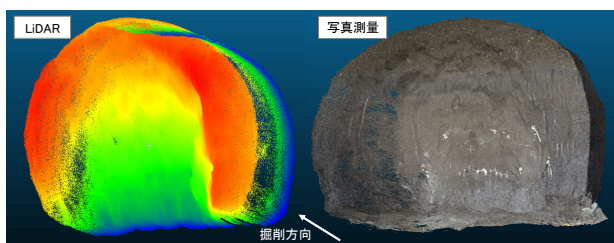


図-5 各種法で取得した切羽面の形状

次に、写真測量に関してもAトンネルにて切羽写真を撮影し切羽面の計測実験を行った。切羽写真は図-3に示したような写真を様々な角度から計15枚撮影した。その切羽写真を写真測量ソフトウェアMetashapeに取り込み構築した点群データを図-5に示す。この点群データの構築には数分を要したものの、LiDARセンサでの計測結果と比較すると点群にRGBデータが付与されているため、切羽の形状に加えて地質等も確認できる点群データとなっている。また、核残しの形状も計測できていることがわかる。

以上、3Dセンサと写真測量の両手法で切羽の形状を点群データとして取得できることがわかった。ここで、

両手法で取得した点群データの重ね合わせを行い、取得した形状がどの程度一致するか分析を行った。両手法で取得した点群データの異なる座標系を重ね合わせる手法としては、後方交会法とICP（Iterative Closest Point）アルゴリズム⁹を用いて重ね合わせる方法がある。ICPは2つの点群同士の重ね合わせを繰り返し計算によって実現する手法であるが、両点群の対応する点がおおまかに合っている必要がある。そこで、両手法の全く異なる点群データから対応する特徴点を数点抽出し、後方交会法によっておおまかな重ね合わせを行った。その後、ICPによって高精度な重ね合わせを行った。この方法で各点群を重ね合わせた点群を図-6に示す。図から明らかなように、それぞれの点群はよく重なっているように見える。また、それぞれの点群の最も近い点同士がどの程度離れているか計算した。計算結果をヒストグラムで表現したものを図-7に示す。この図は横軸がそれぞれの点群において最も近くにある点同士の距離を示しており、縦軸がその点数となっている。この図から、約93%の点が5cm以内の差に、約67%の点が2cm以内の差に、約35%の点が1cm以内の差に収まっていることがわかった。以上から、LiDARと写真測量の両手法においても数cmの誤差で、ほぼ同じ形状計測結果が得られることがわかった。

以上、LiDARによる点群取得に加えて、写真測量でも切羽面の三次元データを取得できることがわかった。特に、LiDARに関しては誤差数mmの精度でリアルタイムに点群データを取得することが可能であり、施工のサイクルタイムを低下させることなく切羽面の三次元データが収集可能である。

3. 切羽面におけるオーバーハングの程度の推定

前章では、点群データ取得手法の検討を行った結果、LiDARと写真測量の両手法において切羽面の三次元形状を点群データとして取得できることがわかった。そこで、肌落ち発生の要因の一つである切羽の凹凸に着目し、岩盤のオーバーハングの程度を推定する方法を検討した。また、ここでは切羽面の凹凸が顕著なBトンネルの切羽を写真測量によって構築した点群データを使用した。Bトンネルの切羽の点群データを図-8に示す。

オーバーハングの程度を推定する手法としては、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、上下に接するvoxelの凹凸差の程度により推定する。voxel変換の概念図を図-9に示す。図に示したように、点群のxy平面上にvoxel要素群を重ね合わせて、各voxel要素に含まれる全ての点群のz値（奥行き）を平均することで点群データをvoxelデータに変換することができる。また、ここでのx軸はスプリングラインの延長方向、y軸はトンネルセンターラインの延長方向、z軸は掘削方向を示している。この作業はプログラミング言語Pythonを

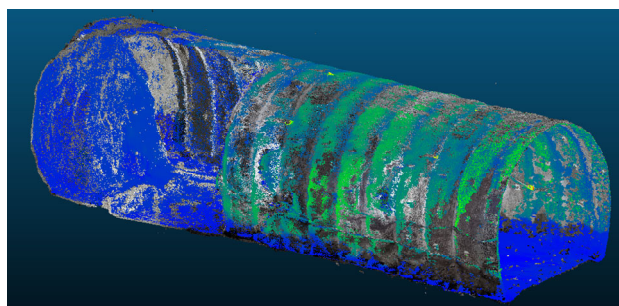


図-6 重ね合わせた点群データ

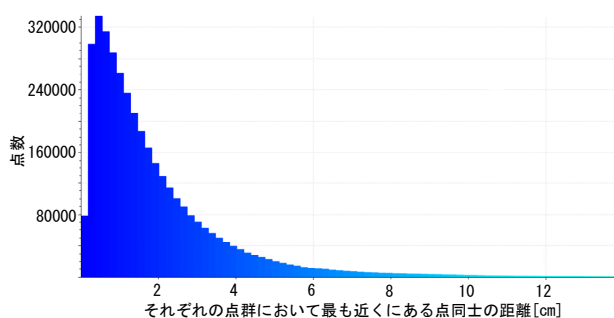


図-7 両手法による点群同士の距離



図-8 計測トンネル（Bトンネル）

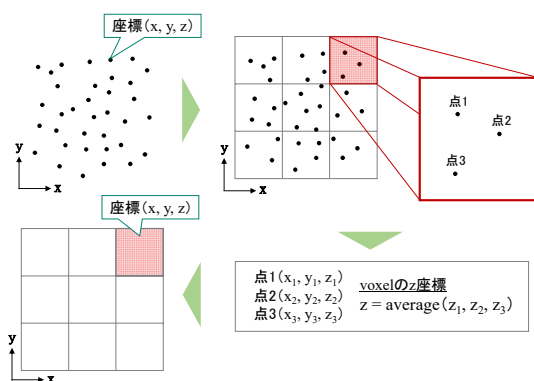


図-9 voxel 変換の概念図

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。

Bトンネルの点群データをvoxelに変換したものを図-10に示す。この図はvoxel幅10cm, 5cm, 1cmの結果を示している。また、各点が各voxelの中心にプロットされており、オーバーハングの程度によって色分けされてい

る。ここで、オーバーハングの程度の計算は上voxel要素のz値から下voxel要素のz値を引いた張出量Lをvoxelの幅Dで除した値L/Dで評価した。それぞれの結果では、L/Dの値が大きくなるほど赤色に近づくように着色している。幅10cmでは、L/Dの最大値が1.99、最小値が0.01となっている。特に、L/Dの値が1よりも大きい場合、つまりvoxel幅よりも張出量大きい場合は肌落ちリスクの高い領域であると推察できる。また、ここではvoxel幅10cm、5cm、1cmの計算結果を示したが、幅1cmにおいてはデータの欠損が確認できる。加えて、幅10cm、5cmでは切羽右肩部に赤色で着色された部分が確認できるが、幅1cmでは赤色で着色されておらず、まとまって赤色に着色されている部分は存在しない。この理由として、voxel幅を小さくするにつれて1つのvoxelに含まれる点群の数が少なくなり、データの欠損や点群データのばらつきにより正確な形状が反映できていないことが推察できる。したがって、点群のデータ数にもよるが、voxel幅は小さくするほど実際の切羽形状に近づくものの、あまりに小さくしすぎると信用度の低いデータになってしまうことがわかった。今回は、約300万点の点群データを使用した。幅5～10cm程度が適していることがわかった。また、肌落ち労働災害における落下岩塊の最小短辺が10cmであることから、幅10cm程度であれば十分に評価できると考えられる。

以上、点群をvoxelに変換することで、オーバーハングの程度を定量化した。また、L/Dに基づいて色付けを行うことで、その切羽の中でリスクの高い部分を抽出することができた。ただし、その切羽の中での相対評価は可能なものの、肌落ち発生の定量的な評価は行えていない。そこで今後の課題としては、リアルタイムかつ高精度に切羽面の三次元データを取得できるLiDARを用いてデータを収集し、肌落ちの発生有無との関係性を明らかにすることで肌落ち発生の定量的な評価が可能になると考えられる。

4. 切羽前方における不連続面の状態の推定

前章では、切羽面の点群をvoxelに変換することでオーバーハングの程度を定量化することが可能であることがわかった。しかし、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。

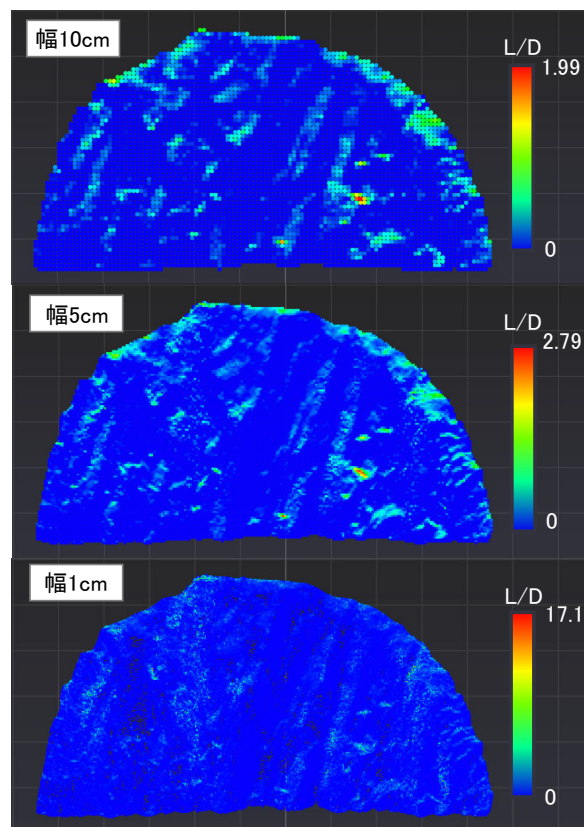


図-10 voxel 変換後のデータ

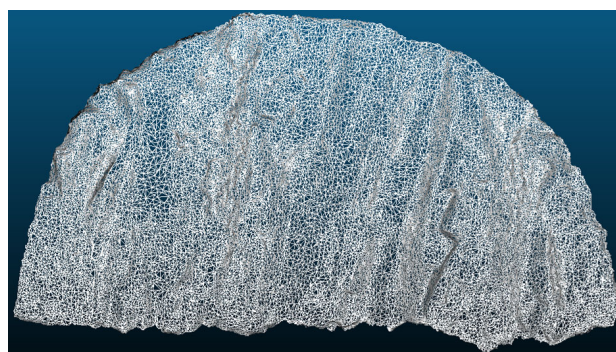


図-11 メッシュ構築を行ったBトンネルの切羽

そこで、切羽面の点群データから面のデータに変換するメッシュ構築を行い、構築した面から走向・傾斜の評価、切羽前方における不連続面を推定した。ここでは前章と同様にBトンネルの切羽の点群データを使用した。まずは、Metashapeを用いてメッシュ構築を行った。メッシュ構築では、点群から抽出した3点を頂点として三角形の要素が構築される。Bトンネルの点群データをメッシュ構築したデータを図-11に示す。ここでは、5万個の面を構築している。このデータには、各要素の頂点の座標が格納されており、この座標データからベクトルの外積を計算し各要素の法線を求め、法線の座標データから走向角度と傾斜角度を算出した。走向・傾斜の概念図を図-12に示す。算出方法は、まず法線ベクトルと直交し水平面上にある走向ベクトルを求める。この走向ベクトル

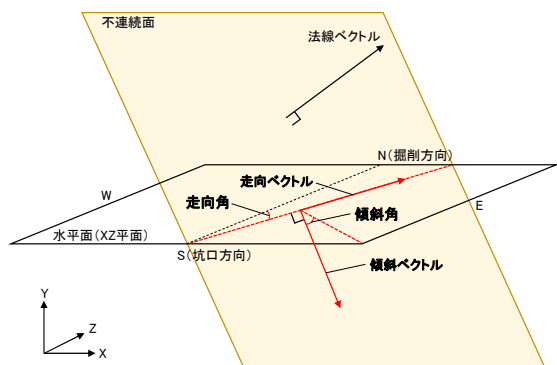


図-12 走向・傾斜の概念図

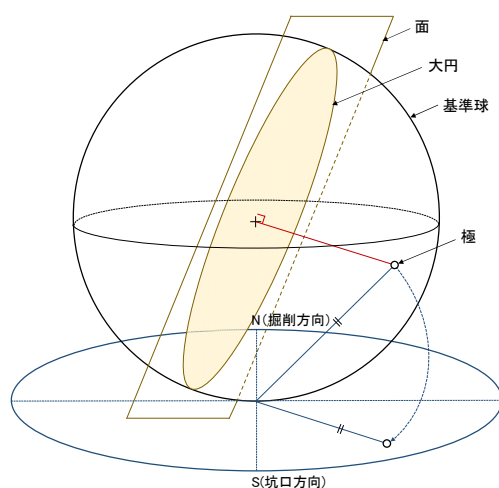


図-13 ステレオ投影の概念図

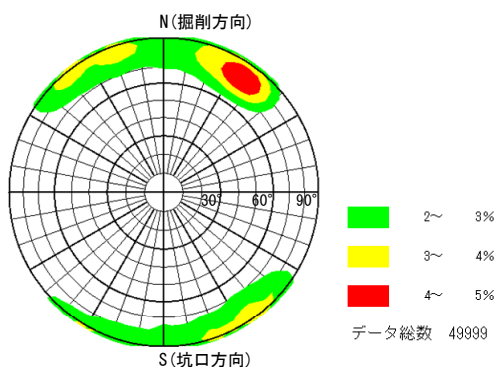


図-14 Bトンネルの走向・傾斜の傾向

ルと南から北を示すベクトルのなす角が走向角となる。また、法線ベクトルと走向ベクトルに直交する傾斜ベクトルを求める。この傾斜ベクトルと水平面のなす角が傾斜角となる。この手順で、各要素の走向角度と傾斜角度を算出した。

次に、走向・傾斜の傾向を確認するために各要素の走向・傾斜のデータに関して、シュミットネットにステレオ投影を行った。シュミットネットは球面上の領域を歪まずに平面に投影することができるため、球面上の点の傾向を正しく評価することができる。投影の概念図を図

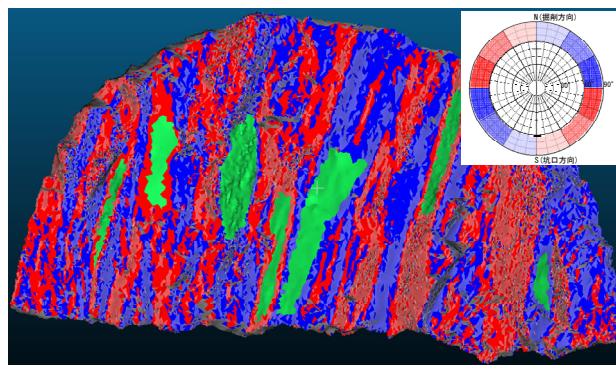


図-15 不連続面の抽出結果

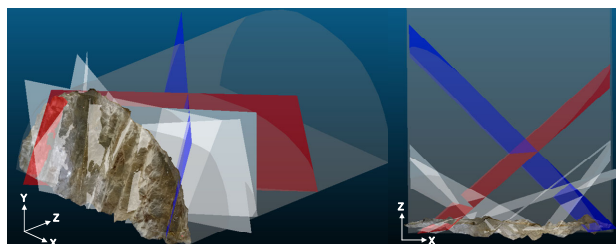


図-16 切羽前方における不連続面の推定結果

-13に示した。ここでは、各面に大円（平面が球の中心を通る場合の切り口）を描くように基準球を重ね、平面における極（平面の法線が下半球表面と交わる点）を求め、極と球の底点を結んだ距離を半径として水平面に投影している。また、磁北の方向はトンネル掘削方向としている。Bトンネルの走向・傾斜データを投影したシュミットネットを図-14に示す。この図から、傾斜角が60°以上の部分かつ走向方向が東西のどちらも走向角が30°の付近に分布が集中していることがわかる。つまり、切羽前方で不連続面が交差している可能性が高いことが推察される。そこで、傾斜角60°以上の要素に着色し切羽面における不連続面の分布を確認した（図-15）。ここでは、走向方向が東の要素は赤色、西の要素は青色に着色しており、走向角が大きくなるほど濃い色で示している。この図により、走向角が同程度の要素のまとまりから切羽前方予測のための不連続面を抽出し、緑色で示した。これらの不連続面に関して、切羽前方における状態を推定した。具体的な方法としては、抽出した不連続面ごとに不連続面部分の各頂点座標に関して距離の二乗和が最小になるような近似平面を算出する。その近似平面を重ね合わせることで切羽前方における不連続面の状態を推定できる。抽出した不連続面について近似平面を重ねた図を図-16に示す。これをみると、切羽前方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出現することがわかる。特に、図-16に赤と青で示した不連続面の交差に着目すると、それぞれの面の法線のなす角を計算することで平面のなす角が求まり、約91°となる。また、2点間の距離を算出することで切羽面から交差箇所

所までの距離が約4.9mとなる。

以上から、不連続面の定量化（面を表す式の算出）が可能となり、切羽前方における不連続面の状態を推定した。しかし、肌落ち発生の定量的な評価は行えていないのが現状である。そこで前章の課題と同様に、切羽面の三次元データを収集し、肌落ちの発生有無と不連続面の交差角度、切羽面から交差箇所までの距離の関係を明らかにすることで肌落ち発生の定量的な評価が可能になると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、肌落ち災害の低減を目的とし、肌落ち発生の定量的な評価に向けて、肌落ち発生要因のうち岩盤のオーバーハングと切羽前方における不連続面の状態に着目した。その中で、切羽面の3次元データをリアルタイムかつ高精度に点群データとして取得する手法を検討した。また、点群データから岩盤のオーバーハングの程

度を定量化する方法と切羽前方における不連続面の状態を推定する方法を検討した。今後の課題としては、LiDARを用いて切羽の三次元データを収集し、岩盤のオーバーハングと不連続面の状態それぞれと肌落ち発生有無との関係性を明らかにすることで肌落ち発生の定量的な評価が可能となり、発生予測につながると考えられる。

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) 戸邊勇人，宮嶋保幸，福島大介，西澤勇祐，本間伸一，山本拓治：CNN によるトンネル切羽の剥落危険度評価，人工知能学会全国大会（第33回），4Q3-J-13-01，pp.1-2，2019.
- 4) K. Kraus, "Photogrammetry", Vol. 2, chap. 3, 2000.
- 5) 増田健：ICP アルゴリズム，コンピュータビジョンとイメージメディア，Vol.2009-CVIM-168，No.23，pp.1-8，2009.
- 6) 日本トンネル専門工事業協会：トンネル工事における肌落ち労働災害防止のハンドブック その 2，pp.3-4，日本トンネル専門工事業協会，2012.