

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

岡崎 泰幸¹・林 久資²・津田 愉大³・田村 大智⁴・
青木 宏一⁵・進士 正人⁶

¹正会員 松江工業高等専門学校助教 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)
E-mail: okazaki@matsue-ct.jp (Corresponding Author)

²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 2-16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 鹿島建設株式会社 九州支店 (〒812-8513 福岡県福岡市博多区博多駅前 3-12-10)
E-mail: tsudayu@kajima.com

⁴学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科建設環境系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: a021veu@yamaguchi-u.ac.jp

⁵正会員 株式会社熊谷組 土木事業本部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)
E-mail: koaoki@ku.kumagaigumi.co.jp

⁶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 2-16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

山岳工法によるトンネル施工では、トンネル切羽付近において岩石等が崩れ落ちる「肌落ち」と呼ばれる現象が発生し、それによって労働災害が生じる場合がある。そのため、肌落ちの発生要因等を踏まえて肌落ちのリスクに対する様々な評価方法が提案されているが、肌落ちの発生要因の1つと考えられる切羽面の凹凸に着目した評価方法は提案されていないのが現状である。

そこで、本研究では、切羽面の凹凸に起因する肌落ちのリスクを評価することのできる解析方法を提案することを目的とし、切羽の写真測量結果からボクセル法を応用することにより切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを生成し、基礎的なトンネル掘削解析を行った。その結果、本研究で提案した解析方法が切羽面の凹凸に起因する肌落ちのリスク評価に対して有用であることが示された。

Key Words: tunnel face, unevenness, continuum approach, 3D numerical analysis, tunnel excavation

1. はじめに

山岳工法によるトンネル施工では、トンネル掘削時において切羽付近の地山が自立することを前提として、発破や掘削機による掘削が行われる。このような前提により、切羽では地山が露出する状況が度々生じるため、切羽面における岩盤の割れ目や風化、凹凸（特に、切羽面よりオーバーハングしている岩塊など）、湧水などの状態によっては岩石等が崩れ落ちる「肌落ち」が発生することがある。また、切羽付近には、火工品の装薬や支保工の建込み作業のために施工者等が接近するため、肌落ちによる重篤度の高い労働災害が度々発生しているのが現状である（図-1 参照）。

この事実を受け、厚生労働省は肌落ち災害の防止を図るガイドラインを取りまとめ、切羽付近での作業を行う際は、切羽監視責任者が切羽を常時監視することを義務

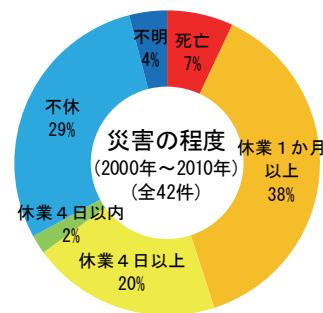


図-1 肌落ちによる災害の程度¹⁾

付けている²⁾。ガイドライン制定以降、切羽監視責任者による目視監視が実施されているが、目視での判断は監視者の経験や集中力に依存するため、避難指示の遅れや見落としなどが生じる可能性がある。そのため、切羽監視者の負担の緩和に寄与する研究開発が行われている。代表的なものとしては、トンネル施工中における肌落ちの発生をカメラによって検知する手法^{3,4)}などが提案されている。一方で、肌落ちによる施工者の被災リスクをより低減させるためには、切羽面における岩盤の状態を定量的に評価し、経験の少ない監視者などでも肌落ちが発生しやすい切羽状況を事前に判断できるようにする必要があると考えられる。そのような理由から、近年では、切羽面における岩盤の割れ目と風化の状態を画像解析により定量的に評価し、機械学習を利用して肌落ちの有無を判定する手法が提案されており、現場への適用が試みられている^{5,6)}。

このように、切羽において発生する肌落ちのリスクに対して様々なアプローチが実施されているが、肌落ちの発生要因の1つと考えられる切羽面の凹凸に着目して、肌落ちのリスク評価を試みた研究はなく、その評価方法についても提案されていないのが現状である。

そこで、本研究では、トンネル切羽面の凹凸に起因する肌落ちのリスクを評価することのできる解析方法を提案することを目的とし、トンネル切羽の写真測量結果からボクセル法を応用して切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを生成し、そのモデルに対して基礎的なトンネル掘削解析を実施する。そして、その解析結果から、本研究で提案する解析方法が切羽面の凹凸に起因する肌落ちのリスク評価に対して有用であることを示す。

2. 切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルの生成手順

トンネル切羽面の凹凸を考慮した三次元のトンネル掘削解析を実施するには、実現場の切羽面から三次元形状を取得し、その取得した形状を三次元数値解析モデルに反映する必要がある。本章では、本研究で提案する切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルの生成手順について生成例を交えながら示す。モデルの生成手順については、あらかじめ図-2にフロー図を示しているので、適宜必要に応じて参照されたい。

(1) 切羽面の三次元形状の取得

本研究では、実現場の切羽面の三次元形状を取得する手段として、Agisoft社のMetashape⁷⁾を採用した。Metashapeは、複数枚の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ことができる。

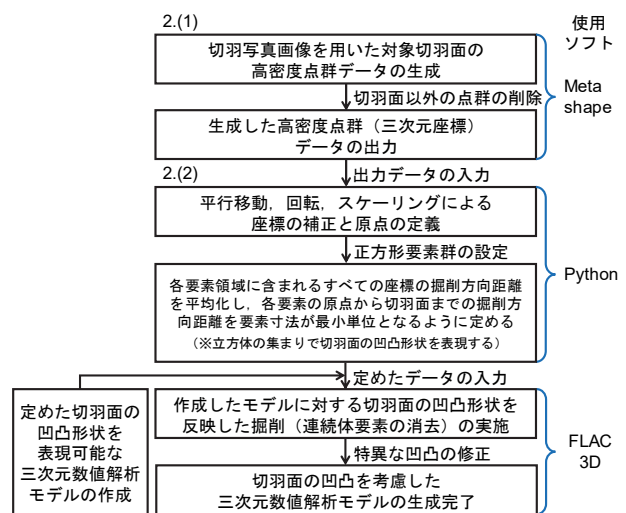


図-2 切羽面の凹凸を考慮した三次元モデル生成のフロー図



図-3 切羽面の高密度点群データの生成結果

そして、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) や高密度点群などの三次元座標データを生成することが可能である。本研究では、切羽面の三次元形状の取得例として、実現場の1切羽で撮影された15枚の切羽写真画像に対してMetashapeを使用し、切羽面における高密度点群データの生成を行った (図-3参照)。この際、写真画像はスマートフォンカメラ (アップル社製iPhoneXR, 1200万画素) で撮影したものをを用いた。また、図-3の高密度点群データは、以下に示すモデリング時のデータ処理の負荷を軽減させるために、特異点を含む切羽面以外の点群を削除し、点群データ数を約65,000点まで減少させたものである。このようにして得られた高密度点群データから三次元座標を出力することができ、その三次元座標の利用により以下に示すような切羽面の三次元形状のモデリングが可能となる。

(2) ボクセル法を応用した切羽面の三次元形状のモデリング

本節では、2.(1)で得られた高密度点群データの三次元座標を基にボクセル法を応用して、切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを生成する。ここで、ボクセル法を採用したのは、ボクセル法が小さいボクセル (通常、立方体) の集まりで三次元対象物を表現するモデリ

ング手法であり⁸⁾、トンネルの実務で使用されることが多い連続体解析（有限要素法や有限差分法など）⁹⁾への適用¹⁰⁾が極めて容易で、実務への応用についても期待できると考えたためである。そこで、本研究では、切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを生成するにあたり、連続体解析手法の1つである三次元有限差分法解析コード FLAC3D¹¹⁾を採用した。以下に、ボクセル法を応用した切羽面の三次元形状のモデリング手順を示す。

切羽面の三次元形状のモデリングでは、まず数値解析モデルとの座標系の整合や、実寸法とのスケールの整合を図るために、2.(1)で得られた切羽面の三次元座標に対して、平行移動、回転、スケーリングなどの座標変換（アフィン変換¹²⁾）により座標の補正を行う。ここでの補正は、切羽手前の鋼製支保工のスプリングライン（以下、SL と称する。）と天端の直交点を原点とし、SL の延長方向が x 軸、トンネルセンターラインの延長方向が y 軸、掘削方向が z 軸となるように実施する（図-4 参照）。そして、図-5 に示すように x-y 平面上に正方形要素群を設定して切羽面の三次元座標との重ね合わせを行い、各要素領域に含まれるすべての座標の掘削（z 軸）方向距離を平均化する。ここで、平均値を求める際には、要素寸法が最小単位となるように四捨五入を行う。この操作により、各要素の原点から切羽面までの掘削（z 軸）方向距離を定めることができ、切羽面の三次元形状をボクセルの凹凸で表現することが可能となる。本研究では、座標の補正から上記までのデータ処理をプログラミング言語 Python により実施した。また、正方形要素群の各要素の寸法については、切羽面の三次元形状を表現するボクセルのサイズが 10cm となるように、10cm×10cm に設定した。ボクセル法に基づく解析は、一般にボクセルのサイズが小さくなるほど、形状の近似精度が向上し解析精度も向上するが、その分要素数が増大し解析時間が長くなるといった特徴がある。本研究では、肌落ち労働災害における肌落ち岩塊の最小短辺が 10cm であること¹³⁾から、10cm のボクセルサイズでも切羽面の凹凸に起因する肌落ちのリスクを十分に評価できると考え、ボクセルサイズが 10cm となるような正方形要素群を採用した。

その後、対象とするトンネルの設計断面を考慮しつつ、連続体解析上で先程定めた切羽面の三次元形状を表現できるような三次元数値解析モデルを生成する。生成例として、FLAC3D 上で作成した三次元数値解析モデルを図-6 に示す。ここでは、前述の操作によって定めた切羽面の三次元形状を表現できるようにするために、先程定めた 10cm×10cm の正方形要素群と掘削領域の要素寸法と x, y 座標を基本的に一致させており、掘削予定位置（モデル奥行き中央部）周辺における要素の奥行き寸法についても 10cm としている。そして、その生成したモデルに対して、先程定めた切羽面の三次元形状を反映し

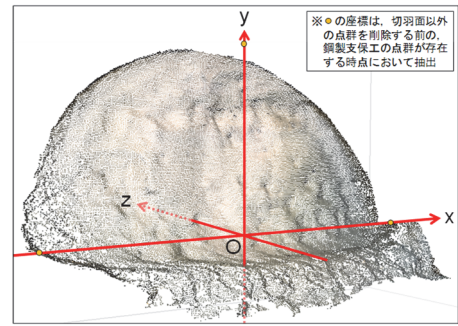


図-4 切羽面の三次元座標補正後のイメージ図

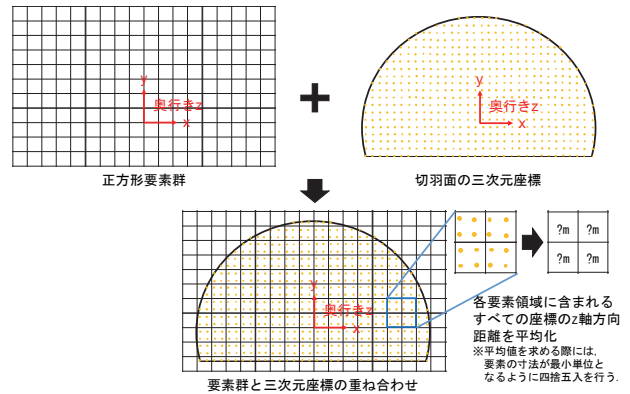


図-5 切羽面の三次元形状の算定方法

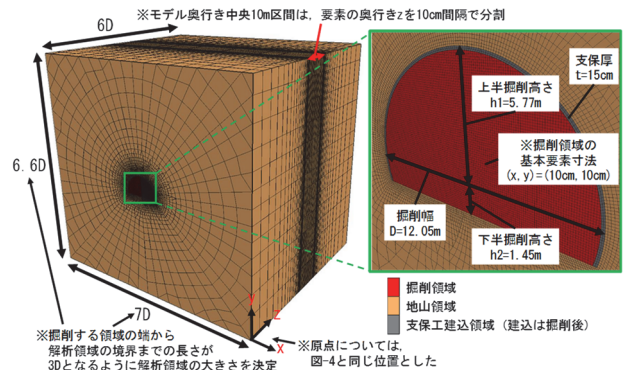


図-6 三次元数値解析モデル（総要素数：約 1750000）

た掘削（連続体要素の消去）を行う。

以上の操作により、切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルの生成が可能となる。

(3) 切羽面の三次元形状のモデリング結果

2.(1)および 2.(2)に示した手順で切羽面の凹凸をモデル奥行き中央部（図-6 参照）において考慮した三次元数値解析モデルの一例を図-7(a)に示す。また、本研究では、切羽面の凹凸を考慮したモデルとの比較を行うため、トンネルの実務の数値解析で一般的に用いられる切羽面の凹凸を考慮していないモデル（図-7(b)参照）の生成も行った。ここで、図-7では、掘削位置（奥行き）や切羽面の状況をわかりやすくするために半断面の状態を示している。また、切羽面の凹凸を考慮していないモデルでは、

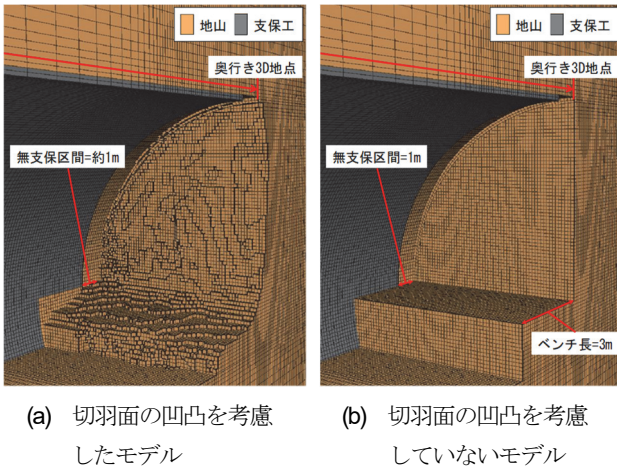


図-7 掘削後の三次元数値解析モデル

切羽面の凹凸を考慮したモデルのベンチ長が最大約 3m であったことから、ベンチ長を 3m としている。

図-7(a)から、本研究で提案したモデリング方法でも、切羽面の細かい凹凸を表現できていることがわかる。また、詳細に着目すると、切羽面よりオーバーハングしている岩塊やベンチの形状についても表現できていることがわかる。

3. 切羽面の凹凸を考慮したトンネル掘削解析

本章では、前章で生成した三次元数値解析モデルを用いて基礎的なトンネル掘削解析を行う。そして、切羽面の凹凸を考慮したモデルと考慮していないモデル（図-7 参照）との比較を行い、本研究で提案したモデリング方法を活用したトンネル掘削解析の有用性を示す。特に、本研究では、切羽面のせん断・引張破壊（肌落ち）に影響すると考えられる切羽面の最大主応力と最小主応力（本研究では、圧縮応力を正、引張応力を負とする。）に関して比較を行う。

(1) 解析条件と手順

本研究におけるトンネル掘削解析の地山の解析物性値を表-1に示す。ここで、本研究では、切羽面の凹凸の有無が解析結果にもたらす影響を確認するための基礎的なトンネル掘削解析を行うため、地山の材料構成則を線形弾性体とし、解析物性値については対象とした現場の支保パターン（DI）とその支保パターンの解析物性値事例⁹⁾を参考に設定した。また、本トンネル掘削解析で考慮する支保工の諸元とその解析物性値を図-8に示す。ここで、解析で考慮する支保工は吹付けコンクリートおよび鋼製支保工とし、各支保工の諸元は対象とした現場の支保パターン（DI）に基づいて定めた。加えて、支保工の材料構成則は地山と同様に線形弾性体とし、その解析

表-1 地山の解析物性値

地山 (ソリッド要素)	単位体積重量	22.0	kN/m ³	対象現場の支保パターンとその支保パターンの解析物性値事例を参考に設定
	ヤング係数	500	MPa	
	ポアソン比	0.30	-	

吹付け コンクリート	設計基準強度	18.0	MPa	対象現場の支保パターンに基づいて諸元を決定 + 解析物性値事例を参考に各支保工の物性値を設定
	厚さ	0.15	m	
	単位体積重量	23.5	kN/m ³	
	ヤング係数	4000	MPa	
	ポアソン比	0.20	-	
鋼製支保工	規格	H-125		
	単位体積重量	77.0	kN/m ³	
	ヤング係数	2.1 × 10 ⁵	MPa	
	ポアソン比	0.30	-	
掘進長		1.0	m	

各支保工の面積比を考慮して等価な物性値を求め、支保工(ソリッド要素)の解析物性値とした。

支保工 (ソリッド要素)	単位体積重量	24.57	kN/m ³
	ヤング係数	8120	MPa
	ポアソン比	0.202	-

図-8 支保工の諸元とその解析物性値

物性値は各支保工の物性値を解析物性値事例を参考に定めた後に、各支保工の面積比を考慮して等価な値を設定した⁹⁾。

トンネル掘削解析における境界条件については、図-7に示す両掘削ケースともに解析領域の面外法線方向の変位を拘束条件とした。また、トンネル掘削解析時の初期応力については、両掘削ケースともに土被り 100m 相当の重力場（側圧係数 1.0）となるように設定した。

そして、上記のように設定した解析条件に基づいて、図-7に示すようなモデル奥行き中央部までの掘削と支保工の建込を一括で行うことによりトンネル掘削解析を実施した。

(2) 解析結果

解析結果として、まず切羽正面から見た切羽面における最大主応力のコンター図を図-9に示す。図-9から、切羽面の凹凸を考慮したモデルは切羽面の凹凸を考慮していないモデルと比較して、最大主応力が 4MPa を超える領域が特に切羽面上部や切羽の隅角部周辺において拡大していることがわかる。この結果と切羽面の最小主応力が掘削に伴う応力の解放によって 0 に近い値を示すことを踏まえて考えると、切羽面の凹凸を考慮した場合、切羽面上部や切羽の隅角部周辺でせん断破壊が生じるリスクが高くなるといえる。また、本研究で提案した切羽面の凹凸を考慮した解析を行うことで、そのせん断破壊のリスクが高い箇所を可視化することができるといえる。

続いて、切羽正面から見た切羽面における最小主応力のコンター図を図-10に示す。図-10から、切羽面の凹凸を考慮していないモデルでは、SL より上の切羽面にお

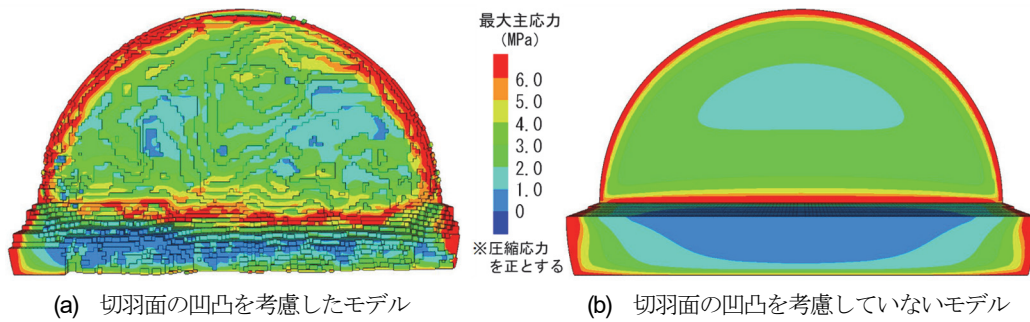


図-9 切羽面における最大主応力のコンター図（正面図）

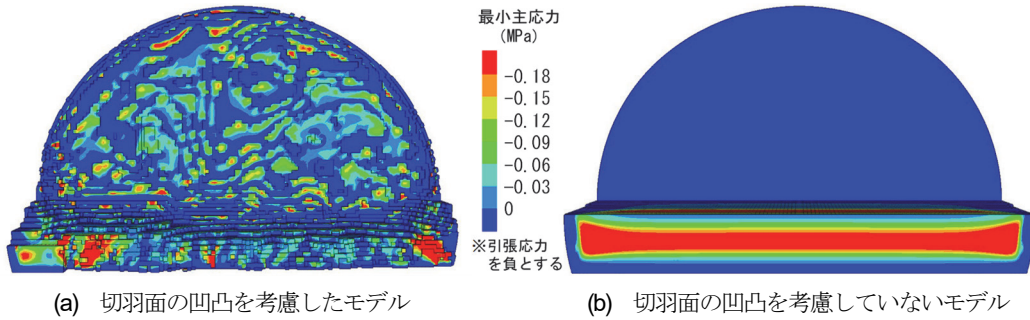


図-10 切羽面における最小主応力のコンター図（正面図）

いて引張の最小主応力が生じていないことがわかる。一方で、切羽面の凹凸を考慮したモデルでは、SL より上の切羽面でも様々な箇所で見張の最小主応力が生じていることがわかる。これらの結果から、本研究で提案した切羽面の凹凸を考慮した解析を行うことで、切羽面において引張破壊のリスクが高い箇所を可視化することができるといえる。

そして、特に切羽のトンネルセンターライン上の断面を側面から見た各主応力のコンター図（図-11 参照）に着目すると、図-11(a)の切羽面の凹凸を考慮したモデルは切羽面の凹凸を考慮していないモデルと比べて、特に切羽面上部のオーバーハング部において最大主応力の増加領域がトンネル掘削方向斜め下向きに進展していることがわかる。また、図-11(b)の最小主応力に着目すると、SL より上の切羽面において引張の最小主応力が生じ、その引張領域がトンネル掘削方向に進展していることがわかる。したがって、切羽面の凹凸状況によっては、切羽面においてせん断・引張破壊領域がトンネル掘削方向に進展しやすくなるといえる。

以上の結果から、本研究で提案した切羽面の凹凸を考慮したトンネル掘削解析を実施すれば、切羽面の凹凸の影響によって生じる切羽のせん断・引張破壊について従来より詳細な検討ができるといえる。また、切羽の各位置の応力状態の評価などから、肌落ちリスクの高い箇所を定量的に評価することができるといえる。したがって、本解析方法は、切羽面の凹凸に起因する肌落ちのリスクを評価するために有用な方法といえる。

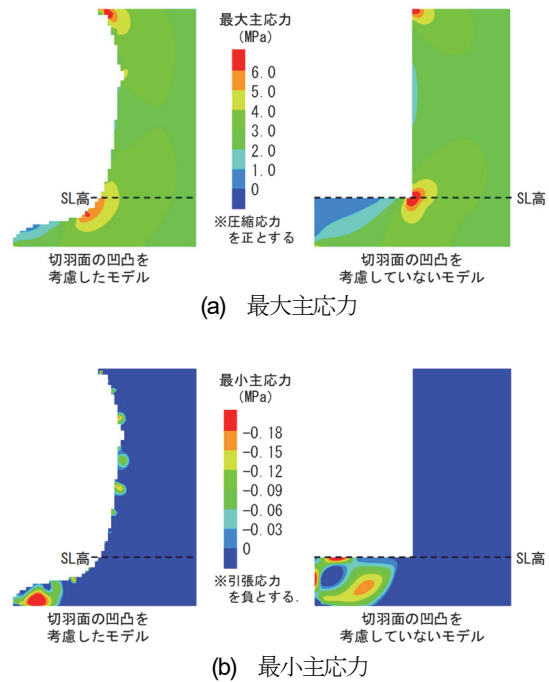


図-11 切羽のトンネルセンターライン上における各主応力のコンター図（側面図）

4. まとめと今後の課題

本研究では、トンネル切羽の写真測量結果からボクセル法を応用して切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを生成し、そのモデルに対して基礎的なトンネル掘削解析を実施した。そして、その解析結果から、本研究で提案した解析方法が切羽面の凹凸に起因する肌落ちのリスク評価に対して有用であるかを検討した。以下に、

本研究により得られた知見を示す。

- 1) 本研究で提案したモデリング方法は、切羽面の凹凸形状（例えば、切羽面よりオーバーハンクしている岩塊など）を表現することが可能である。
- 2) 本研究で提案した解析方法を実施することで、切羽面の凹凸の影響によって生じる切羽のせん断・引張破壊について従来より詳細な検討が可能であることがわかった。
- 3) 解析結果から、切羽の各位置の応力状態の評価を行うことで、肌落ちリスクの高い箇所を定量的に評価することができることがわかり、本解析方法の有用性が明らかとなった。

今後は、対象切羽を増やして本解析方法を実施することにより、トンネル切羽における肌落ちリスクの高い箇所の条件を、特に切羽面の凹凸の観点からより定量的に評価していく予定である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP20K05005（研究代表者：林久資）の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉川直孝, 伊藤和也, 堀智仁, 玉手聡, 豊澤康男：トンネル切羽の肌落ちによる死傷災害の調査分析と安定対策の検討, 土木学会論文集 F6, Vol.67, No.2, pp.I_125-I_130, 2011.
- 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, 藤岡大輔, 中岡健一, 西山哲：トンネル切羽の変状モニタリングのための画像解析技術の研究, 土木学会論文集 F3, Vol.73, No.2, pp.I_226-I_233, 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) 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.
- 6) 西澤勇祐, 本間伸一, 戸邊勇人, 宮嶋保幸, 福島大介：マルチモーダル深層学習による切羽剥落の予測, 人工知能学会全国大会（第 33 回）, 4Q2-J-13-04, pp.1-2, 2019.
- 7) Agisoft : Agisoft Metashape User Manual, https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf (オンライン), 2021-02-21 参照.
- 8) 櫻井英行, 白石知成：地下施設計画のための地下水浸透流ボクセル解析, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp.155-168, 2001.
- 9) 土木学会：トンネル・ライブラリー16 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, pp.119-164, 丸善, 2006.
- 10) 林久資, 酒井大輔, 岡崎泰幸, 森本真吾, 進士正人：数値解析による礫混じり地山でのトンネル掘削挙動予測手法の提案, 土木学会論文集 F1, Vol.76, No.1, pp.21-33, 2020.
- 11) Cundall, P. A. and Board, M. : A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Programs, *Proc. of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, pp.2101-2108, 1988.
- 12) 昌達慶仁：詳解 画像処理プログラミング, pp.191-198, ソフトバンククリエイティブ, 2009.
- 13) 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.

(Received Jun 7, 2021)
(Accepted October 20, 2021)

PROPOSAL OF ANALYSIS METHOD FOR EVALUATING RISK OF FALLING ROCKS DUE TO UNEVENNESS OF TUNNEL FACE

Yasuyuki OKAZAKI, Hisashi HAYASHI, Yudai TSUDA, Daichi TAMURA,
Koichi AOKI and Masato SHINJI

In tunnel construction by the mountain tunneling method, occupational accidents may occur due to falling rocks that occurs near tunnel face. Therefore, various evaluation methods for the risk of falling rocks have been proposed in consideration of occurrence factors of falling rocks. However, at present, no evaluation method has been proposed focusing on unevenness of tunnel surface, which is one of occurrence factors of falling rocks.

In this study, in order to propose an analysis method that can evaluate the risk of falling rocks due to the unevenness of tunnel face, a 3D numerical analysis model considering unevenness of tunnel face was generated by applying the voxel method to photogrammetric results of a tunnel face. And basic tunnel excavation analysis was carried out. As a result, it was clear that the analysis method proposed in this study is useful for evaluating the risk of falling rocks due to unevenness of tunnel face.