

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

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²

¹松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

²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)

³鹿島建設株式会社 九州支店 (〒812-8513 福岡市博多区博多駅前3-12-10)

⁴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二丁目16-1)

⁵株式会社熊谷組 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

*E-mail: okazaki@matsue-ct.jp

山岳工法によるトンネル施工では、掘削後に必ず切羽付近の地山が露出するため、岩石等が崩れ落ちる「肌落ち」という現象が発生することがある。切羽付近には施工者が作業で接近するため、この肌落ちにより労働災害が度々発生しているのが現状である。このような施工者の被災リスクを減少させるためには、肌落ちが生じやすい箇所を定量的に評価していく必要がある。

そこで、本研究では、トンネル切羽における肌落ちが生じやすい箇所の条件を明らかにすることを目的とし、その第一歩として、切羽の写真測量結果からボクセル法によって切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを作成した。そして、作成したモデルを用いて基礎的なトンネル掘削解析を行い、切羽面の凹凸により肌落ちリスクが高まるかについて検討した。その結果、切羽面上部にオーバーハング部が存在する場合、特に切羽面上部のオーバーハング部において肌落ちリスクが高まることがわかった。

Key Words : *mountain tunneling method, tunnel face, simple photogrammetry, 3D numerical modeling, tunnel excavation analysis*

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ける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生じるため、切羽面における岩盤の割れ目や劣化、凹凸、湧水などの状態によっては岩石等が崩れ落ちる「肌落ち」と呼ばれる現象が発生することがある。切羽付近には技術者や技能者が作業で接近するため、この肌落ちは極めて危険な現象であり、実際にこれにより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。例えば、2000年から10年間の肌落ちによる被災者45名は7%が死亡、38%が休業1か月以上となっている¹⁾。

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付けている²⁾。従来、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、作業者の被災リスクをより低減させるためにも、肌落ちが生じやすい箇所を定量的に評価し、経験の少ない監視者などでも肌落ち発生確率の高い危険箇所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。肌落ちの発生要因としては、切羽面における岩盤の割れ目や劣化、凹凸（特に、切羽面よりオーバーハングしている岩塊など）、湧水などが考えられるが、それらを評価して肌落ちが生じやすい箇所を定量化した研究はみられないのが現状である。

そこで、本研究では、トンネル切羽における肌落ちが生じやすい箇所の条件を明らかにすることを目的とし、その第一歩として、トンネル切羽の写真測量結果からボクセル法を用いて、切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを作成する。そして、作成したモデルを用いて基礎的なトンネル掘削解析を行い、切羽面の凹凸により肌落ちリスクが高まるかについて検討する。

2. 切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルの作成手順

本章では、実現場の切羽面の凹凸形状を取得するために、実現場の1切羽で撮影された15枚の切羽写真画像から画像解析ソフトを用いて切羽面の点群データ（三次元座標）の抽出を行う。この際、写真画像はスマートフォンカメラ（iPhoneXR, 1200万画素）で撮影したものを用いた。そして、抽出した点群データからボクセル法を応用して切羽面の凹凸形状を求め、その凹凸形状を反映した要素の消去を連続体解析上で行うことにより、切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを作成する。以下に、その詳細な手順を示す。

(1) 切羽面の凹凸形状の取得

本研究では、切羽面の凹凸形状を取得するために、Agisoft社のMetashapeを用いた。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。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できる。本研究では、実現場で撮影された切羽写真画像に対してMetashapeを使用することにより、切羽面における高密度点群データの抽出を行った（図-1参照）。そして、高密度点群データから得られるすべての三次元座標を利用して、以下に示す切羽の三次元モデリングを行った。

(2) ボクセル法を用いた切羽面の凹凸形状のモデリング

本研究では、2.(1)で得られた三次元座標を基にボクセル法を応用して、切羽面の凹凸形状を考慮した三次元数値解析モデルを作成した。ここで、ボクセル法とは、三次元対象物を細かいボクセル（通常、立方体）の集まりとして表現するものである⁹⁾。また、三次元数値解析モデルを作成する際には、三次元有限差分法解析コードFLAC3D[®]を用いた。以下に、ボクセル法を用いた切羽の三次元モデリング手順を示す。

切羽の三次元モデリングでは、まず座標系や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、平行移動、回転、スケーリングなどを行い座標の補正を行った。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と天端の直交点が原点をとり、スプリングラインの延長方向がx軸、原点-天端の延長方向がy軸、掘削方向がz軸となるように実施した。そして、図-2に示すように、切羽面における点群データと10cm四方の要素群の重ね合わせを行い、各要素に含まれる点群のz軸方向距離を平均化することにより、各要素における切羽手前の鋼製支保工から切羽面までの掘削距離を



図-1 切羽面の高密度点群データの抽出結果

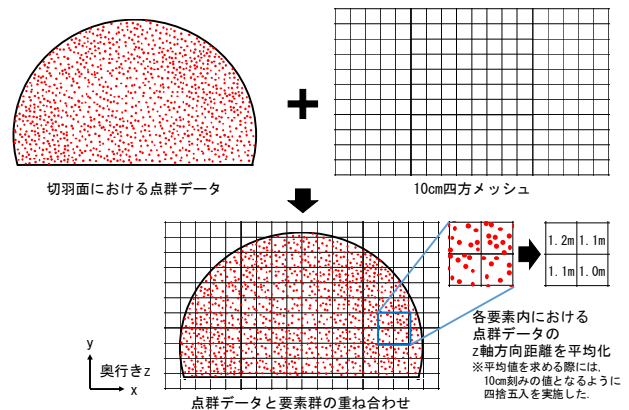


図-2 切羽面の凹凸形状の算定方法

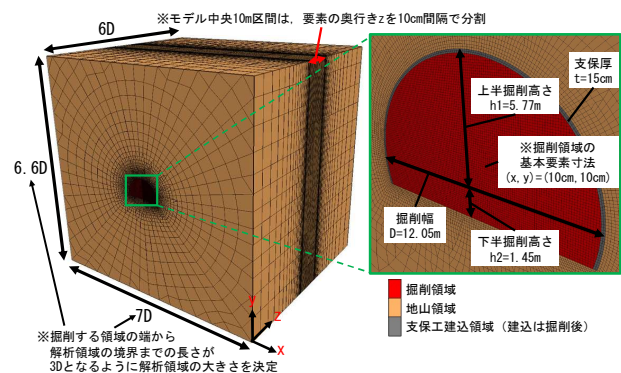


図-3 三次元数値解析モデル

10cm刻みで定めた（すなわち、10cmの立方体の集まりで切羽面の凹凸形状を表現した。）。その後、対象現場の設計断面を考慮しつつ、FLAC3D上で先程定めた切羽面の凹凸形状を表現できるような三次元数値解析モデルを作成した（図-3参照）。そして、その作成したモデルに対して、先程定めた切羽面の凹凸形状を反映した掘削（連続体要素の消去）を行い、切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを作成した。作成後、特異な凹凸がモデル内に生じていた場合には、周りの凹凸となじむように適宜要素の消去や生成を実施した。

上記のような手順で作成した切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを図-4(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、切羽面の凹凸を考慮していないモデル（図-4(b)参照）の作成も行った。ここで、図-4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、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、ベンチ長を簡便に3mとしている。

3. 切羽面の凹凸を考慮したトンネル掘削解析

本章では、第2章で作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との比較を行い、切羽面の凹凸により肌落ちリスクが高まるかについて検討する。特に、本検討では、肌落ちに直結すると考えられる切羽面における鉛直方向の変位や塑性状況についての比較を行う。

(1) 解析条件と手順

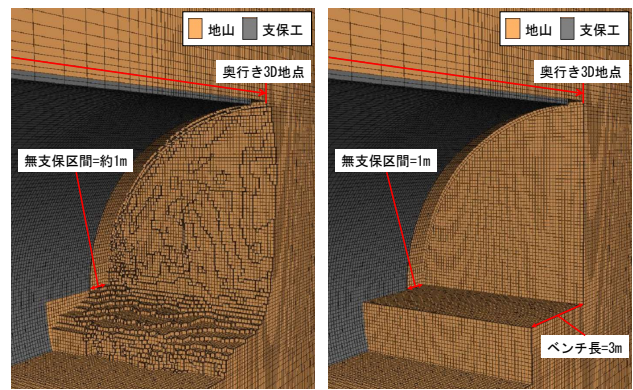
本研究におけるトンネル掘削解析の地山の解析物性値を表-1に示す。ここで、地山の材料構成則は弾完全塑性体（破壊規準：モールクーロンの破壊規準）とし、その解析物性値は対象現場の支保パターン（DI）とその支保パターンの解析物性値事例等^{7) 8)}を参考に設定した。また、本トンネル掘削解析で考慮する支保工の諸元とその解析物性値を表-2に示す。ここで、解析で考慮する支保工は吹付けコンクリートおよび鋼製支保工とし、各支保工の諸元は対象現場の支保パターン（DI）に基づいて定めた。加えて、支保工の材料構成則は線形弾性体とし、その解析物性値は各支保工の物性値を解析物性値事例を参考に定めた後に、各支保工の面積比を考慮して等価な値を設定した⁷⁾。

トンネル掘削解析時における初期応力は、両掘削ケースともに地山強度比が1.5、側圧係数が1.0となるように設定した。また、トンネル掘削解析モデルの境界条件は、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。

そして、上記のように設定した解析条件に基づいて、図-4に示すような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、まず切羽面における鉛直下向き変位のコンター図を図-5に示す。ここで、図-5では切羽面の肌落ちに着目するため、鉛直下向きの変位のみを抽出し示している。図-5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、切



(a) 切羽面の凹凸を考慮したモデル (b) 切羽面の凹凸を考慮していないモデル

図-4 三次元数値解析モデルの掘削ケース

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	-		
	粘着力c	0.50	MPa		
	内部摩擦角φ	38.0	°		
	一軸圧縮強さσ _c	2.05	MPa		cとφから算出
	引張強度	0.205	MPa		σ _c /10

表-2 支保工の諸元とその解析物性値

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	0.20	-	
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	-

羽面における鉛直下向き変位が切羽面上部において増加していることがわかる。また、切羽面における鉛直下向き変位の最大値については、2.3倍程度の差があることがわかる。この結果から、切羽面に凹凸が存在する場合、特に切羽面上部における鉛直下向きの変位が増加する傾向にあると考えられる。

続いて、切羽面における塑性領域図を図-6、図-7に示

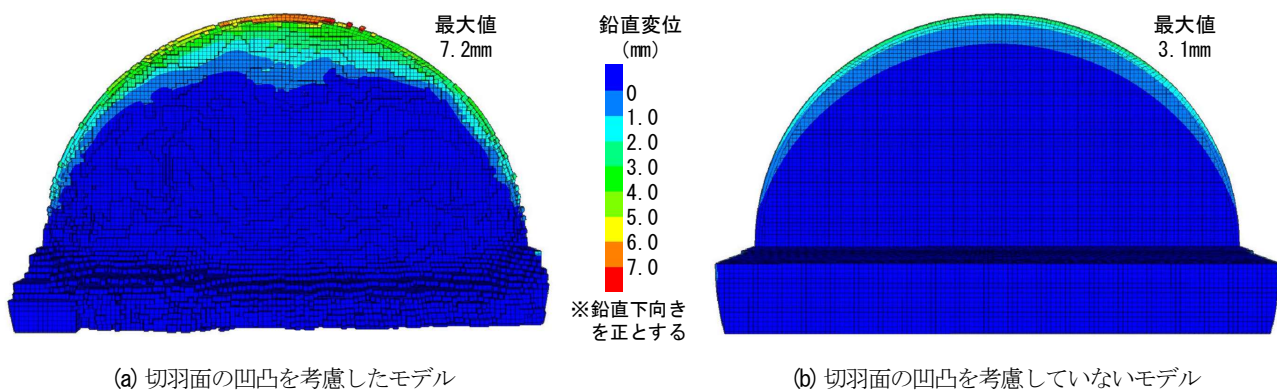


図-5 切羽面における鉛直下向き変位のコンター図

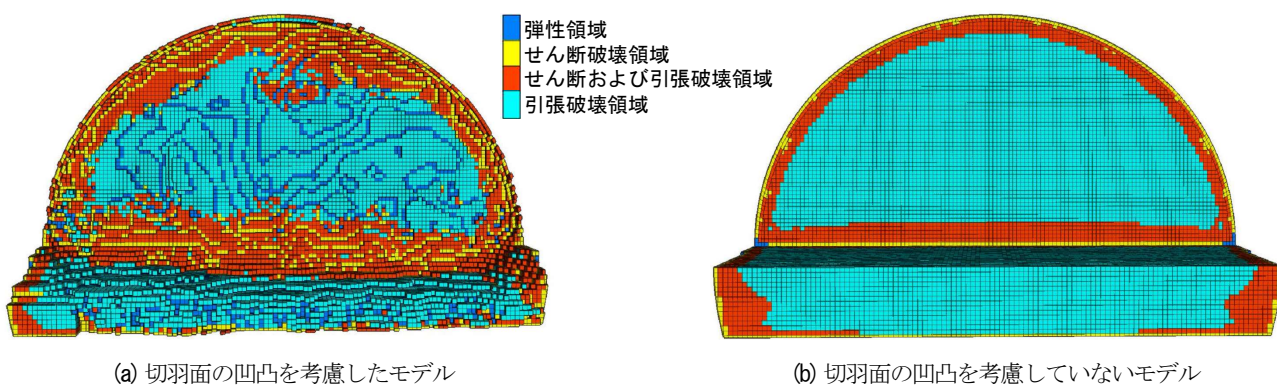


図-6 切羽面における塑性領域図（正面図）

す。ここで、図-7は、トンネル中心位置を側面から見た場合の切羽面における塑性領域図を示している。図-6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、切羽面におけるせん断破壊領域とせん断および引張破壊領域が共に拡大していることがわかる。これは、切羽面に凹凸が存在することにより、切羽面の押出しが切羽面の端部から中心部に向かって一様に増加するような変形とならず、切羽面の最小主応力が引張応力側に減少してしまうためである。そして、特に切羽面を側面から見た塑性領域図（図-7参照）に着目すると、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せん断破壊領域がトンネル掘削方向と鉛直下向き方向に進展していることがわかる。したがって、切羽面上部にオーバーハング部が存在する場合、特に切羽面上部のオーバーハング部において肌落ちリスクが高まると考えられる。また、この切羽面上部のオーバーハング部における塑性領域の進展が切羽面上部における鉛直下向きの変位を増加させた原因と考えられる。

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

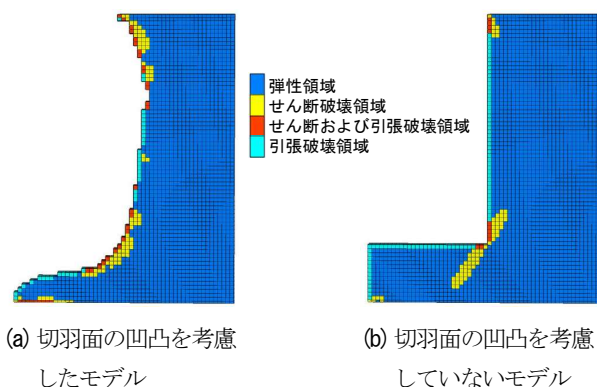


図-7 切羽面における塑性領域図（側面図）

ル法を用いて、切羽面の凹凸を考慮した三次元数値解析モデルを作成した。そして、作成したモデルを用いて基礎的なトンネル掘削解析を行い、切羽面の凹凸により肌落ちリスクが高まるかについて検討した。以下に、本研究により得られた知見を示す。

1. 切羽面上部にオーバーハング部が存在する場合、特に切羽面上部において鉛直下向きの変位が増加する傾向にあることがわかった。
2. 切羽面上部にオーバーハング部が存在する場合、特に切羽面上部のオーバーハング部においてせん断破壊領域がトンネル掘削方向と鉛直下向き方向に進展することがわかった。

3. 以上の結果から、切羽面上部にオーバーハング部が存在する場合、特に切羽面上部のオーバーハング部において肌落ちリスクが高まると考えられた。今後は、対象現場を増やして切羽面の凹凸を考慮したトンネル掘削解析を行うことにより、トンネル切羽における肌落ちが生じやすい箇所を、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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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, 丸善, pp.152-153,163-164, 2006.
- 8) 岡崎泰幸, 青柳和平, 熊坂博夫, 進士正人：トンネル掘削時のトンネル支保工応力に地山の不均質性が与える影響, 土木学会論文集 F1 特集号, Vol.72, No.3, pp.I_1-I_15, 2016.

GENERATION AND ANALYSIS OF 3D NUMERICAL MODEL CONSIDERING UNEVENNESS OF TUNNEL FACE

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

In the mountain tunneling method, ground is always exposed on tunnel face after excavation so fall of rocks may occur. Since contractors often approaches the tunnel face for work, the current situation is that occupational accidents frequently occur due to this phenomenon. In order to reduce the disaster risk to such contractors, it is necessary to quantitatively evaluate the areas where fall of rocks is likely to occur.

In this study, in order to clarify conditions of the areas where fall of rocks is likely to occur on tunnel face, as the first step, 3D numerical model considering unevenness of tunnel face was generated by the voxel method from photogrammetric results of a tunnel face. Then, basic tunnel excavation analyses were carried out using the generated model to investigate the increased risk of fall of rocks due to unevenness of tunnel face. As a result, it was clear that when there was overhang on the upper part of tunnel face, the risk of fall of rocks increased especially in the overhang on the upper part of tunnel face.