

# 三次元数値解析を用いた小土被り地山での 事前予測解析の妥当性に関する一考察

西内 瑞生<sup>1</sup>・林 久資<sup>2</sup>・進士 正人<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒775-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)  
E-mail: b037ve@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 (〒775-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)  
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒775-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)  
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

トンネル掘削では、切羽の安定性確保は重要であり、切羽安定性の事前予測や切羽安定対策の選定には連続体解析を用いた数値解析を行うことがしばしばある。しかしながら、切羽崩壊形態や変形傾向によっては連続体解析を用いた数値解析で切羽の安定性を予測することが妥当か否かが不明確である。そこで本研究では、有限差分法三次元数値解析手法を用いて切羽崩壊形態や変形傾向を再現することができるか考察を行った。その結果、本研究の解析モデルでは切羽周辺地山の押し出し現象を再現出来る一方で、切羽前上方地山が地山の自重によって抜落ちるような現象の再現は再現することができなかった。

**Key Words:** tunnel face stability, subsidence, 3D-numerical analysis, FLAC3D

## 1. 研究目的

トンネル掘削では、切羽の安定が保てず切羽が崩壊するケースが稀に生じ、実際に施工中に切羽が崩壊した例も報告されている。例えば、北海道横断自動車道徳別トンネル東工事<sup>1</sup>では、土被り 192m で地山強度比が 0.5 である脆弱地山を注入式フォアポーリングで施工したが切羽が崩壊した。中部横断自動車道八之尻トンネル工事<sup>2</sup>では、土被り 17m で地山強度が 0.3 以下である地滑り崩積土において長尺先受け工注入開始時に切羽が凸の曲面状に崩壊した事例が報告されている。

未固結地山などにトンネルが掘削される場合、図-1 に示すように切羽前上方から地山が抜落ちる挙動が生じることがある。小土被りの場合、その挙動は地表面にまで影響する大変形・崩壊につながることもある。このような大変形・崩壊メカニズムとしては、切羽前方地山がトンネルの掘削により連続性・一体性を失い、地山自身の重力の影響により掘削されたトンネル側に崩れると同時に、さらに先の地山が緩むことで大変形や大崩壊を起こすものと考えられる。

一方で、図-2 に示すような切羽前上方の地山が自重によって崩壊するのではなく、切羽面が掘削進行方向と

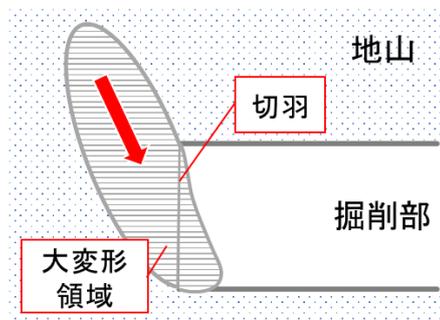


図-1 切羽前上方からの大変形・崩壊イメージ図

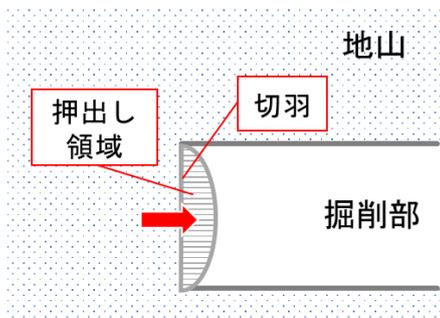


図-2 切羽押し出し挙動のイメージ図

は逆方向に押出される現象も生じることがある。このような押出されるような挙動は、地山強度が図-1 よりも高いが土被りが十分に大きく初期地圧が高い場合や、スメタイトなどの膨潤性の鉱物を含む地山で生じることが多いと考えられる。

上述したような切羽崩壊の可能性が示唆される地山にトンネルが掘削される場合は、三次元数値解析を用いた事前予測解析を行うことが重要であり、一般に有限要素法や有限差分法などのトンネルが掘削される地山を連続体として模擬した解析を行うケースが多い。数値解析では、土被りや地山強度などの入力パラメータが変化することで図-1 に示すような切羽前上方の地山がトンネル内側に流出するような形態や、図-2 に示すような切羽の押出し現象を再現出来ると考えられている。

数値解析を用いて切羽の安定性について言及されている過去の研究事例を調査したところ、林ら<sup>3)</sup>は、長尺鏡ボルトなどの補助部材を多用せず切羽の安定性を向上させる、核残し工法を併用した施工を三次元数値解析によって模擬し、核残し工法を併用することで長尺鏡ボルトの本数を少なくできることを提言した。森本ら<sup>4)</sup>は、軟弱地山にトンネルを施工することを想定し、粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ をパラメータとした三次元数値解析を行いトンネル切羽近傍の変形挙動の傾向について検討し、物性値ごとの切羽挙動を示した。

しかしながら、これまでの研究成果では、連続体的手法を用いた数値解析による切羽挙動や地表面沈下の事前予測精度について言及されたものはみられない。特に、切羽面は掘削に伴い移動するため長期間にわたる計測が難しく、切羽掘削から崩壊までの計測を行った文献はほとんどみられない。

現在における山岳トンネル掘削は、特に新幹線トンネルに見られるような長大トンネルにおいて、トンネル線形の設定によっては長距離にわたって小土被り区間が続くことも考えられ、図-1 に示すような地表面崩壊が起こるリスクも高い。

本研究では、図-1 や図-2 のような地山挙動を数値解析で予測することが可能か否かを検討する。検討にはトンネル掘削予測解析で多くの実績が見られる三次元数値解析コードのFLAC3Dを用いた。

## 2. 大変形・大崩壊を模擬するための解析条件の設定

図-1 や図-2 に示したような大変形地山挙動を数値解析で模擬するために、以下のように解析条件の設定を行った。

まず、土被りの設定であるが30m以上確保できる場合

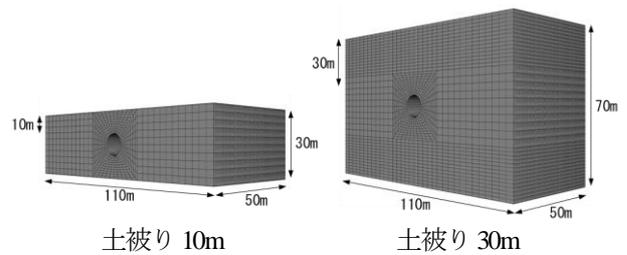


図-3 解析モデル図

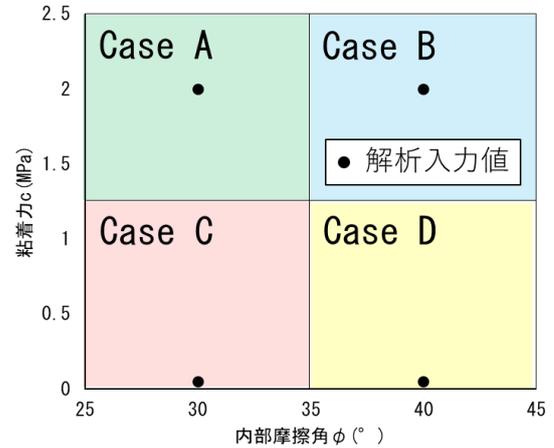


図-4 入力物性値の設定

表-1 解析入力物性値

		単位体積重量	弾性係数	ポアソン比	粘着力	内部摩擦角
		$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$E(\text{MPa})$	$\nu$	$c(\text{MPa})$	$\phi(^{\circ})$
地山	Case A	20	50	0.3	2	30
	Case B	20	50	0.3	2	40
	Case C	20	50	0.3	0.05	30
	Case D	20	50	0.3	0.05	40
吹付けコンクリート		20	4000	0.2		

には地表面沈下が問題となる事例がほとんどないことや、土被りが5m程度しか確保できないトンネルの場合は施工精度がすぐに地表面沈下量に影響し、バラツキが大きくなることが指摘されていること<sup>5)</sup>から、本研究では土被り30mと10mのケースを設定した。どちらのモデルにおいても直径10mの円形トンネルをモデル中央部に掘削した。図-3には土被り10mと土被り30mの解析モデル図を示す。拘束条件は、後に特筆しないものに関してはモデル側面および底面を固定し上面は解放したが、地表面を固定したケースでは深度方向の変形を固定した。

次に、モデルで使用する地山入力物性値は、一般に軟弱地山とされる地山等級DII以下の地山強度を想定した。森本ら<sup>4)</sup>の研究から、図-1 や図-2 に示すような地山挙動の違いは、地山の粘着力や内部摩擦角に依存しているものと想定し、粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ の大きさを考慮し、図-4 に示すようなCase A, Case B, Case C, Case Dの地山物性領域を設定し、それぞれの領域内の代表値を表-1のように設定した。

トンネル掘削に関しては、25m 地点までを一括で掘削した。吹付けコンクリートは、厚さ  $t=20\text{cm}$  とし構成要素はシェル要素で、設計基準強度  $18\text{kN/m}^2$  のものを想定し設定した (表-1)。

### 3. 数値解析結果および考察

#### (1) 特に土被りが小さいケース (土被り 10m)

土被りが極端に小さい地山にトンネルが掘削される場合、掘削における応力解放に伴って切羽周辺の地山の連続性・一体性を失い、地山自身の重力の影響で切羽前上方の地山が崩壊することが懸念される。

そこで、まずここでは本研究における解析ケースの中で土被りが最も小さい 10m での解析結果を示す。地山入力物性値を Case A~Case D に変化させた場合の、切羽前方地山の鉛直下向きの変位コンター図を図-5 に、切羽面の C.L.上の位置と節点のトンネル奥行き方向のみの変位の関係を示したグラフを図-6 に示す。図-5 から明らかなように、Case A および Case B より Case C と Case D は、切羽前上方から地表面まで変位が顕著に生じていることがわかる。最も切羽前上方の変位が大きい Case C では切羽前上方に約 6mm の変位が生じているのに対し、地表面の最大変位は約 3mm と、切羽前上方の約 1/2 の変位が地表面に生じていることが分かる。また、図-6 においては Case C と Case D は、Case A と Case B と比較すると切羽の最大変位が大きいこと、切羽の下方領域の押し出し変位が卓越する変位傾向であることが確認できた。これらより、解析結果のうち Case C と Case D の粘着力が比較的低いケースは図-1 のような切羽前上方からトンネル掘削部への変位が見られることが分かる。ちなみに、Case A と Case B の切羽押し出し変位結果 (図-6) に着目すると、S.L.より下部領域は上部領域よりも切羽変位量がわずかに大きい結果が得られたが、これはそれぞれの位置の初期応力の違いによる影響と考えている。本項では、土被りが極端に小さい場合かつ地山の粘着力が比較的小さい場合には、トンネルを掘削することで切羽前上方の地山が大きくトンネル内側へ変形すること、切羽前上方の変位が地表面まで続き地表面の沈下が大きく生じることがわかった。しかしながら、本解析結果だけでは実地山で得られるような切羽前方地山が地山自身の重力の影響により大崩壊を起こす現象を再現出来たか否かは不明確である。

#### (2) 土被りが小さいケース (土被り 30m)

本項では前項より土被りを大きく設定し、切羽前上方地山が自身の重力の影響により大崩壊を起こしているかを解明する。ここでは、土被りが小さい 30m で地山入力

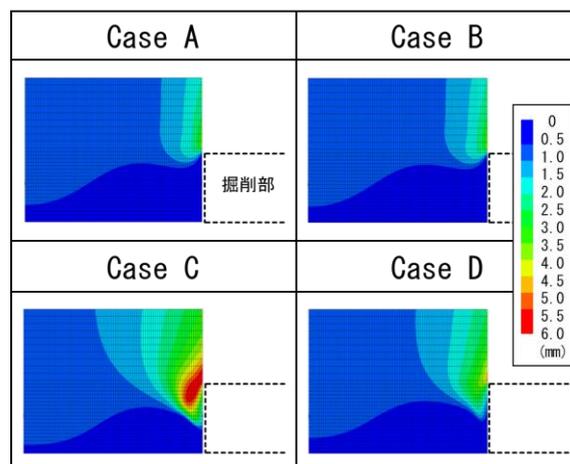


図-5 土被り 10m での切羽前方変位コンター

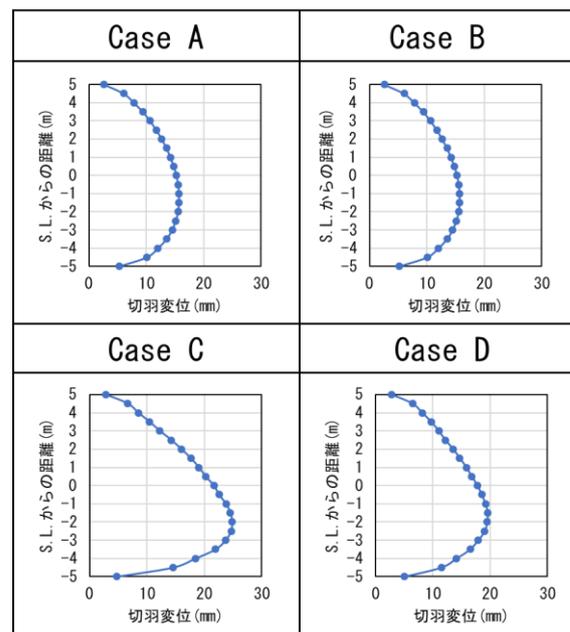


図-6 土被り 10m での切羽変位

定数を Case A~D に変化させた場合の解析結果を示す。

切羽前方地山の鉛直下向きの変位コンター図 (図-7) に着目すると Case A・Case B と Case C・Case D の変位傾向の違いは、土被り 10m の場合と同様に比較的低粘着力が低い Case C、Case D は切羽前上方や地表面の変位が顕著であることがわかる。しかしながら、最も切羽前上方の変位が大きい Case C の結果に着目すると、切羽前上方の変位が約 40mm なのに対して、地表面の最大変位が約 5.8mm となり、地表面沈下量は切羽前上方変位の 1/7 程度となることが分かり、土被り 10m の場合と異なる結果となった。

土被り 10m と 30m の場合の切羽前上方地山の変位と地表面沈下の割合の傾向が異なった理由としては、土被り 30m の場合、切羽前上方の土砂や岩塊が重力の影響により掘削されたトンネルに崩れる傾向が再現できた可能性がある一方で、土被りが 10m から 30m と大きくなることでトンネルが掘削される箇所の初期地圧が大きくなり、

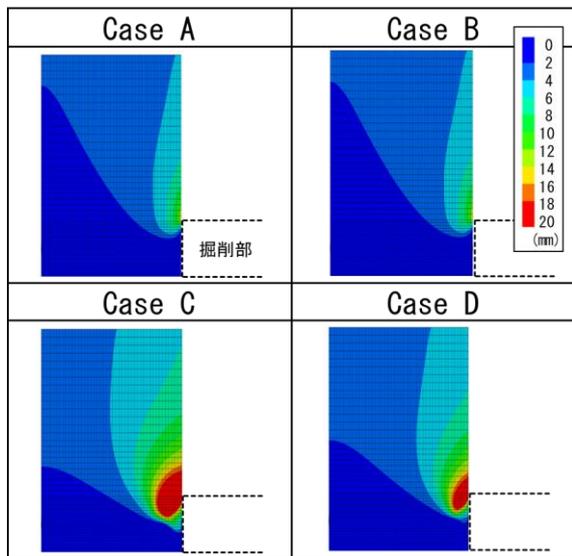


図-7 土被り 30mでの切羽前方鉛直変位コンター

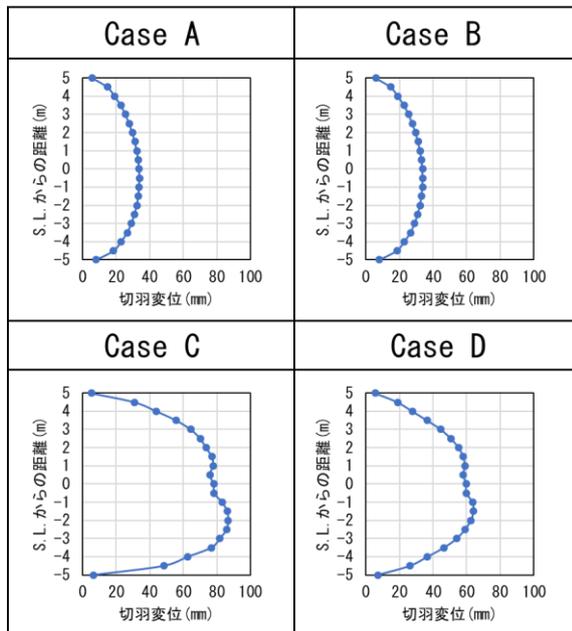


図-8 土被り 30mでの切羽変位

トンネルが掘削されることによる応力解放力の影響が大きく現れた結果、切羽前上方の変位が地表面沈下より卓越する結果となったと考える。

さらに、図-8の切羽面のCL上の位置と節点変位の関係を示したグラフに着目する。図-6に示すように土被りが10mの場合の変状形態と比較すると、Case CとCase Dでは図-2のような切羽押し出し型の変状形態に近いことがわかる。したがって、土被り10mと30mの場合の切羽前上方地山の変位と地表面沈下の割合の傾向が異なった理由のうち、切羽前上方地山が重力の影響により変形する挙動はみられず、地山の押し出しに起因するものだと考えた。

### (3) 地表面を固定したケース

これまでの解析結果より、土被りが10m、30mどちら

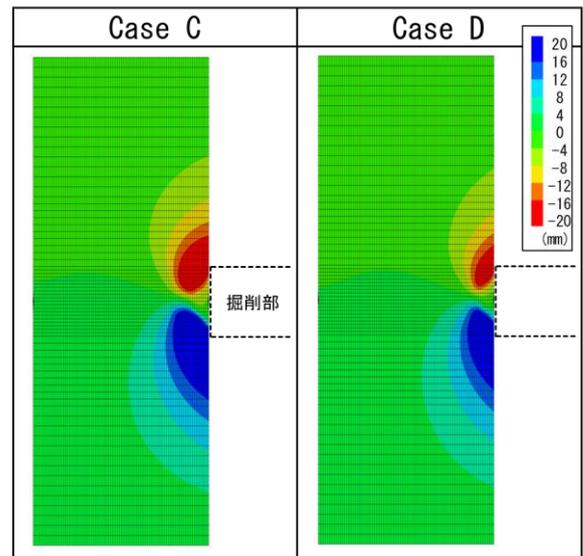


図-9 地表面を固定した時の切羽前方鉛直変位コンター

の場合も、トンネル掘削によって切羽前上方地山が地山自重に起因して落下するか否かは不明確であった。そこで、本項の解析ケースは地表面を強制的に拘束し、地表面沈下を生じさせない解析モデルを作成する。地表面沈下を生じさせないモデルを解析することで、切羽前上方の地山が重力の影響により変形する挙動に着目することが出来ると考える。

解析を行ったモデルは、土被りを30mとし、自重解析により地山に初期応力を生じさせた後、地表面の鉛直方向変位を拘束する。ここでは、一例として図-9に前項までに変位が顕著に生じていた粘着力が比較的低いCase C、Case Dでの解析結果を示す。トンネル掘削後の切羽前上方地山の鉛直方向変位をコンター図にしたもので、上向きの変位を正、下向きを負としている。

図-9に着目すると、切羽前上方に最大約20mmの変位が生じている一方で、地表面変位を拘束しているため地表面付近にまで切羽前上方の変位の影響は生じていない。また、切羽前下方の変位に着目すると、切羽前上方と同様の変位傾向が生じていることがわかる。つまりS.L.を中心として上下対称の結果となった。

これらより、本解析では実地山で生じることのある図-1のような切羽前上方地山が地山自身の重力の影響により大崩壊を起こす現象を再現出来ていないことが示唆された。

## 4. まとめ

本研究では、未固結小土被り地山などにトンネルが掘削される場合の切羽大変形・崩壊現象や地表面沈下に着目し、それらの地山挙動を数値解析で予測することが可能か否かを有限差分法連続体数値解析を用いたトンネル

掘削解析により検討した。その結果、以下のことがわかった。

1. 地山に生じる変位量が最も大きくなる Case A では、土被りが特に小さい土被り 10m の場合、切羽前上方の約 1/2 の変位が地表面に生じている一方で、土被りが 20m では地表面沈下量は切羽前上方の変位の 1/7 程度となることが分かった。
2. 本研究における解析ケースでは、トンネルの掘削に伴い生じる切羽前上方の大変形が地表面にまで続く挙動や、地山の初期地圧がトンネル掘削により解放されることで、切羽面からトンネル掘削部に押出されるような挙動が再現出来た一方で、切羽前上方地山が地山自身の自重によって崩壊する現象は再現できない可能性が高い。

#### 参考文献

- 1) 高橋俊長, 向井隆, 井上孝俊, 垣見康介: 高耐力支保による早期閉合で押出し性地山に挑む, トンネルと地下, 第 41 巻, 第 1 号, pp.15-25, 2010.
- 2) 佐藤淳, 細野泰生, 真下義章, 木村厚之: 曲面切羽で低強度地山の全断面掘削に挑戦, トンネルと地下, 第 43 巻, 第 7 号, pp.13-22, 2012.
- 3) 林久資, 青木一男, 吉岡尚也: 核残しを併用したときの押出し性地山におけるトンネル周辺挙動, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号 vol.66, No.1, pp.17-27, 2010.
- 4) 森本真吾, 進士正人, 中川浩二: 地山特性の違いによるトンネル切羽挙動の把握, 土木学会第 58 回年次学術講演会, III-037, pp.73-74, 2003.
- 5) 土木学会: トンネルライブラリー24 実務者のための山岳トンネルにおける地表面沈下の予測評価と合理的対策工の選定, pp.7-13, 2012.

(2019. 8. 9 受付)

## EXAMINATION OF TUNNEL EXCAVATION ANALYSIS CONSIDERING THE INFLUENCE OF GROUND WEIGHT

Mizuki NISHIUCHI, Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

In tunnel excavation, it is important to stabilize the face and to control the settlement of the ground. However, when examining the possibility of the collapse of the face, in numerical analysis, there may be a form in which the ground in front of the face flows into the tunnel due to the weight of the ground and the pushing out phenomenon of the face in the forward region. In some numerical analyses showing the latter type, the displacement of the face can be seen symmetrically, and the collapse phenomenon due to the natural weight of the natural ground may not be reproduced. Therefore, in this study, we investigated an analysis method to reproduce the collapsed state of the face close to a real phenomenon using 3D numerical analysis. As a result, it was found that the phenomenon that the face fell due to the weight of the natural ground cannot be reproduced in the area not affected by the ground surface.