

切羽安定性評価のための 切羽押出し量の管理値について

熊谷 幸樹¹・川村 柚稀²・安 素賢³

¹正会員 飛島建設 土木事業本部 土木技術部 (〒108-0075 東京都港区港南1-8-15 Wビル4F)
E-mail: koki_kumagai@tobishima.co.jp

²正会員 飛島建設 九州支店 赤嶺トンネル北作業所 (〒901-0225 沖縄県豊見城市豊橋1-1)
E-mail: yuzuki_kawamura@tobishima.co.jp

³飛島建設 土木事業本部 土木技術部 (〒108-0075 東京都港区港南1-8-15 Wビル4F)
E-mail: sohyun_ahn@tobishima.co.jp

山岳トンネルのNATMにおいて、切羽の安定性を保つことは掘削作業の安全性を確保してトンネル構造物の安定性を確保する上で重要であり、切羽の安定性、特に鏡面の安定性を評価する指標の一つとして切羽押出し量がある。しかしながら、地山条件を考慮して切羽押出し量から切羽の安定性を評価して施工管理に活用する具体的な管理値が示されていないのが実状である。そこで、代表的な地山条件に関して三次元FEM解析を実施し、各地山条件で想定される切羽押出し量を算出し、得られた値から切羽安定性の評価や施工管理に活用できる管理値の設定方法について検討を加えた。検討の結果、土盛り100mから200m程度の二車線道路トンネル断面を想定して、地山等級ごとに切羽押出し量の管理値の目安を示した。

Key Words : mountain tunnel, NATM, tunnel face squeezing, deformation, control standard value

1. はじめに

山岳トンネル工事において、切羽の安定性を保つことは掘削作業の安全性を確保してトンネル構造物の安定化を図る上で重要である。切羽を含むトンネル周辺地山の安定性を評価する指標としては、切羽観察記録簿や坑内変位計測等の計測Aがある。さらに、鏡面の安定性を評価する指標の一つとしてレーザ距離計等で測定可能な切

羽押出し量¹⁾がある(図-1参照)。厚生労働省が切羽作業の安全性の確保の観点から施行した「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」²⁾では、切羽押出し量の計測は切羽監視責任者の目視での監視を補助するものとして位置付けられている。しかしながら、現時点では、地形や地質条件を考慮した切羽押出し量の管理値が示されていないため、切羽押出し量の計測監視が切羽の安定性を評価する指標として施工管理に十分に活用されるには至っていないのが実状である。

そこで、本報告では、代表的な地山条件に関して三次元FEM解析を用いたトンネル掘削解析を実施し、それぞれの地山条件で予測される切羽押出し量を算出し、得られた切羽押出し量から切羽安定性の評価や施工管理に活用できる管理値の設定方法や具体的な管理値について検討を加える。

2. 解析的検討の概要

二車線道路トンネル断面を想定して、三次元FEM解析ソフト「GTS NX」を用いてNATMによるトンネル掘削に伴う地山変形解析を実施した。地山条件としては、土盛りと地山等級をパラメータとして弾性解析を行い、地



図-1 多点同時変位計測システムを用いた
切羽安全監視システムの概要¹⁾

山変形や支保部材応力とともに、上半部の切羽押出し量を算定する。

(1) 解析条件と解析モデル

想定した2車線道路トンネルの断面を図-2に示す。トンネル断面の規模は掘削幅Dで約12mである。土被りは100m, 200mの2ケースを想定した。掘削対象地山は、表-1に示す地山等級B～Eを想定した。各地山等級の地山物性値は、高速道路総合技術研究所のトンネル数値解析マニュアル³および鉄道建設・運輸施設整備支援機構の山岳トンネル設計施工標準・同解説⁴を参考にして設定した。

解析モデルの大きさは、トンネル上方は土被り分、トンネル側壁から左右に5D, 下方に3D, 奥行き100mとした。図-3に三次元解析モデルを示す。

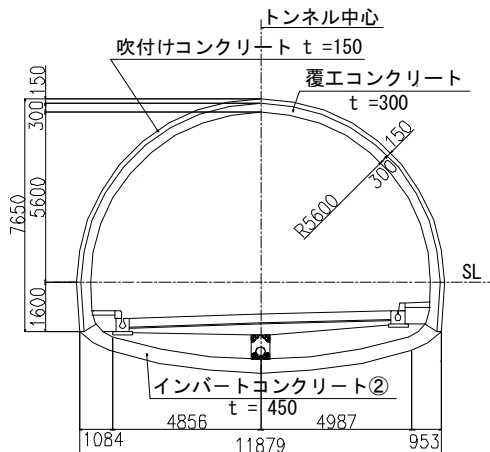


図-2 想定した道路2車線トンネル断面図

表-1 想定した地山等級に対する地山物性値

地山等級	支保パターン	単位体積重量 γt (kN/m ³)	変形係数 D (N/mm ²)	粘着力 C (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)	引張強度 σt (N/mm ²)
B	B	25	5,000	4.0	50	0.8
C I	C I	24	2,000	2.0	45	0.4
C II	C II-b	23	1,000	1.0	40	0.2
D I	D I-b	22	500	0.4	35	0.08
D II	D II	21	150	0.2	30	0.04
E	E	19	50	0.1	25	0.02

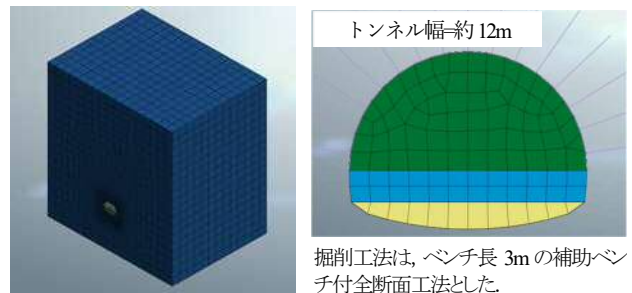
(2) 切羽押出し量の算定方法

三次元FEM解析において、切羽押出し量は図-4に示すとおり、当該断面の掘削および支保が完了するステップの変位量から一つ手前の施工間が完了した時点の変位量を差し引いて算出した。掘削工法はベンチ長3m(施工3間)の補助ベンチ付全断面工法として解析ステップを構成した。

3. 解析結果

(1) 土被り100mでの切羽押出し量

土被りが100m前後の山岳トンネルにおける切羽押出し量を把握するため、土被り100mの解析条件でトンネル掘削解析を行い、各ケースの切羽押出し量を算定した。表-2の左側に、土被り100mでの上半部4点(天端付近、鏡



解析モデル寸法：縦 150～250m×横 130m×奥行き 100m

図-3 三次元 FEM 解析モデル

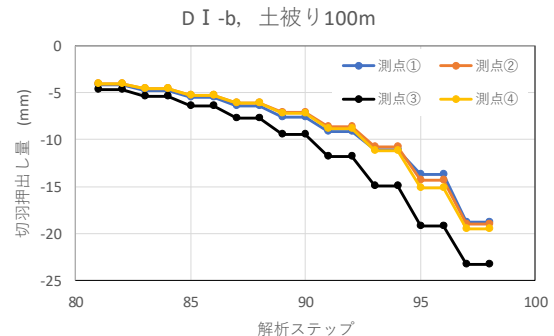
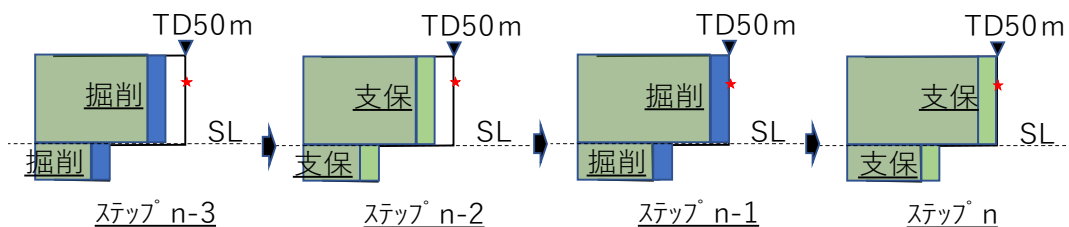


図-5 切羽押出し量の解析結果の例

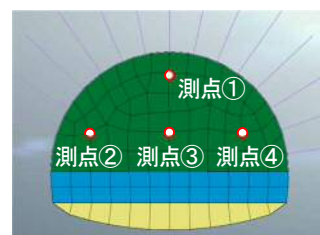


- ・切羽押出し量の定義＝ステップ n からステップ n-2の切羽軸方向の変位量上半部のトンネル軸方向変位量を抽出した。
- ・上半切羽で抽出した地点は4箇所とする。

図-4 三次元 FEM 解析における切羽押出し量の算定方法

表-2 切羽三次元 FEM 解析モデル

支保 パターン	土被り100m				土被り200m			
	鏡面の位置				鏡面の位置			
	①	②	③	④	①	②	③	④
B	0.6	0.5	0.5	0.5	1.1	1.0	0.9	1.0
C I	1.4	1.3	1.1	1.2	2.7	2.5	2.3	2.4
C II-b	2.6	2.4	2.2	2.3	5.2	4.7	4.3	4.5
D I-b	5.1	4.6	4.1	4.4	10.0	9.1	8.0	8.6
D II	15.8	14.6	12.4	13.6	30.9	28.5	25.3	26.8
E	40.9	38.9	34.5	36.7	81.3	76.2	67.7	71.9

切羽押出し量 着目点
測点①～④表-3 地山等級 CI から DII 地山の切羽押出しの管理値
(掘削開始から支保完了まで)

地山 等級	土被り100m			土被り200m		
	良好	←中間→	不良	良好	←中間→	不良
	管理値 I	管理値 II	管理値 III	管理値 I	管理値 II	管理値 III
B	—	0.6	1.4	—	1.1	2.7
C I	0.6	1.4	2.6	1.1	2.7	5.2
C II	1.4	2.6	5.1	2.7	5.2	10
D I	2.6	5.1	15.8	5.2	10	30.9
D II	5.1	15.8	40.9	10	30.9	81.3
E	15.8	40.9	—	30.9	81.3	—

表-4 地山等級 CI から DII 地山の切羽押出しの管理値
(作業サイクルで監視時間を考慮した場合：50%)

地山 等級	土被り100m			土被り200m		
	良好	←中間→	不良	良好	←中間→	不良
	管理値 I	管理値 II	管理値 III	管理値 I	管理値 II	管理値 III
B	—	0.5	1.0	—	1.0	1.5
C I	0.5	1.0	1.5	1.0	1.5	3.0
C II	1.0	1.5	3.0	1.5	3.0	5.0
D I	1.5	3.0	8.0	3.0	5.0	16.0
D II	3.0	8.0	21.0	5.0	16.0	41.0
E	8.0	21.0	—	16.0	41.0	—

面左右および中央付近の計4点)の切羽押出し量を示す。
また、図-5には、土被り100mで、地山等級 D I の場合の切羽押出し量の推移を示す。

図-5より、今回の解析は弾性解析であることから、トンネル掘削に伴う地山変形は地山掘削時に発生していることが分かる。切羽押出し量の絶対値は切羽中央付近の測点③で最大となった。施工時に計測監視できる掘削直後から支保完了までの切羽押出し量としては、測点①が他の測点よりもわずかに大きな値を示した。

次に、表-2左側に示すように、均一な弾性体の地山を想定した場合、土被り100mでは、掘削開始から支保完了までの総切羽押出し量は、B地山で0.5mm、C I 地山で1.5mm、C II 地山で3mm、D I 地山で5mm、D II 地山で15mm、E地山で約40mmであることが分かる。

(2) 土被り200mでの切羽押出し量

同様に、土被りが200m前後の山岳トンネルにおける切羽押出し量の算定結果を表-2の右側に示す。

今回の解析的検討では、地山は弾性体としていることから、各ケースの切羽押出し量は、土被り100mの場合の約2倍となった。よって、地山が弾性体と想定される場合、施工対象となるトンネルの土被りに応じて、表-2に示す値から総切羽押出し量を算定することができる。

4. 切羽押出し量の管理値について

今回の解析的検討で算定した切羽押出し量は、図-3で

言えばTD50mの施工間の作業サイクルにおける掘削開始から支保工施工完了までに発生する変位量である。当該地山が完全弾性体とすれば、この地山変位は掘削完了と同時に100%発生し、支保工施工時には切羽押出しはほとんど発生しない。図-5に示した解析結果も左記のとおり支保工施工時にはほとんど変動していない。しかしながら、実施工では掘削後ずり搬出には時間を要するし、機械掘削の場合なら瞬時には掘削作業は完了しない。そこで、施工者がトンネル掘削時に計測監視できる切羽押出し量は、監視時間の当該施工間の作業サイクル時間に対する比率に依存するものと仮定した。すなわち、当該施工サイクル時間が300分程度とし、計測監視時間が150分すると、計測監視可能な切羽押出し量は算出した押出し量の50%になると仮定した。

次に、切羽押出し量の管理値については、坑内変位に対する計測管理⁹⁾と同様に、管理値 I：注意、管理値 II：要注意、管理値 III：嚴重注意の3つの管理値を設定することを考えた。その際、トンネル切羽の安定性は地山等級の良し悪しに依存すると考え、以下のように管理値を設定した。

管理値 I：1ランク良好な地山等級の場合の押出し量

管理値 II：当該地山の地山等級の場合の押出し量

管理値 III：1ランク不良な地山等級の場合の押出し量

表-3には、トンネル施工時に計測可能しうる切羽押出し量に対する管理値を地山等級ごとに示す。例えば、C II-bの管理値 I は C I の測点①の押出し量、管理値 II は C II-bのそれ、管理値 III は D I -bのその値とした。

表-4には、当該施工間の掘削開始から掘削完了、支保

工施工完了のうち、切羽押出し量を支保工設置期間中に計測するものとし、総押出し量の50%が計測監視できるものとした際の管理値を示す。

例えば、レーザ距離計により鋼製支保工建込み時の切羽押出し量を計測監視をする場合には、監視時間は20分程度なることから、表-4に示した値をさらに小さくして管理値とする必要があると考えられる。しかしながら、計測機器の測定精度(読み取り性能：0.1mm、測定精度：1.0mm未満)を考慮すると、実用的には表-4に示す値が切羽押出し量の管理値の目安になると考えている。

なお、本検討では、今回の解析的検討では弾性体地山を想定したこと、切羽押出し量は掘削開始後から支保工施工完了まで経過時間に比例して発生するとしたことなど、いくつかの仮定条件の下で切羽押出し量の管理値を設定した。そのため、今後は様々は地山条件で切羽押出し量と地山安定性の結果を収集蓄積して、本管理方法の工学的な実用性を確認し検証していく必要がある。

5. おわりに

本検討では、山岳トンネルの切羽安定性の評価指標の一つである切羽押出し量の計測管理を実施するため、三次元FEM解析を実施し、様々な地山条件に対する管理値の設定方法を示すとともに、具体的な管理値案を示した。ここに示した管理値は、トンネル施工当初に設定する管理値としては目安として活用できるものとする。

しかしながら、山岳トンネルで遭遇する地山条件は複雑で多種多様であり、しかも地山挙動は亀裂や層理などの不連続面に依存した非線形性を示すものである。今後に残された課題として、

- ・地山特性の非線形性を考慮した解析的検討の実施
- ・切羽押出し量の実測値に基づく管理値の見直し
- ・切羽・鏡面の安定性を評価できる新たな指標の創出と管理方法の提示

などがあり、山岳トンネルの実施工の中で検討を進めて行き、施工の安全性向上とトンネル支保工の安定性向上に資することに努めたいと考えている。

参考文献

- 1) 寺島佳宏，小川勲，熊谷幸樹，松田浩朗，樽岡民幸：多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と不良地山における試験適用，土木学会トンネル工学報告集，Vol.20，pp.219-223，2010.
- 2) 厚生労働省労働基準局：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(平成30年1月18日改訂)，pp.1-10，2018.
- 3) 高速道路総合技術研究所：トンネル数値解析マニュアル(2017年度版)，p.2-13，2017.
- 4) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp.308-310，2008.
- 5) 例えば，日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，平成21年度改訂版，pp.123-129，2009.

(2020.8.7 受付)

CONTROL STANDARD VALUES FOR SQUEEZING DEFORMATION AT TUNNEL FACE TO EVALUATE THE STABILITY OF THE FACE

Koki KUMAMAI, Yuzuki KAWAMURA and Sohyun AHN

In NATM for mountain tunnels, maintaining the stability of the face is important for ensuring the safety of excavation work and the stability of the tunnel structure. The stability of the face, especially the mirror surface, is evaluated one of the indexes to do is the amount of face extrusion. However, it is the actual situation that the concrete control value to evaluate the stability of the face from the amount of face extrusion and to utilize it for construction management is not shown considering the natural condition. Therefore, we performed three-dimensional FEM analysis on typical rock conditions, calculated the amount of face extrusion expected under each mountain condition, and calculated the control values that could be used for face stability evaluation and construction management. We examined the setting method. As a result of the examination, a guideline for the control value of the face extrusion amount was shown for each rock grade, assuming a two-lane road tunnel section with a soil cover of 100 to 200 m.