



Te 崖錘堆積物   
AI 現河床・氾濫原堆積物   
Ni・To [v] ニセコアン・洞爺カルデラ層（火山噴出物）  
Ni・To [s] ニセコアン・洞爺カルデラ層（砂質土）   
Ni・To [c] ニセコアン・洞爺カルデラ層（粘性土）  
Ni・To [sg] ニセコアン・洞爺カルデラ層（砂礫）   
Ta 真狩別太火山岩類   
 転石

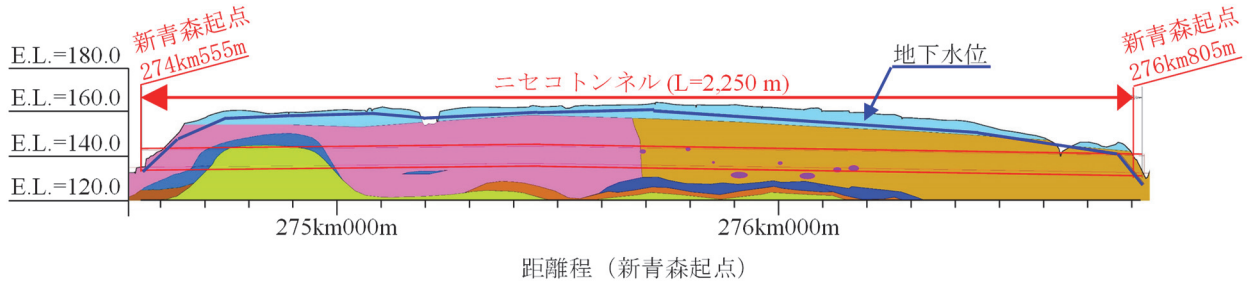


図2 ニセコトンネル地質縦断面

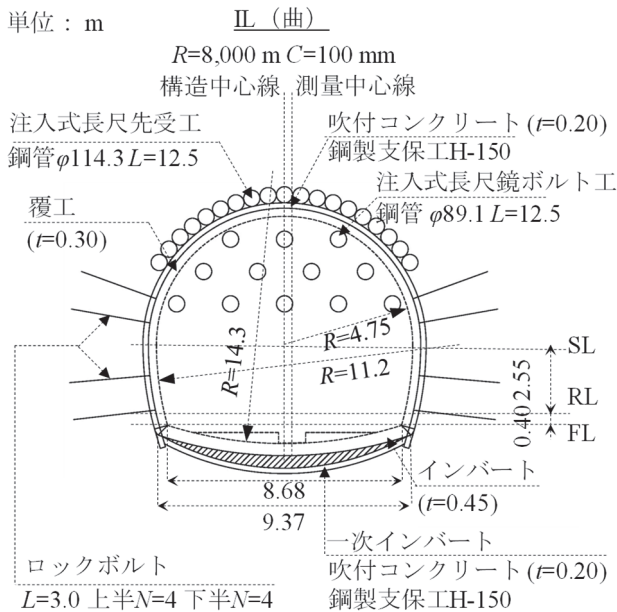


図3 支保工及び掘削補助工法（代表パターン）

ト工法の機械掘削にて行った。

以上のような施工条件から施工時には掘削補助工法として、主に地表面沈下対策を目的として一次インバートと注入式長尺先受工（以下、AGF工と呼ぶ）を、主に切羽崩壊防止を目的として注入式長尺鏡ボルト工を併用した。図3に代表的な支保パターン及び掘削補助工法の適用例を示す。掘削補助工法の採用に当たっては安全性を最優先としつつ、施工性・経済性の観点に加えて内空変位や地表面沈下の計測結果から、地山に過度なゆるみが発生しない適切な補助工法<sup>1)</sup>が求められてきた。そこで、本工事ではこれまでAGF工施工時に得られる削孔エネルギー<sup>2)</sup>や変位量に基づく補助工法の選定<sup>3)</sup>等の施工管理手法を提案してきた。ニセコトンネルは2022年4月に無事貫通を迎えることができたため、提案した施工管理手法による施工記録を取りまとめ、報告する。

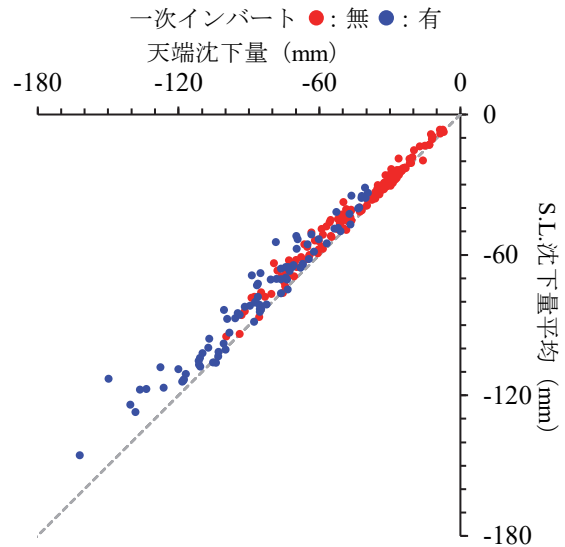


図4 天端沈下量とSL沈下量収束値の関係

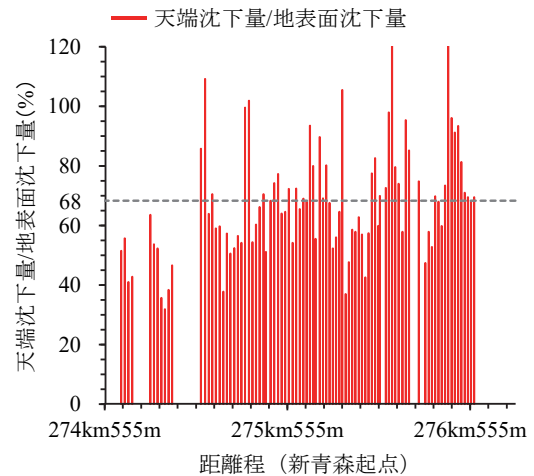


図5 地表面沈下量と天端沈下量の比較

## 2. 地山挙動を考慮した施工管理手法の適用結果

### (1) 施工管理手法の適用性の確認

ニセコトンネルでは切羽状況の観察に加え、内空及び天端沈下計測を約10m毎に、地表面沈下計測を約20m

毎に実施してきた（地表面沈下計測は、トンネル上部の土地利用の制約等がある箇所を除く）。既往の報告<sup>2,3)</sup>では、天端沈下とトンネルスプリングライン（以下、S.L.と記載する）位置の沈下傾向がおおよそ一致する、トンネル断面の「共下がり」現象や天端沈下量と地表面沈下量に一定の相関があることが示されてきた。掘削中の施工管理では、沈下計測が上述と同様の傾向であることを確認し、本施工管理手法を全線で適用できる判断とした。

図-4 に掘削完了時点における天端沈下量と S.L.沈下量（左右平均値）の収束値を示す。ただし、保護盛土区間である新青森起点 274km555m～274km629m 及び 276km615m～276km805m のデータは除き、標高（E.L.）が高くなる方向への変位（鉛直上向きの変位）を正とし、以降も同様に論ずる。図示のとおり、ニセコトンネルでは従来確認されていた「共下がり」現象が沈下量の大小に係らず掘削完了時まで継続していた。

図-5 に地表面沈下量に対する天端沈下量の割合を示す。地表面沈下量に対する天端沈下量の割合は全線を平均して 68%と既往の報告<sup>3)</sup>の 65%と同様であった。

以上のことから、ニセコトンネルでは全線で既往の報告と同様の地質状況が続いていると判断し、トンネル掘削による地表面沈下の増大、すなわち地山への影響が小さくないことから、提案してきた施工管理手法を継続することが妥当であると判断した。

## (2) 沈下計測結果を利用した施工管理の適用結果

本工事では(1)に述べた地山変位の特性から、早期に経済的かつ地山に過度なゆるみが発生しない適切な補助工法を選定するために掘削初期の天端沈下量の変位速度（以下、初期勾配と呼ぶ）に着目した施工管理手法を提案した<sup>3)</sup>。初期勾配の概念を図-6 に示す。初期勾配とは、上半掘削をした地点（Aとする）から上半を 10m掘削した時点（A+10m掘削した時点）での掘削 1mあたりの天端沈下量（A を掘削した時点から A+10 m を掘削した時点までの A の沈下量増分/10 m）を mm で表した値とする。

図-7 に既往の報告<sup>3)</sup>における初期勾配と天端沈下量収束値の関係を示す。一次インバートを設置しなかった区間では天端沈下量収束値は初期勾配の約 16 倍になるといふ線形の相関がみられた。一方で初期勾配が大きくなり、-3 mm/m を超えると天端沈下量収束値との相関性から外れることが述べられている。上述に加え実施の上げ越し等を考慮し、本工事では初期勾配 4 mm/m を一次インバート設置の目安とした。

図-8 にトンネル全線における初期勾配と天端沈下量収束値の関係を示す。また、図-9 に一次インバート設置区間における初期勾配と天端沈下量収束値の関係を抜粋し

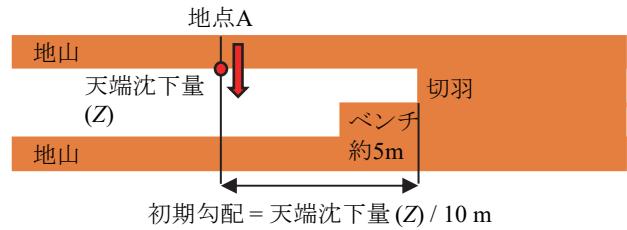


図-6 初期勾配概念図

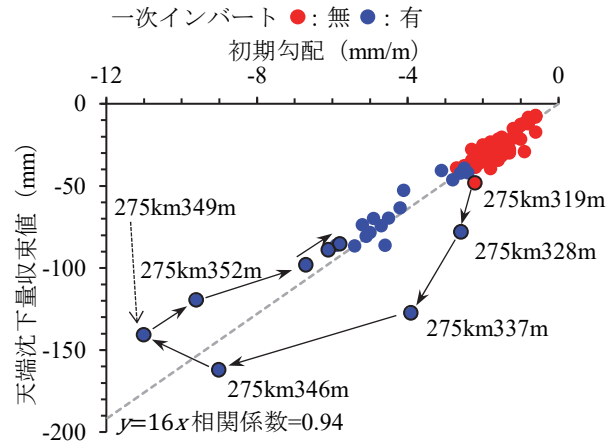


図-7 天端沈下収束値と初期勾配<sup>3)</sup>より修正

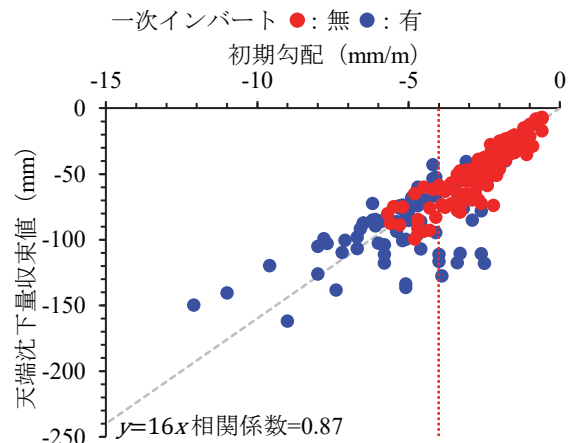


図-8 トンネル掘削後の天端沈下収束値と初期勾配

たものを示す。図-9 には一次インバート区間手前の 3 測点も併記している。図-8 より、既往の報告<sup>3)</sup>で設定した近似線  $y = 16x$  との掘削を通じての相関係数は 0.87 であり、掘削前半で推定した初期勾配と天端沈下量収束値の関係がトンネル全線に渡って有効であったと考えられる。ニセコトンネルでは図-7 にて一次インバート設置の目安を設定して以降、保護盛土区間を除き 8 区間で一次インバートを設置した。図-9 よりいずれの区間においても、一次インバート設置により初期勾配と天端沈下量収束値の関係が近似線上に回復する様子が確認できる。よって、初期勾配に着目したことにより地山の変位増大傾向を早期に捉え、一次インバート施工の判断が早期にできたと考えられる。一次インバートを連続して施工することに

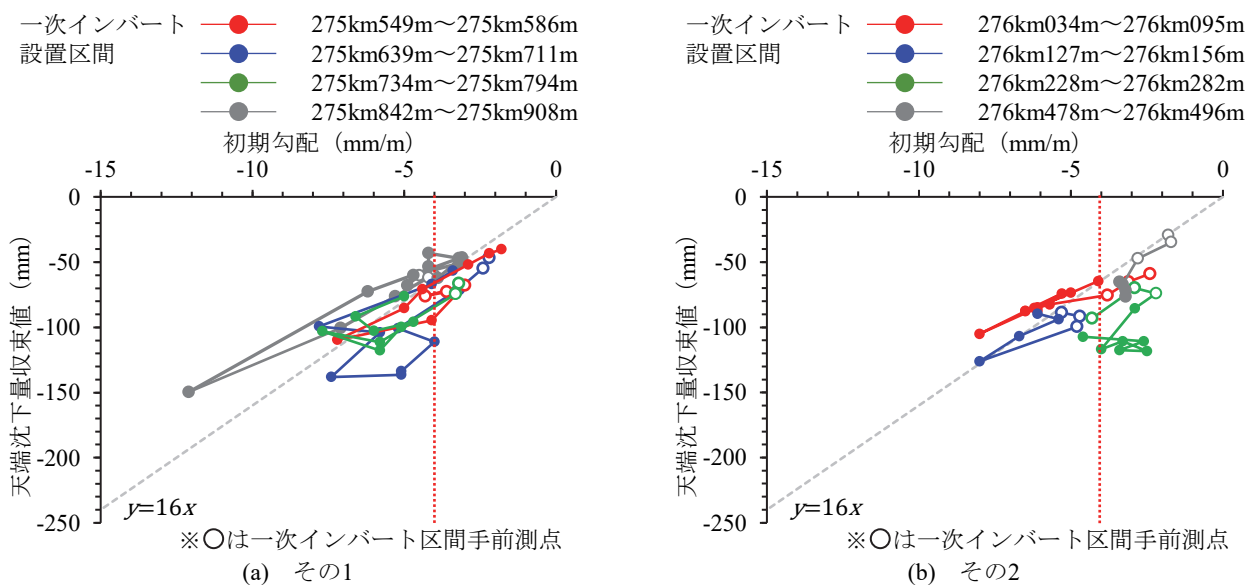


図-9 一次インバート区間天端沈下量収束値と初期勾配

より早期に地山への支持力を確保することができ、これにより地山への影響を抑えながらの掘削を継続できた。

したがって、初期勾配に着目した一次インバート設置の施工管理手法はニセコトンネルにおいて有効であったと考えられる。

(3) 地山削孔エネルギーを利用した施工管理の結果

掘削補助工法として施工している AGF 工は 1 シフト 12.5 m の鋼管 (φ114.3 mm) にシリカレジンを注入して改良径が 600 mm となるよう注入力と注入圧により管理している。図-3 の示す通り、先受け範囲が 120° となるよう 1 断面 19 本配置を標準としており、全ての鋼管をドリルジャンボにて削孔する際に削孔エネルギーを取得しているため、図-10 に示すように面的な切羽前方の調査が可能である。既往の報告<sup>2)</sup>では削孔エネルギーと内空変位量、地表面沈下量の相関を整理し、設定した近似式からの天端沈下量の推定を提案している。

図-11 に削孔エネルギーと天端沈下量の関係を、図-12 に距離程ごとの削孔エネルギーを示す。ただし、削孔エネルギーは各施工距離程での全本数各々の削孔エネルギーを平均したものを該当距離程の代表削孔エネルギーとしている。図-11 中の曲線は天端沈下量  $U$ (mm) を削孔エネルギー  $E_d$ (J/cm<sup>3</sup>) を用いて表す式として既往の報告<sup>2)</sup>より式(1)を用いている。

$$U = -523.95 * E_d^{-0.976} \quad (1)$$

図-11 より、ニセコトンネルは 20~30 J/cm<sup>3</sup> 相当の地山が主として分布していたことがわかる。設計基準強度  $q_u=1,000$  kN/m<sup>2</sup> としていた改良盛土での削孔エネルギーの実績が 80 J/cm<sup>3</sup> であったこと<sup>2)</sup>からも、脆弱な地盤が全線に渡って分布していたことが分かる。図-12 に示す通

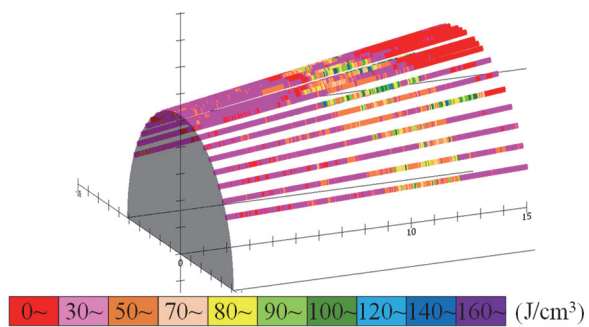


図-10 面的削孔エネルギーの取得例<sup>2)</sup>より引用

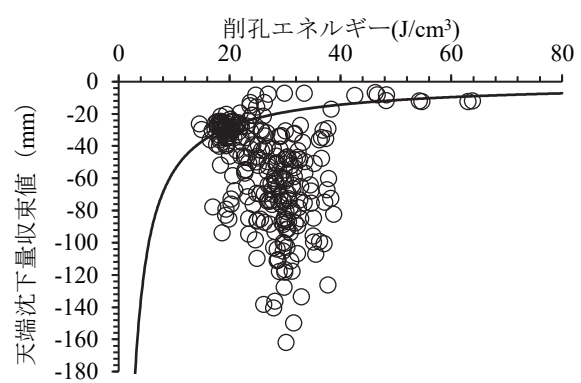


図-11 削孔エネルギーと沈下量の関係

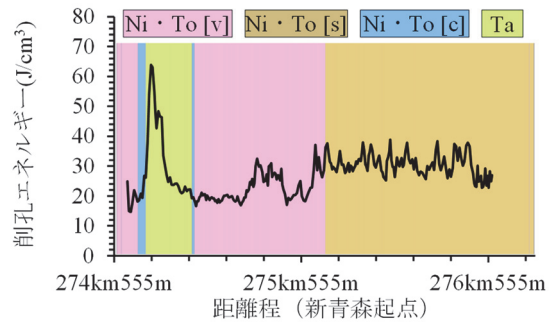


図-12 削孔エネルギー分布

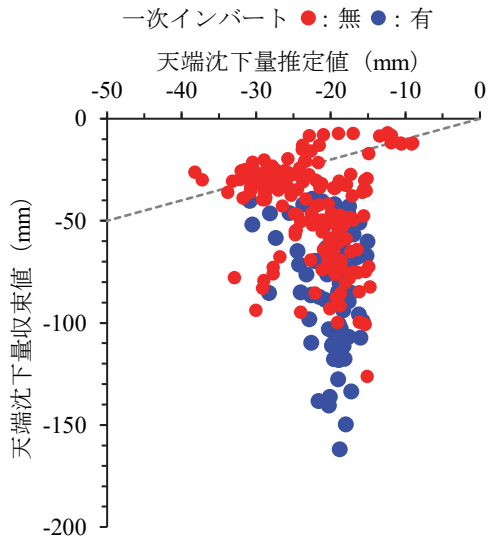


図-13 削孔エネルギーによる天端沈下量予測と実測

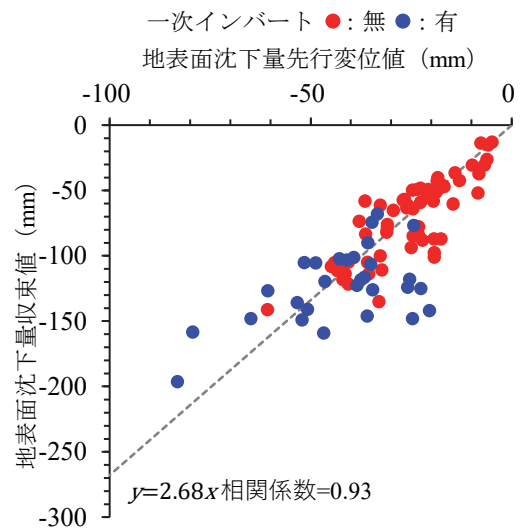


図-14 地表面沈下量の先行変位と最終変位

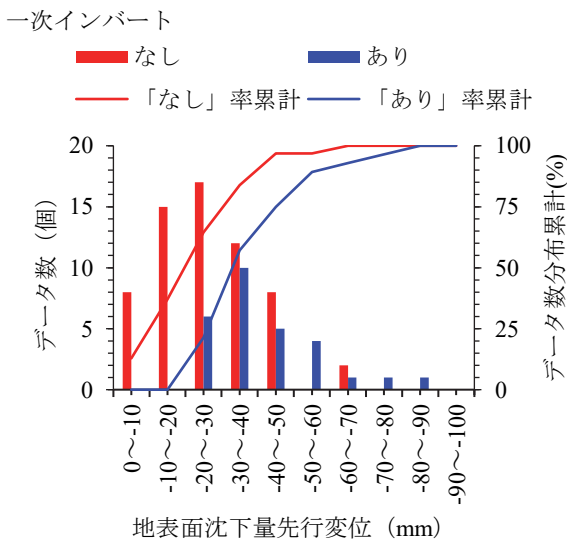


図-15 地表面沈下量先行変位の分布

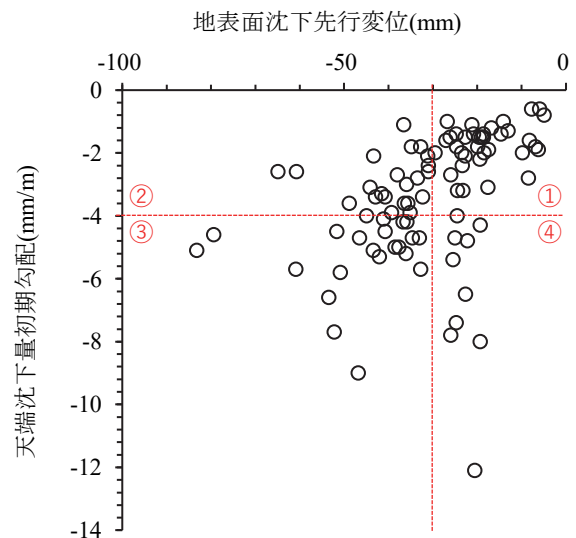


図-16 地表面沈下先行変位と天端沈下初期勾配の比較

り、削孔エネルギーの分布をトンネル断面の地質と比較したとき、基盤岩である真狩別太火山岩類 (Ta) では全体を通して特に高く  $60\text{J}/\text{cm}^3$  超を検出し、ニセコ安層・洞爺カルデラ噴出物 (Ni・To) の中で比較した場合、砂質土層 (Ni・To[s]) で  $30\text{J}/\text{cm}^3$  とより高い値のデータを得ることができた。図-13 に削孔エネルギーによる天端沈下量の予測と実測を示す。図より予測沈下量が  $20\text{mm}$  程度となる一次インバート設置区間で予測と大きく外れる傾向がみられる。これは得られる削孔エネルギーは、AGF 工を上向きに施工するため、主に天端方向の地質の情報であるに対し、図-2 に示すように実際にはトンネル下方にも広く分布している未固結地山の影響を式(1)で考慮できないためと推測される。

したがって、未固結層が鉛直方向に分布する地質条件では、トンネル下方の地質情報を考慮できる手法を検討

する必要がある。

### 3. 他のデータによる施工管理手法の検討

2.ではこれまで提案してきた施工管理手法について適用結果を整理してきた。本工事では天端沈下量と削孔エネルギーの断面ごとの平均値に限らず、様々な値を計測、収集してきた。本章では一連の施工結果及び計測結果を用いて、初期勾配による施工管理手法と同等以上の管理手法が提案できないか検討する。

#### (1) 地表面沈下計測結果を用いた手法

2.(1)で述べたように、ニセコトンネルでは内空及び天端沈下計測に加え約  $20\text{m}$  毎に地表面沈下計測を実施し

ている。地表面沈下は内空変位と同じく地山の変位状況を直接的に確認でき、かつ内空変位とは異なり切羽到達前の先行変位を計測可能である。そこで先行変位量と最終沈下量の相関について整理し、初期勾配を用いた手法と同様に一次インバート要否の判断が可能か、掘削完了後に取りまとめ、検討した。

図-14 に地表面沈下量の先行変位と最終変位の相関を示す。図より、先行変位と最終変位に正の相関があると判断できる。図-15 に地表面沈下の先行変位の分布を示す。図より、先行変位 30mm 付近に一次インバートの要否の閾値があると推察した。図-16 に地表面沈下の先行変位と初期勾配の相関を示す。図は先に述べた地表面沈下先行変位 30 mm 及び初期勾配 4 mm/m を赤点線として描画しており、領域①が両基準において一次インバートを不要と判断される領域、領域③が両基準において一次インバートが必要と判断される領域、領域②及び領域④が片方の基準において一次インバートが必要と判断されるがもう一方の基準では不要と判断される領域を意味する。図より、全 90 測点中約 64% の 58 測点において両基準で判断が一致する結果となった。一方で判断が異なった 32 測点については次の理由が考えられる。

トンネル掘削においては、図-17 に示す様に一般的に掘削に伴う周辺地山の影響は横断方向だけではなく縦断方向にも及ぶ。図-16 はある地表面沈下測点に対し、最も近傍の内空変位測点のデータで比較をしているため前後の変位状況を反映し難い。そこで、ニセコトンネルにおける縦断方向の影響範囲を確認した。図-18 に一般化したニセコトンネルにおける切羽離れの変位を示す。一般化に当たっては、各計測地点の各切羽離れ時点の変位を平均化している。ただし、計測機器設置のタイミング並びに掘削のタイミングにより、各切羽離れ時点で同一数のデータを平均しているわけではない。図より、ニセコトンネルでは 4D 相当となる切羽離れ 40 m 手前よりも前から先行変位が始まる傾向にあった。このことから、ニセコトンネルの各地表面沈下計測点では計測点直下だけではなく、広い範囲の掘削による地山への影響を受けることがわかる。したがって判定が異なる箇所は前後の地山の影響によると推定される。この場合、計測地点より離れた変位の大きい地山の影響を受け先行変位が大きく出てしまい収束値を過大に想定する、または変位の小さい地山の影響を受け先行変位が小さく出てしまい収束値を過少に推定する恐れがある。そのため地表面沈下先行変位を用いる場合には、前後の結果との比較が重要になる。

また、地表面沈下計測結果を用いる場合には次の点で課題があると考えられる。

a) 計測機器の設置間隔

先に述べたように、内空及び天端沈下計測を約 10 m

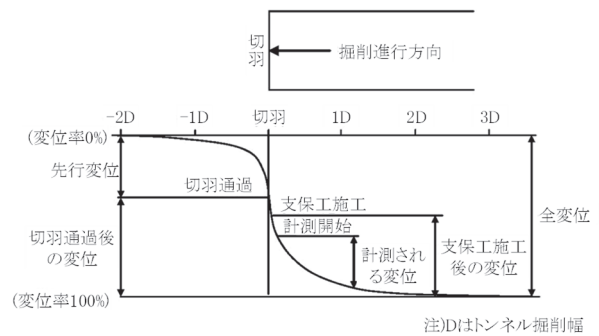


図-17 一般的な切羽と挙動の関係 <sup>5)</sup>より引用

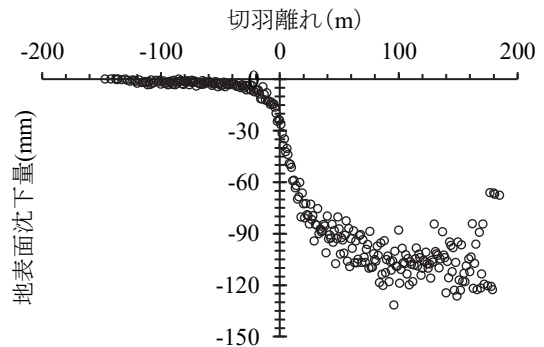


図-18 ニセコトンネルの地表面沈下量と切羽離れ

毎に、地表面沈下計測を約 20 m 毎に実施してきた。しかし、一般に通常の小土被り未固結地山では内空変位の計測間隔が 20 m、地表面沈下が 10-30 m と言われている<sup>4)</sup>。そのため、地表面沈下についても全線で内空変位と同程度の計測間隔とすることが望ましいが計測設備の規模が大きくなる課題がある。

b) 地上の利用状況と気象

地表面沈下は計測地点の利用状況にも左右される。ニセコトンネルでは概ね耕作地であったために全線で同一の環境として計測データを比較できた。また、ニセコトンネルでは GNSS を用いた全自動計測システムによる計測を実施した。このため積雪量の多い当該エリアでも通年で安定したデータの収集が可能であった。人力による水準測量の場合、GNSS を用いた全自動計測システムと比較して計測頻度が減り、かつ冬季の実施が難しくなる等の課題がある。

以上のことから、地表面沈下計測結果を用いる手法についてはデータの相関性からは縦断方向に受ける周辺地山の影響を考慮したうえで、初期勾配を用いた方法と同様の効果が得られると期待できる。一方で経済性・施工性の観点からは十分な計測データを得るためには計測設備の規模が大きくなるリスクがあると言える。

(2) 削孔エネルギーを用いた手法の検証

2.(3)で述べたように、削孔エネルギーを利用した施工

管理手法では天端沈下量の収束値の予測と実測が合致しない傾向が見られる。この原因を、上向きに施工するAGF工から得られる削孔エネルギーは主に天端方向の情報であるためにトンネル下方にも広く分布している未固結地山の影響を考慮できていないためと推測した。

一方、先の報告<sup>2)</sup>では上半根足部の値と変位量の相関が小さかったことが述べられている。そこで、本報告では施工したAGF工の削孔エネルギーの角度毎の平均と変位の相関を整理し、検証した。図-19に施工角度毎の削孔エネルギーの平均値と天端沈下量収束値の相関係数の遷移を示す。施工角度毎の削孔エネルギーの平均値を算出するにあたっては、 $\theta(\text{deg})$ の扇形の広がりの方側の各本のAGF工の最大、平均、最小削孔エネルギーのそれぞれを平均することで各断面における $\theta(\text{deg})$ の代表値と設定し、AGF工施工位置の直近の天端沈下量収束値との相関係数を示している。図より最大及び平均については負の相関を示している。天端沈下量を鉛直上向き方向への変位を正、削孔エネルギーは正の値としている本報告においては削孔エネルギーが大きくなる、すなわち地盤が固いまたは地山が締め固まっていると評価されるほど天端沈下量が大きかったことを意味する。このことは想定していた削孔エネルギーによる地山の状態とは真逆である。角度を小さくすること、つまりは平均する各断面の本数を増やすことで負の相関が高まること示していることは、先の報告<sup>2)</sup>で上半根足部の値と変位量の相関が小さかったことと合致する。一方で最小値については正の相関、つまり削孔エネルギーが大きいほど天端沈下量が小さかった傾向にある。このことから、AGF工の削孔エネルギーを用いて地山変位量を推定する場合には削孔エネルギーの最大値及び平均値に比べ最小値を用いることが良いと考えられる。しかし、最小値を用いた場合でも、ニセコトンネルのデータでは相関係数が最大で0.26と決して高い相関性は得られていない。したがって地山削孔エネルギーを用いた手法については、データの整理方法について更なる検討が必要である。

#### 4. まとめ

本報告では、未固結小土被り地山である北海道新幹線ニセコトンネル掘削時における掘削補助工法の選定に関する施工管理について、先の報告にて提案してきた手法の適用結果を整理した。掘削時に得られる変位状況からトンネル断面の「共下がり」現象や天端沈下量と地表面沈下量に一定の相関があることが引き続き確認されたことから、従来の管理手法の有効性が継続していたことを確認できた。本管理手法による施工の結果、以下の知見が得られた。

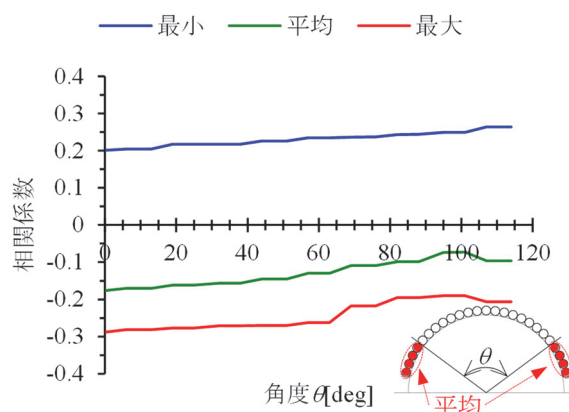


図-19 削孔エネルギーと天端沈下量収束値の相関

- 1) 初期勾配を用いた手法では地盤に過度なゆるみを与えずに沈下量を抑制できた。地山の変位増大傾向を早期に捉え、的確に一次インバート施工の判断ができたためと考えられる。
- 2) 削孔エネルギーを用いた手法では、一次インバート設置区間で予測と大きく外れる傾向がみられた。得られる削孔エネルギーは主に天端方向の地質の情報であるに対し、実際はトンネル下方に広く分布している未固結地山の影響があることを考慮できていないためと推測される。

これに加えて、本報告では地表面沈下計測結果を用いる手法の検討と、削孔エネルギーを用いた手法の検証を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 地表面沈下計測結果を用いる手法については、縦断方向に受ける周辺地山の影響を考慮したうえで初期勾配を用いた方法と同様の効果が得られると期待できる。一方で経済性・施工性の観点からは十分な計測データを得るためには計測設備が大規模化することに留意する必要がある。
- 2) 削孔エネルギーを用いて地山変位量を推定する場合には削孔エネルギーの最小値を用いることが良いと考えられる。しかし最小値を用いた場合でも、ニセコトンネルのデータでは高い相関性は得られなかったため、データの整理方法について更なる検討が必要である。

以上のことから、ニセコトンネルのような小土被り未固結地山での掘削管理においては、天端沈下量の初期勾配に着目する手法が特に有効であったと判断している。ニセコトンネルの施工記録が、他の小土被り未固結地山トンネル掘削の一助となるよう、引き続き施工記録の検証に努めていく次第である。

ニセコトンネルは本報告で用いた手法により安全な掘削を進め、2022年4月15日に貫通を迎えることができ

た。地域の皆様をはじめとする関係各位から賜った多大なるご支援に改めて御礼を申し上げるとともに、引き続き覆工含めたニセコトンネルの完成に向けて受発注者一丸となって工事を進めていく所存である。

#### 参考文献

- 1) (公社) 土木学会：トンネルライブラリー第 24 号 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，丸善出版，2012。
- 2) 板谷創平, 成田研人, 十倉昭次郎, 小塩崇之：小土被り未固結地山における掘削時の地山挙動に関する一考察，トンネル工学報告集 vol.29, I-4, 2019。
- 3) 鈴木裕貴, 吉村直人, 小塩崇之：未固結小土被りトンネルにおける変状傾向と施工管理方法について，トンネル工学報告集 vol.30, I-22, 2020。
- 4) 鉄道総合技術研究所 編：鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル，国土交通省鉄道局，丸善出版，2002。
- 5) (独) 鉄道・運輸機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，2008。

(2022. 8.26 受付)

## A REPORT OF EXCAVATION IN UNCONSOLIDATED SOIL GROUND WITH CONSTRUCTION MANAGEMENT METHOD BATHED ON BEHAVIOR OF THE GROUND

Kyohei AMBAI, Yamato UMEZU, Masaki YAMAGUCHI and Takayuki KOSHIO

The Niseko Tunnel in the Hokkaido Shinkansen (bullet train line from Shin-Hakodate-Hokuto to Sapporo) is the shallow overburden tunnel with unconsolidated ground consisted of volcanic ash sand. In this construction, we applied grouting-type long forepiling, grouting-type long face bolt and primary invert concrete as the auxiliary method. However, we must decide the application of it quickly from the perspective of workability and economical efficiency not to make the ground loose too much. Therefore, in this construction, we suggested the construction management method for the application of auxiliary method based on drilling data and settlement data. As results, because we were interested in the initial slope, we could notice the increase tendency of ground settlement quickly and apply primary invert concrete. Furthermore, in this report, we inspect the management method based on ground surface settlement and drilling data deeply. As we could excavate this tunnel with less impact to the ground, we finished tunnel excavating in April, 2022.