

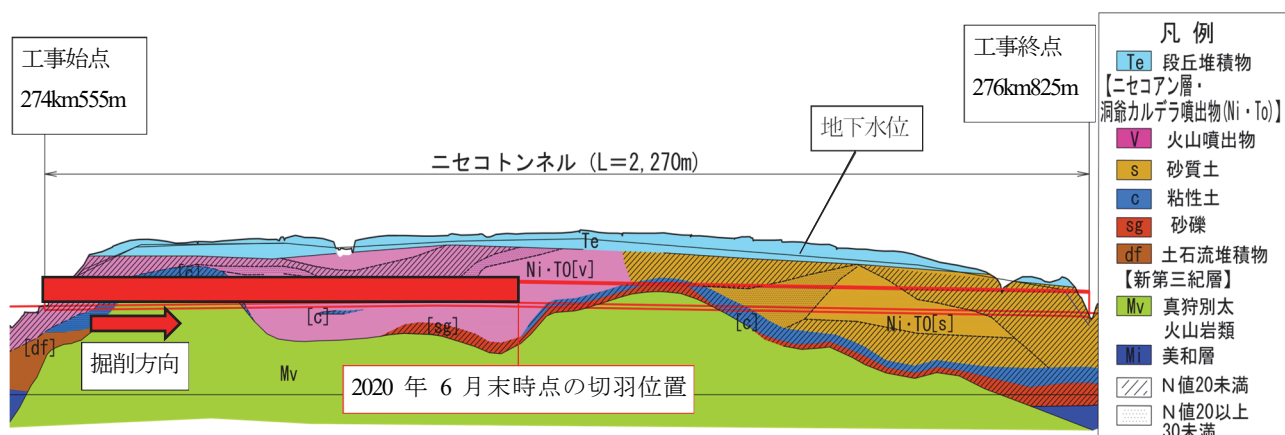


図-2 ニセコトンネル地質縦断面図

断し適用することが求められた²⁾。

本報告は、以下の内容について整理・分析を行い、本トンネルにおける今後の安全・安定的な掘削のための補助工法等の選定に活かすことを目的としてまとめた。

① これまでに掘削した区間での内空変位計測および地表面変位計測の結果を元に、掘削によって、どのような変位が生じているのかを考察する。

② 計測の結果をもとに、上半通過 10m 時点での掘削 1m あたりの天端沈下量と収束値の関係を調べ、地山に発生したゆるみが小さく地山が弾性的な挙動をする場合と、過度のゆるみが発生し塑性的な挙動をする場合の違いを示し、補助工法がどのような効果を示しているのかを説明する。

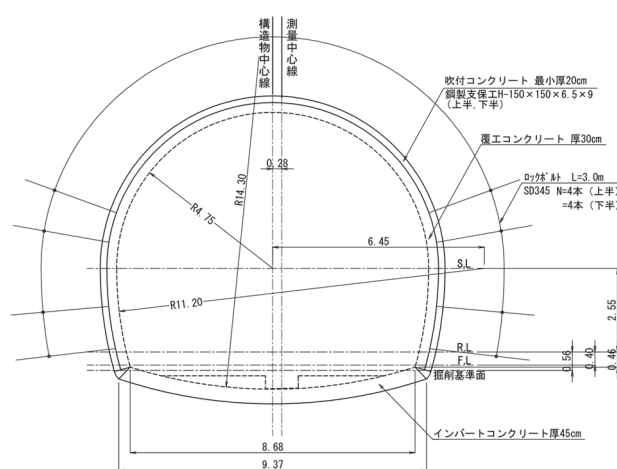


図-3 ニセコトンネルの断面図の一例

2. 計測結果による天端沈下量、SL 沈下量および地表面沈下量の関係

本トンネルでは内空および天端沈下計測と地表面沈下の計測を約 10m 毎に実施している（地表面沈下計測については、冬期間の積雪やトンネル上部の土地利用の制約等がある箇所を除く）。切羽状況に加え、これらの計測結果を踏まえた施工監理を行っている。

図-4 に天端沈下量と SL 位置の沈下量（左右の平均値）の収束値を示す。沈下量がおおよそ一致しており、トンネル断面の「共下がり」現象が発生していることが分かる。

図-5 に地表面沈下量に対する天端沈下量の割合を示す。274km860m～275km100m など、一部上記の理由から計測が行えなかった区間はあるが、平均すると 65% となり、60～70% のデータが多かった。平均から離れた値を示している地点については以下のようなことが原因であると推測される。274km860m の地点については、天端

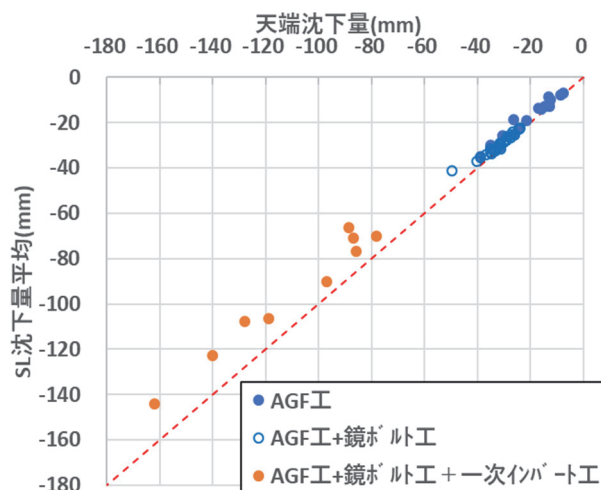


図-4 天端沈下量と SL 位置の沈下量（左右の平均値）の収束値

付近に火山灰質砂および火山灰質シルトの N 値が 10 未満の層があり、下半に真狩別太火山岩類の N 値が 50 以上の層がある、地層の変化点になっていることが上記の

関係とは違う結果になっていると推測される。275km100mの地点については、地上部が道路や倉庫として土地利用されていることから、地表面沈下量が他と比べて小さくなり、地表面の締固めにより地表面沈下量が抑制されている。275km340mの地点については、下半の地質が軟弱であった区間であったため、天端沈下量が大きくなったことが原因であると推測される。そのため、地上部が土地利用がされておらず、上下半が均一な地山に対して、過度のゆるみを起こさず掘削を進めると、上記の関係はおおむね 60～70%になる。今後の施工においてこの関係を維持し施工することで、過度の地表面沈下を起こさずに施工できると考えられる。

図-6 は上半通過後から天端沈下が収束する期間における、天端沈下量と地表面沈下量及び SL 位置の沈下量（左右の平均値）の比較である。地表面沈下量と天端沈下量はおおよそ同等の沈下量を示しており、地表面で計測している先行沈下を考慮しない沈下量については、地表面およびトンネル天端でおおむね同程度の値を示している。また、地表面沈下と SL 位置の沈下量との関係についても同様となっており、この結果からも「共下がり」現象が起きていることが分かる。

3. 初期勾配と収束値の関係

前述のような地表面沈下量および天端沈下量の収束値を把握し、天端沈下量／地表面沈下量が 60～70%を大きく超えていないかなどの地山のゆるみを確認しながらの施工では、補助工法併用の判断に遅れが生じてしまう。早期に適切な補助工法を選定し、実施することは安全かつ経済的に施工を行う上で重要となる。そこで、本トンネルにおいては掘削後 10m までの天端沈下量に着目し施工監理を行ってきた。計測の結果をもとに、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+10m を掘削した時点までの A の総沈下量/10m）を mm あたりで表した値（以下、初期勾配という）を用い、監理を行った。図-7 は天端沈下の初期勾配と収束値の関係を表しており、各断面の初期勾配と収束値の関係を示したものである（初期勾配と天端沈下収束値の相関係数は一次インバート施工区間を含める場合 0.92、含めない場合は 0.95 となり、両者とも強い相関がある）。

AGF 工を併用した 275km000m 付近および AGF 工、注入式長尺鏡ボルト工を併用した 275km300m 付近ではおおむね弾性的な変位を示しており、この範囲においての天端沈下の収束値は、初期勾配の 16 倍程度となることが確認できる。一方、一次インバートを併用した

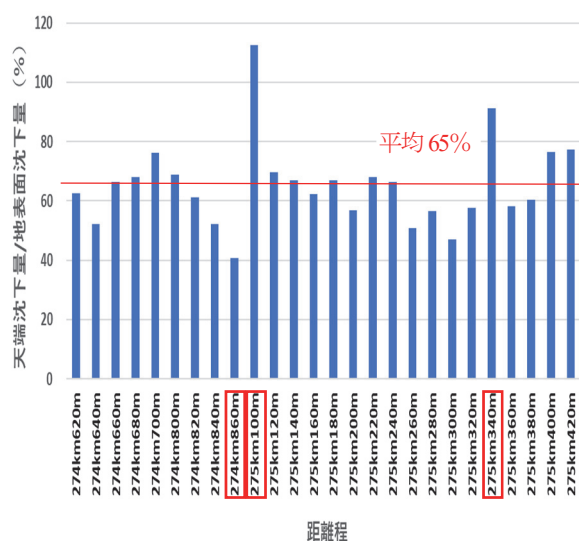


図-5 地表面沈下量に対する天端沈下量の割合

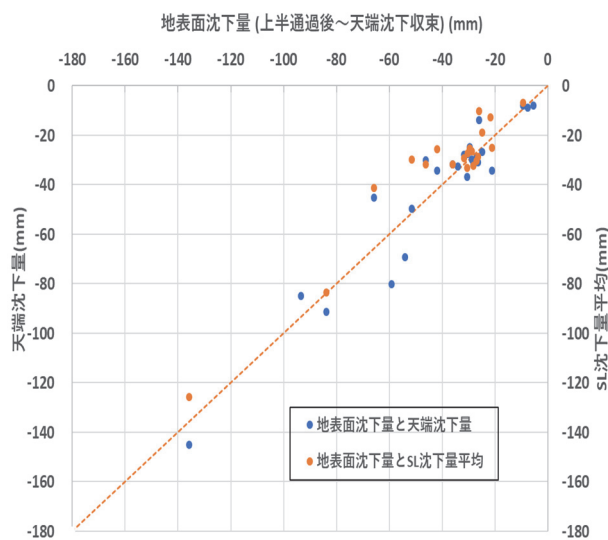


図-6 上半通過～天端沈下量収束までの地表面沈下量と天端沈下量及び SL 位置の沈下量（左右の平均値）

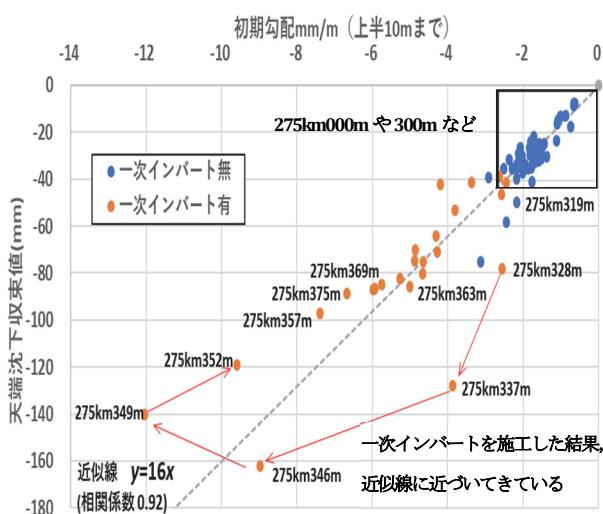


図-7 天端沈下収束値と初期勾配

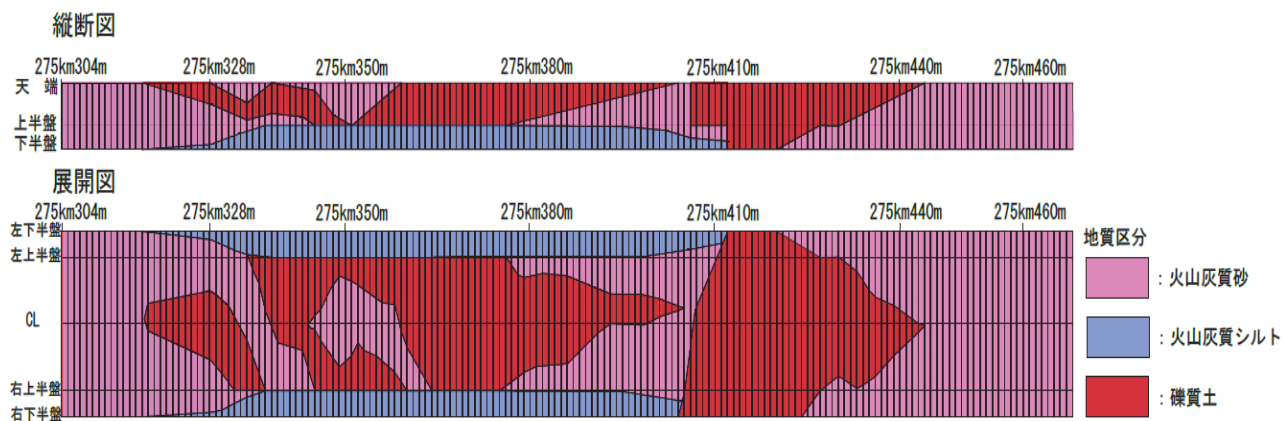


図-8 275km300m～460m 付近の地質縦断面図および断面図

275km328m などの地点については、初期勾配 (x) に対して天端沈下収束値 (y) が大きくなっており、近似線 ($y=16x$) から離れ、塑性的な変位を示していることが分かる。これは、275km328m 付近からは火山灰質シルトが下半盤に現れ始め (図-8)、支保工の根足高さの地盤強度が小さくなったことが原因であると推定される。この区間では、初期勾配が増大し、地盤に過度のゆるみが生じる傾向がみられたことから、一次インバート工による早期閉合を実施した。その結果、275km328m などは、近似線 ($y=16x$) よりも沈下量が大きくなる傾向がみられたが、一次インバートを併用したことにより、その後の天端の沈下量は初期勾配の 16 倍よりもかなり小さくなった。これは、一次インバートを施工して早期閉合したことにより、天端沈下が収束するまでの掘削距離が短くなり、天端沈下量の収束値が小さくなる効果があったためであると考えられる。

4. 初期勾配の管理について

図-9 に距離程ごとの初期勾配の傾向を示す。初期勾配は、掘削地盤の性状や補助工法の方法、施工量によって変化するが、AGF 工を併用した 275km000m 付近までの初期勾配は最大でも 3mm/m 程度に収まっている。275km000m 付近からは切羽が安定せず、沈下量も施工済みの区間と比べ大きかったことから、AGF のラップ長変更に加え注入式長尺鏡ボルト工を併用した。その結果、初期勾配は 2mm/m 程度となった。275km330m 付近では、沈下量が大きくなったため、AGF 工および注入式長尺鏡ボルト工に加えて一次インバートを施工する必要が生じた。この区間の初期勾配は、最大で 12mm/m となっており、地山が悪く、地山に過度のゆるみが発生し、その後の大きな天端沈下につながっていることが分かる。また、地山が安定してきたことから、275km460m 付近で一

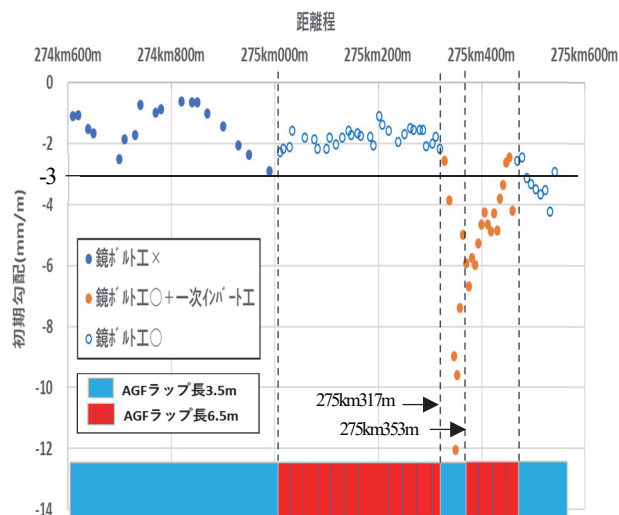


図-9 距離程ごとの初期勾配と AGF のラップ長

次インバート工の併用をやめ、AGF のラップ長を戻し、注入式長尺鏡ボルト工を併用したところ、初期勾配が再び増加しているのが分かる。これは 275km320m 付近～275km460m 付近までの初期勾配が 3mm/m を超えた区間で、AGF のラップ長の変更および一次インバートによる早期閉合が沈下の抑制において効果を発揮していたことを示唆している。

初期勾配は掘削時の変動を早期に把握することができる数少ない指標であり、本トンネルにおいては 3mm/m 程度に抑えられることで弾性的な挙動を示すことが推測される。そのため、初期勾配を 3mm/m 程度に抑えることを目標に掘削することにより、地山に過度なゆるみを与えずに、沈下量を抑制しつつ施工できると考えられる。

5. 補助工法について

本トンネルでは前述の通り、切羽の安定や沈下抑制等

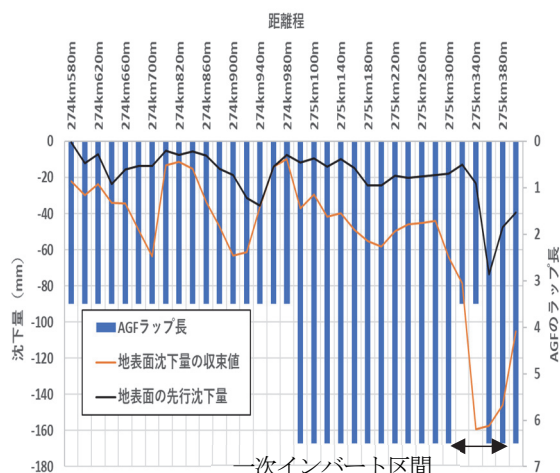


図-10 AGFのラップ長と地表面の先行沈下量および収束値

を目的として、補助工法を併用し掘削を進めている。図-9に距離程ごとのAGFのラップ長を示す。275km000m付近から切羽が不安定になったため、AGFを6.5mラップに変更し施工を行い、275km310m付近から切羽が安定し、沈下量が減少してきたため、AGFラップ長を3.5mに変更した。その後、275km330m付近から下半に火山灰質シルトが現れ、沈下量が増加し、275km350m付近で切羽が一部崩れたことから、275km350m付近からAGFのラップ長を6.5mに変更をした。これらのラップ長の変更による沈下量の変化を図-10に示す。

図-10のAGFのラップ長と地表面の先行沈下量および収束値の関係をみると、275km100m～300m付近のAGFのラップ長が6.5mの区間では、地表面の先行沈下量および収束値が274km580～980m付近のラップ長3.5mの区間と同様に弾性的な挙動を示していると推測できる。これは切羽や天端からの抜け出し等に対し、AGFのラップ長を長くすることで、地表面の先行沈下量、収束値の増大を抑えることができ、地山を弾性領域の変形に留めることができたものであると考えられる。

一方、275km320m～340m付近では沈下量が大きくなった。これは、下半に火山灰質シルトが現れ、火山灰質砂より沈下量が大きくなるタイミングでAGFのラップ長を短くしたことにより、通常であれば弾性的な挙動を示していた地山が塑性的な挙動となったことが原因であると推測される。

沈下量が大きくなったことから、275km350m付近からはAGFのラップ長を6.5mに変更したが、275km360mでは沈下量が大きくは変わっていないことが分かる。これは手前の区間でAGFのラップ長を3.5mにしたことにより、前方の地山を緩ませ、地表面の先行沈下量が大きくなったことから、地表面沈下量の収束値が大きくなったものであると考えられる。

275km380m付近からは先行沈下量および収束値は減少傾向にある。これはAGFのラップ長変更により先行変位を抑制した効果に加え、一次インバートによる早期閉合の効果により全体の沈下量が減少していると推測される。

6. おわりに

本報告では、現在掘削中の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を対象として、内空変位および地表面変位の計測結果から掘削時の地山の変状傾向について考察し、補助工法の効果について分析した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・天端沈下量とSL沈下量はおおむね同程度であり、地表面沈下量と天端沈下量及びSL沈下量においても上半通過後から変位収束後までのおおむね同程度であることから、「共下がり」現象が起こっていると考えられる。
- ・弾性的な変位を示した天端沈下の収束値は初期勾配の16倍程度となった。
- ・一次インバートの早期閉合により、天端沈下が収束するまでの距離を短くすることができ、収束値を小さくする効果が確認できた。
- ・初期勾配を3mm/m程度に抑えることにより、地盤に過度なゆるみを与えずに、沈下量を抑制できた。
- ・AGFのラップ長を長くすることで地表面の先行沈下量の抑制の効果があると推測できる。

今後もトンネル掘削を続けるに当たり、各種データの蓄積を進め、安全かつ経済的に施工を行っていく所存である。終点側の地質は、起点側の地質と大きくは変わらず火山灰質砂が続く見込みであり、これまでの沈下傾向などを参考に施工方法、補助工法を選定したい。一方、施工済みの掘削区間では、層が均一でない場合は均一な区間と比べて沈下の傾向が異なることが確認されたため、今後そのような区間では沈下の傾向等留意して施工を進める必要がある。また、今後は民家直下での施工など、より一層厳しい監理が必要となるため、適切に補助工法を採用し施工を進めていきたい。

参考文献

- 1) (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，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, 2019.11

(2020.8.7 受付)

THE EXCAVATION OF UNCONSOLIDATED GROUND CONSIDERING THE BEHAVIOR OF GROUND

Yuki SUZUKI, Naoto YOSHIMURA and Takayuki KOSHIO

In this report, in the unconsolidated small overburden tunnel currently being excavated, the measurement results of the convergence and the ground surface displacement including the vertical displacement at the crown and SL position are summarized, and what kind of displacement occurs due to excavation. In addition, the relationship between the crown settlement amount per 1 m of excavation (initial slope) and the convergence value at 10 m in the upper section passage was investigated. The difference between the case where the looseness that occurs in the natural ground is small and it behaves elastically, and the case where excessive looseness occurs and it has a plastic behavior are shown. Furthermore, we examined what kind of effect the auxiliary construction method adopted to control the looseness of the ground showed. As a result, it was found that the accompanied settlement was confirmed, and the convergence value of the crown settlement at the point where the ground showed a generally elastic displacement was about 16 times the initial slope. At the points where plastic displacement with a large initial slope, the amount of subsidence was suppressed by changing the wrap length of AGF and performing early closure.