

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

板谷 創平¹・成田 研人²・十倉 昭次郎³・小塩 崇之⁴

¹正会員 (独) 鉄道・運輸機構 ニセコ鉄道建設所 (〒048-1501 北海道虻田郡ニセコ町字富士見 161-1)
E-mail: itaya.soh-ws7e@jrtt.go.jp

²非会員 (独) 鉄道・運輸機構 ニセコ鉄道建設所 (〒048-1501 北海道虻田郡ニセコ町字富士見 161-1)
E-mail: narita.ken-4b25@jrtt.go.jp

³非会員 (独) 鉄道・運輸機構 ニセコ鉄道建設所 (〒048-1501 北海道虻田郡ニセコ町字富士見 161-1)
E-mail: tokura.sho-3v57@jrtt.go.jp

⁴非会員 飛鳥建設(株) 新幹線ニセコトンネル作業所 (〒048-1502 北海道虻田郡ニセコ町字本通 258-1)
E-mail: takayuki_koshio@tobishima.co.jp

本研究では，現在掘削中の小土被り未固結地山を対象として，天端および地表面の沈下計測結果から掘削時の地山挙動について考察し，前方探査時の削孔エネルギー計測結果と掘削による沈下量との関係を近似式を用いて整理した．また，得られた近似式を用いて削孔エネルギーによる前方地山の沈下予測を行った．

その結果，天端と地表面の沈下量は概ね比例関係で変化しており，トンネル掘削に伴い脚部とともにトンネル全体が沈下しているモードで変位が生じていると推定された．さらに，既掘削区間における削孔エネルギーと沈下量の実績から算出された近似式で概ね当てはまることを確認した．一方で，既掘削区間は比較的一様な地質であったのに対し，沈下予測を行った区間では地質の変化や軟弱な部分が出現したことから，予測値と実測値の差異も観測された．

Key Words: NATM, shallow overburden, monitoring measurements, drilling energy

1. はじめに

北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）ニセコトンネルは，長万部駅・倶知安駅間の新青森起点 274km555m～276km825mに位置し，虻田郡ニセコ町のルベシベ川と真狩川の間丘陵地を横断する延長 2,270mのトンネルである（図-1）．ニセコトンネルの全長にわたり 2D以下の小土被りで，掘削地山は火山灰質砂が主体の未固結地山である（図-2）．補助工法として注入式長尺先受工（AGF 工）を併用した山岳工法により，2018 年 7 月より起点側（図-2 左側）から掘削を進めており 2019 年 6 月末時点で，坑口から約 450m の位置を掘削中である．小土被りかつ未固結地山での掘削であるため，掘削中の安全性を確保しつつ，掘削に伴う地表面変位を最小限に留め，かつ，経済的に施工するために，地山状況に適した補助工法を選択する必要がある．

本研究では，以下の内容について整理・分析することで，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とともに，他の類似条件下における山岳トンネル施工の参考となる基礎データを採取することを目的としている．

①これまでに掘削した区間での内空変位計測および地

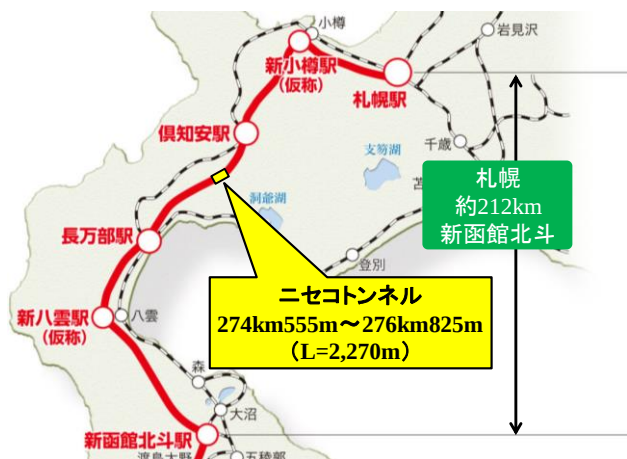


図-1 ニセコトンネル位置図

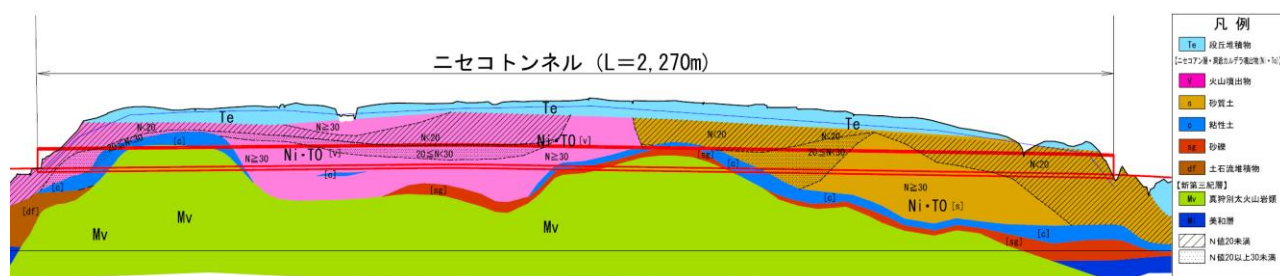


図-2 ニセコトンネル地質縦断面図

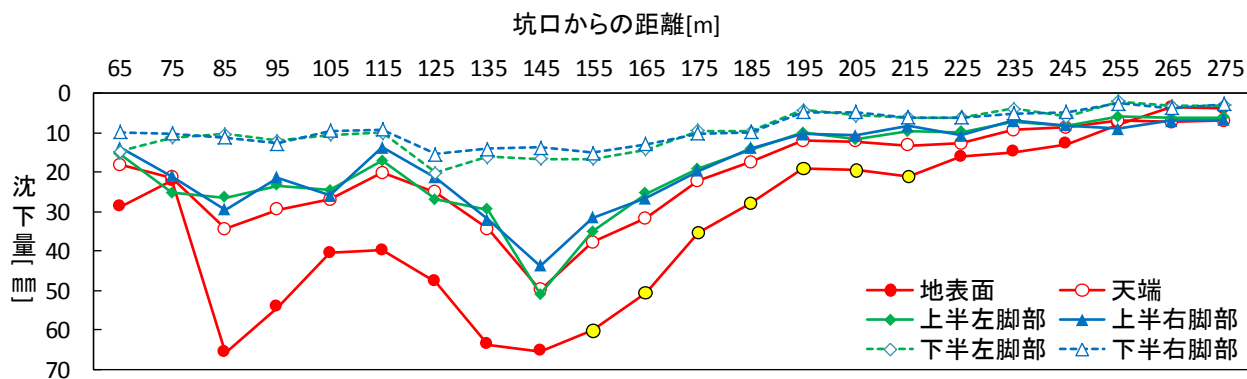


図-3 内空変位・地表面変位計測結果（収束変位）

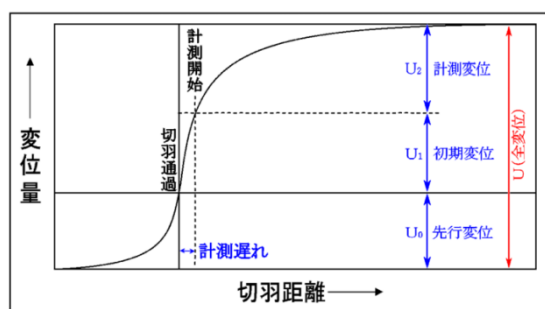


図-4 内空変位計測の概念図

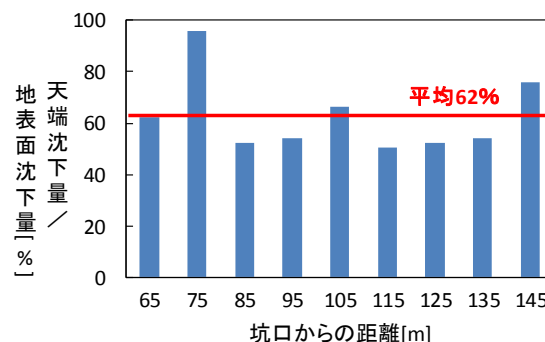


図-5 天端沈下量と地表面沈下量の関係

表面変位計測の結果を元に、掘削に伴う地山挙動のモードや特徴について考察する。

②本トンネルでは、AGF 工の削孔で前方地山を削孔する際に要するエネルギーを評価する手法（DRISS）を適用し、前方の地山性状を探索した上で補助工法選定の一助としている。そこで、前方地山探索での削孔エネルギーと掘削時の地山挙動との関係について整理し、両者の相関を確認する。

2. 計測結果による地山挙動の考察

(1) 計測による地山変形モードの推定

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 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）。切羽状況の他、これらの計測結果を踏まえた施工管理を行っている。

坑口より 275m までの掘削時の天端沈下・内空変位および地表面沈下の計測結果を図-3 に示す。ここで、坑口から 65m までの区間は保護盛土施工部の掘削のため省略している。また、155m～215m の区間は冬期間の積雪やトンネル上部の土地利用の制約等から計測ができていないため、(2)で説明する手法を用いて推定した結果である。

図-3 の計測結果より、上半支保工設置後の天端沈下量と地表面沈下量は概ね比例関係で変化している。また、天端沈下量と左右上半脚部沈下量がほぼ同じ大きさであることから、トンネル掘削に伴いトンネル上部の土塊が一体的に沈下していることが想定された。このことから、トンネルを掘削し土圧が解放されることによりトンネルに変形が生じているのではなく、脚部とともにトンネル全体が沈下しているモードで変位が生じていると考えられる。

(2) 天端沈下量と地表面沈下量との関係

トンネル掘削が進むにつれて、冬期間の積雪やトンネル上部の土地利用の制約等で地表面沈下計測が実施できない箇所があったため、天端沈下量の計測結果から地表面沈下量を推定する目的で地表面沈下計測結果と、天端沈下計測結果の比較を行った。

一般にトンネル掘削により地表面沈下が発生する場合、天端の全変位量 U は地表面変位量 H よりも大きくなるが、図-4 に示す通り実際の天端変位は切羽が通過する前から先行変位 U_0 が生じる。さらに切羽解放から鋼製支保工を建て込むまでの間の計測遅れによる初期変位 U_1 を考慮すると、実際に計測できる変位は U_2 のみである。切羽解放から鋼製支保工を建て込むまでの時間を極力一定に保った上で、計測変位 U_2 と地表面変位 H との関係を整理した。

その結果、天端沈下量と地表面沈下量の比は、坑口からの距離が 65~145m の範囲では、62%であることが分かった（図-5）。図-3 の計測ができなかった地表面沈下は、この結果より天端沈下を 100/62 倍することによって推定したものである。

3. AGF 工と削孔エネルギー

掘削補助工として施工している AGF 工は 1 シフト 12.5m のスリット付鋼管（ $\phi 114.3\text{mm}$ ）にシリカレジンを注入して改良径が 600mm となるよう注入量と注入圧により管理している。図-6 の通り、先受け範囲が 120° となるよう 1 断面 19 本配置しており、19 本全ての鋼管をドリルジャンボにて削孔する際に DRISS による削孔エネルギーを取得しているため、面的な先進調査が可能である（図-7）。この削孔エネルギーと地山挙動のデータを整理することにより、両者の相関を把握し、地表面沈下量と天端沈下量を予測できないか、検討した。

DRISS による岩 1cm^3 あたりの削孔に要する削孔エネ

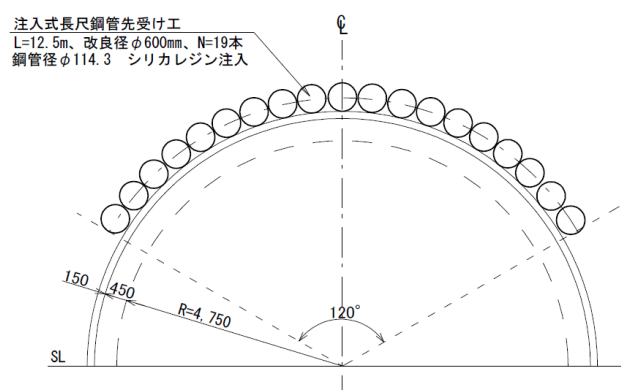


図-6 AGF 工施工断面図

ルギー $E_d[\text{J}/\text{cm}^3]$ は式(1)により算出される¹⁾。

$$E_d = \frac{E_p \times C_p \times k}{V_d \times S} \quad (1)$$

ここに、 E_p ：打撃エネルギー[J]

C_p ：ドリルジャンボの打撃数[bpm]

k ：損失係数

V_d ：削孔速度[cm/min]

S ：削孔断面積[cm^2]

削孔時に部分的に硬い転石や亀裂部分があると削孔エネルギー値としては大きなばらつきが出ることがしばしば見られる。今回対象とする地山では、トンネルの変形モードから、上半脚部の変位と天端沈下および地表面沈下との相関が大きいと考えたが、DRISS での削孔エネルギーのうち、上半脚部の値のみは、ばらつきが大きく、変位量との相関が小さくなった。このため、1 シフト毎に 19 本全ての削孔エネルギーを平均化したものが、上半脚部の地盤強度を代表し、かつ、ばらつきが小さな測定値であると仮定し、切羽前方の地山状況を評価することを試みた。

本トンネルの掘削開始前には、削孔エネルギーによる補助工法要否の決定を目的に保護盛土部における削孔エネルギーの測定を試験的に行った。その結果、保護盛土部地山の削孔エネルギーが $80\text{J}/\text{cm}^3$ 程度であることが確認されたため、安全側の施工管理上の目安として AGF 工の要否を削孔エネルギーが概ね $80\text{J}/\text{cm}^3$ であるかを基準に判断することとした。

4. 削孔エネルギーと沈下量の関係とその予測

(1) 累乗近似による近似式

削孔エネルギーの平均値 22 シフト分（坑口から 77m ~ 260m）について、トンネル掘削に伴う地表面沈下量

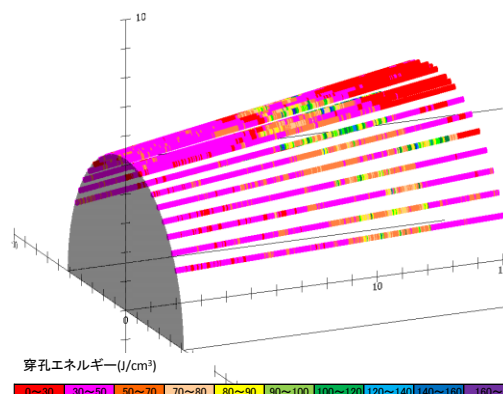


図-7 面的削孔エネルギーデータの例

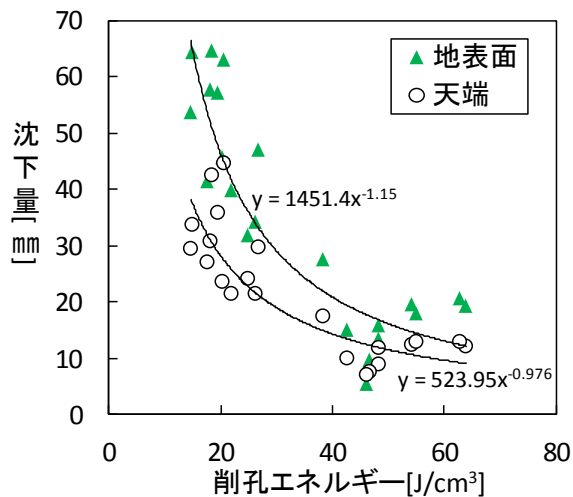


図-8 削孔エネルギーと沈下量の関係と近似曲線

と天端沈下量それぞれについて相関関係を整理した。

削孔エネルギーが大きくなるほど地山が固い、あるいは地盤が締め固まっている状態であると考えられ、削孔エネルギーが大きくなるほど沈下量が小さくなるのが想定されるため、 $y = ax^{-b}$ (y : 天端沈下量の予測値, x : 削孔エネルギー, a および b : データから得られる定数) の形で近似できるものと仮定し導出した。

削孔エネルギーと沈下量の関係および近似曲線を図-8 に示す。また、地表面沈下量 H と天端沈下量 U の近似式は削孔エネルギー E_d を用いて式(2)、(3)によりそれぞれ表される。

$$H = 1451.4E_d^{-1.15} \quad (2)$$

$$U = 523.95E_d^{-0.976} \quad (3)$$

図-8 より、概ね近似曲線で沈下量の実測値が表されているものと考えられる。なお、この沈下量の結果は AGF 工による先受けと改良の効果を受けてのものであることに留意する必要がある。

今回の掘削事例では、坑口から 165m より手前側では比較的一様な火山灰質砂の層であったため、左右鋼製支保工の脚部とともに天端と地表面が沈下する傾向が見られた。一方で 165m より奥では下半部に比較的硬質な真狩別太火山岩類の層が現れ、鋼製支保工脚部が固められたため、地表面沈下量および天端沈下量は減少する結果となった。

硬質な層における削孔エネルギー値は主にアーチ肩部での削孔時に大きくなったことから平均削孔エネルギーが大きくなり、減少した沈下量との相関が強くなったものと考えられる。DRISS によって得られる削孔エネルギー値は一般にばらつきが大きい、多数のデータを平均化することで、当てはまりが良くなったものと推察される。

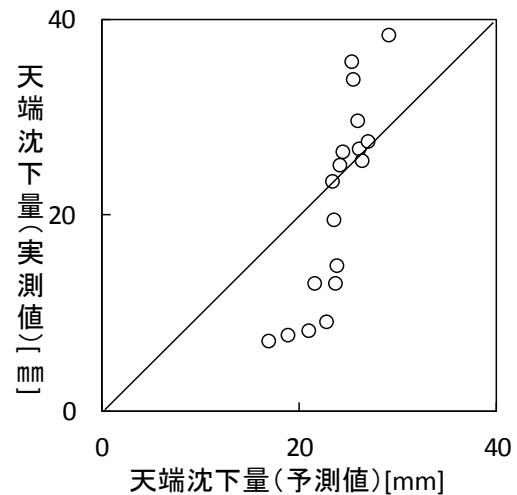


図-9 削孔エネルギーを用いた天端沈下量の予測結果

(2) 削孔エネルギーによる天端沈下量予測の試行

坑口から 269m～422m の区間について、累乗近似により求められた近似式(3)により、削孔エネルギーから天端沈下量の予測を行った。天端沈下量の予測値と実測値の関係を図-9 に示す。横軸に削孔エネルギーから予測された沈下量を、縦軸に実際に観測された沈下量を取っている。

その結果、天端沈下量の実測値が予測値とほぼ一致する測点が複数見られたものの、結果としては、天端沈下量の予測値が 22～23mm 程度を境に予測値と実測値の開きが見られ、予測より下回る測点や上回る測点も散見された。

天端沈下量の予測値よりも実測値が下回った測点は、坑口から 269m～323m の約 50m に亘る測点（予測区間の坑口側）において観測されていた。この区間は前述の通り真狩別太火山岩類の比較的硬質な層が下半部に現れており、鋼製支保工脚部が固められることにより沈下が抑制された区間であるが、上部から差し目に軟質な火山灰質砂の層が現れており、削孔エネルギーは小さく計測されたためこのような結果となったことが考察される。

天端沈下量の予測値よりも実測値が上回った測点は、坑口から 404m～422m の約 20m に亘る測点（予測区間の奥側）において観測されていた。坑口から 400m ほどを過ぎてから地山の粘着力が不足し、吹付けコンクリートが付着しづらい区間が続いており、結果として地山が緩んだ状態となった可能性がある。このため沈下量が大きくなったと考えられる。

これらのことから、削孔エネルギーのみで天端沈下量を正確に予測することは難しいが、今後掘削データをさらに蓄積し、沈下量に与える様々な要因を精査することで予測に資する知見を得ることができると見出すことができた。

5. おわりに

本研究では、現在掘削中の小土被り未固結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挙動について考察し、AGF 工施工時の削孔エネルギー計測結果を用いた前方地山の沈下予測を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ・天端沈下量と地表面沈下量は概ね比例関係で変化しており、トンネル掘削に伴い脚部とともにトンネル全体が沈下しているモードで変位が生じていると推定された。
- ・天端沈下量は地表面沈下量の約 60% 計測されていることが確認された。この結果を利用し、地表面沈下が測定できない環境では、天端沈下計測結果から地表面沈下を推定し施工管理を行った。
- ・削孔エネルギーは一般にばらつきが出やすいため、1 断面 19 本のデータを平均化し、上半脚部の地山強度を代表する値として、沈下予測式を導いた。

この結果、削孔エネルギーを用いて地表面沈下量と天端沈下量が概ね近似曲線にて示すことができた。

- ・近似式を用いて削孔エネルギーから天端沈下量を予測したところ、ほぼ一致する測点が複数見られたものの、予測値から外れた測点も見られた。沈下量に与える要因を、ばらつきを小さくし測定し、その相関を精査することが今後の課題である。

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、さらなる予測精度の向上に努めていく所存である。

参考文献

- 1) 木村哲，山下雅之，西山哲：ぜい弱地山における穿孔探査法の適用，pp.494-499，材料学会論文集，2003.

(2019. 8.9 受付)

A STUDY ON THE GROUND BEHAVIOR AT THE TIME OF EXCAVATION IN SHALLOW AND UNCONSOLIDATED GROUND

Sohei ITAYA, Kento NARITA, Shojiro TOKURA and Takayuki KOSHIO

In this study, we investigated the natural ground behavior during excavation based on the measurement results of the crown and ground surface subsidences, and the measurement results of drilling energy during forward exploration. The relationship between the drilling energy and the amount of subsidence due to excavation was organized using approximate equations. In addition, using the approximate formula obtained, the settlement of the front ground was predicted by drilling energy.

As a result, the amount of subsidence of the crown and the ground surface changed in a proportional relation, and it was estimated that the displacement occurred in the mode in which the entire tunnel was subsidized along with the root leg during tunnel excavation. Furthermore, it was confirmed that the approximate equation calculated from the actual drilling energy and subsidence in the existing excavation section is applicable. On the other hand, while the existing excavated section had relatively uniform geology, changes in the geology and soft parts appeared in the section where subsidence was predicted.