

一般国道40号 音威子府村 音中トンネル完成まで —難工事に挑んだ12年の軌跡—

北海道開発局旭川開発建設部士別道路事務所 ○中村 順一
島田 武
大場 北斗

現在建設中の音中トンネル(延長4,686m)が令和4年3月に完成を迎える。既報の通り、蛇紋岩区間ではトンネル閉塞に至る大変状が発生し、真円三重支保構造によるトンネル再構築を実施した。また緑色岩区間では想定以上の変位による変状が発生、二重支保工の採用に至った。このような幾多の困難に遭遇、国内屈指の難工事となった。本報告は平成22年3月の着工から完成に至るまでの施工経緯について報告するものである。

キーワード：蛇紋岩、緑色岩、真円三重支保工、二重支保工

1. はじめに

(1) 音中トンネルについて

一般国道40号は、旭川市を起点に稚内市に至る延長約250kmの幹線道路である。このうち「音威子府バイパス」は、現道の雪崩による特殊通行規制区間を解消及び道路交通の定時性、安全性向上や交通事故低減を目的とした総延長19kmのバイパス事業である。

「音威子府バイパス」では、4本のトンネルを建設しており、音中トンネルは、事業区間のほぼ中央に位置する延長4,686mの道路トンネルである(図-1)。



図-1 音威子府バイパス全体図

(2) 音中トンネルの地質概要

音中トンネルの地質縦断面図を図-2に示す。掘削対象となる地層は起点側(音威子府側)から蝦夷層群の泥岩、貫入岩の蛇紋岩、空知層群の玄武岩類および蝦夷層群の砂岩・泥岩である。トンネルの最大土被りは玄武岩区間において約420m、また当工事で最大の難所となった蛇紋岩区間では約320mであった。

2. トンネル掘削

音中トンネルは起点側(音威子府村)と終点側(中川町)の両方向から掘削を行う計画で2010(平成22)年3月に着工、幾多の困難を乗り越え2020(令和2)年11月に貫通した。貫通時の施工延長は起点側1,908.5m、終点側2,750.5m(SP=8,738)であった。

以下に起点側、終点側それぞれの施工記録を報告する。

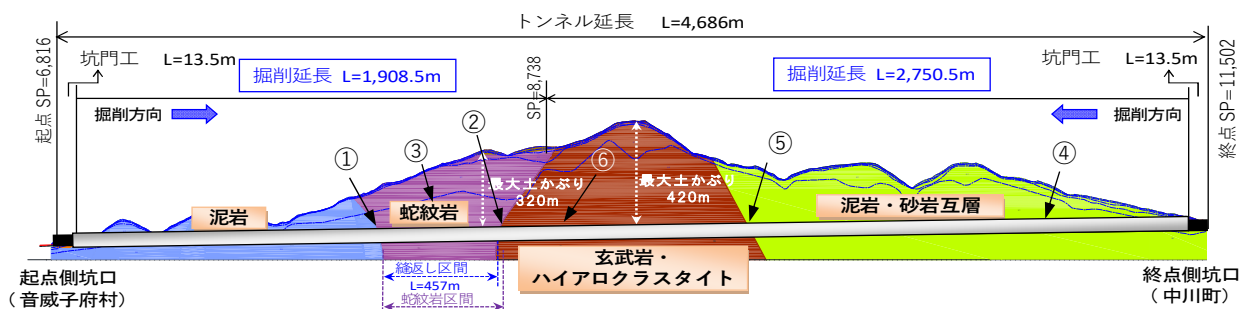


図-2 地質縦断面図

(1) 起点（音威子府村）側

2010（平成22）年5月より準備工を開始，仮設備の設置，坑口部盛土ならびに地盤改良を行い，同年9月よりトンネル掘削を開始した。掘削初期の破碎質泥岩かつ坑口付近の低土被り区間において変位の増大による支保の変状が発生したが，起点側坑口からTD=1,280m（SP=8,110）付近までは発破工法により順調に掘削を進めていった。2012（平成24）年3月，当初より警戒していた蛇紋岩に到達（SP=8,134；図-2の①）した。音中トンネルの蛇紋岩は葉片状～粘土状の蛇紋岩が分布しており，土被りが200m以上の区間における地山強度比（地山の軸圧縮強度／土被り圧；一般に2を下回るとトンネルの安定に問題が生じやすいといわれる）は「0.5以下」という極めて脆弱な蛇紋岩であった。この脆弱な蛇紋岩に対して，先進ボーリングから得られた地山物性値より支保パターンを選定し，慎重な掘削を行っていた。掘削の進行と共に土被り大きくなり，蛇紋岩の性状も葉片状から粘土状が主体となるなどトンネル掘削が困難な状況が続くこととなった。補助工法による切羽の安定化対策，インバート形状1.5R（R：上半半径）の二重支保工，瞬結吹付けコンクリート，早期断面閉合を実施し，支保の安定を図っていた（図-3）¹⁾。

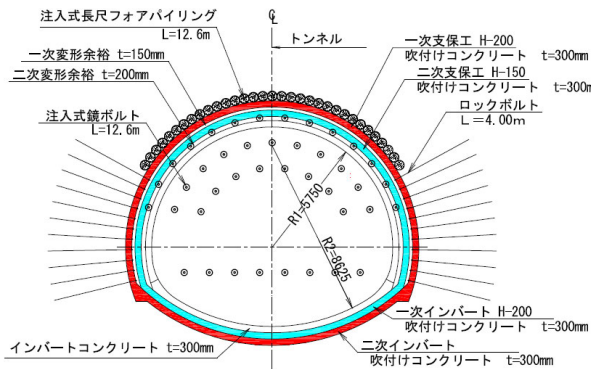


図-3 代表的な当初の支保パターン（起点側二重支保工）

ところが，蛇紋岩掘削開始から1年9ヶ月が経過した2014（平成26）年1月，トンネルの大変状が発生した。鏡吹付けコンクリートの剥離（SP=8,591；図-2の②）と切羽後方での盤ぶくれを確認，変状抑止対策として押え盛土や増吹付けコンクリートを講じるも変状の勢いを止めることはできず瞬く間に坑口側へ波及，数日間のうちに切羽から180m区間が破壊された。そのうち，切羽後方105mの位置での盤ぶくれの高さは約2m（推定）に達した（写真-1）。急速に加速した変状は一旦落ち着きをみせたが最初の変状から1ヶ月後の同年2月にトンネル内部を閉塞するほどの崩落（写真-2）が切羽後方250mで発生（SP=8,346；図-2の③）するなど，蛇紋岩区間全線（L=457m）での再掘削を余儀なくされた。

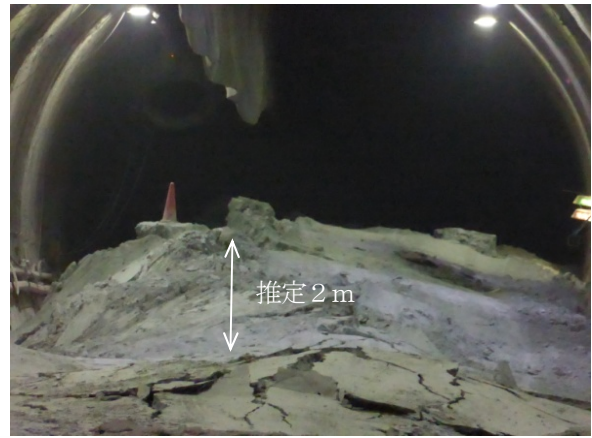


写真-1 変状（盤ぶくれ）発生状況



写真-2 天端崩落発生状況

この大規模変状を受け「音中トンネル検討部会」を設置し，有識者の助言を得ながら，変状発生メカニズム，支保構造の断面形状，必要部材耐力，後荷（時間依存性挙動），施工性など幅広い観点において議論を重ね，再掘削に必要な支保として真円三重支保構造（早期断面閉合）を採用することとした（図-4）²⁾。

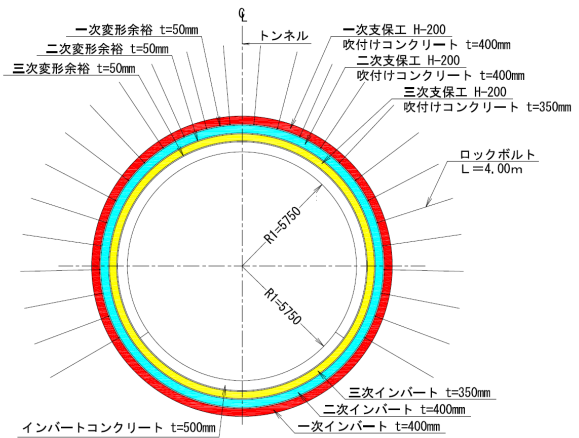


図-4 再掘削で採用された支保パターンの例（真円三重支保工）

また、トンネル内を完全に閉塞した天端崩落区間への対応としては調査ボーリング（写真-3）によりトンネル周辺のゆるみ領域調査を行い、ボーリング時のコア観察ならびに削孔水の逸水状況を確認、顕著な空隙部はセメントミルクにより充填（地山改良）を行うことで地山の安定を向上させることとした。さらに天端崩落を生じた箇所は硬質な微閃緑岩と脆弱な蛇紋岩（接触変質部）が混在し不均質な地山状況を示しており、崩落区間のトンネル上部に残存する微閃緑岩の岩塊がトンネルの再掘削に伴って抜け落ちてくる可能性があった。そこで、この不安定岩塊を固定する対策として、地山改良時の削孔エネルギーを活用して岩塊規模を推定（図-5）し、先受け鋼管（AGF工法）天端130度範囲に2段配置とすることとした。この結果、再掘削時の安定が確保され、当該区間で天端崩落を再発することなく突破することができた。なお、調査ボーリングはトンネル上部の空洞、空隙の有無と地山物性値を確認する目的でトンネル崩落が発生した箇所から再掘削20m毎に行い、延19シフト（うち地山改良3シフト）実施した。

これらの対策工により慎重な掘削を重ね、最初の変状が確認されてから5年9ヶ月、2019（令和元）年10月に再掘削を完了した。



写真-3 調査ボーリング実施状況

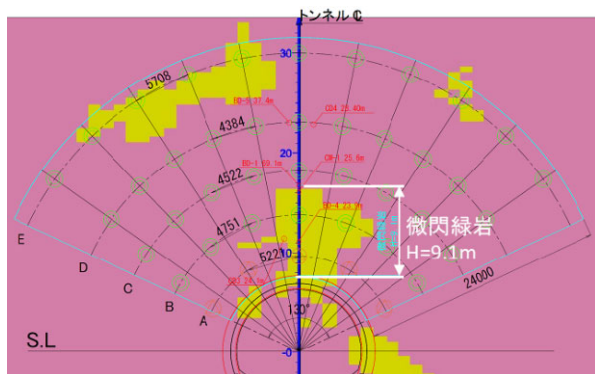


図-5 削孔エネルギーによる岩塊規模推定

(2) 終点（中川町）側

一方、終点側は工事用道路の造成より着手し、起点側より遅れること1年、2011（平成23）年5月よりトンネル準備工として、坑口部の盛土、地盤改良および仮設備を設置、同年9月よりトンネル掘削を開始した。トンネルは掘削当初より不安定な地質が分布し、切羽の崩落、収束しない変位に伴う吹付けコンクリートの変状やロックボルトの変形が終点側坑口からTD=500m（SP=10,988；図-2の④）付近まで続き、インバート吹付けやインバートストラットなどの対策を講じて施工を行った。その後、地山は好転し標準パターンでの施工が可能となったものの長くは続かず、終点側坑口からTD=750m（SP=10,738）付近より多亀裂部、破碎され粘土化した脆弱な岩盤（泥岩）が出現した。度重なる切羽崩落や天端の抜け落ち、変位の増大による支保の変状（写真-4）などが発生したことから、掘削時の計測結果を用いた解析的手法を用いた支保設計を行い、二重支保構造が必要と判断した。

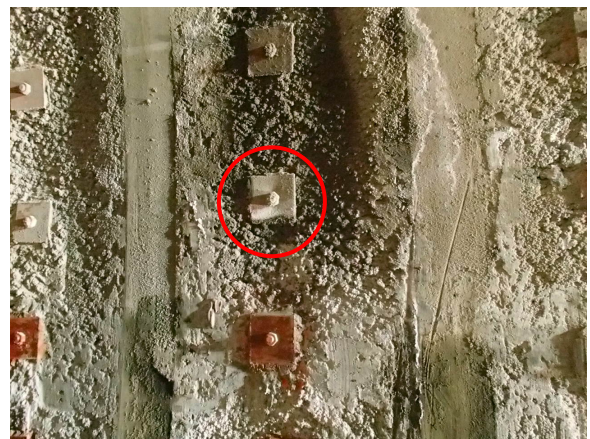


写真-4 終点側での支保変状状況（赤枠内）

この脆弱な状況は終点側坑口からTD=1,485m（玄武岩・ハイアロクラスタイト境界部、SP=10,003；図-2の⑤）まで続いた。この2度目の難所突破後、終点坑口からTD=2,566m（SP=8,922）までは、一部でインバート吹付けや増しロックボルトを必要とする区間があったものの、標準の支保パターン（DI, DII）での施工が可能であった。その後、先進ボーリングにおいて緑色岩化した玄武岩質ハイアロクラスタイトが主体となる岩盤を確認した（写真-5）。当該地山ではボーリングの孔壁が非常に崩壊しやすく、ケーシング（鋼管）による孔壁保護を行いながら調査を実施したが、1回あたりの調査延長は最大でも30m程度と短かった。また、全体的に緑の変色が強く、ボーリングコアは粘土混じり礫状が主体であり、網状に分布する割れ目面は鏡肌で条線が明瞭な箇所が多い状態であった。さらに、RQD(5)の平均値は9%程度で、0%となる箇所が過半数を占める状況（地山等級「E」）であったことから、標準的な支保パターンでの施工は困難と判断し、支保設計を余儀なくされた。

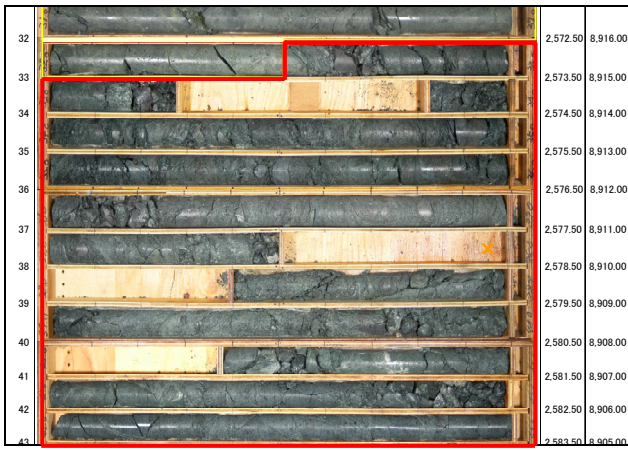


写真-5 緑色岩化したボーリングコア

特に終点側坑口よりTD=2,625m (SP=8,863 ; 図-2の⑥)以降では、土被りの増加に伴い緑色岩化による変質が顕著な脆弱部の範囲が拡大していき、断面閉合後の内空変位の収束性が悪く、吹付けコンクリートの浮きやロックボルトの破断が確認された。そのため、支保部材の初期剛性および部材耐力を高めた支保パターン (図-6) と補助工法の施工方法の見直しによる切羽安定対策により掘削を行った。

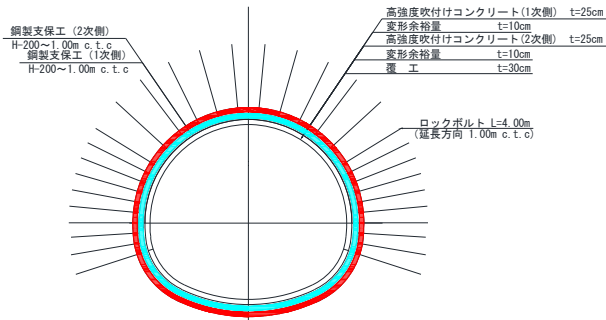


図-6 代表的な支保パターンの例 (終点側二重支保工)

その後の施工においては支保部材に変状等は確認されず、安定した支保構造を構築することができた³⁾。

トンネルはこの地質条件ならびに支保構造での貫通となることから先進ボーリング、切羽観察および計測結果など総合的な観点より、起終点間の離隔を十分確保したうえでインバート部が比較的硬質で切羽の安定が見込

まれる位置 (SP=8,738, 終点坑口からTD=2750.5m) を貫通点と定めた。そして2019 (令和元) 年12月に切羽は到達、起点からの貫通を待つこととした。

(3) 再掘削完了から貫通

蛇紋岩区間で発生した変状の発端となった切羽位置 (SP=8,591 ; 図2の②) は蛇紋岩と玄武岩との地質境界部付近であった。当該切羽近傍では、調査ボーリングや近傍の切羽観察の結果から、玄武岩から変質した緑色岩起源の断層破碎帯が切羽に対して低角 (見かけ傾斜30°程度) で分布していることが確認されており、強大な地圧による変状発生要因の1つであることが推定された

(図-7) .断層破碎帯区間の原位置試験による地山物性値は、蛇紋岩区間での支保設計で採用している変形係数 $E=150\text{MPa}$ に対して約80%程度の値であり、極めて脆弱であることが確認された。以上より、本坑断面から断層破碎帯の離隔 (土被り) が本坑1D程度 (Dはトンネル直径) となる区間を断層破碎帯影響範囲「蛇紋岩境界部」と位置づけて掘削方法の検討を実施した。結果、初期変位速度の増大、切羽の自立性の不安定化、想定以上の作用土圧の発生等が懸念されたため、これらのリスクを低減することを目的として中央導坑先進工法を採用した。蛇紋岩区間の本坑支保構造の設計については、時間依存性の発生応力増加分を考慮した真円三重支保構造としているが、中央導坑の支保構造については、短期間で幅掘削へ移行することを考慮し、時間依存性の応力増加分を加味しない本坑二重支保相当の最大支保内圧を確保するものとした (図-8)⁴⁾。

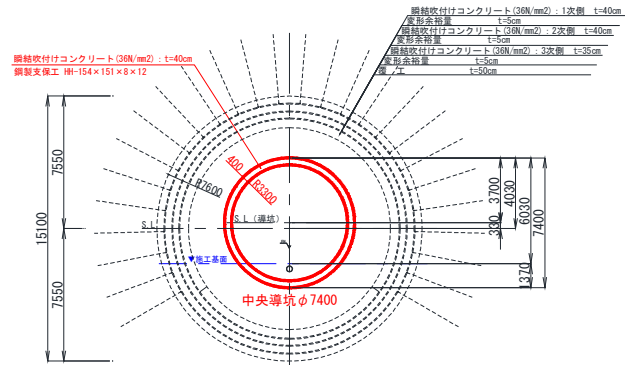


図-8 中央導坑支保パターン

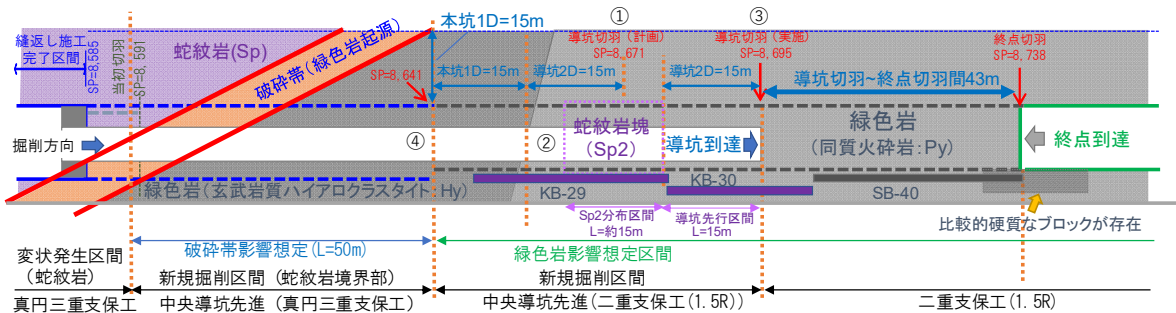


図-7 想定地質分布図 (蛇紋岩境界部)

中央導坑は2019（令和元）年10月より掘削を開始し、断層破碎帯を細心の注意のもと通過し、当初の計画位置（破碎帯が天端方向本坑1Dかつ延長方向本坑1D+導坑2D）であるSP=8,671（図-7の①）に向けて順調に掘削を行っていた。しかしながら、先進ボーリング（KB-29）により新たな蛇紋岩を確認（図-7の②）したことから導坑区間を延長した。その後の調査において、この蛇紋岩は局所的なものと確認されたことからSP=8,695までを導坑先進区間（図-7の③）とし、2020（令和2）年2月に到達した。中央導坑掘削完了後、真円三重支保による拡幅掘削（写真-6）に移行し、蛇紋岩境界部にて想定されたリスクに対し、切羽観察や変位計測、支保の発生応力に注視しながら慎重に施工を進め、2020（令和2）年6月に蛇紋岩境界部（SP=8,641；図7の④）を無事突破した。



写真-6 中央導坑先進工法による本坑拡幅掘削

その後、切羽は緑色岩化した脆弱な玄武岩質ハイアロクラスタイトとなり、インバート形状1.5Rの二重支保工により掘削を実施、同年9月に中央導坑先進区間の拡幅掘削が完了（図7の③；貫通点まで43m）した。そして、2020（令和2）年11月20日、終点側の掘削完了位置に到達、JVならびに現場従事作業員が見守るなか、無事貫通（写真-7）を迎えた。



写真-7 貫通の瞬間

3. 蛇紋岩区間における覆工設計および施工

(1) 覆工設計について

蛇紋岩区間における支保部材の設計は、時間依存性挙動に応じた増分変位・応力に対して耐力を保持した真円三重支保構造を採用することで、トンネルの安定性を確保している。このため、覆工は時間依存性挙動を含めた作用土圧に対する耐力は考慮せず、不確実性に対する安全性の担保とすることを基本的な考え方とした。ただし、覆工は支保工の構築後に連続して施工されるため、時間依存性挙動に応じた変位・応力の影響を受けることは避けられず、蛇紋岩区間の覆工には、時間依存性変位・応力の増分に対して力学的機能を保持した構造を設計する必要があった。そこでトンネル掘削時の変位計測データ（A計測）から時間依存性変位速度と覆工打設後の増分変位量を算出し、FEM解析により覆工に発生断面力を予測し、覆工の仕様（覆工厚さ： $t = 500\text{mm}$ 、鉄筋：D16@250mm（内空側・地山側））を決定した。

(2) インバートの施工について

真円三重支保における覆工およびインバートはいずれの断面においても同一の設計断面耐力を有する構造である。蛇紋岩で適用した真円三重支保のインバートは標準のインバートと比べ床付面が深く、コンクリートの打設量が多くなるため、施工を3分割（図-9）とした。このうち、インバート②および③の施工において、側壁部の鉄筋組立には専用の移動式足場台車（写真-8）を導入、また型枠には標準の木製型枠に変えて脱型不要の埋設型枠（写真-9）を採用し、省人化、省力化を図った。

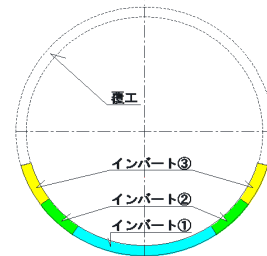


図-9 インバートの施工（3分割）

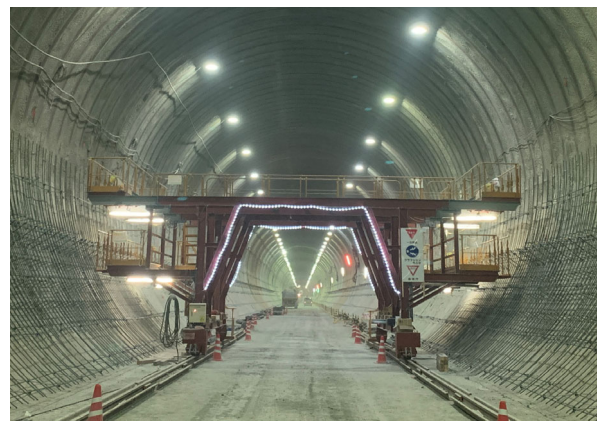


写真-8 移動式鉄筋台車



写真-9 埋設型枠によるインバート施工状況

(3) 覆工の施工について

複鉄筋区間の覆工では、吹上げ時に鉄筋がコンクリートの充填に支障をきたす可能性があり、特に天端部におけるコンクリートの充填を確認しながら施工を進めることが密実なコンクリート打設に重要となった。そこで、複鉄筋区間においては天端部3か所にコンクリートの充填性を視認できる振動デバイス（ジューテンダー）を設置して充填性を確認することとした。この振動デバイスは空気、ブリージング水、コンクリートの識別が可能であるため、目視が困難な覆工型枠内部の充填を確認しながら施工を進める事を可能とした（写真-10）。また、覆工厚が500mmと大きいことで、標準部に比べて打設数量が1.7倍となり、打設時間が長くなるため、3日に1回の打設を標準サイクルとして脱型強度を確保した。

なお、覆工は2022（令和4）年2月完了予定である。今後、覆工打設後においても支保部材や構造物に発生する応力および内空変位を継続的に把握していく。

なお、詳細な設計手法と施工方法については別稿（大場北斗，中村順一，大久保証一郎；「時間依存性変位を考慮した覆工設計と施工について—一般国道40号音威子府村音中トンネルの施工報告—」）にて報告しているのでそちらを参照願いたい。



写真-10 覆工充填確認状況

4. おわりに

2010（平成22）年3月に着工した音中トンネルは2021（令和4）年3月遂に竣工を迎える予定である。トンネル掘削は起点のみならず終点においても脆弱な地質が広範囲に分布し、様々な事象に直面、掘削に困難を要した。そのなかでも特に蛇紋岩が分布するトンネル史上まれに見る強大な地圧下において、真円三重支保工や中央導坑先進工法の採用など様々な取組みにより無事、トンネル掘削を実現することができた。さらに覆工についてもトンネル掘削施工時の計測データから時間依存性変位の発生量を求め、支保工・覆工の合成部材に発生する応力挙動を再現解析により推定し、覆工構造の決定を行うなど数々の技術的課題を克服してきた。このような様々な取組みが今後のトンネル工学の発展に寄与することを祈念している。最後に本報告に際して多大なるご助言とご協力を頂いた関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 荒川大輔，楡井賢司，今野秀一，蛇紋岩地質の強大な地圧による変状について—一般国道40号音威子府村音中トンネル—，第59回北海道開発技術研究発表会論文，2015.2
- 2) 中村順一，松尾勝司，大久保証一郎，淡路動太，大規模変状が発生した蛇紋岩地山を真円三重支保で突破—国道40号音威子府バイパス音中トンネル—，トンネルと地下vol153，2022.1
- 3) 小川修，高橋民雄，松尾勝司：緑色岩区間におけるトンネル支保構造の検討について—一般国道40号音威子府村音中トンネルの施工報告—，第64回北海道開発技術研究発表会論文，2020.2
- 4) 高橋民雄，小川修，大久保証一郎：強大な地圧想定区間における中央導坑先進工法の施工について—一般国道40号音威子府村音中トンネルの施工報告—，第64回北海道開発技術研究発表会論文，2020.2