

小土被り低強度地山の早期閉合トンネル挙動 と長距離巻出工の施工

村井 博¹・新宅 正道²・仁義 水緒³・石黒 聡⁴・楠本 太⁵

¹札幌市 建設局 土木部 工事課 (〒060-8611 札幌市中央区北1条西2丁目)

E-mail:hiroshi.murai@city.sapporo.jp

²正会員 清水建設(株) 土木部 (〒060-8617 札幌市中央区北1条西2丁目1札幌時計台ビル)

E-mail:shintaku@shimz.co.jp

³正会員 清水建設(株) 土木技術部 (〒060-8617 札幌市中央区北1条西2丁目1札幌時計台ビル)

E-mail:m_jingi@shimz.co.jp

⁴正会員 清水建設(株) 土木技術部 (〒060-8617 札幌市中央区北1条西2丁目1札幌時計台ビル)

E-mail:akira.ishikuro@shimz.co.jp

⁵正会員 清水建設(株) 土木技術本部 地下空間統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2丁目16-1)

E-mail:kusumoto@shimz.co.jp

盤溪北ノ沢トンネルは、札幌市の道路ネットワークを形成する幹線道路道道西野真駒内清田線のこばやし峠区間に新設する延長1 612mの歩道付2車線道路トンネルである。到達側（盤溪側）のトンネル掘削において、切羽の崩落や過大な天端沈下、脚部沈下が発生したことから、安定確保方法として補助工法および補助ベンチ付き全断面早期閉合法を採用した。また、北ノ沢側の小土被り区間では、開削によりアーチカルバートを構築して埋戻しを実施した。巻出工の延長は140mであり、アーチ形状、ヤード等の与条件から移動式全断面外型枠（以下アウトセントル）を採用した。

本稿は、補助ベンチ付き全断面早期閉合法によるトンネルの力学的安定性とアウトセントルを使用した巻出工の施工実績について報告するものである。

Key Words : Early ring closure, full-face tunnel excavation, long distance cut and cover

1. はじめに

盤溪北ノ沢トンネルは、札幌市の道路ネットワークを形成する幹線道路道道西野真駒内清田線のこばやし峠区間に新設する延長1 612mの歩道付2車線道路トンネルである（図-1）。



図-1 盤溪北ノ沢トンネル位置図

トンネル工事は、2011年10月に着手、2012年3月に北ノ沢側より掘削を開始し、2014年10月に貫通した。

到達側（盤溪側）では、切羽の崩落や過大な天端沈下、脚部沈下が発生したため、補助工法および補助ベンチ付き全断面早期閉合法を採用した。

また、北ノ沢側における延長140mの巻出工では、施工ヤードの制約や労働力、工程の確保などの課題を考慮して外型枠に移動式全断面外型枠（以下アウトセントル）を採用した。

本稿は、補助ベンチ付き全断面早期閉合法によるトンネルの力学的安定性とアウトセントルを使用した巻出工の施工実績について報告するものである。

2. 工事概要

工事概要を表-1に示す。また、図-2にトンネルの標準断面図を示す。

表-1 工事概要

工事名称	社会資本整備総合交付金事業 道道西野真駒内清田線 (こばやし峠) トンネル新設工事
発注者	札幌市 建設局 土木部 工事課
施工者	清水・堀口特定共同企業体
工期	平成23年10月23日 ～平成28年3月25日
工事内容	トンネル延長 1,612m (掘削延長 1,455.5m) 掘削断面積 CⅡ 76.4 m ² 防災等級 第3種第2級A等級 縦断勾配 i=3.07% 平面線形 R500 L=192.5m R400 L=236.52m 直線 L=1,182.98m (緩和曲線含む) 坑門工(盤溪側) : 16.5m 巻出工(北ノ沢側) : 140.0m 覆工 : 1,455.5m インバート工 : 1,017.5m 非常駐車帯(26m) : 2ヶ所 掘削方法: 発破掘削, 機械掘削 補助工法: AGF : 14ｼﾌﾄ@29.5本 長尺鏡ぶち : 10ｼﾌﾄ@17.5本 全面接着式FP, 鏡吹付け

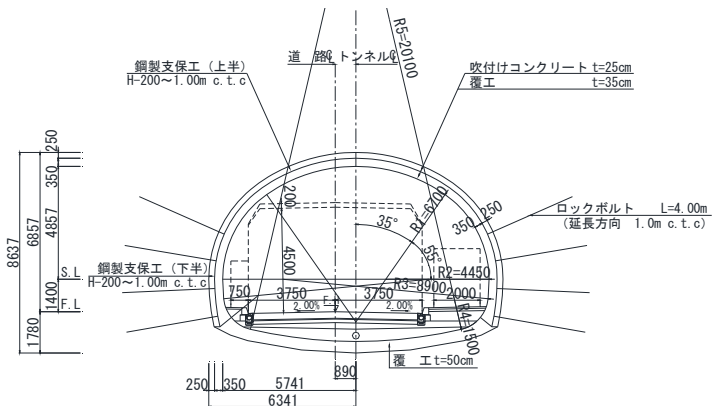


図-2 標準断面図 (DIIIa)

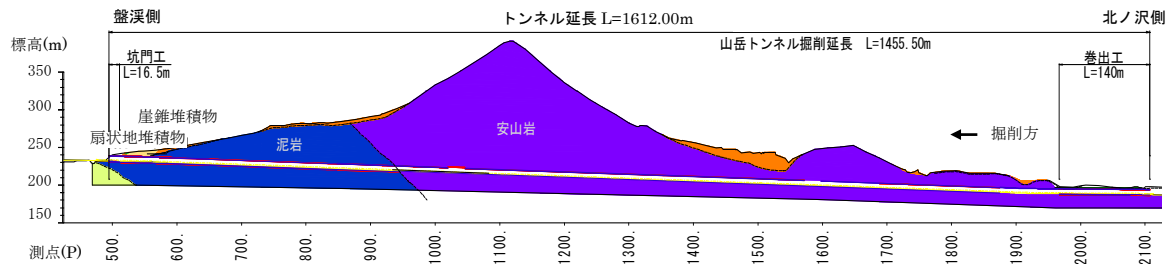


図-3 地質縦断面図

盤溪北ノ沢トンネル周辺の地質は、北ノ沢側に新第三紀の安山岩が分布しており、緻密かつ硬質な岩質を主体としている。盤溪側は、新第三紀の泥岩を基盤とし、それを覆うように第四紀の崖錘堆積物、扇状地堆積物といった未固結堆積物が分布している。基盤岩である泥岩は、無層理塊状で軟質であり、表層部には風化帯が形成され、その程度は強風化～弱風化に区分される。強風化帯は、N値が10～20程度の礫混じり土砂状、中風化帯は、岩片自体が軟質化した脆弱な岩相を示し、グラウンドアーチ形成による自立安定性が困難な低強度地山である(図-3)。

3. 小土被り低強度地山のトンネル施工

(1) 安定確保の考え方

測点P704の泥岩地山の切羽では、岩塊が抜け落ちる切羽崩壊が生じた(写真-1)。

測点P572の以奥では、約7mの小土被りであるが、必要内空断面図確保が困難な過大沈下が発生した(図-4、図-5)。

これらの対策として、岩塊の抜け落ちについては掘削補助工法を採用した。また、過大な沈下に対しては、リング構造の早期閉合トンネルを設計し、早期閉合距離Lfを6mとする補助ベンチ付き全断面早期閉合工法を採用してトンネルの力学的安定を確保した。



写真-1 切羽崩落状況 (測点 P704)

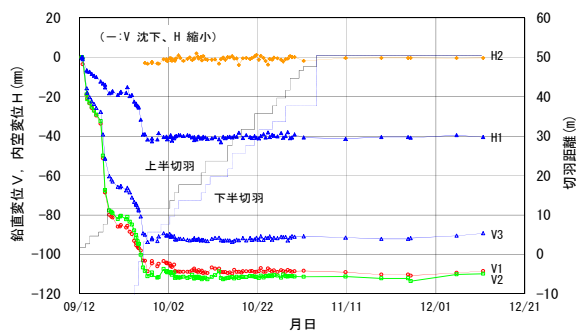


図-4 トンネル変位経時変化 (測点 P561)

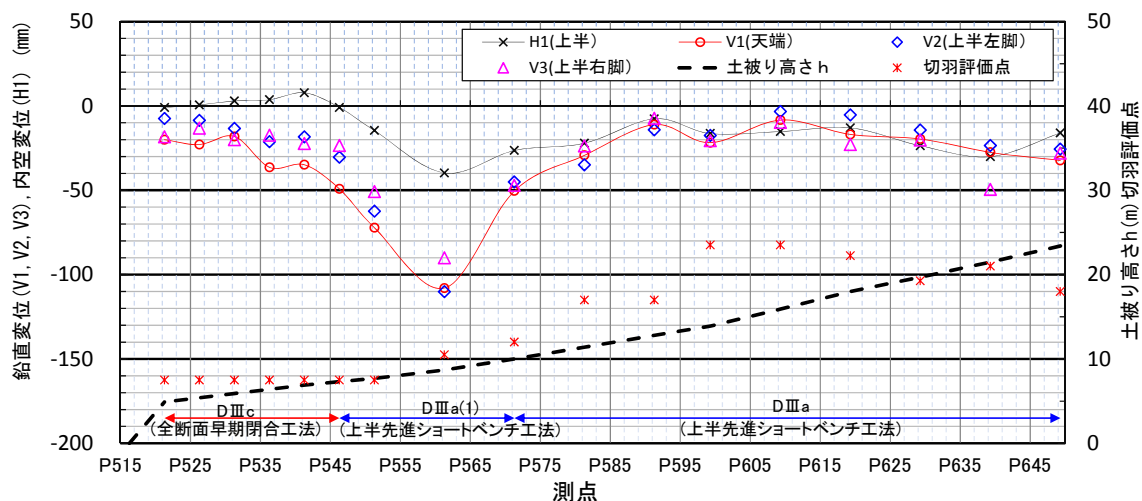


図-5 実施支保パターンと鉛直、内空変位、切羽評価点関係図

(2) 早期閉合トンネル構造

測点P546.30までの施工は、掘削補助工法を併用する標準支保パターンDIIIaと計測結果に応じてインバート吹付けと鋼インバート支保工による断面閉合によりトンネルの安定を確保したDIIIa (1) パターンであった。両パターンともに上半先進ショートベンチ工法を基本とした (図-5、表-2)。

測点P561.30において水平変位に対して鉛直変位が卓越する過大沈下が発生したため、トンネル支保耐荷力をDIIIaと同等の早期閉合パターンDIIIcを設計した (図-6)。

この早期閉合構造は、インバート吹付けと鋼インバート支保工からなり、トンネル支保構造と同じ部材仕様である。早期閉合構造半径比 $r1/r5$ ($r1$: トンネル構造半径, $r5$: 早期閉合構造半径) は、作用土圧 ($=\gamma H$ γ : 泥岩の単位体積重量 20.7kN/m^3 , H : 土被り 10m 以下) が最大 0.2N/mm^2 以下と推定されるので、厚肉円筒理論¹⁾より、耐荷力 ($=Ac \times f'_{ck}/r5$, Ac : 吹付けコンクリート断面積, f'_{ck} : 設計基準強度) が 214kN/m^2 となる $r5/r1=3.0$ を採用した。

掘削補助工法は、地山性状に応じて選択し、天端素掘り面の安定確保と先抜けの防止、切羽の自立安定を確保することとした (表-3)。

●トンネル変位 (→: 矢印の方向, V: 下方, H: 縮小)
V1: 天端沈下, V2: 上半左脚沈下, V3: 上半右脚沈下,
H1: 上半内空変位, H2: 下半内空変位

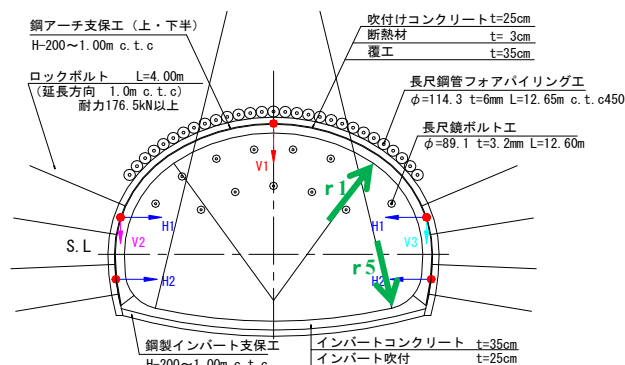


図-6 早期閉合トンネル構造概要と計測工測点位置 (DIIIc)

表 - 2 トンネル構造諸元

支保パターン		早期閉合パターン DⅢc	標準支保パターン	
			DⅢa(1)	DⅢa
掘削工法		補助ベンチ付き全断面早期閉合工法	上半先進ショートベンチ工法	
最大土被り高 h(m)		7m	25m	
想定地山強度比 cf(-)		<1	<2	2<
変形余裕量(cm)		0	0	
一掘進長(m)		1.00	1.00	
トンネル 支保 構造	吹付け厚 (cm)*1	25	25	
	吹付け補強	—	—	
	鋼アーチ支保工	NH200	NH200	
	ロックボルト耐力	176.5kN 以上	176.5kN 以上	
	ロックボルト本数	L=4m(8 本)	L=4m(8 本)	
早期 閉合 構造	吹付け厚 (cm)*1	25	25	—
	鋼インバート支保工	NH200	NH200	—
	構造半径比 (r5/r1)	3.0	3.0	—
	早期閉合距離 Lf(m)	6	25~70	25~70
覆工巻厚 t(cm)*1		35	35	

*1 設計基準強度 f' ck=18N/mm² (28 日)

表 - 3 掘削補助工法

名称	対象	仕様
充填式フォアポーリング	天端素掘り面岩塊の安定	鉄筋 D25, ctc600
注入式長尺鋼管フォアパイリング	天端素掘り面の安定, 先抜け	φ 114.3, t=6, L=12650, ctc450
鏡吹付け	上半切羽の肌落ち防止	t=50
注入式長尺鏡ボルト	上半切羽の安定	φ 89.1, t=3.2, L=12600, ctc1500

(3) 施工方法

トンネル掘削は一掘進長を 1m とし, 2ton ブレーカーによる機械掘削を行った。標準パターン DⅢa および DⅢa (1) は, 上半先進ショートベンチ工法であった。

DⅢa (1) は, 計測結果により, 下半掘削と同時に断面閉合を行った。早期閉合パターン DⅢc は, 上半ベンチ長を 4m とする補助ベンチ付き全断面工法であった。早期閉合距離は Lf=6m とし, 上半 2m 掘削後, 下半 2m, 早期閉合 2m の交互施工であった。

(4) 施工結果と考察

計測工 A 断面は, 進行方向 5m 間隔に設けた。トンネル変位は, 上半 3 測点, 下半 2 測点を設け, 3 次元自動測定システムを用いて, 6~12 時間毎に自動測定した (図-6)。トンネル変位データ (図-7~図-10) から, 以下の知見を得た。

1. 過大なトンネル沈下が生じた測点 P561 の DⅢa と測点 P536 の DⅢc の地山条件に有意な差はないが, Lf=6m の全断面早期閉合工法の DⅢc は, トンネルの安定が確保され, トンネル変位は抑制された (図-7)。

2. 上半ショートベンチ工法のトンネル変位は, 定性的評価法である切羽観察の評価点が 15 を下まわると, 水平変位に対して鉛直変位が卓越した (図-8)。

3. 各支保パターンの計測結果を比較した。DⅢa のトンネル変位は, V1 は -40mm 以下の沈下, H1 は -30mm 以下の縮小であった。DⅢa (1) は, 大きく変形が起こった後に閉合を実施し, トンネルを安定化させた。DⅢc の V1 は -50mm 以下の沈下, H1 は 10mm 以下の拡大であり, トンネル変位は抑制されていた (図-9)。

4. リング構造の DⅢc は, アーチ構造の DⅢa に比べて, トンネルの安定性は高く, トンネル変位の収束距離は 13m 程度であった (図-10)。

以上から, 早期閉合トンネル DⅢc は, 小土被り低強度地山のトンネル支保パターンとして有効であり, 全断面早期閉合工法はトンネル施工を確実にできた。また, 長尺鋼管先受け工と長尺鏡ボルトおよび鏡吹付けの掘削補助工法は, 掘削素掘り面の自立と切羽の安定確保に有効であった。

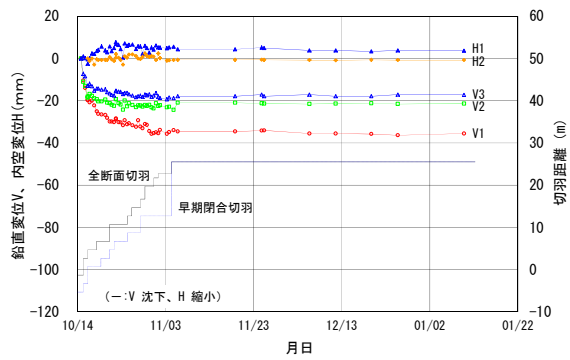


図-7 早期閉合トンネル変位経時変化
(DIIIc, P536)

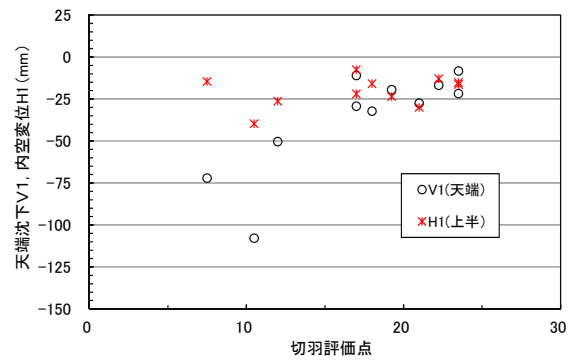


図-8 切羽評価点とトンネル変位
(上半先進ベンチカット工法)

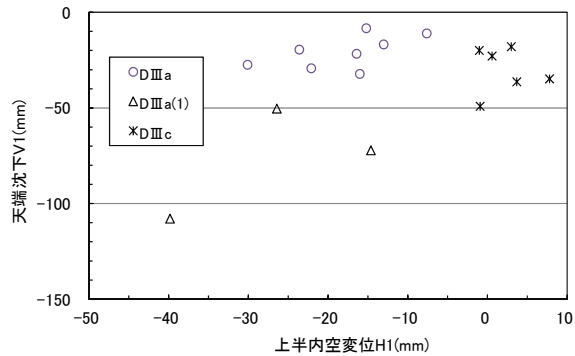


図-9 H1 と V1

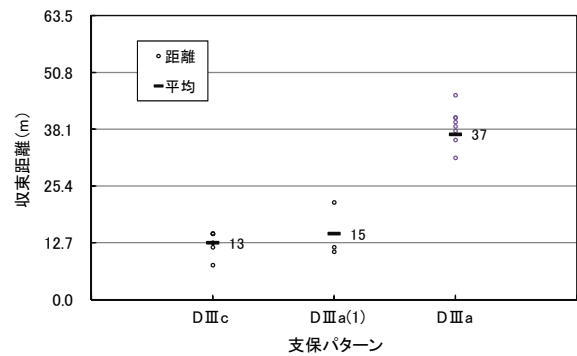


図-10 トンネル変位収束距離

4. 長距離巻出工の施工（北ノ沢側）

盤溪北ノ沢トンネルは、北ノ沢側に 140m の巻出工が計画されていた。延伸方法は、場所打ちアーチカルバートとし、内型枠は覆工で使用するスライドセントル（以下インセントル）を用いた。外型枠に

ついては、スライドセントル（以下アウトセントル）を製作、使用した。本章では、巻出工の施工上の課題やその施工方法について述べる。

(1) 巻出工概要

巻出工の縦断、平面図を図-11 に、断面図を図-12 に、構造仕様を表-4 に示す。

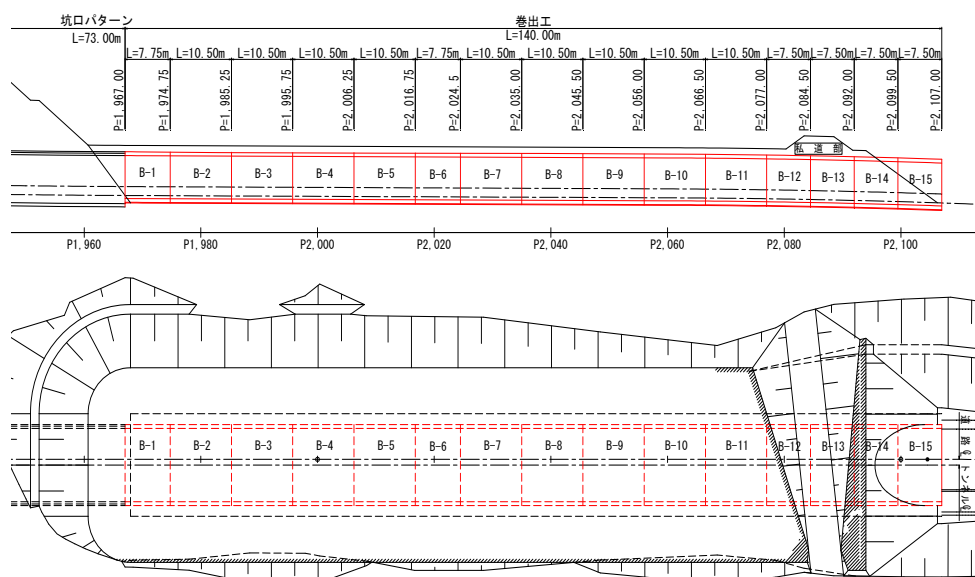


図-11 巻出工縦断、平面図

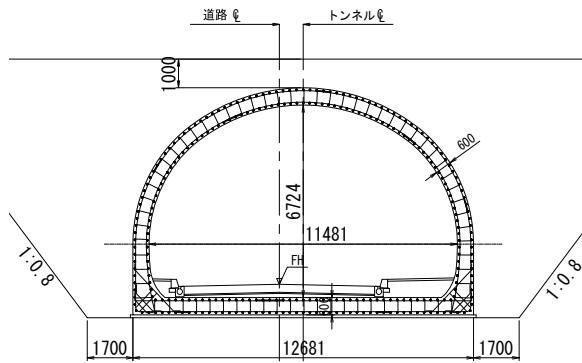


図-12 巻出工断面図

表-4 巻出工仕様

ブロック	標準	調整	私道横断
ブロック長	10.5m	7.5m, 7.75m	7.5m
延長	94.5m	30.5m	15m
ブロック数	9	4	2
防災箱抜 (背面突出)	5箇所	2箇所	-
巻厚	600mm		
コンクリート 配合	24-8-40 BB		
鉄筋	主筋: D19 配力: D16	主筋: D32 配力: D16	
鉄筋芯かぶり	100mm		

(2) 巻出工の施工上の制約と課題

延長 140m, 計 15 ブロックのアーチカルバートを施工するにあたり, 施工上の制約と課題を以下に述べる。

a) 狭隘な施工ヤード

左右が法面に囲まれており, 躯体外面から法尻まで 1.7m と狭隘な作業ヤードに躯体を構築する必要がある。また, 法肩から上は, 雑木林で民有地でもあるために重機, 車両の乗り入れができない。さらに, トンネルは線状構造物であり, 他の坑内作業を並行して実施するため, 走路の妨げとなるラフタークレーンを作業ヤード中央に配置することが困難である (図-12, 写真-2)。



写真-2 巻出工縦断・平面図

b) 労働力の確保

a) の理由から, 足場工や鉄筋工を先行して施工することが困難で, 1 ブロック毎に「内型枠→足場組立→鉄筋組立→足場盛替→外型枠→打設→型枠解体→足場解体→移動」を 1 サイクルとして施工する必要がある。ラフタークレーンの設置が困難なため, 資材などは人間の手で運ぶ必要があり, 鳶工と型枠大工を通常以上の人数を確保しなければならない。

c) 工程の確保

冬期間の気温低下や養生の必要性に加え, 積雪による雪崩が懸念されることから, 置換えコンクリート, 底版部を含め 3 月～11 月の期間内に施工完了する必要がある。

一般的なトンネルの巻出工の施工は, 内型枠には覆工のインセメントもしくは, 簡易的なバラセメントルを用いる。また, 外型枠には, 木型枠かユニット式の鋼製型枠を採用する。施工日数は, 資材揚重用のラフタークレーンを常設可能なヤードを有する有利な条件においても, 1 ブロックに付き 10 日～2 週間弱掛かるのが通例である。本トンネルに仮定すると, 15 ブロックのアーチ部の構築のみで最短でも 7.5 ヶ月を要し, 冬期施工を余儀なくされる。

上記の施工上の制約と課題を克服するために, 本トンネルにおいては, アウトセメントルを採用した。以下に, その利点を述べる。

(3) アウトセメントルの利点

a) 狭隘なヤードでも通行を妨げない

アウトセメントルの断面図を図-13 に示す。

剛性の高い外部足場が外型枠と一体となる構造を設計した。組立, 解体時に 60 t 級ラフタークレーンを正面に配置する必要があるため, 数日間のみ通行止めが発生したが, 躯体施工のサイクルにおいては, 大掛かりな揚重作業は発生しなかった。さらに全線 140m において, アウトセメントル用のレールを事前に敷設することで, 都度の揚重, 設置作業を回避し, 通常作業においては, 自走モーターによる移動のみとして, 大型重機での牽引のような通行の妨げとなる作業を軽減させた。

設備配置図を図-14 に示す。全ての設備を内部通過型とすることで, 坑内での非常駐車帯区間の覆工および舗装工や排水工との並行施工を可能とした。

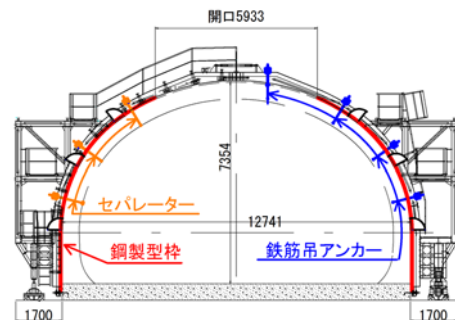


図-13 アウトセメントル断面図

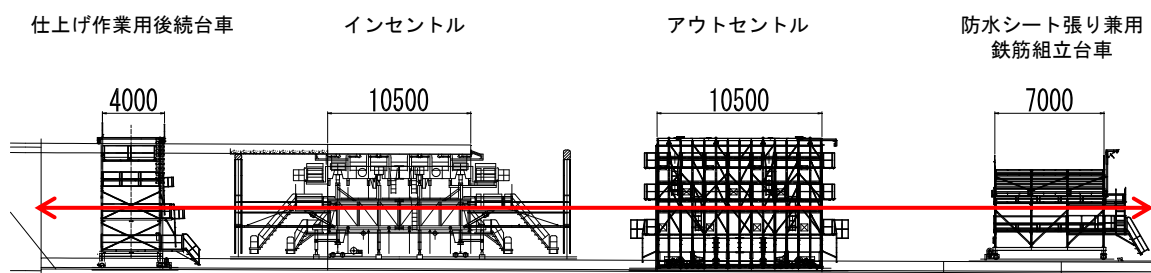


図-14 設備配置図

b) 最小限の労働力で施工可能

一般的な巻出工の施工における足場の組立、盛替、解体作業が不必要なため、躯体の施工前および完成後の台車関係の組立解体のみとなり、鳶工を手配した。

1ブロックにおける鳶工の歩掛りを組立（2日×6人工）、盛替（1日×6人工）、解体（2日×6人工）の30人工とすると、15ブロックで450人工となる。アウトスライドセントルの歩掛りは、組立（7日×6人工）、解体（7日×6人工）計84人工となり、約20%の労働力で施工可能である。型枠大工に関しては、1ブロックに対し、組立（2日×6人工）、解体（1日×6人工）計18人工、15ブロックで270人工となるが、アウトセントルにおいては必要ない。

鉄筋の組立を除いた型枠の据付、固縛、コンクリートの打設といった一連の作業を、覆工コンクリートと同様の配員（6名程度）で施工することが可能となった。

c) 施工サイクルを確立して工程を確保

外型枠は、一般的に拱頂部に型枠がなくオープン形状である。トンネル坑内の覆工コンクリートと同様に施工サイクルを確立するため、アウトセントルに風雨防止用の屋根を掛け、全天候型にした（写真-3）。

また、構造鉄筋の組立をトンネル坑内と同様の吊鉄筋方式として計画した。一般的には、インセントルを据え付けた後に、セントル上に鉄筋を組み立てていくが、別途、鉄筋組立外部足場が必要となる。しかし、アウトセントルによる吊鉄筋方式とすることで、坑内で使用していた防水シート張り兼用鉄筋組立台車が使用可能となり、鉄筋組立外部足場の省略による工程短縮と坑内と同様の作業による鉄筋工の熟練度向上が組立サイクルの短縮に寄与した（写真-4、図-15）。

さらに、外型枠自体の剛性が高いことで、内型枠と連結するセパレータの本数を木型枠の半分に低減することができ、施工速度向上に繋がった。

施工サイクルを確立することで、労務と材料の先行手配ができ、確実な工程管理を実施した。

これらの結果から、1ブロックを7日で構築するサイクルを確立し、一般的な巻出工に比べ、1ブロックあたり4日以上工程短縮を行った。15ブロック全体では、実働で60日、休日を含めると2.5ヶ月の短縮ができた（図-16）。



写真-3 全天候型養生



写真-4 吊鉄筋方式組立完了

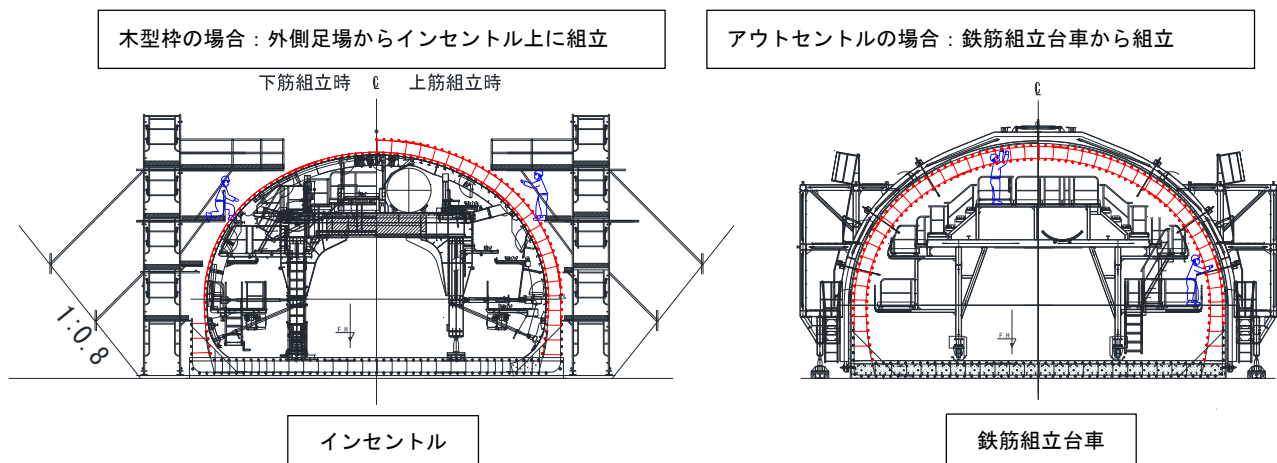


図-15 鉄筋組立方法の比較

木型枠の場合

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
インセントルセット、セパレーター取付、測量																						
足場組立																						
鉄筋																						
足場撤替																						
型枠、打設準備																						
打設																						
養生、型枠解体																						

アウトセントルの場合

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
アウトセントルセット、セパレーター取付、測量																						
シート張り兼用鉄筋組立台車移動																						
インセントルセット、妻型枠、打設準備																						
打設																						
養生、型枠解体																						

4日の短縮

図-16 1ブロックあたりの施工サイクル比較

(4) 巻出工の創意工夫

アウトセントルを採用するにあたって実施した創意工夫について、以下に述べる。

a) コンクリート配合の工夫

巻出工の設計配合は、24-8-40 BB (RC-2-1) である。アーチカルバートは、矩形カルバートと違い、曲率が付いた型枠にコンクリートを打込むため、形状に追随する高い流動性が必要である。私道交差部においては、構造鉄筋として、D32 が複鉄筋で配置されており、スターラップも配筋されているため、充填不良を引き起こす危険性がある。さらに、打ち上がり高さ 4m 程度までは、覆工コンクリート同様にインセントルからの配管による圧送方式の打込みとなり、ポンパビリティーの低下から閉塞の恐れもある。また、高炉セメント B 種 (BB) は、普通ポルトランドセメント (N) に比べ、凝結初期の硬化熱が低いことから、春季および秋季・初冬の強度発現に影響し、工程を遅延させる懸念がある。

以上の懸念事項から巻出工のコンクリート配合を 27-18-20N (JIS 規格品) に変更承諾して、施工した。その結果、締固め不良、配管閉塞、初期強度不足のような不具合の発生なく構築を完了できた。

b) 巻出工背面の防災箱抜突出部の工夫

アウトセントルの採用にあたり、最も検討が必要

となった事項として、防災箱抜の背面側突出部の施工が挙げられる。アウトセントルは、脱型時に左右両脚部の支点のみで自立し、さらに型枠据付時には、構造鉄筋を吊った状態で型枠形状を保持できる剛性を持ち合わせなければならないため、簡単な改造などでは型枠を組み替えられない重構造である。仮に組み替えるとすれば、相当に大掛かりな組み換えが箱抜ごとに発生することになる。また、全線において箱抜を包括する断面に拡幅して構築するなど検討したが経済性に劣り、かつ構造の再設計などが必要となるため現実的ではなかった。

そこで、鉄筋の機械式継手を採用し、背面側突出部を別施工とすることを試みた。

機械式継手の形状を図-17 に、防災箱抜の継手詳細図を図-18 に示す。

躯体の打設後に打継目のチッピングを行い、接続側の継手付き鉄筋を配置した (写真-5)。箱抜部の打設は、狭隘な作業ヤードのため、躯体本体の施工が進行するとコンクリートポンプ車のブームが届かなくなるため、次ブロックまたは、次々ブロックの躯体打設時に実施した。打継面の外周部には、更なる漏水対策として樹脂コーティングによる外防水を実施した。完成状況を写真-6 に示す。

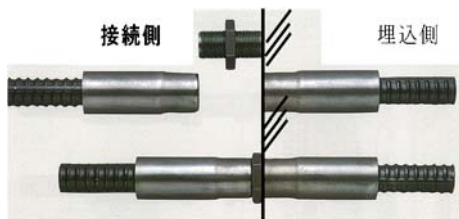


図-17 機械式継手形状

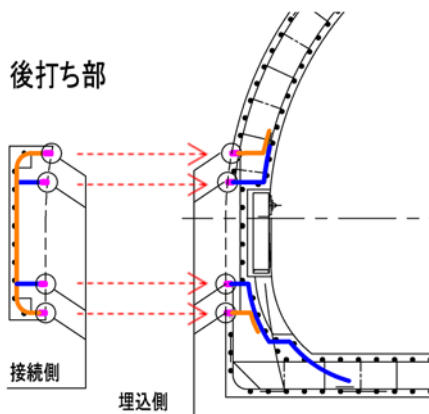


図-18 継手詳細図



写真-5 チッピングと配筋状況



写真-6 背面突出部完成

c) 躯体構築後の仕上げ作業用後続台車の工夫

アウトセントルは、1ブロックを施工するごとに前送りして移動していくため、脱型後のブロックには足場のない状態となる。脱型後には、養生シート敷設、散水、セパレータのモルタル処理、目地部のケレンおよびウレタン吹付による外防水工、突出部のチッピング、配筋、型枠、打設、養生などの構築中の本体躯体より後続の仕上げ作業を並行して実施する必要がある。これらの作業を行うために、別途移動式足場を設置する必要があり自走式の台車を作製した。以下に作製した仕上げ作業用後続台車とその使用状況を示す（図-19、写真-7）。

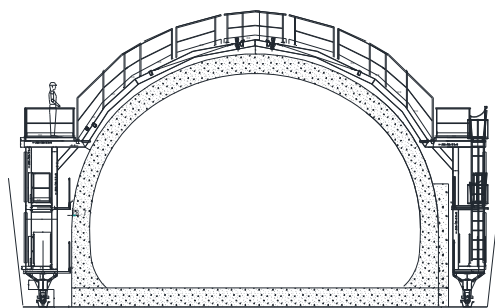


図-19 仕上げ作業用後続台車



写真-7 ウレタン外防水施工状況

(5) 巻出工まとめ

1. アウトセントルを採用することで、クレーン作業を最小限に省力することができ、実質的な通行止めを打設時のみ（写真-8）に留め、坑内作業との円滑な調整が可能となった。比較的施工延長の長い狭隘な作業ヤードにおいては、非常に有効である。
2. 労務状況が逼迫している中で、薦工、型枠大工を極力減らすことができ、最小限の人員でアーチカルバートを構築できた。
3. 全天候型の施工をはじめ、種々の検討により、工程短縮を図った。さらに、施工サイクルを確定することで、確度の高い工程管理を実践し、冬期の前に躯体の構築を完了させることができた（写真-9）。



写真-8 打設状況



写真-9 躯体の構築状況

5. おわりに

本トンネルは、両坑口ともになだらかな傾斜の小土被り区間を、一方は早期閉合と掘削補助工法で、他方は開削アーチカルバートで構築した。当工事の実績が今後の同様な工事に役立てば幸いである。

謝辞：工事の実施にご理解とご協力を頂いた関係各位ならびに地元住民の皆様に心から感謝の意を表します。

参考文献

1) 小川 澄, 楠本 太：早期閉合の効果を施工事例および数値解析より検討, トンネルと地下, vol.43, pp139-147, 2012.2.

(2016.8.5 受付)

BEHAVIOR OF A TUNNEL WITH EARLY RING CLOSURE OF SMALL OVERBURDEN IN THE LOW STRENGTH ROCK MASSES AND CONSTRUCTION OF LONG DISTANCE CUT AND COVER

Hiroshi MURAI, Masamichi SHINTAKU, Mio JINGI
Akira ISHIKURO, Hutoshi KUSUMOTO

BANKEI KITANOSAWA tunnel of 1612m long located in Sapporo City, Hokkaido Prefecture, is a 2 traffic line road with sidewalk. A collapse of tunnel face occurred at the arrival side (BANKEI side). To overcome this trouble, the full face early ring closure method was employed to ensure the stability of the tunnel in the low strength rock masses having no stand-up time. At the KITANOSAWA side, arch culvert were constructed over 140m using full face outside form that is possible to move itself.

This paper reports that mechanical stabilization of the tunnel depends on the full face early ring closure method and construction result of cut and cover.