

覆工コンクリートの天端充てん性と品質の向上への 実験取り組み

Experimental Approach to Improve the Filling and Quality of Lining Concrete at the parts of Tunnel Crown

椎名 貴快*	佐藤 幸三**
Takayoshi Shiina	Kozo Sato
高橋 雅***	金丸 信一****
Masashi Takahashi	Shinichi Kanemaru

要 約

山岳トンネル工事の覆工コンクリート施工では、特に、充てん性や密実性を確保する上で課題となるのは肩部から上方のアーチクラウン部（以下、天端部）での施工である。天端部はパイプレータによる締固め作業がしにくい上、打ち終わり時に充てん状況を目視で確認できないなど種々の制約があり、施工上、現場担当者の経験に頼るところが大きい。そこで、天端部を模擬した実大規模の型枠を作製し、コンクリートの充てん圧力や締固め、トンネル縦断勾配といった施工条件を実験項目とした検討をおこなった。本稿では、覆工コンクリート天端部における充てん性と均質なコンクリートの確保に必要な施工方法について実験で得られた結果を報告する。また、中流動覆工コンクリートの充てん品質についても併せて報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 覆工コンクリート天端部の施工性確認実験
- § 3. 中流動覆工コンクリートの施工実験
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

山岳トンネル二次覆工コンクリートの施工では、特に天端部において、締固め作業が困難で、充てん状況を目視確認できないため、現場担当者の経験に頼るところが大きい。そのため、充填不足による背面空洞の発生や密実性の低下など品質面での不具合を生じる場合がある。

そこで、過去の施工実績などで充てん性の向上や覆工コンクリートの高品質化・均質化に寄与すると評価された技術を選定し、それらの効果を施工実験で確認することで、より品質の高い覆工コンクリートを施工するための方法について検討した。またここ数年、適用件数が増加している中流動覆工コンクリートについても、配合選定や施工性および品質について検証をおこない、その効果と今後の課題について報告する。

* 技術研究所土木技術グループ

** 技術研究所

*** 北日本（支）名取（出）

**** 土木計画部技術課

§ 2. 覆工コンクリート天端部の施工性確認実験

2-1 実験概要

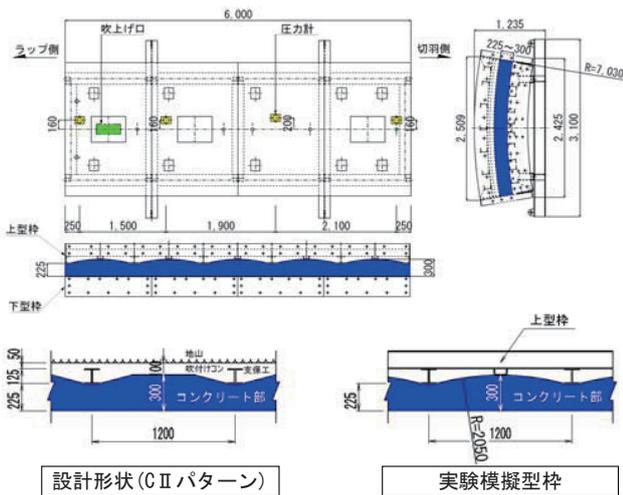
実際の施工条件に近い背面地山の形状を再現した実大規模の天端模擬型枠を用いて、コンクリートの充てん性や硬化後のコンクリート品質を確認し、より高品質なコンクリートを施工するための方法について検討した。

2-2 天端模擬型枠の概要

天端模擬型枠は、CIIパターンにおける覆工背面での支保工と吹付けコンクリートとの凹凸形状を再現した上型枠を特長としており、寸法は幅約2.5m×延長（流動距離）6.0m、覆工厚225～300mmである（写真-1、図-1）。



写真-1 天端模擬型枠の外観



図一 天端模擬型枠の模式図

2-3 実験項目と検討ケース

実験項目は全5項目で、実験ケースは全4ケースである(表一)。No.1は標準的な施工方法を想定したものである。No.2は標準的な打込み完了後、下型枠の4箇所(ラップ側から250, 1750, 3650, 5750 mm)に設置した圧力計で充てん圧力を確認しながらポンプ吐出量を調整し、圧力値80 kPa(型枠の設計耐圧の約8割)を目標に加圧充てんし、その後、天端引抜きパイプによる締めをおこなった。No.3は、上型枠の天端部縦断方向に配置した特殊なホースを用いて、コンクリート打込み中および打込み完了後2~4時間程度まで継続的にブリーディング水と残留エアを吸引排出し、さらにコンクリート強度が十分発現した後、無収縮モルタルによる空洞充てんをおこなった(写真二)。No.4はNo.1(標準施工)を逆勾配で施工した場合を想定し、勾配は実績上の最大勾配4%とした。

2-4 コンクリート配合と使用材料

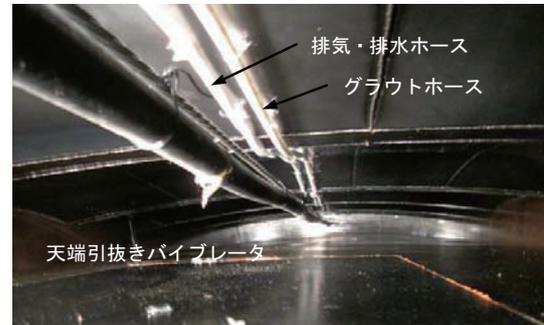
表二にコンクリート配合と使用材料を示す。配合条件として、 $W/C \leq 60\%$ 、 $W \leq 175 \text{ kg/m}^3$ 、スランブ15 cm、空気量4.5%、 $G_{\text{max}} = 20 \text{ mm}$ に適合するプラントJIS配合を選定した。配合の呼び強度は 27 N/mm^2 で、一般的な覆工配合 $18 \sim 21 \text{ N/mm}^2$ に比べてやや高いが、使用骨材の粒度分布が比較的粗く、微粒分量が少なかったため、安定したフレッシュの経時性状を得るために結合材量が若干多くなり、結果として呼び強度がランクアップした。なお、実験時期を考慮して夏期配合とした。

2-5 コンクリート打込み手順

アジテータ車(11 t車)から直接、定置式ポンプ(油圧2ピストン式)に荷卸しし、輸送管(管径5A)を通して吐出量 $15 \sim 18.5 \text{ m}^3/\text{h}$ で圧送し、ラップ側端部下面の吹上げ口からコンクリートを吹き上げて打ち込んだ。

表一 実験項目と検討ケースの一覧

	検討ケース			
	No.1	No.2	No.3	No.4
実験項目				
順勾配(2%)	○	○	○	
加圧充てん(80kPa)		○	○	
天端引抜きパイプ		○	○	
天端エア抜き+充てん			○	
逆勾配(4%)				○



写真二 上型枠への引抜きパイプと特殊ホースの設置

表二 コンクリート配合と使用材料

W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
56.0	48.9	175	313	876	922	4.07

セメント：普通ポルトランドセメント、密度 3.16 g/cm^3
 細骨材1：八王子市美山町産 砕砂、表乾密度 2.64 g/cm^3 、F.M2.90
 細骨材2：西多摩郡多磨町産 石灰砕砂、表乾密度 2.64 g/cm^3 、F.M3.00
 細骨材3：富津市鶴岡産 山砂、表乾密度 2.58 g/cm^3 、F.M1.70
 粗骨材：相模原市緑区小倉産 砕石、表乾密度 2.65 g/cm^3 、実積率59.5%
 混和剤：AE減水剤
 水：地下水

表三 硬化コンクリートの品質評価項目

測定項目	概要
コンクリート表面観察	コンクリート表面の仕上がりがり状況を目視観察し記録。観察面は、地山側と内空側の各面、側枠側2面、稜側側2面の計6面。
圧縮強度 単位容積質量	巻厚方向に採取したコア供試体(成形後 $\phi 100 \times 100 \text{ mm}$)と、現場封緘養生のテストピース($\phi 100 \times 200 \text{ mm}$)の2種類を使用。試験材齢は7日、28日。
テストハンマー強度	土木学会規準 JSCE-G 504-2007「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法(案)」に準じ、シュミットハンマ NR型を使用。測定箇所は地山側と内空側の2面で、試験材齢は7日、28日。
表面水分量	コンクリート・モルタル水分計 HI-520 でコンクリート表面の水分量を測定。
表面弾性波伝搬速度	コンクリート表面で表面弾性波測定器(UK1401:日本マテック株)で測定。測定面は地山側と内空側の2面で、1面当りの測点数77点(5回の平均値)。
促進中性化深さ	JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じて試験を実施。供試体はラップ側と稜側から採取したコア $\phi 100 \times 100 \text{ mm}$ を各々1本使用。
透水係数	地山側から採取したコア供試体($\phi 150 \times 150 \text{ mm}$)を3体使用。試験方法はインプット法(内圧式透水試験法)で拡散係数を求め、透水係数に換算して整理。
細孔径分布 細孔径量	水銀圧入式ポロシメータを使用。試験試料は、稜側で巻厚方向に抜いたコア $\phi 100 \text{ mm}$ から地山側と内空側で各々モルタル分を約10 g採取して試験。
地山側背面空洞	専用の測定定規を製作し、背面空洞の形状、深さおよび位置を測定して容積を算出。

2-6 硬化コンクリートの品質評価項目

硬化コンクリートの品質評価に用いた測定項目を表-3に示す。非破壊でコンクリート表面から測定する項目以外はすべてコア供試体を採取して評価した。

2-7 実験結果

(1) コンクリートのフレッシュ性状

コンクリート現着受入れ試験の結果、気温が30℃前後でプラントからの運搬に30分程度を要したが、すべての検討ケースで、スランプと空気量は規格内であった。

(2) コンクリートの流動状況

コンクリートの流動状況について、型枠の設置勾配の違いにより、流動傾向に若干の差がみられた。順勾配2%のNo.1~3は、吹上げ後、コンクリートが左右に広がり、その後、概ね左右均等にコンクリートが稜方向に向かってスムーズに流動して打ち上がった(写真-3)。一方、逆勾配4%のNo.4については、吹上げ後、比較的流動勾配が小さいまま稜方向へ進んだものの、全体の3分の2程度まで進んだ所でしばらく進行が鈍化して滞留した。この間、コンクリートと接触している圧力計の値が数kPa跳ね上がるような傾向がみられた。その後、圧力が元の値に戻った後、再びコンクリートが流動し始め、稜枠まで達した。なお、流動先端部での骨材とペースト分との分離は確認されなかった。

(3) 充てん圧力

図-2に施工終了時の充てん圧力分布を検討ケースごとに示す。同図より、No.1(標準)では、吹上げ口から遠ざかるほど圧力が緩やかに低下し、平均28.9kPaであった。No.4(逆勾配)の場合、ラップ側や稜側の値はNo.1と概ね同等の値であったが、中央付近で充てん圧が高い傾向にあり、平均37.4kPaであった。一方、No.2(加圧充てん+引抜きパイプ)では、全体的に圧力の差が小さく縦断方向での圧力分布は概ね等しい値であり、平均圧力はNo.1より6割程度高い45.5kPaであった。

図-3に、施工終了時における充てん圧力の最大と最小の差を示す。同図より、充てん圧力差は、No.1~3で、標準打設後に平均15kPa、加圧充てん後では平均39kPaで、標準打設後の2.6倍となった。その後、引抜きパイプをかけることで圧力差が7~9kPaまで下がった。一方、逆勾配(No.4)では、標準打設後の圧力差が順勾配での圧力差の2倍程度までばらついていった。

以上より、加圧充てんと引抜きパイプを併用することで、覆工天端全体に等価な圧力を作用させてコンクリートを打ち込むことができると考える。また、逆勾配では圧力ムラが生じやすいと推定される。

(4) 圧縮強度、単位容積質量、テストハンマー強度

表-4に、材齢28日での圧縮強度、単位容積質量、テストハンマー強度の値を示す。同表より、加圧充てん+引抜きパイプの使用(No.2, 3)により、標準施工(No.1)に比べて、覆工内空側と地山側での強度および単位容積



(奥：ラップ側吹上げ口，手前：稜側)
写真-3 型枠内でのコンクリート流動状況 (No.1)

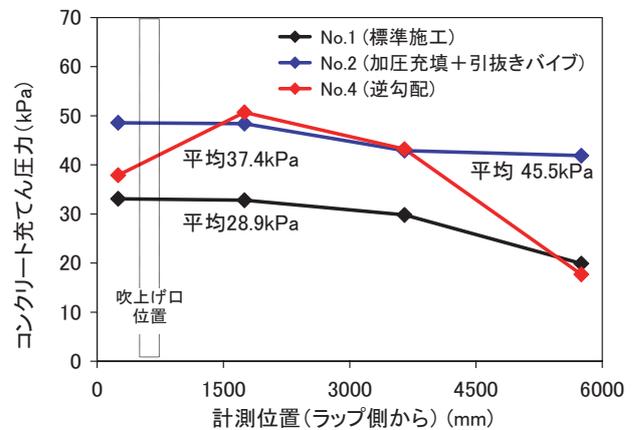


図-2 施工完了時のコンクリート充てん圧力分布

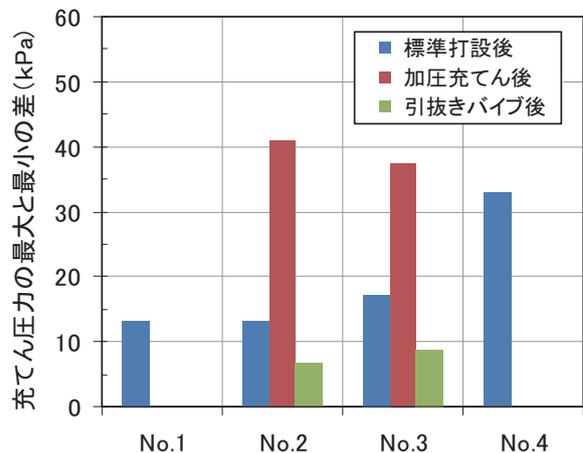


図-3 施工終了時での充てん圧力の最大と最小の差

表-4 圧縮強度、単位容積質量、テストハンマー強度

		No.1	No.2	No.3	
圧縮強度 (N/mm ²)	テストピース(現場封緘)	30.3	31.0	30.7	
	コア供試体	地山側	27.2	28.7	30.8
		内空側	29.6	32.2	32.0
単位容積質量 (kg/m ³)	テストピース(現場封緘)	2,276	2,283	2,293	
	コア供試体	地山側	2,284	2,317	2,341
		内空側	2,300	2,339	2,341
テストハンマー強度 (N/mm ²)	地山側	23.1	25.8	30.7	
	内空側	29.1	31.3	30.9	

質量の値が増加し、さらに天端エア抜き+充てんをおこなったNo.3では、内空側と地山側の品質の差が小さくなり、巻厚方向の品質ムラが抑えられ、均質化できていることがわかった。なお、No.1, 2のテストハンマー強度の値が地山側で低いのはレイタンス層の影響と推定される。

(5) 表面弾性波伝搬速度

図-4に、表面弾性波伝搬速度の分布状況を示す。同図より、標準施工 (No.1) では内空側と地山側で測定値に大きな差があったが、No.3 (加圧充てん+引抜きパイプ+天端エア抜き+充てん) では、内空側で平均4,153 m/s、地山側で平均4,111 m/sとなり、ほぼ等しい結果となった。なお、加圧充てんと引抜きパイプを併用したNo.2では、No.1同様に地山側の値が低かったため、天端部でのエア抜きによる効果が高かったと推定される。

(6) 促進中性化深さ

覆工内空側から採取したコア供試体 (φ 100 mm) を用いた促進中性化試験の結果、促進中性化速度係数の値は、No.1で5.1 mm/√週、No.3で4.6 mm/√週となり、No.3の方が1割程度小さい値であった。このため、加圧充てん+引抜きパイプの使用によって緻密性が高まり、中性化に対する抑制効果が得られたと考える。

(7) 透水係数

地山側から採取したコア供試体 (φ 150×150 mm) を用いて実施した透水試験の結果、透水係数の値はNo.1 (標準施工) で 3.7×10^{-12} m/s、No.3で 2.1×10^{-12} m/sとなり、No.3は透水係数が43%向上した。この結果、地山側での天端部エア抜き+充てんによって覆工コンクリートは水を通しにくくなり、緻密性が向上したといえる。

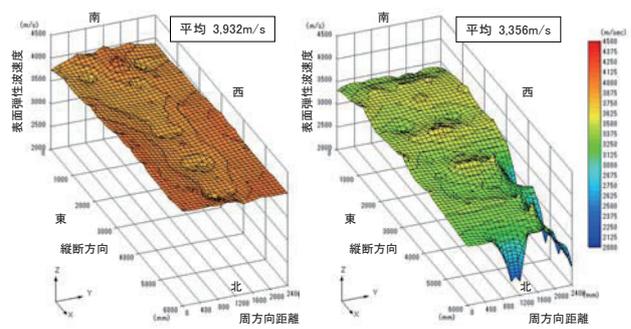
(8) 細孔径分布

表-5に水銀圧入式ポロシメータによる細孔径試験の結果を示す。同表より、全細孔径容積の値は、No.1で平均0.1200 ml/gに対して、No.3では平均0.0892 ml/gで約26%小さい結果であった。また、中性化抵抗性などの耐久性品質は水セメント比によらず直径0.05 μm以上の細孔空隙量に依存するとの指摘もあるが、本実験では、No.1で平均0.0652 ml/gに対して、No.3では平均0.0440 ml/gとなり、No.3の方が約33%小さい値であった。この結果、No.3はNo.1に比べて、コンクリート中における比較的径の大きな細孔が減少し、コンクリートの物質移動抵抗性や耐久性品質が向上しているといえる。

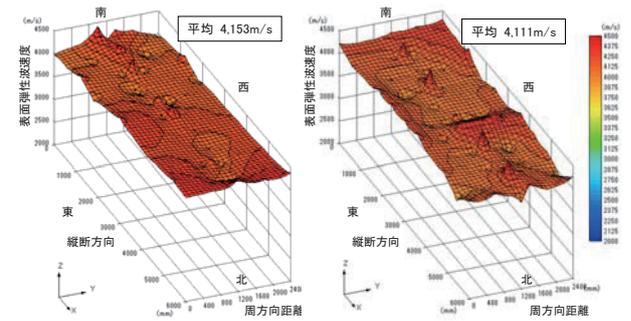
(9) 覆工コンクリート面の仕上がり状況

内空側覆工面の仕上がり状況について、No.1ではラップ側と切羽側に軽微なあばたが発生した他、縞模様の色むらも確認できた。一方、加圧充てんと引抜きパイプを併用したNo.2, 3については、目立った変状は発生しておらず、縞模様の色むらも目立たないほどであった。

地山側覆工面の仕上がり状況を写真-4に示す。写真の上方がラップ側 (吹上げ側)、下方が襍側である。No.1では上型枠の凹部にあたる3箇所エア溜まりやブリー



No.1 (左:内空側, 右:地山側)

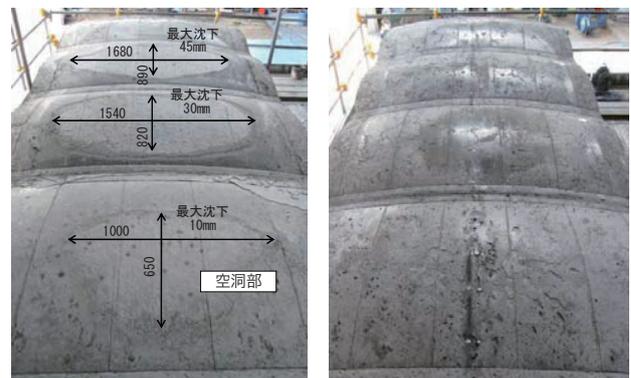


No.3 (左:内空側, 右:地山側)

図-4 表面弾性波伝搬速度の分布

表-5 細孔径試験結果

	No.1		No.3	
	地山側	内空側	地山側	内空側
全細孔径容積 (ml/g)	0.1234	0.1166	0.0874	0.0909
	平均 0.1200		平均 0.0892	
直径 0.05 μm 以上の細孔容積量 (ml/g)	0.0765	0.0538	0.0434	0.0446
	平均 0.0652		平均 0.0440	



No.1: 吸引なし (空洞発生) No.3: 吸引あり (空洞なし)
写真-4 地山側覆工面の仕上がり状況

ディングによる背面空洞を確認でき、その容積は計0.058 m³であった。No.2では、加圧充てんと引抜きパイプによる効果で空洞の大きさは軽微であったもののNo.1と同様に3箇所計0.014 m³の背面空洞が発生した。No.3では、天端部におけるブリーディング水とエアの吸引による効果で空洞は発生しなかった。この結果、加圧充てんと引抜きパイプに、排気・排水ホースによる吸引工を併用することで、覆工背面の地山形状が設計上の凹凸範囲内であれば、背面空洞の発生を抑制する効果を期待で

きると考える。なお、グラウトホースによる無収縮モルタルの空洞充てん作業については、今回の実験では空洞が発生しなかったため、特に施工を要しなかった。

§3. 中流動覆工コンクリートの施工実験

3-1 要求性能

表一六に東・中・西日本高速道路株式会社のトンネル施工管理要領(中流動覆工コンクリート編)¹⁾に規定された中流動覆工コンクリート(短繊維混入:種別T3-1)の要求性能を示す。

表中の加振変形量とは、振動下におけるコンクリートの流動性や材料分離抵抗性といった変形性能を評価する指標である。試験には加振変形試験器を使用し、スランプフロー試験をおこなった後、テーブル下面に設置された棒状振動機を10秒間作動させ、加振前後でのスランプフローの変化量(加振変形量)を測定する。加振変形量が10±3cmの範囲内の場合、所要の変形性能を満足する。

U形充てん高さ(障害なし)とは、コンクリートの充てん性能を評価する指標である。試験は、JSCE-F511「高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法(案)」に準拠し、U形容器(流動障害なし:ランク3)を使用する。充てん高さが280mm以上の場合、所要の充てん性能を満足する。

3-2 コンクリート配合と使用材料

表一七にコンクリートの配合(30-50-20N)を示す。呼び強度30N/mm²、スランプフロー50cmで、セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤は水溶性合成ポリマーの特殊増粘剤を一体化したポリカルボン酸系高性能AE減水剤標準形(I種)を使用し、ポリプロピレン短繊維(以下、PP繊維)をコンクリート容積比0.3%混入した。

本配合は増粘剤を用いた中流動配合であり、東・中・西日本高速道路株式会社の中流動覆工コンクリートの仕様に準拠している。なお、単位セメント量は同要領の繊維補強覆工コンクリート編²⁾に規定された最低セメント量340kg/m³とした。

3-3 フレッシュ性状

表一八にフレッシュ試験の結果を示す。繊維混入後のスランプフロー値は46.0×44.5cm(加振前)で、加振後の広がりには8.0×9.5cmとなり規定範囲10±3cm内であった。また、空気量は5.1%、U形充填高さは313mmとなり、所要の変形性能と充填性能を満足した(写真一5、6)。

3-4 コンクリート打込み方法と流動性

型枠は順勾配2%で設置し、コンクリートは吐出量15m³/hで定置式ポンプにて圧送し、締固めには型枠振動機

表一六 中流動繊維補強覆工コンクリートの要求性能

材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	加振 変形量 (cm)	U形充填高さ (障害なし) (mm)	曲げ靱性特性
18	35~50	4.5±1.5	10±3 (10秒加振後の 広がり)	280以上	基準線4.1kN以上かつ曲げ靱性係数平均1.4N/mm ² 以上

表一七 コンクリート配合(30-50-20N)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (C×%)	繊維 (vol.%)
		W	C	S	G		
50.0	52.6	170	340	936	851	1.4	0.3

表一八 フレッシュ試験結果

	スランプフロー (cm)			空気量 (%)	U形充填高 (障害なし) (mm)
	加振前	加振後	加振変形量		
繊維 混入前	50.0×48.5 (4.9秒停止)	—	—	4.1	—
繊維 混入後	46.0×44.5 (4.1秒停止)	54.0×54.0 (4.2秒停止)	8.0×9.5	5.1	313 (4.2秒停止)
要求性能	35~50	—	10±3	4.5±1.5	280以上



写真一五 加振変形試験



写真一六 U型充填性試験



(奥:ラップ側吹上げ口, 手前:棲側)
写真一七 中流動覆工コンクリートの流動状況

(出力550W)を4台設置して用いた。写真一七にコンクリート打込み時の流動状況を示す。吹上げ後、アーチ部に沿って左右に流れて広がった後、左右の側枠に沿って棲側方向に進み、やや遅れて中央部のコンクリートが棲側方向に流れる傾向であった。この傾向は過去の同種実験³⁾で示された結果と同様である。なお、打設中のコンクリートの流動勾配は、標準配合コンクリートに比べて極めて小さく、全体的に平坦な状態で打ち上がっていったが、流動先端部での材料分離は確認されなかった。

3-5 コンクリート充てん圧力

図-5 にコンクリート充てん圧力の経時変化を示す。標準的な打込み法による施工終了後、充てん圧力は25～40 kPa の範囲でばらついていた。その後、型枠振動機4台を15秒間作動させた結果、締固め完了時には4箇所での圧力は概ね等しい値となり、平均30.4 kPaであった。

3-6 覆工面の仕上がり状況

中流動コンクリートは普通コンクリートよりも打込み時の流動勾配が小さく平滑に打ち上がっていくため、地山側にエア溜まりによる空洞が生じやすいと推定された。実験の結果、背面に5箇所計0.076 m³の空洞を確認した(写真-8)。この値はNo.1(標準施工)より大きな空洞であった。対策として、天端部中心測線上に排気・排水ホース(内径8 mm)を設置し、コンクリート打込み中および打込み完了から4時間程度までブリーディング水と残留エアを強制的に吸引ポンプで排出する。実験の結果、背面空洞の発生を防止できた。

内空側の仕上がりについては、型枠振動機の効果により、標準施工(No.1)に比べて、全体的に色むらも小さく良好な仕上がりとなった。

3-7 硬化コンクリート特性

表-9 に中流動覆工コンクリート(排気・排出ホース使用時)の硬化体特性をまとめて示す。圧縮強度、単位容積質量およびテストハンマー強度の値は、地山側と内空側で概ね等しい値であり、覆工巻厚方向での品質のばらつきは小さかった。曲げ靱性経緯数の値はNEXCO規格(≥1.4 N/mm²)を上回る結果を得られた。また、促進中性化速度係数の値はNo.1(標準)の50%程度、透水係数の値も65%程度と極めて小さい値であった。

§4. おわりに

本稿では、実際の施工条件を再現した実大規模の天端模擬型枠を使用し、覆工コンクリートの充てん性と品質の確保に向けた実験の取組みについて報告した。

実験の結果、これまでの標準的な施工方法に加えて、コンクリートの加圧充てんや、引抜きパイプによる天端部の締固め、排気・排水ホースによる天端部のブリーディング水とエアの吸引排出を併用することで、品質が改善され、均質な覆工コンクリートを施工することができた。また、中流動覆工コンクリートに関しては、増粘剤系中流動配合を選定し、施工性と品質を確認できたが、背面空洞の防止にエア吸引が有効であった。

謝辞：本実験において、本社土木計画部、土木設計部、トンネル委員会をはじめ、平塚製作所の方々の御指導、御支援を戴きました。ここに深く謝意を表します。

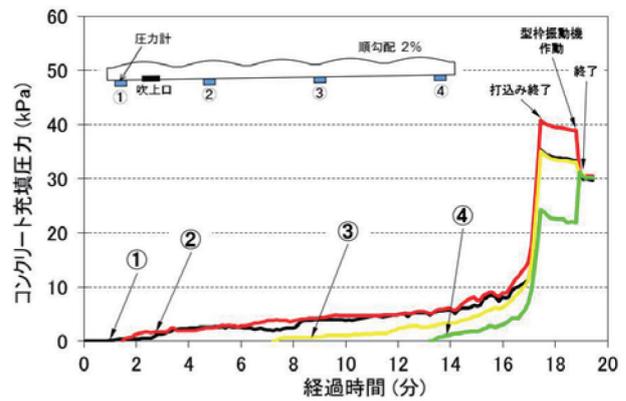


図-5 コンクリート充てん圧力の経時変化



写真-8 覆工背面の仕上がり状況

表-9 硬化コンクリート特性

圧縮強度 (N/mm ²)	テストピース (現場封緘)	35.4
	コア供試体	地山側 33.1 内空側 35.5
単位容積質量 (kg/m ³)	テストピース (現場封緘)	2,247
	コア供試体	地山側 2,287 内空側 2,295
テストハンマー強度 (N/mm ²)	地山側	32.2
	内空側	33.5
曲げ靱性係数 (N/mm ²)		1.78
表面弾性波伝搬速度 (m/s)	地山側	3,933
	内空側	4,084
促進中性化速度係数 (mm/√週)	内空側	2.6
透水係数 (m/s)	地山側	1.3 × 10 ⁻¹²
	内空側	0.0895
全細孔径容積 (ml/g)	地山側	0.0895
	内空側	0.0864
背面空洞 (m ³)	ホース未使用	0.076
	ホース使用	0

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路株：トンネル施工管理要領(中流動覆工コンクリート編)，平成23年7月。
- 2) 東・中・西日本高速道路株：トンネル施工管理要領(繊維補強覆工コンクリート編)，平成23年7月。
- 3) 馬場弘二ほか：中流動覆工コンクリートの模擬型枠による施工性確認試験，土木学会第61回年次学術講演会，pp. 363-364, VI-182, 平成18年9月。