

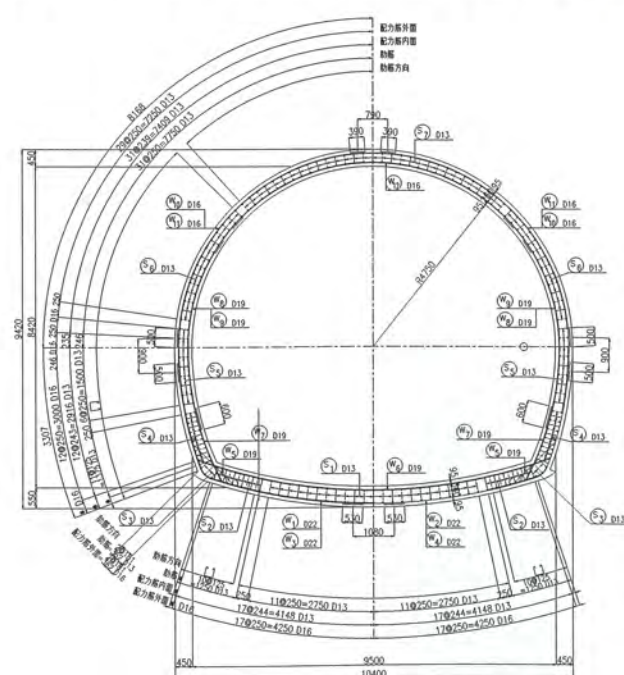
特殊増粘剤を使用した中流動コンクリートの覆工コンクリート（RC）への適用（九州新幹線 松原トンネル）

五洋建設（株）	技術研究所	土木技術開発部	○小笠原 哲也
同 上	本社	土木部門 土木設計部	武井 俊哉
同 上	名古屋支店		青木 英一
同 上	名古屋支店	土木営業部	安野浩一朗
同 上	技術研究所	土木技術開発部	水野 剣一
同 上	技術研究所	土木技術開発部	山口 英樹
同 上	技術研究所	土木技術開発部	藤原 正稔

1. はじめに

松原トンネルは、九州新幹線西九州ルート（武雄温泉－長崎間）における松原高架橋他（延長 L=1,895m）工事のうち延長 335m の山岳トンネルである。発注者は、鉄道・運輸機構九州新幹線建設局である。

施工場所は長崎県大村市であり、山と谷が入り組んだ複雑な地形条件において、トンネルは土被り厚 2～5m の区間が大部分を占めており、近隣に田畑・住宅地が存在したため、通常の山岳トンネルより慎重な施工が要求された。トンネルの地山等級は I_L であり、かつ土被りが小さいことから、覆工は全線にわたって複鉄筋コンクリート構造（RC）で計画されていた（図－1 参照）。覆工厚さは 45cm で作業スペースはあるが、D16 や D19 の鉄筋が約 250mm ピッチで地山側と内空側の両方に配置されており



図－1 トンネル構造図



a) 天端部の配筋状況



b) 側壁部の配筋状況

写真－1 配筋状況

(写真－１参照)、打設窓から棒状バイブレータを挿入して締め固める際に、鉄筋が干渉し十分な締め固めを行えないことが懸念された。また、鉄筋が干渉するため引抜きバイブレータの適用も難しい。そこで覆工コンクリートとして、自社開発したセルローズ系の特殊増粘剤を使用した中流動コンクリートを採用し、型枠バイブレータを基本とした締め固め、充填する施工を行った。なお、施工方法については NEXCO 発注のトンネル工事で採用されている方法に準拠した。

中流動コンクリートは、これまでの実績から型枠バイブレータを併用することで高流動コンクリートと同等の高い流動性と充填性を得ることができると考えられるが、本工事では試し練りから試験施工を経て、充填性を確認した上で実施工を行った。

なお鉄道・運輸機構において覆工コンクリートに中流動コンクリートを全線にわたって適用するのは、本トンネルが初めてであった。

2. 検討概要

2.1 工事概要

前述のようにトンネル延長は 335m であり、覆工は全線にわたって複鉄筋の鉄筋コンクリート構造であった。トンネル仕上がり寸法は、断面幅 9.5m×高さ 7.76m でありトンネル内空断面は 66m²である。覆工 1 スパン長 10.5m、覆工厚さ 45cm で、コンクリート全数量は約 3,500m³(インバート除く)、1 日の最大打設量は約 120m³であった。

コンクリート仕様は、呼び強度 24N/mm²および 30N/mm²で、当初のスランプは 15cm であった。強度仕様が 2 種類あるのは作用荷重の条件が異なる箇所があるためである。コンクリートの打込み方法は、セントルに設置した打設用配管を使用してポンプ車により吹き上げて打ち込む一般的な吹上げ方式である。

生コンクリート工場は、現場まで運搬時間 30～40 分を要する場所にあり、製造～打込み完了までの時間が長く必要となるため、スランプロスの少ないコンクリートが求められた。

2.2 基本方針の策定

(1) 配合および打込み方法策定の考え方

締め固めしづらい箇所へのコンクリート打設であったため、スランプ 15cm を変更して自己充填性を有する高流動コンクリートの適用を検討したが、材料のコストアップが大きいと試算されたため断念した。

鉄道・運輸機構の北海道新幹線では、フライアッシュを用いた覆工用高充填コンクリート¹⁾(スランプ 21cm)を使用した実績があったが、棒状バイブレータを使用することが前提であり、複鉄筋コンクリート構造の場合、棒状バイブレータによる締め固めが十分できない可能性があることから、より大きな流動性および充填性が必要であると考えた。また本工事では生コンクリート工場のセメントサイロの空き具合から別途でフライアッシュなどの混和材を使用することが困難であった。

本検討は 2015 年に開始しており、覆工コンクリートの高品質化を目的として、型枠パイプレータを使用した粉体系の中流動コンクリートが覆工コンクリート^{2),3)}に適用されて実績を積み、さらに増粘剤一液型の高性能 AE 減水剤による中流動コンクリート^{2),3)}が適用され始めた時期であった。

使用するコンクリートのコストアップをなるべく抑制した上で、複鉄筋コンクリート構造の覆工コンクリートを打設するため、本工事でも中流動コンクリートの適用を検討することとした。検討にあたっては、以下のことを勘案した。

- ①温度ひび割れの発生リスクをできるだけ低減するためにセメント量（結合材量）を大きく増加させない。
- ②フライアッシュや石灰石微粉末のような混和材については、生コンクリート工場のセメントサイロを 1 ビン占有する必要があるため、本工事ではサイロの都合がつかないため使用しない。
- ③現場で混和剤を後添加する方式も検討したが、現場の手間が非常に大きくなると判断して見送った。
- ④生コンクリート工場からの運搬時間が 30～40 分必要である上に、型枠内に打ち込んだあと早期に流動性が低下すると、後続に打ち込むコンクリートの障害物となって未充填を生じる可能性があるため、流動可能な時間をできるだけ確保することとした。運搬と打込みに必要な時間を考慮して、本工事では製造後 90 分以上（目標 120 分程度）のスランプ保持性能を確保するようにした。
- ⑤中流動コンクリートの仕様、品質管理方法および施工方法については、覆工コンクリートで実績がある各高速道路株式会社^{2),3),4)}により使用されているものを準用する。

上記の②セメントサイロの条件については、より多くの打設量や打設頻度があれば生コンクリート工場の協力を得やすいが、本工事ではトンネル延長が短く打設量が少ないことと、各スパンで鉄筋組立を行い打設の時間間隔が通常より長く必要なため、対応できなかった。

①、②の条件を考えて、セメント量をなるべく増やさずに中流動コンクリートとするためには、増粘剤（分離低減剤）により材料分離抵抗性を付与することが考えられる。増粘剤一液型の高性能 AE 減水剤を使用する配合が候補となるが、製造後 90 分以上（目標 120 分程度）のスランプ保持性能を確保できるか懸念された。

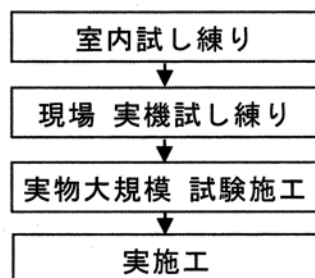
そこで、スランプ保持性能を確保できる高性能 AE 減水剤を市販品の中から選定できるように、高性能 AE 減水剤とは別に特殊増粘剤を添加する中流動コンクリートを適用することとした。これは増粘剤系や併用系の高流動コンクリートで今まで用いられている方法であるが、本工事の特殊増粘剤はセルローズ系の成分や粘性のグレードを中流動コンクリートに適合するように調整して自社開発したものである。フライアッシュなどの混和材は使用せず、特殊増粘剤を別添することでセメント量を大きく増や

さずに、従来の中流動コンクリートと同様の材料分離抵抗性と充填性を確保できる。混和材や特殊な高性能 AE 減水剤を使用しないので、混和剤の入替えや大きな設備変更が無く製造可能となる。もし流動性の経時変化が所要の性能を満足できない場合には、混和剤の入替えが生じるが、特注品ではなく市販の高性能 AE 減水剤の種類変更で対応できる。ただし粉体の増粘剤を生コンクリート工場で人力にて手投入するので、その分の人手が必要である。

なお中流動コンクリートを打ち込む場合、通常のコンクリートよりセントルに作用する圧力が大きくなり、さらに型枠バイブレータの使用による衝撃が加わることから、セントルの補強・改造を行った。

(2) 検討手順

図－2のような手順で検討した。現場で試し練りを行う前に、五洋建設の技術研究所で事前の予備試し練りを行い、現場での室内試し練り、実機試し練り、実物大規模の試験施工、実施工を実施した。技術研究所での予備試し練りでは、水中不分離性混和剤とその他における実績を基にペースト等による増粘剤種類の比較を行い、また現場より骨材を取り寄せてコンクリートの室内試し練りを行って混和剤の大まかな選定を行い、その後現場での検討に移行した。



図－2 検討手順

3. 中流動コンクリートの配合選定

3.1 使用材料

使用材料を表－1に示す。セメント、骨材については生コンクリート工場で常用されているものを使用した。増粘剤、高性能 AE 減水剤については事前の試験で 90 分以上の流動性を保持できると考えられたものを選定した。高性能 AE 減水剤については生コンクリート工場で常用していないものを選定したので、材料の入替えを行った。

表－1 使用材料一覧表

材料種別	種類・銘柄など	密度 (g/cm ³)	粗粒率または実績率
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	－
練混ぜ水	地下水	1.00	－
細骨材	海砂（長崎県壱岐産）	2.57（表乾）	2.50
粗骨材	碎石 2005（長崎県諫早産）	2.67（表乾）	60%
増粘剤	水溶性セルローズエーテル複合体	0.1～0.3	－
高性能 AE 減水剤	リグニンスルホン酸とポリカルボン酸エーテル化合物の複合体	1.085	－

3.2 配合

試し練りを行った配合表を表－2に示す。呼び強度 24N/mm^2 の配合の単位セメント量は、フレッシュ性状を確認した上で、各高速道路株式会社⁴⁾の増粘剤一液型高性能AE減水剤を使用したときの最小単位セメント量 320kg/m^3 と同様とした。 30N/mm^2 の配合では、必要強度を満足する水セメント比よりセメント量を設定した。

また、事前に骨組構造解析により脱型強度を算定したところ、 2N/mm^2 より小さい強度で脱型可能となったため、一般的な脱型強度である $2\sim 3\text{N/mm}^2$ ⁵⁾を考慮して若材齢（16hr）において圧縮強度 2N/mm^2 以上発現することを目標とした。

表－2 配合表

呼び強度 (N/mm^2)	スラン プ フロー (cm)	粗骨 材の 最大 寸法 (mm)	空 気 量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					
						水 W	セメ ント C	海 砂	碎石 2005	高性能 AE 減水 剤※	増粘剤※
24	35～50 (42.5)	20	4.5	54.5	50.0	174	320	874	908	6.40 ($\text{C}\times 2.0\%$)	0.174 ($\text{W}\times 0.1\%$)
30				47.9	48.0	175	366	820	924	5.856 ($\text{C}\times 1.6\%$)	0.131 ($\text{W}\times 0.075\%$)

※実機練りの値を示す。室内試し練り時の値を微調整したものである。

3.3 試験項目および基準

試し練りによる配合選定時の試験項目と基準については、各高速道路会社⁴⁾のものを準用し表－3とした。

表－3 試験項目と基準

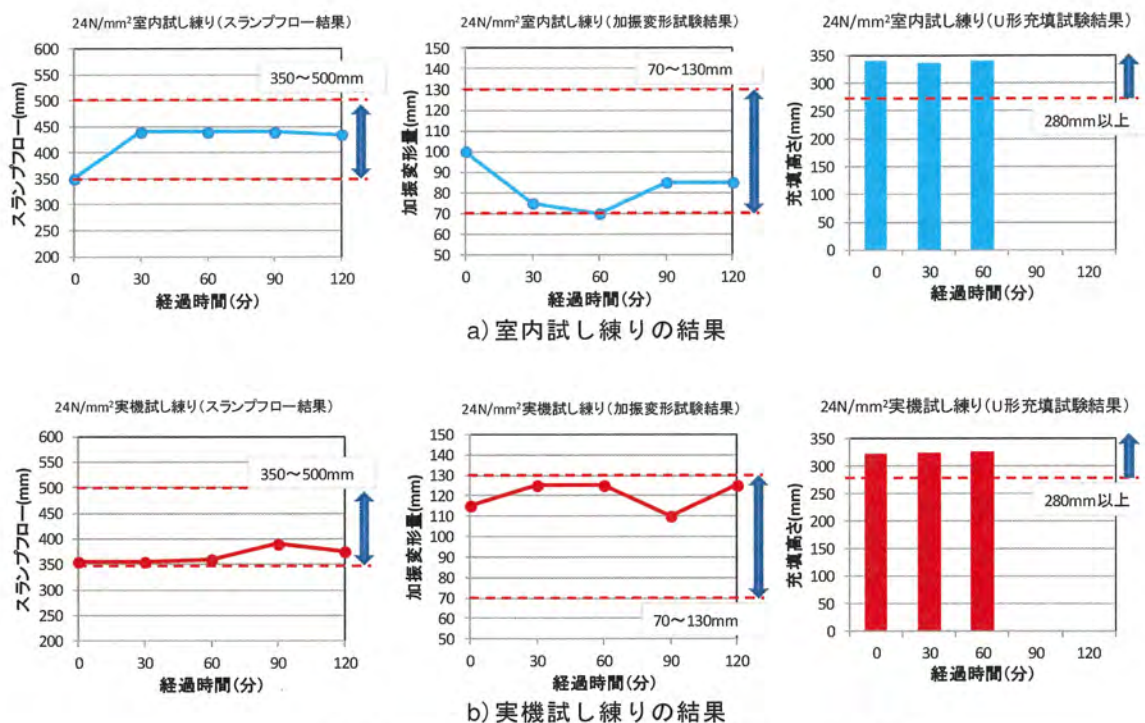
呼び強度 σ28 (N/mm ²)		スラン プ フロー (cm)	加振変形試験 (cm)	U 形充填高さ (障害無し) (mm)	空気量 (%)	若材齢(16hr) 圧縮強度 (N/mm ²)
24		35～50	10±3	280 以上	4.5±1.5	2 以上 (目標値)
30			10 秒加振後のスラン プフローの広がり			
試験 方法	JIS A 1108	JIS A 1150	試験法 733-2008	試験法 733-2008	JIS A 1128	JIS A 1108

※実機試験練りにおいては、スランプフロー等の経時変化も測定

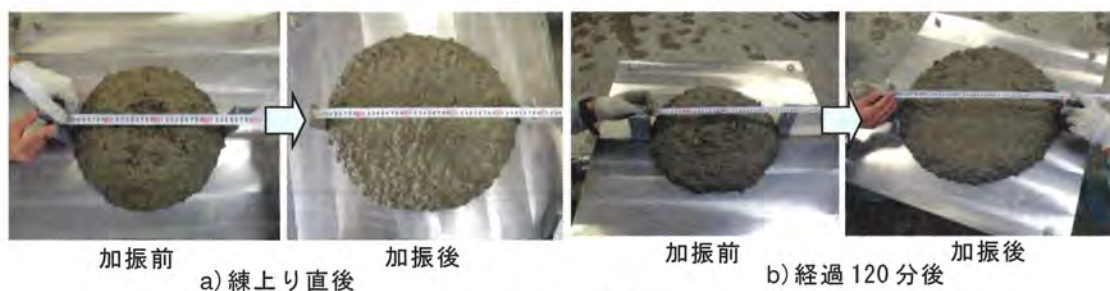
3.4 室内試し練りおよび実機試し練り

出荷予定の生コンクリート工場にて室内および実機の試し練りを行った。

代表的な試験結果として 24N/mm^2 の結果を図－3に示し、実機試し練り時のスランプフローの試験状況を写真－2に示す。図－3のように室内および実機の試し練りにおいて表－3の試験項目の基準をいずれも満足した。フレッシュ性状の経時変化については、現場到着時点と想定される製造後の30分から120分までスランプフローの変化があまりなく、安定的に流動性を保持していた。加振変形試験では中央部に粗骨材が残置されず、またコンクリートの周囲部まで粗骨材を連行し、分離したセメントペーストや水はないと観察されたため、材料分離抵抗性についても問題ないと判断した。



図－3 試し練りの試験結果(24N/mm²配合)



写真－2 実機試し練りの試験結果 (24N/mm² 配合)

表－4 実機試し練りの圧縮強度試験結果

呼び強度	圧縮強度 (N/mm ²)					備考
	16hr	20hr	24hr	7 日	28 日	
24	2.80	3.57	4.80	24.4	32.2	練上り時 コンクリート温度 20～22℃
30	3.90	5.73	7.34	32.4	43.9	

以上のことは 30N/mm² の配合においても同様であり、フレッシュ性状の所要性能を満足した。

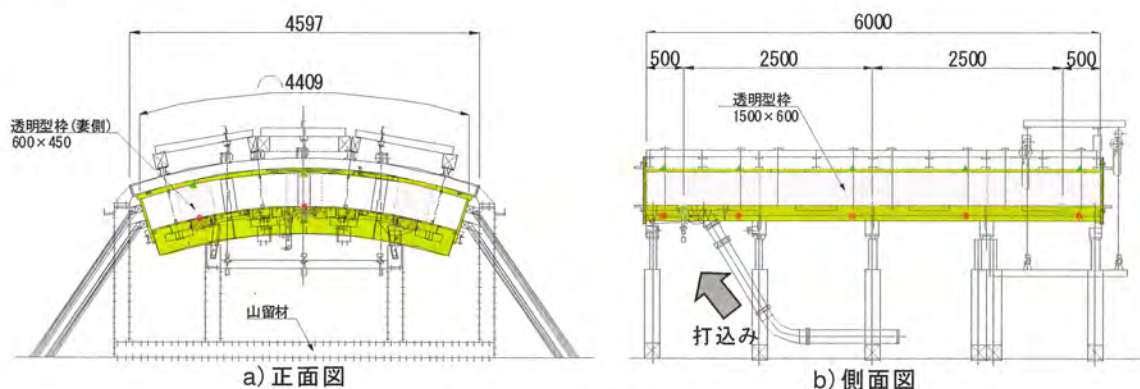
表－4 に実機試し練りにおける圧縮強度の試験結果を示す。材齢 28 日の圧縮強度は必要強度を満足し、若材齢時の圧縮強度についても 16hr で目標値を満足した。凝結時間に影響する可能性のあるセルロース系の増粘剤を使用したか、少量添加であることから若材齢時の強度発現も通常と同様で脱型時期に影響を及ぼさないと確認できた。

4. 実物大規模の試験施工

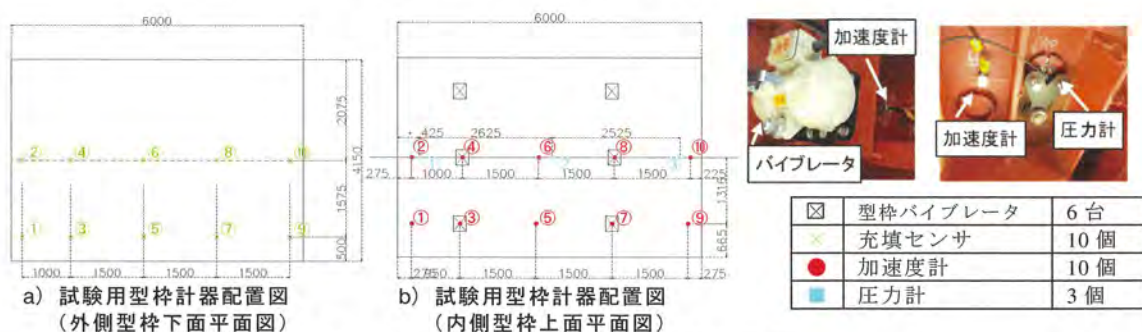
本試験施工は、トンネル覆工の天端部分を模擬した実物大の型枠に、実施工に近い方法で中流動コンクリートを充填したものである。

実施工に向けて、生コンクリート工場の実機ミキサで連続的に製造できること、運搬時の経時変化、ポンプ圧送状況、打込み時の流動状況や充填状況、および型枠パイププレートによる締固め・加振方法を確認した。中流動コンクリートとしては、これまでに検討した配合のうち 24N/mm^2 のものを用い、製造量は約 16m^3 （アジテータ車 4 台）であった。

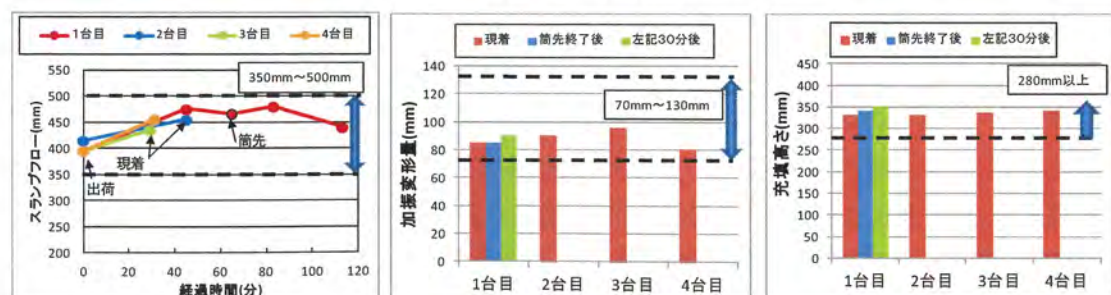
実物大型枠の概略図を図－4に示す。流動状況や充填状況の観察のため、側面の 2 面と妻側の一部を透明型枠とした。計測器としては、図－5のように充填センサ、加速度計、圧力計を設置した。



図－4 覆工天端部を模擬した実物大型枠の概略図



図－5 実物大型枠の計測器配置図

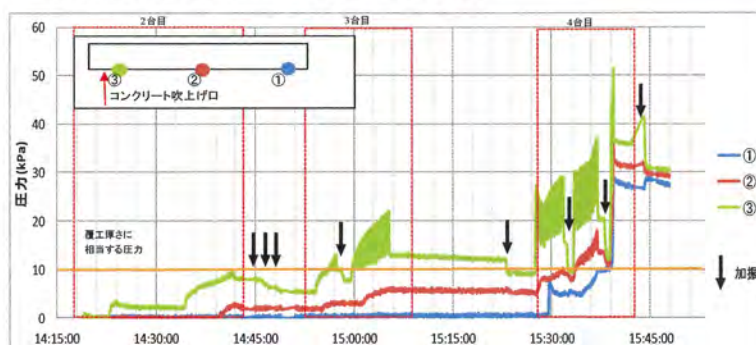


図－6 フレッシュ性状試験結果（試験施工）



写真－3 試験施工における型枠と充填状況

アジテータ車 4 台分である約 16m^3 の製造を行い、4 台ともに図－6 に示すようにフレッシュ性状は所要の性能を満足した。フレッシュ性状の経時変化についても 120 分程度まで大きな変化はなかった。



図－7 試験施工における圧力測定結果

コンクリートの打込みは、透明型枠により充填状況を観察しながら行った。加振しなくとも障害物になるような団子状の塊はできず、型枠内で広く流れながら充填されることを目視確認できた。充填を確実にを行うため、途中で型枠バイブレータにより加振した。圧力計の測定結果を図－7 に示す。加振時期についても図中に示した。打込み中はポンプ圧力が作用して吹上げ側の圧力③が高いが、型枠バイブレータにより加振した後の圧力は全体がほぼ均一となった。覆工コンクリート厚 45cm の自重は 10kPa 程度に相当するが、ポンプ圧力により最終的に圧力が 30kPa 作用していることと、すべての充填センサが反応したため十分充填できていると判断し充填完了とした。なお、加速度計での測定の結果、振動エネルギーの累計は 3.7J/L^4 以上であった。打設翌日に脱型したところ、写真－3 に示すように非常に綺麗に隅々まで充填されていた。

5. 実施工

5.1 コンクリートの施工概要

写真－4 にセントル設置状況の写真を示す。試験施工の結果により十分な充填を行うことができたため、中流動コンクリートと型枠バイブレータを基本とした施工方法により打設した。ただし、スプリングライン以下については、棒状バイブレータを使用して気泡残留に留意し、スプリングライン以上についても打設窓から行える範囲で棒状バイブレータにより締固めを行った。

5.2 コンクリートの品質管理試験結果

実施工のコンクリート受け入れ試験として、スランプフロー試験を最初の 1～5 台、



写真-4 セントル設置状況

および 50m³ ごとに行った。試験結果は、図-8 に示すようにすべて許容範囲内であった。

5.3 コンクリートの流動状況

写真-5に覆工天端部の中流動コンクリートの流動状況を示す。粗骨材の分離が見られず、ブリーディング水の浮き上がりは認められなかった。また打込み中に配管閉塞は生じなかった。

5.4 打込み中の各種測定結果

(1) 充填センサ

初期段階(1~3回)の打設は、充填センサにより充填状況を把握しながら行った。充填センサは、地山側の天端中心においてトンネル軸方向に7個設置した。打込み完了時にすべての充填センサが反応し、天端上部までコンクリートが充填されたことを確認できた。

(2) 圧力計

図-9に圧力測定結果を示す。圧力計3個を覆工天端部の内空側に設置したが、最終的に 20~40kPa の圧力が作用していた。前述のようにコンクリート厚 45cm の自重は 10kPa 程度となるが、それに加えてポンプ圧が全体にわたって作用していると言え、実施工の圧力と試験施工の圧力に大きな差はなかった。充填センサの確認結果とあわせてコンクリートが確実に充填されたと判定できた。また、型枠内部の圧力差は 15.5 kPa であり、普通コンクリートの計測事例(120kPa 以上)¹⁾と比較して非常に小さい値となった。流動性の高い中流動コンクリートを採用することで、局所的な圧力損失が生じづらくなり、普通コンクリートより均一に圧力が作用したと考えられる。

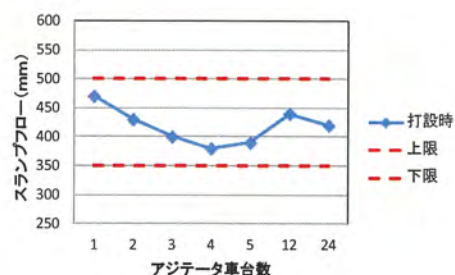


図-8 実施工のスランプフロー試験結果の例(1回目打設)



写真-5 覆工天端部の流動状況

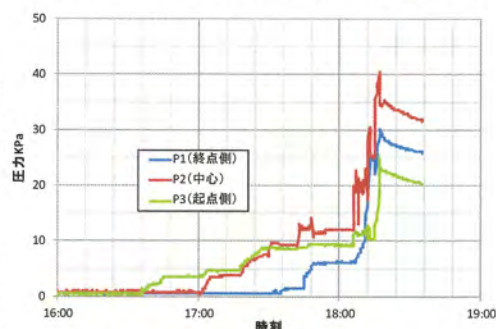


図-9 実施工における圧力測定結果

5.5 覆工コンクリートの仕上がり

写真－6のように、コールドジョイント、ジャンカ、砂すじ等は見当たらず、均質なコンクリートであることを確認した。

5.6 コンクリート表層の試験結果

シュミットハンマーによる材齢 28 日の強度試験結果は $31\text{N/mm}^2 \sim 33\text{N/mm}^2$ であった。標準養生供試体の圧縮強度 34.7N/mm^2 に近く、実構造物のコンクリートは所要強度を十分満足す



写真－6 覆工コンクリートの仕上がり

ることを確認した。また天端部を含めて 9 箇所の透気試験（材齢 28 日）を行った。表面透気係数は $0.02 \times 10^{-16} \sim 0.78 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の範囲で平均値 $0.31 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であった。一般的な覆工コンクリートでは、表面透気係数が $1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を越える⁶⁾との報告があるが、本工事では大きく下回り、密実なコンクリートを打設できたことを確認した。

6. おわりに

複鉄筋コンクリート構造の覆工コンクリートに自社開発した特殊増粘剤を添加した中流動コンクリートを適用し、型枠バイブレータにより締め固めて打ち込んだ。実物大の試験施工を経て、実施工で密実なコンクリートが打設できたことを各種試験により確認した。近年、北海道では、フライアッシュを用いた覆工用高充填コンクリートや中流動コンクリートが適用されているが、生コンクリート工場の設備の制約や、運搬距離が長い条件がある場合には、本報告の方法が適用しやすいと考えられる。

最後に、鉄道・運輸機構の方々を初めとして、本工事の施工にあたり多大なご協力をいただいた関係各位に紙面を借りて謝意を表す。

参考文献：

- 1) 佐藤貴史，萩原秀樹，秋田勝次，桜井邦昭：フライアッシュを用いた覆工用高充填コンクリートの開発，トンネルと地下，Vol.44，No.10，pp.43-52，2013.10.
- 2) 岩尾哲也，水野希典：高速道路トンネルにおける中流動覆工コンクリートの標準化，トンネルと地下，Vol.44，No.11，pp.43-51，2013.11
- 3) (株)高速道路総合技術研究所：NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ，2011.12
- 4) 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：トンネル施工管理要領，2017.7
- 5) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針（案），コンクリートライブラリ 102，2000.7
- 6) 国土交通省 東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（トンネル覆工コンクリート編），2016.5