

1

中流動コンクリート適用によるトンネル覆工の品質向上技術の開発

川又 篤*1・唐沢 智之*2・川島 義和*3・西脇 敬一*1

概 要

本開発では、トンネル覆工の高品質化を目的に、高い流動性を有する中流動コンクリート（スランプフロー45cm程度）を適用した。中流動コンクリートは、従来の覆工コンクリートと比較して水セメント比を低減した配合であるために高強度化・高耐久化を図ることができ、また、高い流動性により覆工の天端部の充てん性を確保することができるため、覆工の品質向上に寄与できるコンクリートである。試験施工では、流動性および充てん性が優れているため、補助的な締固め程度で型枠内の隅々まで充てんすることができた。硬化後の外観状況についても、従来の覆工で見られる色むら等もなく、良好であることが確認された。

キーワード：中流動コンクリート・フレッシュ性状・収縮量・側圧・試験施工

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR IMPROVING THE QUALITY OF
TUNNEL LINING WITH SEMI-HIGH FLUIDITY CONCRETEAtsushi KAWAMATA*1, Tomoyuki KARASAWA *2,
Yoshikazu KAWASHIMA*3, Keiichi NISHIWAKI*1

Abstract

The development project used semi-high fluidity concrete (slump flow: about 45 cm) to improve tunnel lining quality. Since a water-cement ratio of this concrete is smaller than that of conventional lining concrete, the lining will be able to have higher strength and higher durability. Furthermore, this concrete will fill the space at the lining crown sufficiently because of its high fluidity, thereby improving the lining quality. In the placement, every corner of the form was filled with only supplementary vibration because the fluidity and self-compacting ability of this concrete were sufficient. The appearance of the hardened concrete was also excellent, free of such color irregularities as found in conventional linings.

Keywords: semi-high fluidity concrete, fresh concrete properties, shrinkage, lateral pressure, placement

*1 Material / Structure Group, Research and Development Department, Engineering Division

*2 Manager, Material / Structure Group, Research and Development Department, Engineering Division

*3 Tunnel Group, Civil Engineering Technology Department, Engineering Division

中流動コンクリート適用によるトンネル覆工の品質向上技術の開発

川又 篤*1・唐沢 智之*2・川島 義和*3・西脇 敬一*1

1. はじめに

従来、トンネルの覆工コンクリートの打設は、狭隘な空間において行われており、特に覆工の天端部では一般に吹上げ方式により実施されている。そのため、覆工の側壁部や肩部では比較的容易に締固めが可能であるが、天端部では締固めが比較的困難であり、更に型枠内をある程度流動させる必要がある。したがって、これらの施工条件下では、締固め不足によるジャンカ等の初期欠陥を発生させる可能性があり、一般的なコンクリート構造物と比較して高い流動性と材料分離抵抗性が要求される。そのため、トンネルの覆工コンクリートには、スランプ 15~18cm 程度のコンクリートが一般的に用いられている。しかしながら、スランプを大きくすることで、上述した初期欠陥に対するリスクは低減されるが、それでもなお締固めは十分に実施する必要がある。

これらの経緯から主な対策として、流動化剤の添加や、高流動コンクリートの採用が挙げられる。これらは主に天端部における流動性および充てん性に着目した対策であるが、前者は、スランプの低下が大きくなりやすく、また、材料が分離しやすくなるため、管理に留意する必要がある。一方、後者は、自己充てん性に優れており、締固めが効率的に行えるほか、粘性の増加による材料分離抵抗性の向上、ブリージングの低減、低水セメント比による高強度化・高耐久化等の高品質なコンクリートが期待できる。しかし、高流動コンクリートを使用した場合、凝結遅延による施

工サイクルの低下、材料費の増大、製造から施工までの高い技術力の必要性、側圧増大に伴う型枠設備の補強等が懸念され、覆工コンクリートに適用する事例は非常に少ない。

一般的に、覆工は無筋もしくは軽微な補強鉄筋程度の構造であり、更に、型枠に設置された窓から締固めが可能であるため、高流動コンクリートほど優れた流動性および充てん性を必要としない。そこで、本開発では、高流動コンクリートほどではないが、従来の覆工コンクリートよりは流動性および充てん性に優れたコンクリート（以下、中流動コンクリートと呼ぶ）を用いることが、覆工コンクリートの課題に対して有効であることに着目した。

本開発における中流動コンクリートは、打設において、補助的な締固め程度で型枠内の隅々まで充てんすることが可能な流動性に富んだ特徴を有している。また、従来の覆工コンクリートと比較して水セメント比を低減した配合であるため、強度発現や耐久性に優れたコンクリートである。したがって、中流動コンクリートを適用することで、天端部の密実化、コンクリートの高強度化・高耐久化により、覆工の品質向上が期待される。

これらの特徴を有した中流動コンクリートのトンネル覆工に対する適用性を検証するため、日向第2トンネル工事において試験施工を実施した。本稿は、既に報告されている内容^{1),2),3)}も含めて、試験施工の結果を報告するものである。

*1 エンジニアリング本部 研究開発部 材料・構造グループ

*2 エンジニアリング本部 研究開発部 材料・構造グループ・リーダー

*3 エンジニアリング本部 土木技術部 トンネルグループ

2. 工事概要

本工事の概要を表-1に示す。本工事は、宮崎県日向市街中心部から北西に約3kmの山間部である日向市大字日知屋～日向市大字富高間の東九州自動車道の建設である。東九州自動車道とは、図-1に示すように九州の東側の福岡、大分、宮崎、鹿児島県の各県を結び、北九州JCT～加治木JCT間の延長約436mの国土開発幹線自動車道である⁴⁾。

本工区は、起点側より日向第二トンネル(L=498m)、本谷トンネル(L=239m)および西川内トンネル(L=304m)の3つのトンネルで構成されている。中流動コンクリートの試験施工は、西川内トンネル内の2スパンで実

施した。試験施工を実施した区間を図-2に示す。トンネル覆工の内空の高さは約7.3m、最大の幅は約11.2mである。

また、施工区間の仕様を表-2に示す。近

表-1 工事概要

工事名	東九州自動車道 日向第二トンネル工事
発注者	西日本高速道路株式会社 九州支社 延岡高速道路事務所
工事場所	宮崎県日向市大字日知屋～日向市大字富高（工事延長：1826m）
工期	平成17年12月1日から 平成21年1月13日まで
請負者	鉄建建設株式会社・株式会社菅組 特定建設工事共同企業体
トンネル	日向第二トンネル（L=498m） 本谷トンネル（L=239m） 西川内トンネル（L=304m）



図-1 工事場所⁴⁾

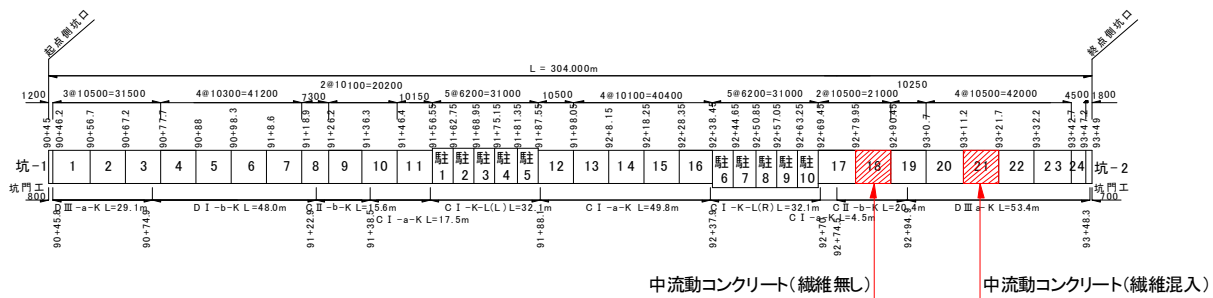


図-2 中流動コンクリート試験施工位置図（西河内トンネル覆工打割割図）

表-2 施工区間トンネルの仕様

地山等級	測点	施工延長	アーチ部配筋	インバート有無	覆工コンクリート厚	コンクリート種別
C区間(CII)	STA. 92+79.95～90.45	10.5m	無	無	300mm	中流動 繊維無し
D区間(DIII)	STA. 93+11.2～21.7	10.5m	SD345 シングル 主筋 D19@200	シングル 配筋	350mm	中流動 繊維混入

表-3 必要性能

必要性能				試験方法	評価値		
					中流動コン		従来コン
					繊維無し 繊維混入後	繊維混入前	
フレッシュ コンクリート	流動性	スランプ フロー	(cm)	JIS A 1150	45.0±5.0	50.0±5.0*1	-
		Lフロー*2	(cm)	JSCE-F 514	26.0以上	-	26.0以上
		スランプ	(cm)	JIS A 1101	-	-	15.0±2.5
	自己 充てん性	U形 充てん高さ	(cm)	JSCE-F 511	28.0以上 (障害なし)	28.0以上 (障害なし)	-
	材料分離抵抗性			目視	-	-	-
硬化 コンクリート	空気量	(%)	JIS A 1128	4.5±1.5	3.0±1.5	4.5±1.5	
	圧縮強度(材齢28日)	(N/mm ²)	JIS A 1108	18以上	-	18以上	
	長さ変化	(×10 ⁻⁶)	JIS A 1129	-	-	-	
	自己収縮	(×10 ⁻⁶)	JCI法	-	-	-	

*1: 目標値。短繊維混入後に45.0±5.0を満足する範囲で適宜調整する。

*2: フロー停止後、容器に棒状パイプを押し当てて50~75cmの流動時間を測定した。また、材料分離状況を目視観察した。

表-4 使用材料

材料	記号	種類	物性他
セメント	C	高炉B種	密度 3.04g/cm ³
細骨材	S1	砕砂	宮崎県日向市産 表乾密度 2.58g/cm ³ 粗粒率 2.81
	S2	砕砂	大分県津久見市産 表乾密度 2.67g/cm ³ 粗粒率 2.71
粗骨材	G	砕石 2005	宮崎県日向市産 表乾密度 2.62g/cm ³ 実績率 59.0%
混和剤	SP	高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸系 密度 1.08g/cm ³
	Ad	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物 密度 1.25g/cm ³
繊維	F	PVA繊維	長さ 40mm, 直径 0.66mm 密度 1.30g/cm ³

年、覆工コンクリートでははく落防止の観点から繊維補強コンクリートが実用化されているため、試験施工で適用した中流動コンクリートは繊維混入の有無により2種類とした。

3. 配合

3.1 必要性能

中流動コンクリートの必要性能と試験方法を表-3に示す。

中流動コンクリートのスランプフローについては、スランプ15~18cmの従来の覆工コンクリートとスランプフロー50~75cmの高流動コンクリートの中間を目指して、スランプフローを45cmに設定した。繊維を混入する中流動コンクリートのスランプフローについては、事前に実施した試し練りから繊維混入によるスランプフローの低下量を5cm程度と見込んで、繊維混入前の目標値を50cm、繊維混入後を45cmに設定した。

また、流動性の把握および目視による材料分離の確認を目的に、Lフロー試験を実施した。Lフロー停止後、試験器の流動部先端に棒状パイプを押し当て、フロー50~75cm間の流動時間を測定して、振動による流

動性および材料分離抵抗性を確認した。

また、自己充てん性を確認するために、U形試験により障害なし（自己充てん性のランク3）で28.0cm以上とした。

3.2 使用材料および配合

コンクリートの使用材料を表-4に示す。ここで、材料分離抵抗性の向上を目的にセメントの他にフライアッシュや石灰石微粉末等を使用して粉体量を増加させた中流動コンクリートが研究されているが、これらの混和材を添加した中流動コンクリートを製造する場合、粉体用の予備サイロを保有しているレディーミクストコンクリート工場に限られる。または、これらの混和材をミキサもしくは計量槽に人力で投入するという多大な労力が必

要となる。そこで、本開発では、使用するレディミクストコンクリート工場の設備、労力等に関係なく従来と同様に製造できるように、粉体はセメントに限定して、高炉セメントB種を使用した。

配合を表-5に示す。

表中の配合略号において、

MCは基本となる中流動コンクリートの配合である。FMCは繊維を混入した場合の中流動コンクリートであり、繊維の分散性、繊維混入によるスランプフローの低下を見込み、単位セメント量と混和剤の添加量を増加した。UCは比較用の従来の覆工コンクリートである。UCと比較すると、MCおよびFMCでは材料分離抵抗性の確保のために粉体量を増加させた結果、水セメント比が10%以上低減されて、高強度・高耐久な配合となった。

4. 材料特性

4.1 フレッシュ性状および力学特性

コンクリートの室内試し練り結果を表-6に、中流動コンクリートのフレッシュ試験状況を写真-1に示す。

スランプフローについては、必要性能を満足した。また、目視観察において材料分離もなく良好な性状が得られた。ここで、FMCの繊維混入によるスランプフローの低下量は6.8cmとなり、当初想定していた5.0cmよりも若干大きくなった。再度実施した室内試し練りにおいても低下量は6.0cmであったが、室内試し練りでは練り量が少ないために低下量は増大傾向にあると考えて、当初の評価値の修正は行わなかった。なお、実機試し練りでは、低下量は4.3cmであった。

Lフローについても必要性能を満足する結果となった。Lフロー停止後の試験容器に振動を加えたところ、コンクリートはスムーズ

表-5 コンクリートの配合

配合略号	配合種類	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
				水	セメント	細骨材	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	AE減水剤	繊維
				W	C	S1*1	S2*1	G	SP	Ad	F
MC	中流動コン 繊維無し	46.5	50.0	165	355	260	630	882	2.66*2	-	-
FMC	中流動コン 繊維混入	44.6	50.0	165	370	258	626	875	2.96*2	-	3.9*3
UC	従来コン	57.3	44.7	157	274	244	592	1026	-	1.37*2	-

*1: 細骨材混合率 S1 : S2=30 : 70

*2: MC : C×0.75%, FMC : C×0.80%, UC : C×0.50%

*3: Vol×0.3%



(a) スランプフロー



(b) Lフロー (加振前)



(c) U形充てん

写真-1 中流動コンクリートのフレッシュ試験状況 (配合: MC)

表-6 コンクリートの試験結果

配合略号	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	Lフロー (cm)	Lフロー50~75cm		U形充てん		圧縮 強度 (N/mm ²)
						流動 時間 (sec)	流動 速度 (cm/s)	高さ (cm)	停止 (sec)	
MC	-	46.5×46.0	4.4	11.0	35.0	4.96	5.04	32.5	12.0	62.7
FMC*	-	56.5×54.0	3.9	10.0	-	-	-	-	-	-
FMC	-	50.0×47.0	4.0	10.0	31.0	4.12	6.07	31.5	12.1	-
UC	13.5	-	3.0	11.0	-	-	-	-	-	44.9

*繊維混入前

に流動することが目視確認され、かつ材料分離も見られなかった。そのため、施工時には補助的にバイブレータを使用することにより良好な充てん性が得られるものと考えられた。

材齢 28 日の圧縮強度試験結果は、MC の方が UC よりも約 1.5 倍の高い値を示す結果となり、従来の覆工と比較して高強度化が図られる結果となった。

4. 2 収縮量

今回の中流動コンクリートの配合は、汎用性を考慮して、混和材を使用せず、セメントに限定した配合とした。そのため、セメント量の増加に伴う収縮量の増加により、施工後のひび割れが懸念されたため、収縮量の比較を実施した。

長さ変化試験結果を図-2に、自己収縮試験結果を図-3に示す。長さ変化率については、MCの方がUCよりも 40×10^{-6} 程度小さくなった。また、質量減少率についても、MCの方がUCよりも0.5%程度小さくなった。質量減少率の差と比較して長さ変化率の差が小さいのは、UCではMCと比較して細骨材率が小さい、つまり粗骨材が多いため収縮が拘束されたと推察される。

自己収縮については、繊維の分散性を考慮して単位セメント量を増加させたFMCの方がMCよりも若干大きくなったが、その差は 30×10^{-6} 程度と小さかった。また、参考として、土木学会 コンクリート標準示方書[設計編]に示されている自己収縮の予測式を使用して、W/C=40%の場合の自己収縮を算出した。予測

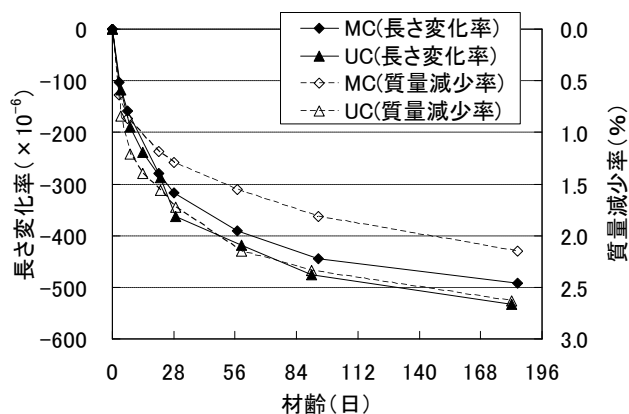


図-2 長さ変化試験結果

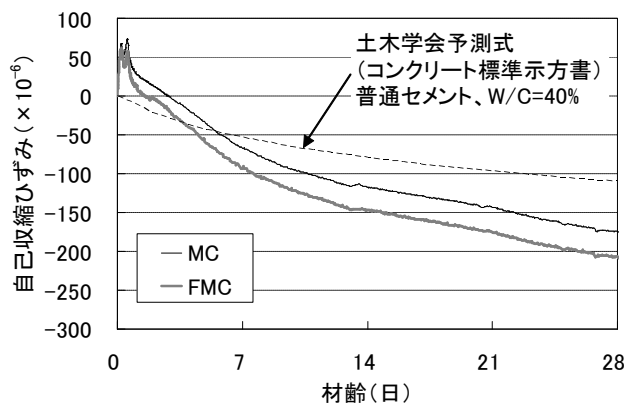


図-3 自己収縮ひずみ試験結果

式は普通セメントを対象としているため、高炉セメントを使用した今回の試験値は予測値よりも大きな傾向を示した。

5. 試験施工方法

5. 1 締固め

施工に先立って、中流動コンクリートの充てん性および流動性を確認するために、模擬型枠による施工試験を実施した。その結果を反映して、施工時の締固め方法については以

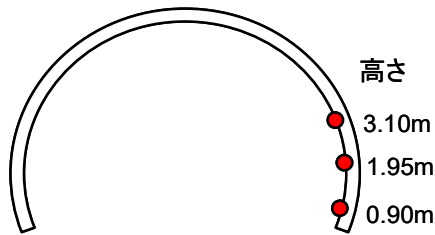


図-4 側圧の測定位置

下のように実施した。

締固めは、中流動コンクリートの特性を最大限に引き出すため、筒先から排出された直後は行わず、自由流動が概ね停止した時点で、コンクリート上面が水平になる程度の振動を高周波フレキ型バイブレータにより加える方法とした。また、天端部の打設において窓を閉鎖した後は、型枠バイブレータにより締固めを行ったが、過度な締固めによる材料分離に十分留意した。

5. 2 側圧測定

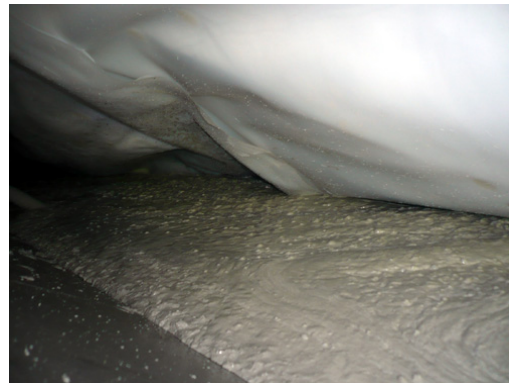
流動性の増大が型枠に及ぼす影響を確認するため、10.5mのスパンの中央における図-4に示す位置で側圧の測定を行った。なお、比較として、他の施工スパンでスランプ15cmのUCについても同様の測定を行った。

6. 試験施工結果

6. 1 施工性

スランプフローは、MCで44.5～45.5cm、FMCで46.5～48.5cmの範囲となり、設定した所要の流動性を全ての品質管理試験で満足する結果となった。

打設時のコンクリートの流動状況を写真-2と写真-3に示す。粗骨材が分離することなく流動しており、FMCでは鉄筋の背面にも確実なコンクリートの充てんが確認できる。また、打設時には、UCと比較して軽微な振動でコンクリート上面がほぼ水平になる状況も確認できた。これらにより、中流動コンクリートは、適切な材料分離抵抗性を有しており、従来の覆工コンクリートに比べて、良好な充てん性を有することが確認された。

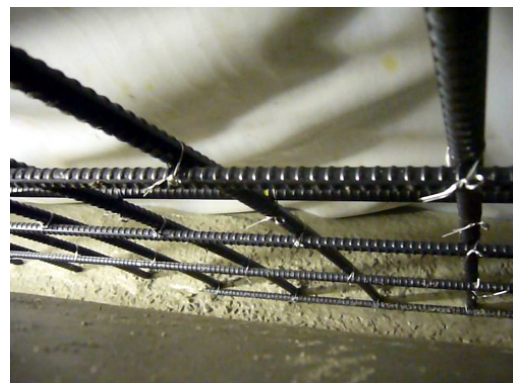


(a) 肩部



(b) 天端部

写真-2 コンクリートの流動状況 (MC)



(a) 側壁部



(b) 天端部

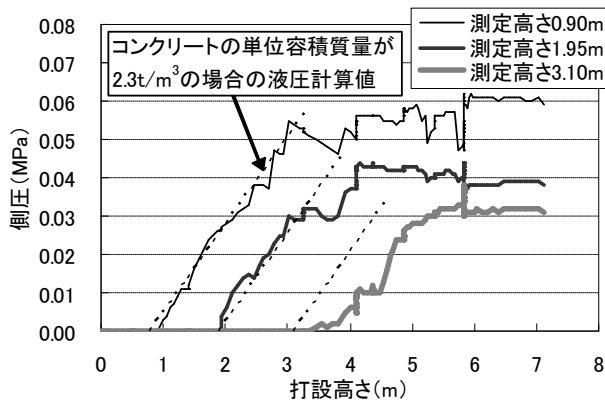
写真-3 コンクリートの流動状況 (FMC)

6. 2 側圧

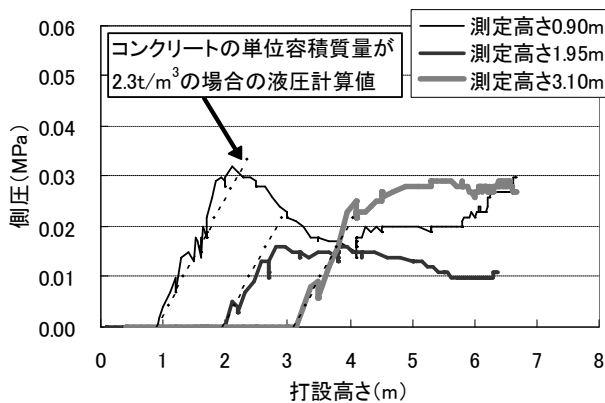
MC および UC の側圧の測定結果を図-5に示す。MC の場合、測定位置より 2m 程度の打設高さまで側圧が液圧として作用する傾向が見られた。一方、UC では、測定位置より 1m 程度の打設高さまでしか側圧が液圧として作用していない。このことから、今回の試験施工では、中流動コンクリートの側圧は、液圧として作用する打設高さが従来の覆工コンクリートに比べて高くなることがわかった。そのため、中流動コンクリートの場合には側圧が過剰に高くなるように、従来のコンクリートに比べて打設速度を遅くするなど、打設時の管理には十分な配慮が必要であることがわかった。

6. 3 充填性の確認

充填性の最終確認は、妻部のコンクリート状態を目視することで実施した。その結果、



(a) MC



(b) UC

図-5 側圧測定結果

細部にわたって、コンクリートが充填されており、コンクリートと防水シートも確実に密着していることが確認できた。

6. 4 外観性

中流動コンクリートを打設した覆工の脱型後の外観を写真-4に示す。天端部は、従来の覆工で見られる色むら等もなく、非常に良好な仕上がりであり、外観性の向上にも寄



(a) 側壁部



(b) 妻部



(c) 全景

写真-4 脱型後の外観

与することが確認できた。

7. まとめ

本開発では、トンネル覆工の天端部における流動性および充てん性の課題を克服して、高品質な覆工を構築することを目的に、中流動コンクリートの覆工コンクリートへの適用性を確認する試験施工を実施した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 中流動コンクリートの配合として、汎用性を考慮して粉体はセメントのみに限定した。配合の特徴として、粉体量の増加、W/C の低減が挙げられ、粘性の増加に伴う材料分離抵抗性の向上、高強度化・高耐久化が可能となった。
- (2) 施工時では、流動性および充てん性が優れているため、補助的なバイブレータの使用程度で型枠内の隅々までコンクリートを充てんすることが可能となり、密実なコンクリートの構築や締固めの効率化に寄与する結果となった。
- (3) 当初懸念された側圧の増加についても、打設速度を制御することで、従来と同様の設備、施工工程で対応できる結果となった。
- (4) 従来の覆工で見られる色むら等もなく、良好な仕上がりであることが確認された。

以上より、高品質なトンネル覆工を構築するにあたり、中流動コンクリートの適用性が確認された。

謝辞

(株)高速道路総合技術研究所および西日本高速道路(株)の関係者の方には、試し練りから試験施工に至るまで多大な御指導、御意見を戴き、誠に有り難うございました。

参考文献

- 1) トンネルの高速施工技術に関する検討報告書 (株式会社高速道路総合技術研究所委託), 社団法人日本トンネル技術協会, 2009.1
- 2) 川又篤, 西脇敬一, 唐沢智之, 松岡茂: 中流動コンクリートの基礎的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門V, 第63回, pp.745-746.2008.9
- 3) 西脇敬一, 川又篤, 唐沢智之: 道路トンネルにおける中流動コンクリートの試験施工, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門V, 第64回, pp.685-686, 2009.9
- 4) 西日本高速道路株式会社ホームページより, <http://corp.w-nexco.co.jp/>
- 5) 馬場弘二, 伊藤哲男: 中流動覆工コンクリートの開発検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門V, 第59回, pp.723-724, 2002.9