

増粘剤系中流動覆工コンクリートの施工

Construction of Tunnel Lining with Middle Performance Concrete using Superplasticizer mixed with Viscosity Agent

松田敦夫* 大野和民** 竹本光慶*** 廣中哲也****

要 旨

流動性と材料分離抵抗性を増粘剤添加タイプの混和剤で付与した中流動覆工コンクリートを、舞鶴若狭自動車道田上トンネルの鉄筋区間に試験的に採用した。通常の繊維補強覆工コンクリートから混和剤を変更するだけでトンネル施工管理要領の基準を満足する中流動覆工コンクリートが製造できた。配合の特徴や強度発現性状、製造から打ち込みまでの運搬・繊維投入・ポンプ圧送といったステップごとの変動を考慮した管理範囲の設定、打ち込み時の側圧や型枠パイプレータにより型枠に作用する加速度分布、日常管理試験の結果や硬化後の均質性、表面の仕上がりなど中流動覆工コンクリートの特性や施工時の留意点をまとめた。

キーワード：中流動覆工コンクリート、増粘剤、型枠パイプレータ、経時変化、均質性

1. まえがき

山岳トンネルの覆工コンクリートは、狭隘な型枠内での締固め作業が必要なことから、不具合の発生しやすい部位がいくつも存在する。そのため、覆工の長期耐久性を維持するために移動式型枠の構造やパイプレータの改良、コンクリート材料や打ち込み方法の工夫が進められてきたが、近年、充填性能と分離抵抗性能の高い中流動覆工コンクリート（以下、中流動コンクリートと表記）を型枠パイプレータで締固める工法が開発された¹⁾。

中流動コンクリートには粉体系と増粘剤系の2つのタイプがあるが、本稿では舞鶴若狭自動車道田上トンネル(写真-1)の鉄筋区間の覆工に採用した増粘剤系の中流動コンクリートについて報告する。

2.1 使用材料の選定

トンネル施工管理要領²⁾（以下、「要領」と表記）によると中流動コンクリートは「スランプ15cmの普通コンクリートとスランプフロー65cmの高流動コンクリートの中間的な性状を有するコンクリート」と説明されている。この違いをスランプ試験の試料断面で表すと、図-1となる。自己充填する高流動コンクリートより安価で、通常コンクリートより軽微な振動締固めで耐久性のあるコンクリートが打設できる（図-2参照）。

中流動コンクリートは、混和剤により流動性を大きくすることで高まる材料分離のリスクを、粉体系では石粉、石炭灰といった混和材で、また、増粘剤系では水中不分離コンクリートや高流動コンクリートで多くの使用実績



写真-1 田上トンネル抗口

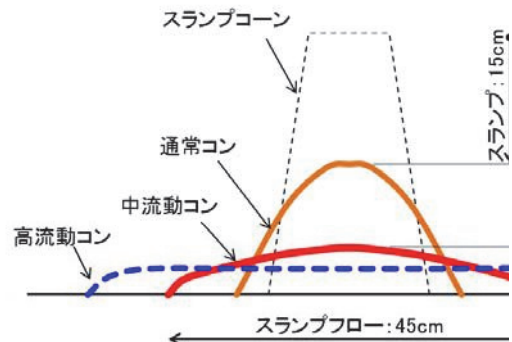


図-1 スランプ試験後の試料断面

2. 中流動コンクリートの諸特性

*東日本支社土木技術部 **東北支店土木部 ***東日本支社土木第1部 ****技術研究所

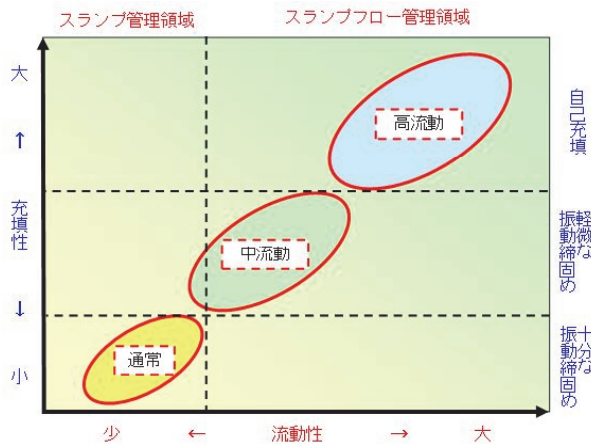


図-2 流動性と充填性による分類

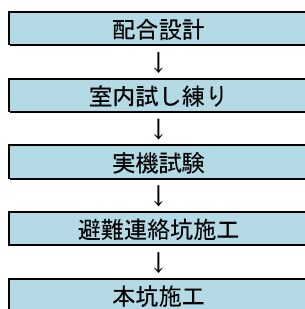


図-3 本坑施工までの実施フロー

がある増粘剤により粘性を大きくすることで回避している。本工事では、一液タイプの増粘剤添加型高性能減水剤³⁾を使用した中流動コンクリートを採用し、図-3に示すようにその有効性を室内試験・実機試験・避難連絡坑で確認した後、本坑を施工した。

2.2 配合設計

本工事の通常配合（繊維補強覆工コンクリート：T3-1）と中流動コンクリートの配合を表-1に示す。中流動コンクリートは、通常配合と水・セメント・骨材・短繊維の単位量が同一で、通常配合に使用したポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を増粘剤添加型高性能減水剤に変更するだけで、要領で規定される表-2の基準を満足する配合が得られた。これは通常配合の単位セメント量が 340kg と十分な粉体量であったことによる。したがって、増粘剤系では混和剤タンクの切り替えのみでどちらの配合も製造可能である。室内試験で作製した供試体の強度試験では表-3に示すように、それぞれの配合による圧縮強度・曲げ靱性係数の違いはほとんどない。

2.3 フレッシュコンクリートの管理値の設定

表-2の*印の基準は「打込み箇所」で採取した試料が対象である。通常配合においても運搬・短繊維投入・ポンプ圧送による特性の変化を製造時に考慮するが、中流動コンクリートの経時変化のデータは少ない。特に充

表-1 配合と使用材料

	単位量 kg/m ³					
	W	C	S	G	Sp	Fb
通常 (T3-1)	175	340	988	908	3.40 (1.0%C)	2.73
中流動	175	340	988	908	5.78 (1.7%C)	2.73

W：地下水 C：普通ポルトランドセメント(密度 3.16) S：砕砂(密度 2.69),陸砂(密度 2.55),混合比 65：35 G：砕石(密度 2.91 最大寸法 20mm) Sp：[通常]高性能 AE 減水剤 [中流動]増粘剤含有高性能減水剤 Fb：ポリプロピレン(密度 0.91,繊維長 47mm)

表-2 配合決定のための基準

項目	基準値
材齢 28 日圧縮強度	18N/mm ²
スランブ	21.0±2.5cm *
スランブフロー	35~50cm *
加振変形後の広がり	10±3cm
U 形充填高さ(障害なし)	280mm 以上
空気量	4.5±1.5% *
最大塩化物含有量	300g/m ³
材齢 28 日の曲げ靱性係数	1.40N/mm ²

表-3 強度試験の結果 単位 N/mm²

繊維	試験項目	通常	中流動
なし	4 週圧縮強度	40.5	40.2
	4 週圧縮強度	39.6	39.2
あり	靱性係数	2.08	1.76

表-4 実機試験結果で定めた目標値

ステージ	製造	現場到着	繊維投入後	筒先
スランブ cm	22 以上	22.5±2.5	21.5±2.5	21.0±2.5
スランブフロー cm	50~65	45~60	40~55	35~50
空気量 %	4.5±1.0	4.5±1.5	4.5±1.5	4.5±1.5
加振変形量 cm	—	—	10±3	—
U 形充填高 cm	—	—	28 以上	—

填性能への影響が大きく、管理範囲が 35~50cm と大きいスランブフローは各施工ステップで明確にしておく必要がある。そこで、室内試験・実機試験の結果をもとに表-4の目標値を設定し、避難連絡坑の施工を行った。図-4、図-5にスランブフローと空気量の経時変化を示す。スランブフローでは製造直後から筒先までのロスが 1 台目 12.5cm、2 台目 13.9cm、空気量では 1.0%、0.7%となったことから、表-4の設定は妥当であるとして本坑の管理値として採用した。

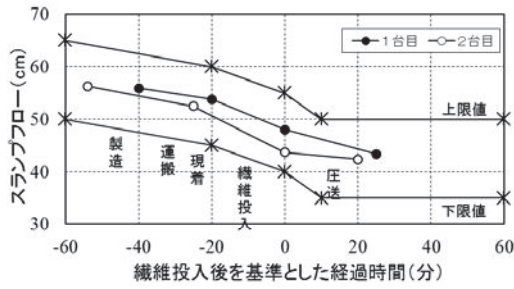


図-4 スランプフローの経時変化

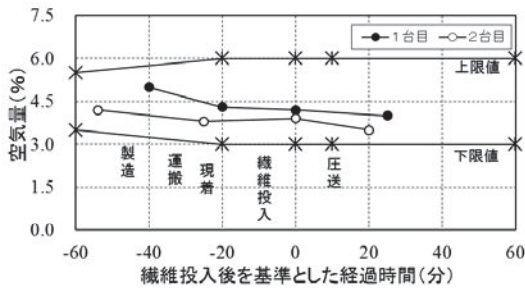


図-5 空気量の経時変化

2.4 強度発現性状

図-6 に実機試験における積算温度と若材齢の圧縮強度の関係、図-7 に室内試験における材齢と強度の関係を示す。一般的に、化学混和剤の使用量が多くなるとセメントの水和反応が遅れるが、通常配合と中流動に強度の違いはなかった。型枠の脱型時間や脱型後の養生方法は同じで良いことがわかる。

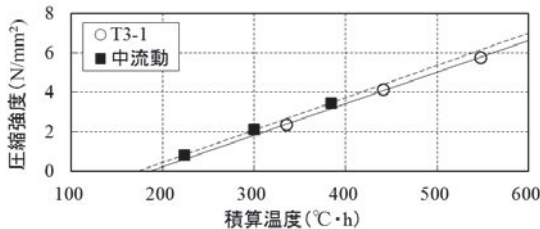


図-6 若材齢強度と積算温度の関係

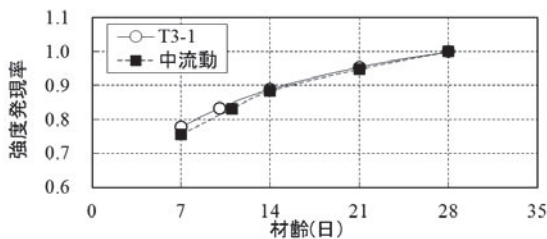


図-7 材齢と圧縮強度の関係

3. 施工時の特徴

3.1 型枠の表面加速度分布

本工事では文献⁴⁾を参考に、トンネル軸方向 3m、断面方向 2m 程度の間隔で型枠バイブレータの設置を計画し、避難連絡坑の施工で充填できることを目視にて確認した。本坑の施工では図-8 に示すトンネル軸方向 4 か所、断面方向 10 か所に設置した。今回本坑で測定した型枠表面の加速度波形の例を図-9 に示す。要領では型枠表面の加速度からコンクリートに与えられる入力エネルギーの目安を 3.7 J/L として、加振時間を調整する。バイブレータ近傍とその中間点の周波数は 110Hz、最大値はそれぞれ 75m/s²、5m/s² で、これらから計算される加振時間は 54 秒となる。加振時間がやや長いのは中間点で加速度が小さかったことが原因である。ただ、壁部では加振開始から 20 秒経過した頃から大きな気泡の上昇が観察されたことから 30 秒程度は加振時間が必要であると思われた。バイブレータ間の型枠表面加速度の一例を図-10 に示す。補強板位置で加速度が低下しており、バイブレータの設置位置は型枠の構造を考慮して加速度の変動が小さくなるよう選定しなければならない。

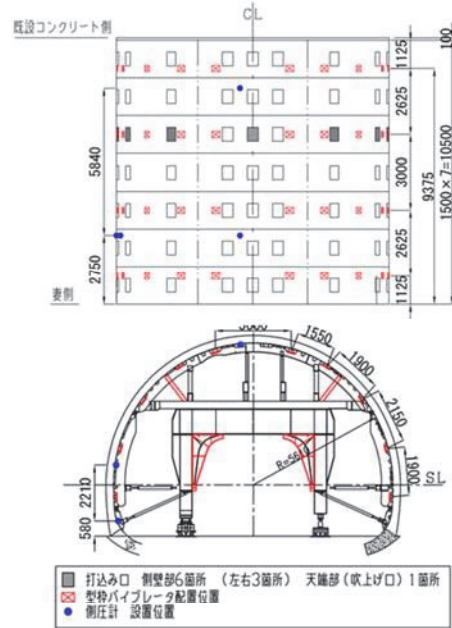


図-8 型枠バイブレータの配置

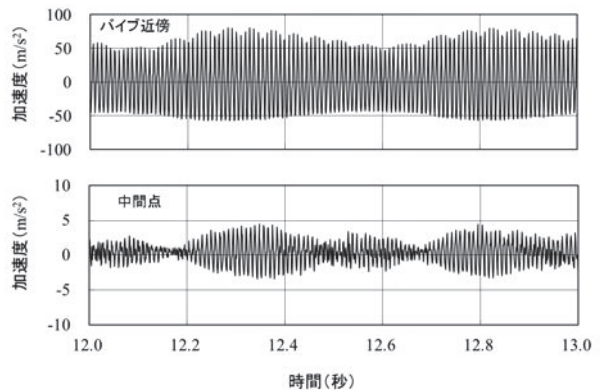


図-9 型枠表面の加速度波形の一例

3.2 側圧の経時変化

一般的に高流動コンクリートでは型枠に液圧が作用することが知られており⁵⁾、中流動コンクリートでも同様な測定例が報告されている⁴⁾。図-11 に避難連絡坑における下面から 0.5m・1.5m・2.5m 位置の側圧の差 (y 軸の 0.024N/mm² はコンクリート 1m の液圧) を示す。10 時 50 分に 0.5m 位置に到達したコンクリート上端は 11 時 45 分に 1.5m まで上がり、12 時 30 分に 2.5m に達している。12 時 15 分から液圧から下がり始めるが、12 時 30 分に型枠バイブレータを稼働することで再び液圧が作用し、その後は一様に低下した。したがって、今回の中流動コンクリートは液圧の作用時間を 2 時間見込んだ。これにより本坑の移動式型枠は補強後の設計荷重 0.065N/mm² から打ち込み速度を 1.4m/h 以下とした。

また、図-12 は 12 時 30 分に型枠バイブレータを稼働した前後の側圧分布である。コンクリートに振動が作用すると急激に側圧が上昇した。型枠バイブレータを作用させる際は、この偏圧による型枠の変形や移動を起こさないよう注意する必要がある。

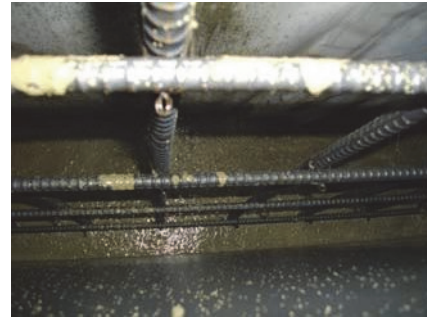


写真-2 壁部の流動状況



写真-3 天端部の流動状況

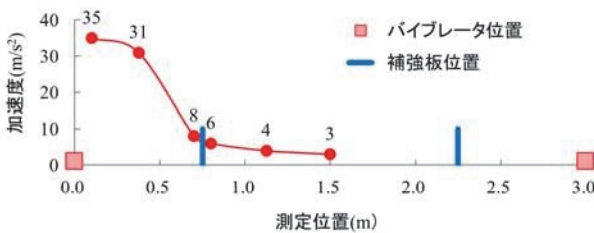


図-10 トンネル軸方向の型枠表面加速度分布

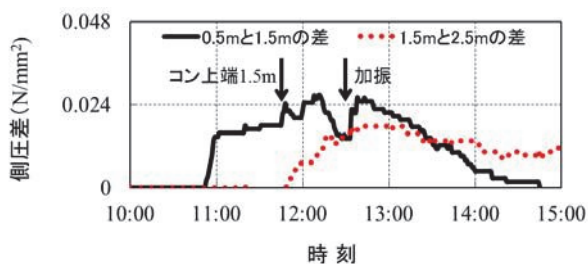


図-11 側圧の経時変化 (計測 1 m 分の差圧)

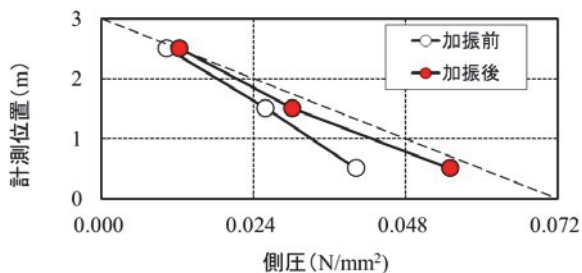


図-12 加振前後の側圧分布

3.3 コンクリート天端勾配

写真-2 に示す本坑壁部打設時のコンクリート天端勾配を表-5 に示す。コンクリートの投入箇所から自然流動による勾配は 8.2% で、振動を加えると 3.5% に減少した。これは投入箇所から妻枠まで約 30cm の高低差で、この勾配を利用しブリーディング水を妻枠から排出した。

表-5 壁部のコンクリート天端勾配

計測のタイミング	勾配 (%)
加振前	8.2
加振後	3.5

4. 打設結果

4.1 日常管理試験

本坑の施工における日常管理の結果では、表-4 の受け入れ時の基準範囲はすべてクリアした。5 ブロックで施工した日常管理試験結果を表-6 に示す。中流動コンクリートの圧縮強度平均値は 38.2N/mm²、標準偏差は 2.87N/mm² で、配合変更前の T3-1 (30 ブロック) の 39.0N/mm²、2.25N/mm² と大きな違いはなかった。変動係数は一般的な JIS 認定工場で設定される 10% より十分小さいことから、特に品質管理を変更する必要はなく、他現場との交互出荷で問題になることもなかった。図-13 と図-14 に日常管理試験の結果を繊維投入前後でまとめた結果を示す。現場到着時のスランプフローが大きいと繊維投入によるフロー低下量は大きく、空気量が

きいと増加量は小さい。

繊維補強コンクリートでは繊維投入後のスランプフロー50～55cm（筒先 45～50cm）はやや大きく、上限値ではペーストの材料分離が懸念される。写真-4、5にみられるように、分離性状は現れていないものの繊維有は繊維無に比べてモルタルそのものの粘性が低いことから筒先の管理値を小さくする方が良いと考えられる。

4.2 覆工の品質

覆工の均質性を確認するために、超音波伝搬速度を壁部・肩部・天端中央のトンネル軸方向3測線で計測した。



写真-4 日常管理試験（スランプフロー）



写真-5 分離性状確認のたたき後の性状

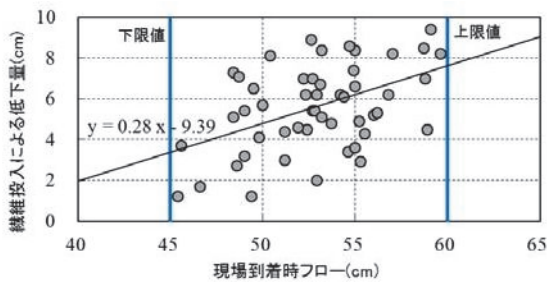


図-13 現着と繊維投入後のスランプフロー

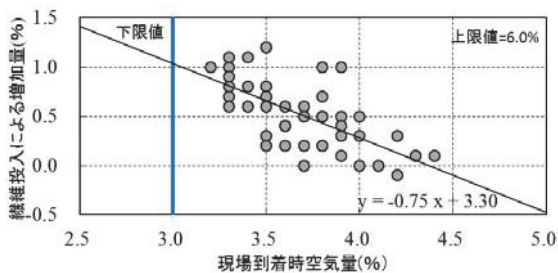


図-14 現着と繊維投入後の空気量

（写真-6参照）超音波の受発信子間隔は50cm一定とした。参考文献⁶⁾によると、この間隔はコンクリート表面から10cm程度以深で一定となる伝搬速度の領域に相当する。計測結果を図-15に示す。棒パイプレータで十分締めることのできる壁部と肩部は、T3-1、中流動コンクリートともトンネル軸方向の伝搬速度の変動が小さいが、天端中央でT3-1は既設側に伝搬速度が低下しているのに対し、中流動コンクリートは壁・肩部と同様に伝搬速度の変動が小さい。

棒パイプレータによるT3-1の覆工よりも、型枠パイプレータによる中流動コンクリートの方が、トンネル軸方向に流動させる施工において均質であるという結果が得られた。

表-6 日常管理試験結果

	平均値	標準偏差	変動係数
スランプ	24.0cm	0.46cm	0.022
スランプフロー	52.9cm	3.46cm	0.065
空気量	3.7%	0.30%	0.081
4週圧縮強度	38.2N/mm ²	2.87N/mm ²	0.075

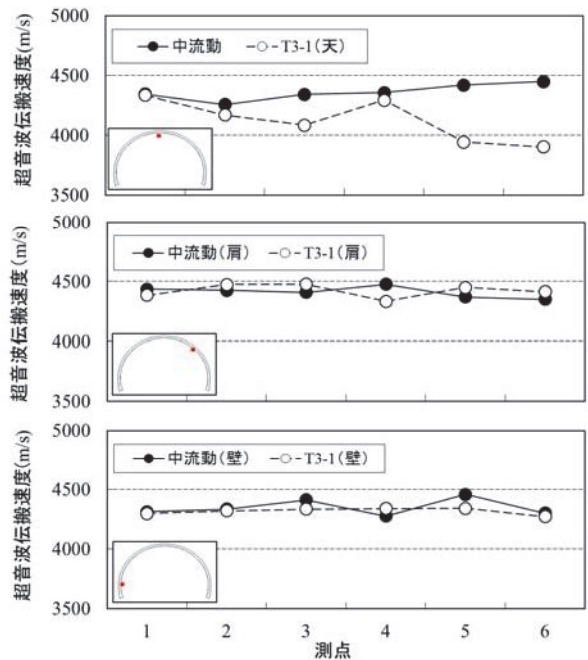
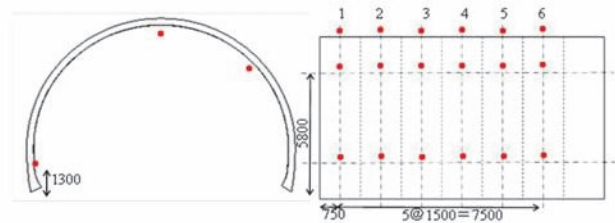


図-15 トンネル軸方向の超音波伝搬速度分布



写真-6 超音波伝搬速度の測定

中流動コンクリートの表面の仕上りを写真-7、写真-8に示す。コンクリートの流動痕が少なく、美観は向上している。しかし、壁ハンチ部では型枠バイブレータの振動により空気泡が型枠表面に集まる傾向が大きい。特に、短繊維の周りに気泡が付着することで細長い形状の気泡が目立つ。この部分の気泡の除去が今後の課題である。



写真-7 覆工表面の仕上がり

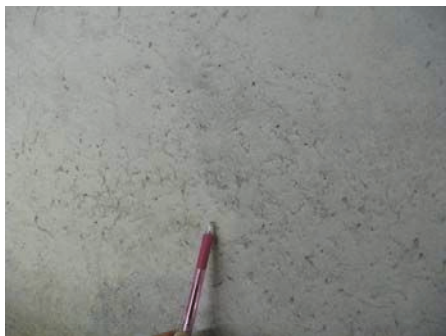


写真-8 壁部の空気泡痕

5. まとめ

増粘剤系の中流動コンクリートの試験施工で得られた知見を以下に示す。

- i. 繊維補強覆工コンクリート通常配合の混和剤を増粘剤添加型に変更するだけで中流動コンクリートの基準値を満足できた。これにより、鉄筋区間の

み増粘剤系中流動コンクリートを打設することが容易にできる

- ii. 増粘剤系中流動コンクリートの若材齢時の初期強度特性は通常配合とほぼ同じであった。また、4週圧縮強度も所定の強度を満足し、その変動も少なく安定していた
- iii. 室内試験・実機試験から定めた中流動コンクリートのフレッシュ性状の品質管理目標値を採用し、安定した品質管理ができた
- iv. 移動式型枠の構造により、型枠バイブレータの振動の減衰が大きい部位があるため、バイブレータの配置に工夫がいる
- v. 移動式型枠に作用する液圧は2時間程度見込めばよい。また、バイブレータを稼働させた直後に型枠に作用する側圧が急増するため、偏圧に留意する必要がある
- vi. 超音波伝搬速度により、打設後のコンクリートを評価すると中流動コンクリートの天端部は高い均質性を有することが確認された

6. あとがき

増粘剤系の中流動コンクリートを用いることで、粉体系で問題とされてきた初期強度の低下が解消され、製造設備の追加が不要となる。安定した品質で施工性もよいことから、現地の実情に合わせた材料の選択肢が広がり、今後多くのトンネル工事に中流動コンクリートが採用されるとともに、特徴を活かした施工システムの開発が期待される。

【参考文献】

- 1) 城間博通ほか、「トンネル覆工専用中流動コンクリートの開発」、土木技術、64巻4号、2009.4
- 2) 東日本、中日本、西日本高速道路(株)、「トンネル施工管理要領(本體工編)」、2013.7
- 3) 三浦義雅ほか、「関西地区骨材を対象とした新タイプの高流動コンクリートの開発」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.913-914、1998.9
- 4) たとえば 村崎慎一ほか、「トンネル全線に中流動コンクリートを適用し高品質覆工に挑戦」、トンネルと地下、第41巻12号、pp.7-16、2010.12
- 5) 土木学会、「2012年制定 コンクリート標準示方書[施工編]」、pp.236、2013.3
- 6) (独) 土木研究所、「超音波試験(土研法)による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案)、2006.5(H21修正)