

# 報告 新規の特殊増粘剤を用いた低セメント量の高流動コンクリートによるトンネル覆工の施工

桜井 邦昭\*1・永松 雄一\*2・上原 哲哉\*3・山川 勉\*4

**要旨：**新規の特殊増粘剤と汎用品の高性能 AE 減水剤を用いることで、従来の覆工コンクリートと同じ単位セメント量のまま、高い流動性と自己充填性を確保できる低セメント量の高流動コンクリートを道路トンネルの覆工全線に適用した。初めに、室内試験により配合を選定し、ブリーディングが少なく圧送性に優れること、強度や耐久性は従来の覆工と同等であることを確認した。次に、実物大の壁状模擬部材を用いた流動実験を行い、締固めを行うことなく長距離を均質な状態で流動し充填できることを検証した。その後、実施工に適用し、充填の難しい箇所である覆工の天端部においても確実に充填できること等を確認した。

**キーワード：**高流動コンクリート, 特殊増粘剤, トンネル覆工, 生産性向上, 品質確保, 作業環境改善

## 1. はじめに

昨今、建設工事における生産性向上が強く求められている。トンネルの覆工作业でも、熟練作業員の高齢化や若手作業員の不足が常態化している。また、覆工コンクリートは閉鎖空間内での打込み・締固め作業が必要であり、作業員に苦渋作業を強いるとともに、仕上りの良し悪しが作業員の熟練度に依存しやすい部材である。

近年では、補助的な締固めにより充填できる程度まで流動性を高めた中流動コンクリート<sup>2)3)</sup>が開発・実用化されているが、締固め作業を完全には排除できないため、作業員数の低減や作業環境の抜本的な改善には至っていない。覆工の品質を確保しつつ、生産性向上や環境改善を図るには、締固め作業が不要となる自己充填性を有する高流動コンクリートの適用が効果的である。しかし、従来の高流動コンクリートは、高い流動性に見合った材料分離抵抗性を確保するために単位セメント量（単位粉体量）を大幅に増加させる必要があり、材料コストや温度ひび割れの発生リスクが増加する課題がある。このため、高密度な配筋を有する場合<sup>4)</sup>などを除き、覆工にはほとんど適用されていない現状にある。

そこで、筆者らは、新規の特殊増粘剤と市販の高性能 AE 減水剤を用いることで、一般的な建設工事で使用する普通コンクリートに対して、単位セメント量を増加することなく、高い流動性と自己充填性を確保できる低セメント量の高流動コンクリートを開発した<sup>5)</sup>。さらに、トンネル覆工に試験的に適用し、締固めを行うことなく均質な覆工を構築できること、締固め作業を排除することで生産性の向上や作業環境の改善に大きく貢献できることを検証した。

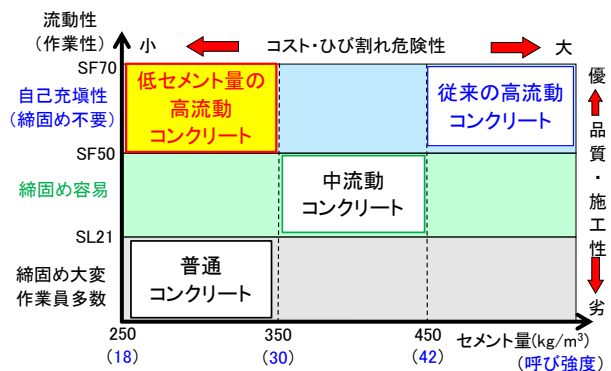


図-1 各種コンクリートの位置づけの概念図

本稿では、自動車専用道路のトンネル（標準部の内空断面積 92m<sup>2</sup>、延長 1,335m）全線に低セメント量の高流動コンクリートを適用することを目的として実施した室内試験における配合選定と各種品質試験結果、実物大の壁状模擬部材を用いた流動実験の結果、ならびに実施工へ適用した結果等について報告する。

## 2. 高流動コンクリートの配合条件と目標品質

低セメント量の高流動コンクリートの位置づけの概念図を図-1に示す。使用する特殊増粘剤（写真-1）は、平均粒径が約 80μm の粉末で、主成分はセルロースエーテルである。今回、成分組成を調整し、従来品に対して、少量でかつ適度な粘性がコンクリートに付与できるよう改良した。なお、今回の高流動コンクリートの基本的性質や特殊増粘剤の概要の詳細は文献<sup>5)</sup>を参照されたい。

高流動コンクリートの配合条件と目標とした品質を表-1に示す。発注機関の仕様書、コンクリート標準示方書および高流動コンクリート指針<sup>6)</sup>を参考に設定した。

\*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

\*2 (株)大林組 九州支店 下屋形トンネル JV 工事事務所 所長

\*3 (株)大林組 九州支店 下屋形トンネル JV 工事事務所 工事長

\*4 信越化学工業(株) 合成技術研究所 研究部開発室 主席研究員 博士 (工学) (正会員)

表-1 高流動コンクリートの配合条件と目標とした品質

項目	支保パターン		準拠標準
	Cパターン	Dパターン	
設計基準強度	18N/mm <sup>2</sup>	30N/mm <sup>2</sup>	仕様書
粗骨材の最大寸法	40mm以下	25mm以下	
単位セメント量	270kg/m <sup>3</sup> 以上	340kg/m <sup>3</sup> 以上	
水セメント比	60%以下	60%以下	
繊維混入率	—	0.3Vol%	
スランプフロー (JIS A 1150)	60±10cm		示方書・指針 <sup>6)</sup>
500mmフロー到達時間 (JIS A 1150)	3~15秒		
充填高さ(JSCE-F511)	30cm以上(ランク3)		仕様書
空気量(JIS A 1128)	4.5±1.5%		
ブリーディング率 (JIS A 1123)	従来の覆工比べ少ないこと		—
流入モルタル値 (円筒貫入計による方法)	30mm以下		指針 <sup>7), 8)</sup>
加圧ブリーディング (JSCE-F502)	良好な圧送の範囲内		指針 <sup>9)</sup>
圧縮強度(管理材齢28日, JIS A 1108)	設計基準強度以上		仕様書
凍結融解抵抗性 (JIS A 1148 A法)	相対動弾性係数70%以上		示方書



写真-1 特殊増粘剤の外観

表-2 使用材料

種類	記号	物理的性質など
セメント	C	高炉セメントB種, 密度3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup>
	S2	海砂, 表乾密度2.58g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	砕石2005, 表乾密度2.70g/cm <sup>3</sup>
	G2	砕石4020, 表乾密度2.70g/cm <sup>3</sup>
混和剤	WR	AE減水剤(市販品) *Cパターンの従来覆工で使用
	SP	高性能AE減水剤(市販品, ポリカルボン酸系)
	VMA	特殊増粘剤(セルロースエーテル)
非鋼繊維	PP	ポリプロピレン繊維, 密度0.91g/cm <sup>3</sup>

表-3 低セメント量の高流動コンクリートの配合とフレッシュ時の品質試験結果

支保パターン	コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランプフロー (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						特殊増粘剤 (C×%)		繊維 PP (Vol%)	品質試験結果						
							W		S		G		WR	SP		スランプフロー (cm)	500mmフロー到達時間 (秒)	空気量 (%)	充填高さ (cm)	流入モルタル値 (mm)	ブリーディング率 (%)	
							C	S	S1	S2	G1	G2										
C	従来覆工	40	SL15	4.5	54.9	44.1	161	293	409	397	632	421	1.0	—	—	SL15.0	—	4.4	18.0	—	7.2	
	高流動		60		54.9	51.0	161	293	473	459	646	277	—	1.40	60	—	61.0	5.5	4.5	35.0	22	2.1
D	従来覆工	20	SL15	4.5	50.9	51.5	173	340	452	452	878	0	—	0.75	—	0.3	SL17.5	—	4.2	26.0	—	3.9
	高流動		60		50.9	55.2	173	340	492	478	810	0	—	1.35	60	0.3	60.5	7.1	4.5	34.3	15	1.9

本工事で構築する覆工は大半が無筋部材であり、一部には補強鉄筋を有する区間もあるが、配筋ピッチが200mm程度であることから、自己充填性はランク3とし、目標スランプフローは60cmとした。また、覆工天端部における背面空洞の発生や圧送時の閉塞を防止するため、ブリーディング試験や加圧ブリーディング試験も実施した。さらに、圧縮強度や耐久性については、従来の覆工コンクリートと同等以上であることを目標値に設定した。

本工事は、地山の軟弱度や土被りに応じて2つの掘削支保パターン (CおよびD) がある。覆工コンクリートは、これに応じてポリプロピレン製の繊維 (以下、PP繊維という) を混入しないCパターンと混入するDパターンとがあるため、2種類の高流動コンクリートを用いた。

### 3. 配合選定と各種品質試験結果

#### 3.1 使用材料と配合

使用材料を表-2に、試験練りにより選定した高流動コンクリートの配合をフレッシュ時の試験結果と合わせて表-3に示す。また、各種のコンクリートのスランプおよびスランプフロー試験時の状況を写真-2に示す。

練混ぜには傾胴式ミキサ (容量80L) を用い、練混ぜ量は40L/バッチとし、コンクリートの種類によらず、全材料投入後180秒間練り混ぜた。なお、特殊増粘剤は、



写真-2 スランプ(フロー)試験時の試料の外観

他の材料の投入に合わせてミキサ内へ投入した。

いずれのパターンとも、特殊増粘剤を60g/m<sup>3</sup>用い、高性能AE減水剤を使用することで、セメント量を増加することなく、目標とする流動性および自己充填性を有する高流動コンクリートが製造できることが確認できた。

#### 3.2 材料分離抵抗性と圧送性の確認

指針<sup>7), 8)</sup>に示される円筒貫入計による流入モルタル値の測定結果を表-3中に示す。これらの指針では流入モルタル値が30mm以下であれば、材料分離抵抗性に優れるとの閾値を示している。今回の高流動コンクリートは

2種類ともその値を十分に満足する結果であった。

ブリーディング試験結果を表-3中に示す。低セメント量の高流動コンクリートのブリーディング率は、従来の覆工コンクリートに比べて大幅に低減できており、材料分離や背面空洞が生じにくいことを確認した。

加圧ブリーディング試験結果を図-2に示す。Cパターンの従来の覆工コンクリートでは、ポンプ施工指針<sup>9)</sup>に示される「良好な圧送が行える範囲」をやや逸脱しており、圧送時に閉塞が生じやすいことが示唆される結果であるのに対し、高流動コンクリートは良好な圧送が行えることを示す結果が得られた。

### 3.3 硬化コンクリートの品質確認

圧縮強度の試験結果を図-3に、凍結融解試験結果を図-4に示す。低セメント量の高流動コンクリートの圧縮強度や凍結融解抵抗性は、水セメント比の等しい従来の覆工コンクリートと同等以上であることが確認できた。

以上の結果から、今回の低セメント量の高流動コンクリートは、従来の覆工コンクリートに対して、同じ単位セメント量のまま、材料分離抵抗性を確保しつつ高い流動性と自己充填性を確保できること、同等以上の強度特性や凍結融解抵抗性を有することが確認できた。

### 4. 実機ミキサによる製造確認

前章で選定したCパターンの高流動コンクリートを対象に、レディーミキストコンクリート工場の実機ミキサで容易に製造できること、および時間経過に伴うフレッシュ性状の変化を検証するため実機試験を行った。

コンクリートは4m<sup>3</sup>製造してアジテータ車に積載して、練上がりから30分間隔で品質試験を行った。試験結果を表-4に示す。試験時のコンクリート温度は15℃であった。いずれの試験項目についても、練上がりから120分間にわたり目標とする品質が確保でき、時間経過に伴う品質変動が小さい配合であることを確認した。

### 5. 実物大の壁状模擬型枠を用いた流動実験

#### 5.1 実験概要

高流動コンクリートが、コンクリート自体の高い流動性と自己充填性により型枠の隅々まで流動し充填できることを検証するため、写真-3に示す実物大の壁状模擬部材(L6.2m×B0.6m×H0.9m、V=約3.3m<sup>3</sup>)を用いた流動実験を行った。本工事において最も厳しい配筋条件となる施工箇所の覆工側壁部を模擬した形状・配筋とした。また、高流動コンクリートは当該箇所に用いるPP繊維を混入したDパターンの配合を用いた。

なお、覆工施工は1スパン長10.5mで施工する 경우가多いが、鉄筋のない無筋区間を模擬した延長10.5mの模擬部材を用いて、今回と同様の低セメント量の高流動コ

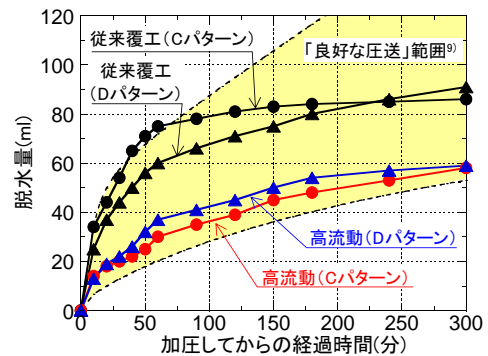


図-2 加圧ブリーディング試験結果

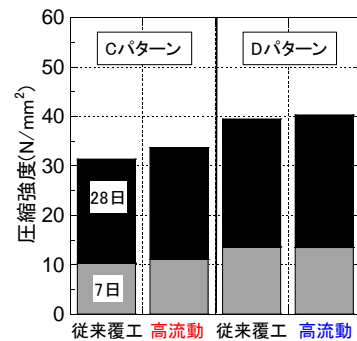


図-3 圧縮強度の試験結果

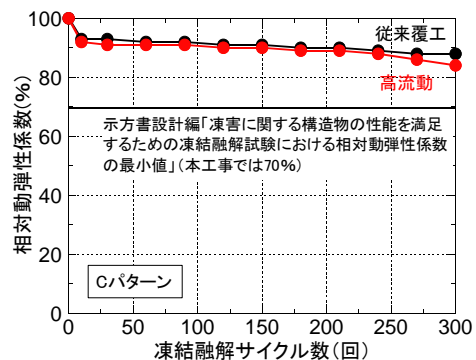


図-4 凍結融解試験結果

表-4 実機試験における品質試験結果 (Cパターン)

試験項目	単位	目標品質	試験結果				
			5分後	30分後	60分後	90分後	120分後
充填高さ(ランク3)	cm	30以上	35.0	35.0	34.8	34.8	35.0
スランプロー	cm	60±10	62.0	62.5	61.0	61.0	62.0
500mmフロー到達時間	秒	3~15	5.0	5.7	7.0	7.0	7.2
空気量	%	4.5±1.5	4.5	4.1	4.2	4.5	4.6

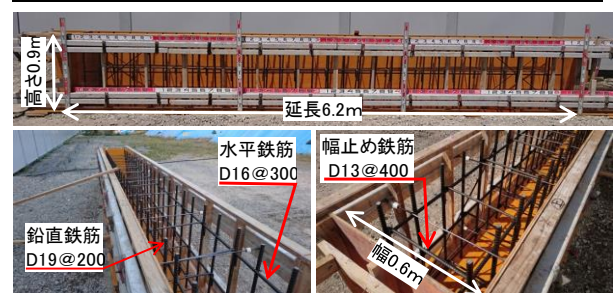


写真-3 実物大の壁状模擬型枠の概要

ンクリートが締め固めを行うことなく容易に流動し充填できることを既往の実験<sup>10)</sup>により検証している。



写真-4 壁状模擬型枠を用いた流動実験における低セメント量の高流動コンクリートの流動状況

高流動コンクリートは、実施工時と同様に、出荷予定のレディーミクストコンクリート工場で4m<sup>3</sup>製造し、アジテータ車に積み込んで現場内に設置した壁状模擬部材まで約25分かけて運搬した。現場に到着後、専用の投入機を用いてPP繊維を混入した。その後、型枠の端部より、アジテータ車のシュートにて型枠内に打ち込んだ。

なお、現場到着時のベースコンクリートのスランプフローは65.5cm、空気量は3.1%であり、PP繊維投入後はそれぞれ61.5cm、4.6%であった。

## 5.2 実験結果および考察

高流動コンクリートの流動状況を写真-4～写真-5に示す。なお、コンクリートは、実施工時の荷卸し速度を想定して、約5分で打ち込んだ。流動試験は春期に行い、コンクリート温度は20～23℃であった。

コンクリート自体の高い流動性により、鉄筋間隙を容易に通過し、6.2m先の反対側端部まで流動し、充填できた。また、流動に伴い、ブリーディング水などが先走ることはなく、均一な状態で流動していた。

充填後に、流動勾配を測定した。打込み箇所と流動先端箇所での上面高さの差は16cm（流動勾配は約1/40）であった。また、写真-5に示すように、上面には骨材も認められ材料分離は生じておらず、側面もきれいにコンクリートが充填されていた。

流動先端箇所の下部において、コンクリート試料を採取して、試料中に含まれる粗骨材量とPP繊維の量を測



写真-5 実験後の打上がり上面(左)と側面(右)の状況

定した。測定の結果、試料中の粗骨材量は設計値（示方配合における単位粗骨材量）の95%であり、材料分離することなく均質な状態で充填できていることが確認できた。また、PP繊維の混入率は設計値（0.3Vol%）の117%であり、実施工における混入率試験の規格値（80～120%）を満足できていた。さらに、流動前および流動先端箇所から採取した試料で供試体を作製し、圧縮強度試験を行った。流動実験前の試料の材齢28日の圧縮強度は38.5N/mm<sup>2</sup>、流動先端は38.4N/mm<sup>2</sup>と同等であった。

以上の結果より、今回の高流動コンクリートを用いることで、鉄筋を有する断面においても、コンクリート自体の流動性により、型枠内を流動し、均質な状態で充填できることが検証できた。

## 6. 実施工

本章では、道路トンネルの覆工に実適用した際におけるコンクリートの品質試験結果、セントルに作用する側圧の測定結果、天端部における充填の確認結果および打上がり等について示す。

### 6.1 コンクリートの製造と打込み方法

コンクリートの製造は、前章の実機試験と同様に行い、アジテータ車にて施工現場まで運搬した。なお、特殊増粘剤は、写真-6 に示すように、あらかじめ1バッチ当たりの製造量に相当する特殊増粘剤を水溶紙で梱包し、他の材料の投入に合わせて手で投入した。

コンクリートの打込みは、従来の覆工施工と同様に、側壁部ではスパン中央付近より、天端部では端部の吹上げ口より行った。側壁部では、コンクリートの打上がりに伴い、順次打込み口を上方に移動させた。コンクリートの打上がり高さは、一般的な施工と同様に1.5m/h程度とし、セントルに作用する圧力をSL付近に設置した圧力計にて計測した。また、天端部においてコンクリートが確実に充填できていることを確認するため、天端部に7台の圧力計を設置して充填状況を監視した。

### 6.2 品質試験結果

高流動コンクリートは、締固め作業を行わないことから、表-1 に示す目標品質を有するコンクリートがレディミクストコンクリート工場から安定的に供給される必要がある。そこで、施工当初は品質試験頻度を高めてコンクリートの性状を確認した。一例として、CパターンおよびDパターンの初回施工時の品質試験結果を表-5 に示す。いずれの試験項目においても、目標とする品質が確保できていることが確認できた。

### 6.3 セントルに作用する側圧

一般に高流動コンクリートを用いる場合、型枠には液圧が作用するとして型枠支保工の設計を行う必要がある。トンネル覆工は施工高さが高く、液圧で設計すると大掛かりなセントルの補強が必要となる。そこで、セントルSL付近に設置した圧力計にて、側圧を測定した。

測定結果を図-5 に示す。側圧の最大値は、Dパターンの場合が約0.045N/mm<sup>2</sup>、Cパターンが約0.035N/mm<sup>2</sup>であった。セントルの設計耐力(0.08N/mm<sup>2</sup>)に対して十分に小さく、既往の知見<sup>3)</sup>におけるスランプフロー35~50cm程度の中流動コンクリートを用いた場合と大差のない結果であった。今後データの蓄積が必要であるが、トンネル覆工は打上がり速度が比較的小さいため、施工高さの全高に相当する圧力(本工事の場合、約0.2N/mm<sup>2</sup>)のような大きな側圧は作用しないと考えられる。

### 6.4 コンクリートの流動および充填状況

高流動コンクリートの流動状況を写真-7 に示す。コンクリート自体の高い流動性により、セントル内を容易に流動していた。また、コンクリートの打込み箇所と流動先端箇所との流動勾配はほとんど生じていなかった。流動先端においてもブリーディング水の先走りは認められず、均質な状態で流動・充填できていた。

天端部はコンクリートが特に充填しにくい箇所であ



写真-6 特殊増粘剤の梱包状況(左)と投入状況(右)

表-5 実施工における荷卸し時の品質試験結果の一例

支保パターン	項目	単位	目標品質	測定結果			
				回数	平均	最大	最小
C	充填高さ(ランク3)	cm	30以上	8	34.8	35.3	34.5
	スランプフロー	cm	60±10	8	61.4	65.5	57.0
	500mmフロー到達時間	秒	3~15	8	6.4	9	5.5
	空気量	%	4.5±1.5	8	3.8	4.5	3.1
	単位水量(エアメータ法)	kg/m <sup>3</sup>	161±15	8	163	172	157
D	充填高さ(ランク3)	cm	30以上	8	34.9	35.0	34.5
	スランプフロー	cm	60±10	8	63.6	68.0	61.0
	500mmフロー到達時間	秒	3~15	8	4.6	6.2	3.5
	空気量	%	4.5±1.5	8	4.0	5.0	3.7
	単位水量(エアメータ法)	kg/m <sup>3</sup>	173±15	8	175	181	172

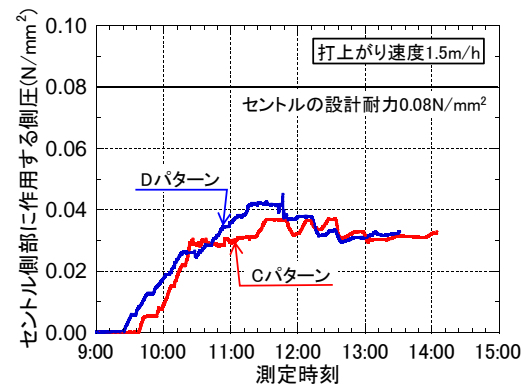


図-5 セントル側部に作用する側圧の測定結果



写真-7 高流動コンクリートの流動状況

る。そこで、本工事ではセントル天端部の7か所に圧力計を設置して充填状況を監視した。圧力計による測定結果例を図-6 に示す。いずれの高流動コンクリートを用いた場合においても、天端部の各所において、覆工厚さに相当する圧力の2倍以上の圧力がセントルに作用しており、確実に充填できることが確認できた。

なお、Dパターンの作用圧力は、Cパターンに比べて若干大きい傾向にある。これは、PP繊維を混入したことで、コンクリートの圧送抵抗が大きくなったこと等が理由として推測される。

### 6.5 仕上がり状況

脱型後の仕上がり状況を写真-8 に示す。充填不良やひび割れは発生していなかった。また、従来の覆工コンクリートで生じやすい天端部の縞模様はほとんど認めら

れず、高流動コンクリートを用いることで、仕上がりも良好となることが確認できた。

## 7. まとめ

新規の特殊増粘剤と市販の高性能 AE 減水剤を用いることで、従来の覆工コンクリートと同じセメント量のまま高い流動性と自己充填性を確保した低セメント量の高流動コンクリートを道路トンネルの覆工に適用した。一連の事前検討および実施工で得られた知見を以下に示す。

- (1) 低セメント量の高流動コンクリートは、従来の覆工コンクリートに比べブリーディングが小さく、圧送性に優れる。また、強度や耐凍害性は同等である。
- (2) 低セメント量の高流動コンクリートは、コンクリート自体の高い流動性と自己充填性により、鉄筋間隙を通過し、均質な状態で流動・充填できる。
- (3) 市中のレディーミクストコンクリート工場において、品質の安定した低セメント量の高流動コンクリートが製造・供給できる。
- (4) 高流動コンクリートは、セントル内を材料分離することなく容易に流動し、型枠の隅々まで充填できる。
- (5) 高流動コンクリートを用いて構築したトンネル覆工は、充填不良や天端部の縞模様は認められず、仕上がりも良好となる。

なお、本工事は、2018年6月より高流動コンクリートによる覆工施工を開始しており、2019年1月時点で約600mの施工を完了している。

最後に、今回の低セメント量の高流動コンクリートの適用に際しては、国土交通省九州地方整備局大分河川国道事務所の方々に多大なるご理解とご協力をいただきました。記して御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) たとえば、土木学会：コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案，コンクリートライブラリー148，pp.3-14，2016.12
- 2) たとえば、土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012年版]，コンクリートライブラリー136，pp.資料-83～110，2012.6
- 3) 中間祥二，谷藤義弘，森俊介，桜井邦昭：中流動コンクリートを用いたトンネル覆工の施工—北海道横断自動車道 久留喜トンネル—，コンクリート工学，Vol.48，No.6，pp.25-30，2010.6
- 4) 加藤隆雄，黒川尚義，出口大輔，桜井邦昭：高流動コンクリートによる大断面トンネルの覆工コンクリートの施工，コンクリート工学，Vol.55，No.7，pp.584-590，2017.7
- 5) 桜井邦昭，泉水大輔，山川勉，石田知子：新規の特

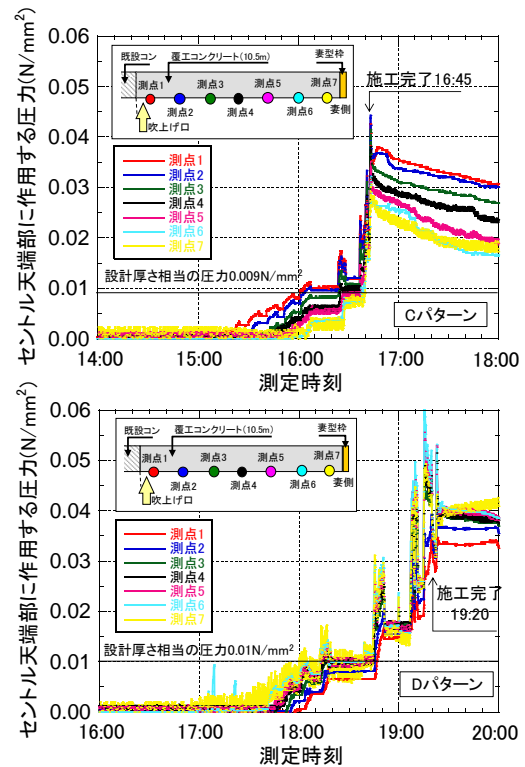


図-6 天端部の充填状況の測定結果



写真-8 トンネル覆工の仕上がり状況

- 殊増粘剤を用いた低セメント量の高流動コンクリートの開発と実構造物への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1161-1166，2018.7
- 6) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012年版]，コンクリートライブラリー136，pp.86-92，2012.6
- 7) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説，p.140，1997.1
- 8) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説，pp.74-76，2015.2
- 9) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針 [2012年版]，コンクリートライブラリー135，p.26，2012.6
- 10) 黒川尚義，西浦秀明，岡崎雄一，桜井邦昭：低セメント量の高流動コンクリートのトンネル覆工への適用性検討—その2 柱部材を用いた側圧実験と流動距離 10.5m の打込み実験—，土木学会第 73 回年年次学術講演会概要集，VI-100，pp.199-200，2018.8