

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の検討

渡辺 匠¹・桜井 邦昭²・黒川 尚義³・西浦 秀明⁴・岡崎 雄一⁵

¹正会員 株式会社大林組 名古屋支店 (〒461-8506 名古屋市東区東桜1-10-19)

E-mail:takumi.watanabe@obayashi.co.jp

²正会員 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:sakurai.kuniaki@obayashi.co.jp

³正会員 株式会社大林組 名古屋支店 (〒461-8506 名古屋市東区東桜1-10-19)

E-mail:kurokawa.naoyoshi@obayashi.co.jp

⁴正会員 株式会社大林組 土木本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:nishiura.hideaki@obayashi.co.jp

⁵正会員 株式会社大林組 土木本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:okazaki.yuichi@obayashi.co.jp

覆工作業の生産性を向上するには、締固め作業が不要な高流動コンクリートの適用が効果的である。しかし、これまでの高流動コンクリートは、従来のトンネル覆工に用いるコンクリートに比べて単位セメント量を大幅に増加させる必要がある。そこで、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、単位セメント量をほとんど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、道路トンネルの覆工コンクリートに適用した。その結果、締固め作業を行うことなく、均質なトンネル覆工を構築できることを確認した。

Key Words : self-compacting concrete, tunnel lining, special viscosity agent, improve of production

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¹⁾。トンネルの覆工作業でも、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、作業環境は必ずしも良好であるとは言えない。

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^{2,3)}や高充填コンクリート^{4,5)}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。覆工作業の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セメント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ため、高密度な配筋を有する

場合⁶⁾などを除き、覆工にはほとんど適用されていない。

そこで、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に比べ、セメント量をほとんど増加することなく、自己充填性を有する低セメント量の高流動コンクリートを開発した⁷⁾ (図-1)。

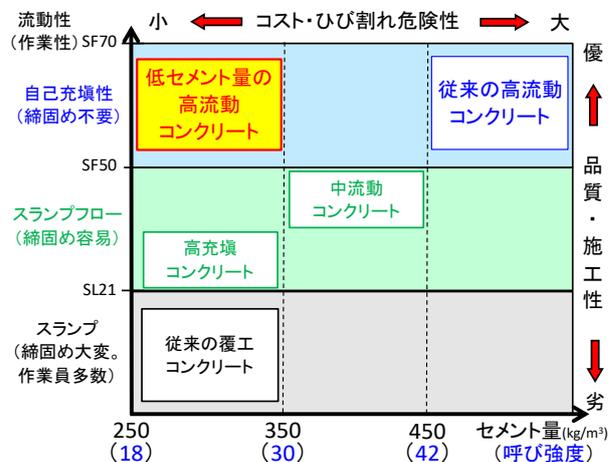


図-1 低セメント量の高流動コンクリートの位置づけ

表-1 高流動コンクリートの目標とした品質

試験項目	目標とした品質	試験方法
充填高さ(ランク3)	30cm以上	JSCE-F511
スランプフロー	60±10cm	JIS A 1150
空気量	4.5±1.5%	JIS A 1128
ブリーディング	従来の覆工に対して低減	JIS A 1123
加圧ブリーディング	指針 ⁹⁾ に示される「良好な圧送」の範囲内	JSCE-F502
圧縮強度	・設計基準強度以上 ・従来覆工と同等以上の発現性	JIS A 1108
中性化深さ	従来の覆工に対し同等以下	JIS A 1152 JIS A 1153
凍結融解抵抗性	従来の覆工に対し同等以上	JIS A 1148

表-2 使用材料

種類	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
水	W	地下水
細骨材	S1	川砂, 表乾密度2.62g/cm ³
	S2	砕砂, 表乾密度2.65g/cm ³
粗骨材	G1	砕石1505, 表乾密度2.66g/cm ³
	G2	砕石2010, 表乾密度2.66g/cm ³
	G3	砕石4020, 表乾密度2.66g/cm ³
混和剤	WR	AE減水剤(高機能タイプ)*汎用品。従来覆工で使用
	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)*汎用品。高流動で使用
	VMA	特殊増粘剤(粉末状, セルロースエーテル)*高流動で使用

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試験結果

コンクリート種類	自己充填性のランク	目標スランプフロー(cm)	粗骨材の最大寸法(mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤		フレッシュコンクリートの品質				
						W	C	S		G			減水剤(C×%)	特殊増粘剤(g/m ³)	スランプフロー(cm)	空気量(%)	充填高さ(cm)	ブリーディング率(%)
								S1	S2	G1	G2	G3						
従来の覆工コンクリート	-	スランプ15±2.5	40	55.0	48.2	165	300	615	267	287	287	383	HWR 1.0	-	スランプ16.5	5.8	17.9	8.8
低セメント量の高流動コンクリート	ランク3	60±10	40	48.5	47.2	165	340	422	427	335	335	287	SP 0.90	30	55.0	5.5	33.1	2.4

本稿では、開発した高流動コンクリートを道路トンネルの覆工全線に適用することを目的に実施した各種品質試験、側圧検証実験および流動実験の結果を示すとともに、実際に道路トンネルの覆工に適用した結果を示す。



写真-1 特殊増粘剤の外観

2. 高流動コンクリートの目標品質の設定

高流動コンクリートの配合選定にあたり目標とした品質を表-1に示す。目標品質は土木学会のコンクリート標準示方書や高流動コンクリート指針⁸⁾を参考に設定した。覆工は、大半が無筋構造物であるため自己充填性のランクはランク3、スランプフローの目標値は60±10cmとした。また、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を実施した。さらに、強度発現性や各種の耐久性も試験した。



写真-2 従来の覆工(左)と高流動コン(右)の外観

3. 室内試験による配合選定と各種品質の確認

(1) 高流動コンクリートの配合

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表-3に示す。単位水量やセメント量の増加を抑制するため、従来覆工と同じ最大寸法40mmの粗骨材を用いた。なお、特殊増粘剤の主成分はセルロースエーテルである。写真-1に示すように、平均粒径80μmの微粉末で、使用量は30g/m³と少量である。また、高性能AE減水剤は市販の汎用品である。このため、この高流動コンクリートは、日本各地の生コン工場で容易に製造することが可能である。

(2) フレッシュコンクリートの品質

高流動コンクリートのフレッシュ品質の試験結果を表-3中に示す。選定した高流動コンクリートは、目標とする流動性および自己充填性を満足できていた。また、スランプフロー試験後の試料を観察したところ、モルタル分と粗骨材との分離やブリーディング水の浮き上がりは認められなかった(写真-2)。

ブリーディングおよび加圧ブリーディング試験結果を図-2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の1/4程度に低減されており、施工時の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は、従来の覆工コンクリートでは、土木学会のポンプ施工指針⁹⁾に示

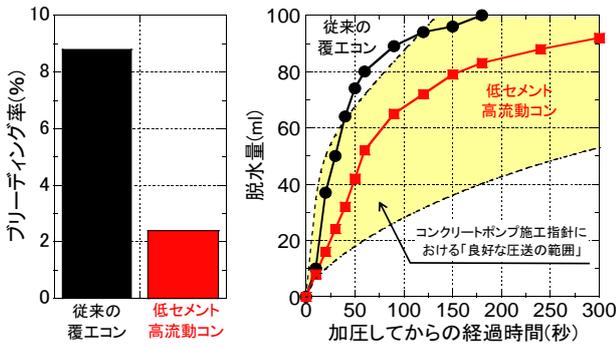


図-2 ブリーディングおよび加圧ブリーディング試験結果

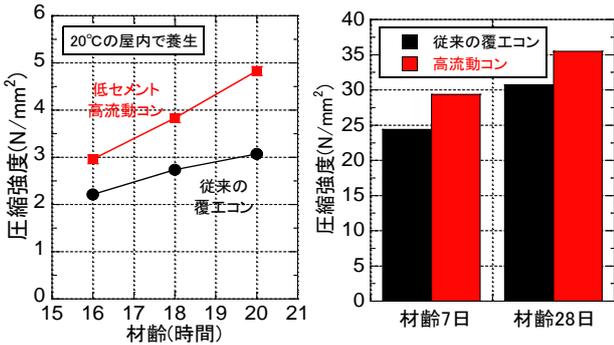


図-3 圧縮強度試験結果 (左: 若材齢, 右: 通常材齢)

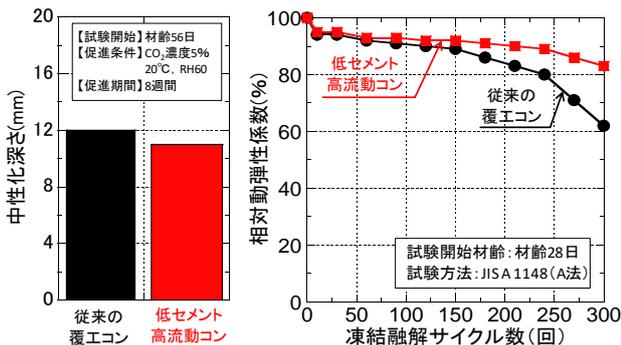


図-4 耐久性試験結果 (左: 中性化, 右: 凍結融解)

される良好な圧送が行える範囲から逸脱しており、圧送時の閉塞が生じやすいことが示唆される結果であったのに対し、低セメント量の高流動コンクリートは圧送性に優れる配合であることが確認できた。

(3) 強度発現性と耐久性

圧縮強度試験結果を図-3に示す。低セメント量の高流動コンクリートの若材齢における強度発現性は、従来の覆工コンクリートと同等以上であり、従来通りのサイクルで覆工作业が行えることを確認した。

耐久性の試験結果を図-4に示す。中性化に対する抵抗性や凍結融解抵抗性とも従来の覆工コンクリートと同等以上であることを確認した。

以上の結果から、今回選定した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と同等の強度および耐久性を有することが確認できた。

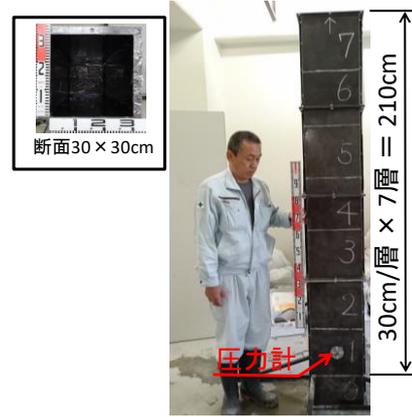


写真-3 側圧実験に用いた柱部材の外観

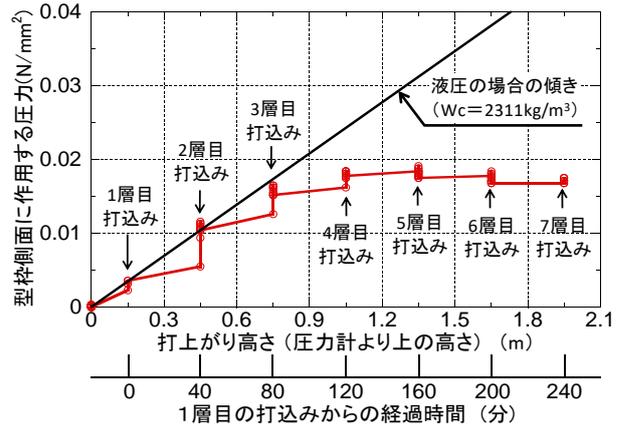


図-5 打上がり高さ and 型枠に作用する圧力

4. 柱部材を用いた側圧検証実験

(1) 実験目的

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セントルの設計を行う必要がある。覆工は施工高さが高く、液圧として考慮すると大がかりな補強が必要となり不経済である。そこで、柱部材を用いた側圧実験を行い、実施工時にセントルに作用する側圧を推定し、セントルの設計に反映させることにした。

(2) 実験概要

実験に用いた柱部材を写真-3に示す。高流動コンクリートの打込みは30cm/層とし、40分間隔（打上がり速度0.45m/h）で合計7層に分けて行った。圧力計は1層目の中心に設置し、打上がりに伴う側圧を測定した。

高流動コンクリートには前章で選定した配合を用い、上述の打込み速度に合わせて40分間隔で製造し、所要の品質であることを試験で確認した後に打ち込んだ。なお、試験は温度20°Cで制御された屋内で行った。

(3) 実験結果および考察

側圧の測定結果を打上がり高さとの関係で整理して図-5に示す。側圧は、3層目の打込み完了まで（1層目の打

込みから80分後まで)は、液圧とほぼ等しい。

その後、側圧の増加は急激に緩やかとなり、5層目の打込み完了後(同160分後)で最大値に達した。その後は、緩やかに低下した。型枠に作用した側圧の最大値は約0.018N/mm²であり、この時点(160分後)まで液圧が作用するとした場合(0.035N/mm²)の約50%であった。

1層目の打込みに合わせて、試料をスランブコーンに詰めて静置した後、40分間隔で引き抜く静置スランブ試験を行った(写真-4)。静置後80分までは、試料は横方向に流動し、型枠には圧力が作用していると推察された。一方、静置後120分では、試料は横方向には移動せずに崩れ、160分後では自立する状態であり、側圧がピークに達したのを裏付けるような結果であった。

標準的な覆工作業の打上がり速度は1.5m/h程度である。試験結果から打込み160分後には液圧相当の50%の圧力が作用すると仮定すると、実施工では約0.046N/mm²の側圧が作用すると想定された。実施工では、打込み作業に伴うセントルの変形や、温度条件によっては長時間にわたり側圧が増加する恐れもあることから、30%の安全率を見込んで実施工に用いるセントルの設計耐力は0.06N/mm²に設定することにした。



写真-4 静置スランブ試験状況 (写真中の数値は静置時間)

5. 壁状部材を用いた流動実験

(1) 実験概要

トンネル覆工は打込み箇所が制限されるため、コンクリートの流動距離が長くなり、材料分離の発生や均質性の低下が懸念される。そこで、実施工での最大流動距離10.5mを模擬した実物大の模擬部材(長さ10.5m×幅0.3m×高さ0.9m, 数量2.2m³)を用いた流動実験を行った。

コンクリートは、出荷予定の生コン工場の実機ミキサで製造(2m³×2バッチ)した。アジテータ車にて施工現場まで約30分かけて運搬した後に、模擬部材の端部から、アジテータ車のシュートにて打ち込んだ。実施工での荷卸し速度を模擬し、約5分で打ち込んだ。

なお、実験は秋期に行い、実験時のコンクリート温度は約15°Cであった。

(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-5に示す。コンクリート自体の高い流動性により、反対側端部まで容易に流動した。また、ノロやペースト分の先走りは認められなかった。実験後に、打込み箇所と流動先端箇所でのコンクリートの打上がり高さを測定したところ、その差は6cmで流動勾配に換算すると約1/175となり、ほぼ平坦に流動できていた。

また、流動先端部で試料を採取して洗い試験を行い、試料中の粗骨材量を調べたところ、含有していた粗骨材量は、粒径4020が配合計算値に対して103%、粒径2005が102%であり、均質な状態で流動・充填できていたことを確認した。

以上の結果から、選定した低セメント量の高流動コンクリートを用いることで、締固めを行うことなく、型枠の隅々まで均質な状態で充填できると推測された。

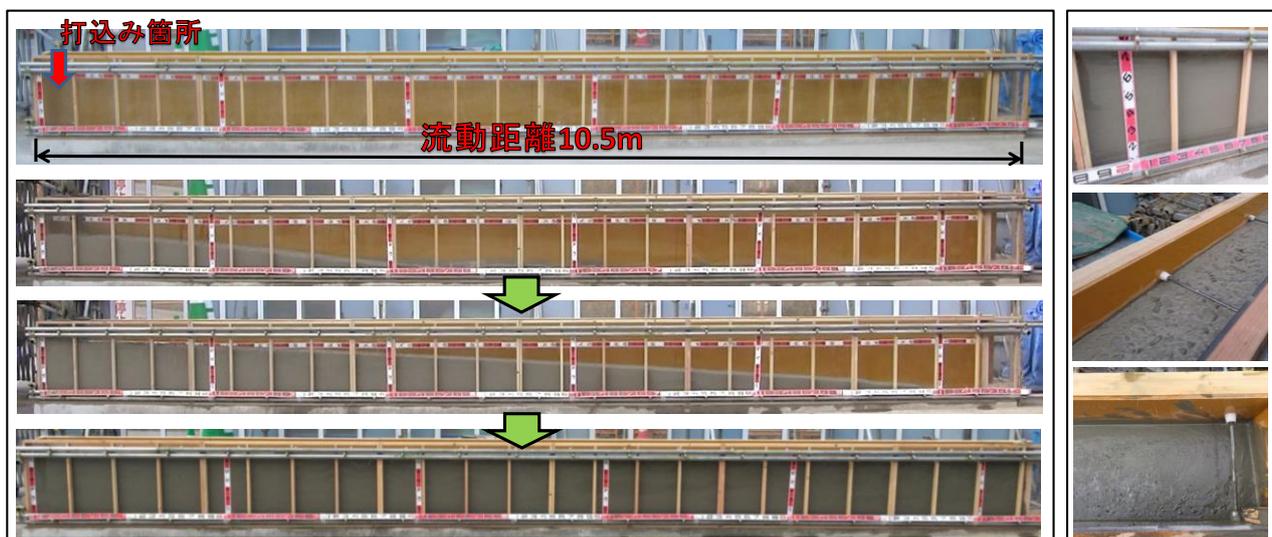


写真-5 低セメント量の高流動コンクリートの流動状況 (左) と充填後の側面および上面の状態 (右)



写真-6 水溶紙に梱包した特殊増粘剤の外観



写真-7 特殊増粘剤の自動投入装置の外観

表-4 荷卸し時の品質試験結果

試験項目	目標品質	単位	測定回数	試験結果		
				平均値	最大値	最小値
スランブフロー	60±10	cm	28	57.6	66.0	51.5
500mmフロー到達時間	3~15	秒	28	8.4	12.7	5.6
空気量	4.5±1.5	%	28	4.5	5.5	3.5
充填高さ	30以上	cm	11	33.5	35.5	31.0
単位水量	165±15	kg/m ³	7	161.3	171.4	151.9

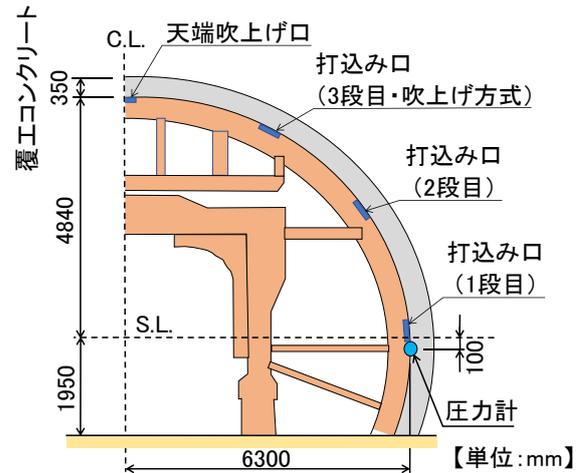


図-6 コンクリートの打込み方法の概要

6. 高流動コンクリートによる覆工の施工

(1) 高流動コンクリートの製造

高流動コンクリートの製造は、5章で示した方法と同様に、2m³/バッチで製造し、2バッチ製造して、アジテータ車で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、予め1バッチ当たりの使用量（60g）を水溶紙に梱包した状態で準備し、写真-7に示す自動投入装置から投入した。この装置は、生コン工場の操作室からボタン操作できる仕組みになっており、セメントや骨材等の他の材料の投入に合わせて増粘剤を自動投入することができる。

(2) 品質試験結果

高流動コンクリートを用いた施工では、締固め作業を行わないことから、コンクリートのフレッシュ時の品質が、構築される覆工の良否に直結する。このため、安定した品質の高流動コンクリートを継続的に製造・出荷することが極めて重要である。

そこで、施工当初は頻度を高めて、コンクリートの品質試験を実施した。2018年7月末現在における荷卸し時の品質試験結果の一覧を表-4に示す。

いずれの試験項目でも、目標とする品質が確保されており、今回採用した高流動コンクリートが、市中の生コン工場から安定して製造・出荷できることが確認できた。

(3) コンクリートの打込み方法

コンクリートの打込み方法の概要を図-6に示す。従来の覆工コンクリートの施工と同様に、側壁部はスパン中央付近の左右の打込み口から、天端部は既設側の吹上げ口から打ち込んだ。

側壁部では、コンクリートの打ち上がりに合わせて順次、上方の打込み口に切り替えた。また、1層当たりの打込み高さが50cm以下となるように、アジテータ車1台のコンクリート（4m³）を左右に半分ずつ打ち込むとともに、自由落下高さが1.5m以下となるように適宜サニーホースを設置した。打上がり速度は、標準的な施工速度である1.5m/hとした。

なお、高流動コンクリートであることから、締固め作業は行っていない。

(4) コンクリートの流動状況

低セメント量の高流動コンクリートの型枠（セントル）内での流動状況を写真-8に示す。

本工事では、一部に補強鉄筋を有する区間もあったが、容易に鉄筋間隙を通過し、型枠の隅々まで材料分離することなく流動・充填できていた。また、ノロやペースト分の浮き上がりもほとんど認められなかった。

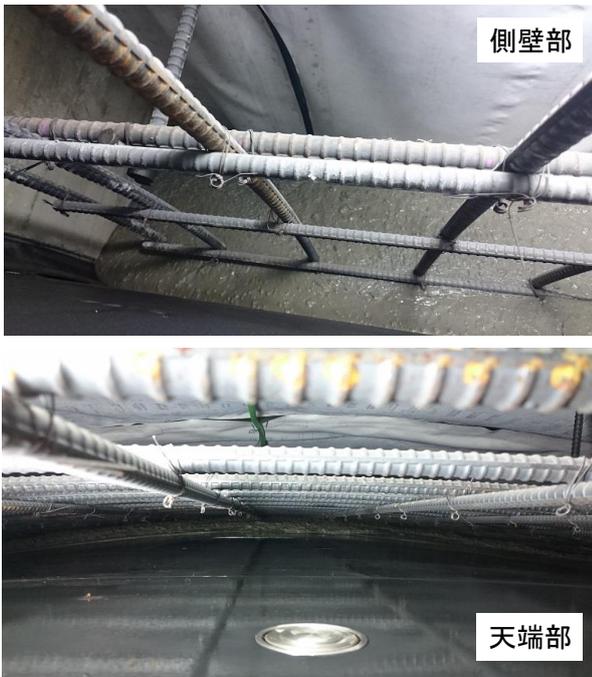


写真-8 コンクリートの流動状況

(5) セントルに作用する側圧

セントル下端部に圧力計を設置して、コンクリートの打上がりに伴い、セントルに作用する側圧を計測した結果を図-7 に示す。打上がりに伴い側圧は増加するが、打込みの約 60 分後にピークを迎えた後は、ほとんど増加しない結果であった。側圧の最大値は 0.04N/mm^2 程度であり、3 章に示した柱部材を用いた実験結果からの推定値 (0.046N/mm^2) と同程度であった。一方、既往の文献⁷⁾では、粗骨材の最大寸法 20mm を用いた低セメント量の高流動コンクリートの側圧は約 0.055N/mm^2 であったことが示されている。今回用いた高流動コンクリートは、粒径の大きい粗骨材を用いていることなどの影響により、一般に言われるほどの側圧の増加が認められなかった可能性もある。今後データを蓄積していく必要はあるものの、今回開発した低セメント量の高流動コンクリートを用いる場合には、従来のセントルに対してそれほど大がかりな補強対策は不要であると考えられる。

(6) 天端部の充填確認

覆工コンクリートの天端部は、端部からの吹上げ施工となるため、特に充填が難しい部位である。そこで、セントルの天端 3 か所に圧力計を設置して、コンクリートが確実に充填できることを検証した。測定結果を図-8 に示す。いずれの測定箇所においても、覆工厚さに相当する圧力に対して 5 倍程度の圧力が作用しており、締固めを行うことなく密実に充填できることが確認できた。

(7) 仕上がり状況

低セメント量の高流動コンクリートを用いて構築した

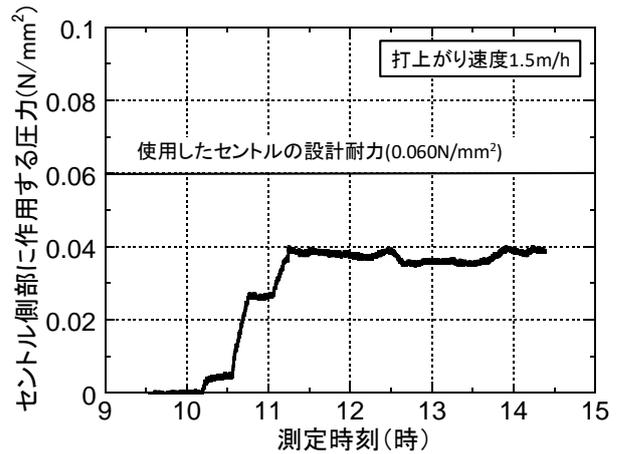


図-7 セントルに作用する側圧の測定結果

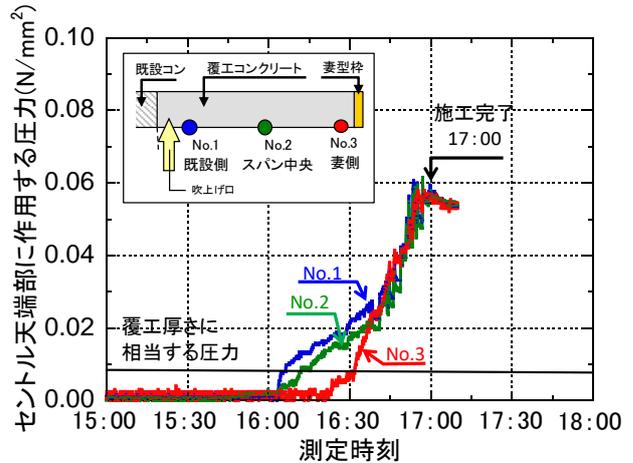


図-8 天端部の充填確認の測定結果



写真-9 高流動コンクリートで構築した覆工の仕上がり状況

覆工の外観を写真-9 に示す。充填不良やひび割れは一切認められなかった。また、従来の覆工コンクリートを

用いた場合に生じやすい側壁部の表面気泡や、天端部での色むら等も大幅に低減されており、仕上がりも良好となることが確認できた。

なお、文献⁷⁾によれば、今回と同様の道路トンネルの覆工を普通コンクリートで施工したところ、棒状バイブレータによる締固め作業時間は合計 960分(16時間)であったことが示されている。このため、高流動コンクリートの採用により締固め作業を排除することで、作業員数を2名程度削減できる可能性があるものと考えられる。また、棒状バイブレータによる締固め作業は、大きな騒音・振動を生じる作業であることから、締固めを排除することは作業環境の改善にも貢献できるといえる。

本工事においても、コンクリートの施工中に作業員が行う作業は、配管の切り替え、検査窓の閉鎖、清掃等であり、従来に比べ少人数で対応できている。また、セントル内にはコンクリートポンプの圧送音のみが生じており、作業環境も大幅に改善できている。

7. まとめ

特殊増粘剤を用いることで、従来の覆工コンクリートに対して、単位セメント量をほとんど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、道路トンネルの覆工コンクリートに適用した。一連の検討で得られた知見を以下に示す。

- ・開発した低セメント量の高流動コンクリートは、ブリーディングを大幅に低減できるとともに、良好な圧送性を確保できる。また、強度発現性や各種の耐久性は従来の覆工コンクリートと同等以上である。
- ・実施工を模擬した流動実験の結果から、低セメント量の高流動コンクリートは、材料分離せずに、均質な状態で長さ10.5mを容易に流動し充填できる。
- ・市中の生コン工場から安定した品質の低セメント量の高流動コンクリートが製造・出荷できる。
- ・低セメント量の高流動コンクリートは、補強鉄筋を有する場合でも鉄筋間隙を容易に通過して型枠の隅々まで流動し充填できる。
- ・低セメント量の高流動コンクリートを標準的な打上が

り速度で施工した場合、セントルに作用する側圧は、 0.04N/mm^2 程度であった。今後、さらにデータを蓄積していく必要があるものの、セメント量が少なく、粒径の大きな粗骨材を用いた高流動コンクリートの場合には、従来の覆工コンクリートでの施工に用いるセントルに比べて、それほど大がかりな補強対策は不要と考えられる。

- ・低セメント量の高流動コンクリートを用いることで、締固め作業を行うことなく、仕上がりの良好なトンネル覆工を構築できる。

参考文献

- 1) たとえば、流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会：流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン，pp.1-7，2017.3
- 2) 村崎慎一，森俊介，中間祥二，桜井邦昭：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—北海道横断自動車道 久留喜トンネル—，トンネルと地下，Vol.41，No.12，pp.7-16，2010.12
- 3) 諏訪園和彦，松野徹，泉水大輔，桜井邦昭：増粘剤系中流動コンクリートによるトンネル覆工の施工—南九州西回り自動車道 津奈木トンネル（仮称）—，コンクリート工学，Vol.50，No.4，pp.366-371，2012.4
- 4) 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
- 5) 鈴木成，永松雄一，黒川尚義，西野俊論，西浦秀明，桜井邦昭：高充填コンクリートの諸地域への展開，トンネル工学報告集，第26巻，I-13，2016.11
- 6) 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
- 7) 桜井邦昭，泉水大輔，山川勉，石田知子：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
- 8) 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
- 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

(2018.8.10 受付)

APPLICATION FOR TUNNEL LINING OF NEW TYPE SELF-COMPACTING CONCRETE WITHIN LOW CEMENT CONTENT USING NEW SPECIAL VISCOSITY AGENT

Takumi WATANABE, Kuniaki SAKURAI, Naoyoshi KUROKAWA, Hideaki NISHIURA and Yuichi OKAZAKI

We have newly developed self-compacting concrete(SCC) with the same unit cement as ordinary concrete using inexpensive special viscosity improver and with the maximum size of coarse aggregate, 40mm. We have also applied it to the lining of a road tunnel.

Before the actual construction, the side pressure was investigated acting on the lining form by a model test. The lining form was designed considering the result of this test. In addition, fluidity test was also conducted using a model form with the same length as the actual lining form, 10.5m. From this test, it was investigated whether the newly developed SCC uniformly flows to fill every space and corner.

Finally, the SCC was applied to the actual construction. As a result, the concrete properly flew to every corner without vibration, which has realized a high-quality tunnel lining without segregation. Moreover, absence of vibration work could reduce the number of crews working on the tunnel lining, and the work environment was improved.