

山岳トンネル現場における 覆工用高流動コンクリートの適用

松本 修治・坂井 吾郎・手塚 康成

近年、建設業界では、作業員の高齢化に伴う労働力不足により生産性の低下が懸念されており、機械化、自動化に資する技術が求められている。このような課題に対して、山岳トンネルの分野では、覆工において締固め作業を一切必要としないコンクリートの適用が考えられる。著者らは、覆工コンクリート特有の条件を考慮し、「覆工用高流動コンクリート」を開発した。このコンクリートを実際の覆工の施工に適用し、施工性および硬化後の品質について良好な結果を得た。

キーワード：トンネル、二次覆工コンクリート、高流動コンクリート、生産性向上、省人化、自動化

1. はじめに

近年、建設業界では、作業員の高齢化および若年入職者の減少による技能者不足が深刻化しており、労働力不足による建設現場の生産性の低下が懸念されている。それらの課題に対して、国交省では、抜本的に生産性を向上させる重要な施策として「i-Construction」を掲げ、建設作業の機械化、自動化が進められている。山岳トンネル分野では、省人化および品質向上を目的とし、型枠パイププレートで締固めを行うトンネル二次覆工用の中流動覆工コンクリート^{1), 2)}が開発されている。この中流動コンクリートの適用により、狭隘な移動式型枠内の締固め作業を大幅に減少させることができ、覆工コンクリートの品質向上が図られている。

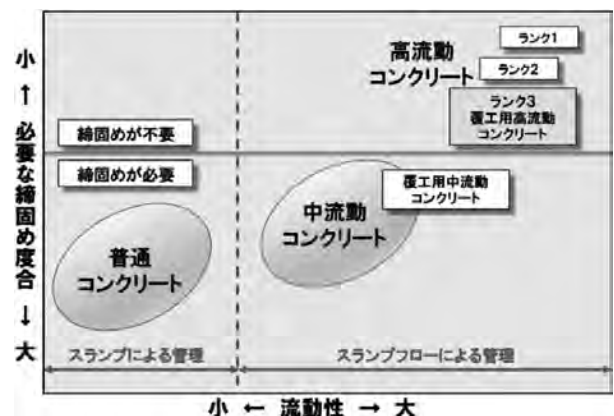
著者らは、これまでに覆工用中流動コンクリートを用いた施工を多く実施してきており、それらを踏まえて覆工コンクリート特有の条件に応じた高流動コンクリート（以下、覆工用高流動コンクリートと称する）の検討を進めている。この覆工用高流動コンクリートを用いることで、型枠パイププレートを含む締固め作業を一切不要とすることができ、コンクリート配管の盛替えなどの施工の機械化や制御技術と組み合わせることで、将来的に覆工コンクリートの打込み全体における自動化を実現することができるものと考えられる。本稿では、覆工の施工自動化の第一歩として、覆工用高流動コンクリートを実際のトンネル覆工に適用した事例について紹介する。

2. 覆工用高流動コンクリート

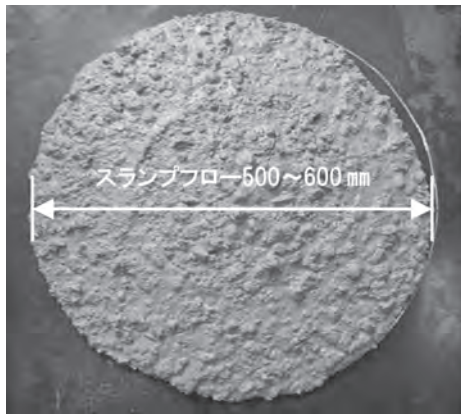
覆工コンクリートは、無筋もしくは単鉄筋程度の配筋を有する構造物である。したがって、覆工用高流動コンクリートは、土木学会の「高流動コンクリートの配合設計・施工指針³⁾」（以下、指針と称する）に示される自己充填性「ランク3」の高流動コンクリートに相当するものと考えられる（図—1）。指針では、ランク3のスランプフローの中心値の範囲として550～650mmという目安を与えているが、著者らは、

- ・打ち込む空間の厚さが300mm程度
- ・ポンプによるコンクリートの圧入が可能
- ・型枠への負荷低減のため、側圧を低減する

という覆工コンクリートの施工上の特徴を鑑み、写真—1に示すようにスランプフローの中心値の範囲として500～600mmを目安とし、中心値を500mm（以下、SF500と称する）と600mm（以下、SF600



図—1 各種コンクリートの位置づけ



写真一 覆工用高流動コンクリート

表一 使用材料

使用材料	記号	種類	摘要
セメント	C	高炉セメント B種	密度：3.04 g/cm ³
細骨材	S	苫小牧市字勇弘産 砂	表乾密度：2.68 g/cm ³ 粗粒率：2.80
粗骨材	G1	北斗市峨朗産 石灰碎石 2005	表乾密度：2.70 g/cm ³ 実積率：59.0% 混合比 70%
	G2	板木山地区 碎石	表乾密度：2.72 g/cm ³ 実積率：59.0% 混合比 30%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物

表二 覆工用高流動コンクリートの配合

配合	W/C %	s/a %	単位量 kg/m ³					混和剤 C*%
			W	C	S	G1	G2	
SF500	45.5	54.0	157	345	976	587	253	0.90
SF600	41.3	55.0	157	380	978	563	243	1.00

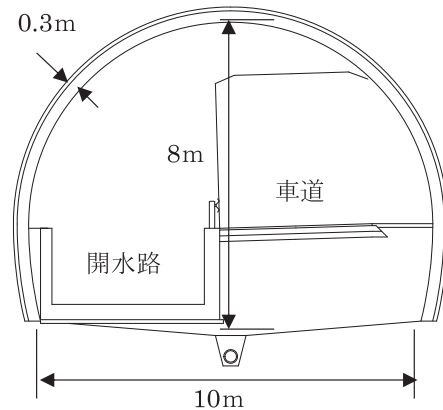
と称する) とした 2 種類の配合を選定した。流動性および材料分離抵抗性を確保する材料としては、コンクリートの製造のしやすさを考慮し、材料の貯蔵や計量が容易な増粘成分一液型の高性能 AE 減水剤を用いることとした。使用材料を表一に、コンクリートの配合を表二に示す。

単位セメント量は、一般部(無筋部)の設計基準強度が 18 N/mm²であることから、できるだけ少なくすることとし、SF500 で 345 kg/m³、SF600 で 380 kg/m³とした。単位水量は、覆工コンクリートの乾燥収縮が大きくなりやすいことを考慮して、できるだけ減じることとし、試験練りにより 157 kg/m³と定めた。

3. 覆工用高流動コンクリートの実現場への適用

(1) 適用現場の概要

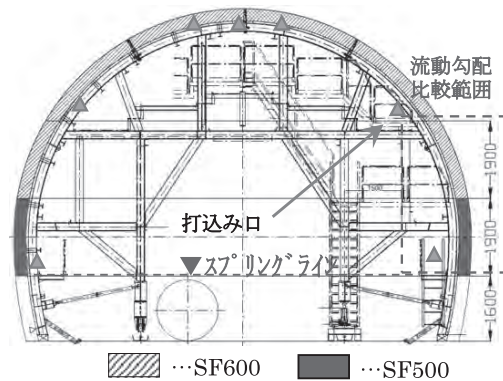
覆工用高流動コンクリートを適用した現場は、図一2に示すようにトンネル断面が内空幅 10 m、内空高 8 m 程度の開水路と車道が併設されたバイパストンネルであり、覆工厚は 300 mm の仕様であった。また、一区間が R = 80 m 程度の曲線であるため、構造上、一般的な移動式型枠より IBL の延長が 6 m と短く、補剛材との取り合いの関係で検査窓が限られた特殊な移動式型枠を用いた。そのため、締固め作業が困難で、覆工コンクリートの打込みには大変な労力が必要となることから、坑口部など一部の区間については、当初計画の段階から中流動コンクリートが用いられることとなっていた。



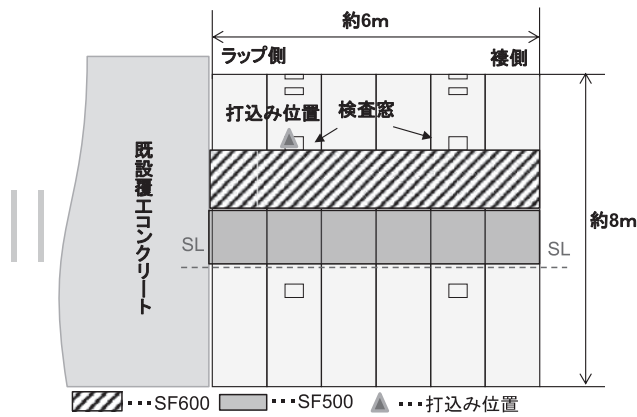
図一2 トンネル断面の仕様

(2) 施工方法

図一3に検査窓の位置と SF500、SF600 の打込み範囲を、図一4に縦断面図における打込み位置を示す。覆工用高流動コンクリートの打込み手順は、覆工コンクリート側壁部の S.L. 下から順に SF500 を 2 層



図一3 検査窓位置と打込み範囲



図一四 打込み位置 (縦断面図)

打ち込んでからSF600を2層打ち込み、それより上部はSF600で天端まで連続して打ち込むこととした。また、覆工用高流動コンクリートの側壁での打ち込みは、側圧が大きくなることが想定されたため、アジテータ車に積載された4m³のコンクリートを15分程度で打ち込んだ後に15分間隔を持たせるようにすることを繰り返してコンクリートの打ち込みを行った。

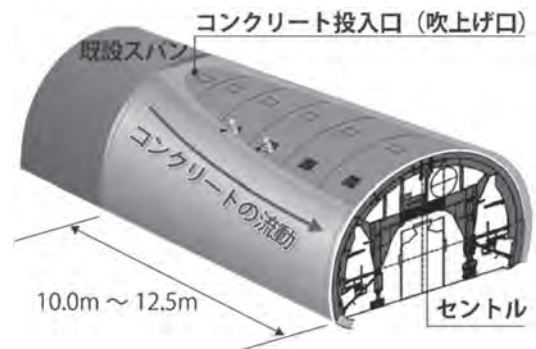
(3) 適用時の検証内容

フレッシュコンクリートの性状は、側壁に打ち込むSF500とSF600を積載したアジテータ車4台からそれぞれ試料を採取し、試験を行った。また、コンクリートの流動勾配について、SF500、SF600を打ち込んだ側壁部で、コンクリートを1層当り4m³打ち込むごとに、検査窓からコンクリートの打上がり面までをスケールで計測し算出した。計測位置は、コンクリートを打ち込み口から4.5m程度流動させた後に打ち込み口と流動距離3mの位置で計測した。硬化後の覆工コンクリートの品質評価としては、覆工コンクリートの表面水分率が5.5%程度以下となった時点でトレント法による現場透気試験を実施した。測定箇所は、SF500を用いたS.L.上部で縦断方向に3か所、SF600を用いた肩上と天端でそれぞれ縦断方向に3か所の計6点とした。また、比較のために、従来の覆工コンクリート(スランプ15cm)を用いた隣接区間でも同様にS.L.から天端まで計9点の計測を行った。

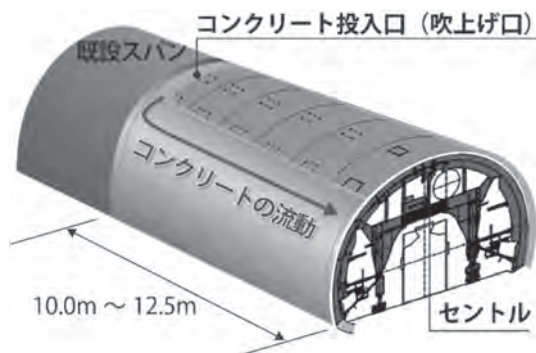
4. 適用結果

(1) 施工状況

図一五に示すように、従来、覆工コンクリートの施工は、スランプ15cm程度のコンクリートを移動式型枠内の30cm程度の狭小な空間に打ち込み、内部振動機を用いて、人力による締固め作業が行われ



図一五 従来の覆工コンクリートの施工状況



図一六 覆工用高流動コンクリートの施工状況

る。そのため、窮屈な姿勢での苦渋作業が余儀なくされており、品質を確保するためには、内部振動機による締固め作業員が4名にコンクリートポンプの操作員が1名の計5名程度の人員が必要である。それに対して、図一六に示すように、今回の覆工用高流動コンクリートの施工では、一切の締固め作業をせずにコンクリートを打ち込めたため、コンクリートポンプの操作員として1名、コンクリート配管の盛替え人員として1名の計2名で施工可能であった。この施工状況から、将来的に圧送および打ち込みの自動制御ができれば、無人化・自動化施工も十分に可能性があるものと考えられる。さらに、作業足場でもある移動式型枠内の狭隘な空間から、パイプレータに関わる一連の機器や配線等がなくなり、作業員の転倒リスク等が低減され、安全性が向上することも確認できた。

一方、施工速度については、打ち込み量約50m³を5時間で完了しており、時間当たりの打ち込み量は10m³/h程度と通常の覆工コンクリートの2/3～1/2であった。これは、スランプ15cm程度の従来のコンクリートを打ち込むことを想定して設計された特殊な移動式型枠に対して、作用する側圧に配慮して施工速度を抑えたことによるものである。しかしながら、今後、さらに生産性向上を図っていくためには、移動式型枠の設計や覆工用高流動コンクリートの材料・配合の工夫により改善していく必要があるものと考えられる。

(2) フレッシュコンクリートの性状

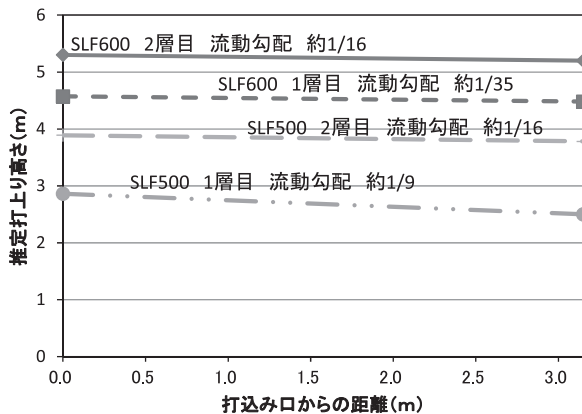
表一3 に実施工でのフレッシュコンクリートの試験結果を示す。表中のSF500-1 は、SF500 の1層目、SF500-2 は2層目に打ち込んだフレッシュコンクリートの性状を示している。SF500, SF600 のいずれの配合も所定の性状を満足するものであった。

表一3 フレッシュ性状試験の結果

配合	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
SF500-1	470	5.2	24
SF500-2	520	-	-
SF600-1	600	5.0	25
SF600-2	610	-	-

(3) 流動勾配

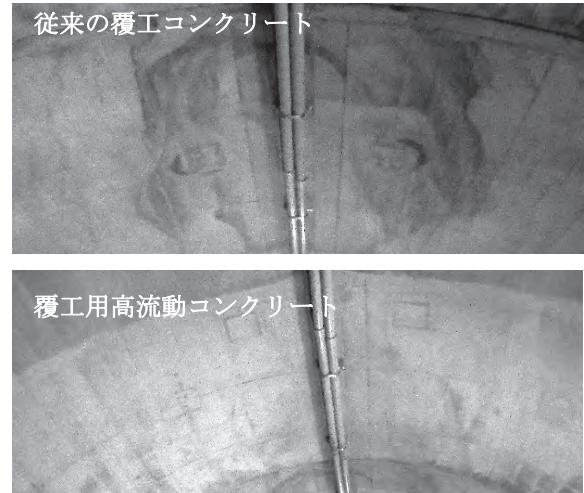
図一7 に、流動勾配の測定結果を示す。スランプフローが470 mmであったSF500 の1層目は、コンクリートを打ち込んでいくと、一定の高さまではあまり流動せずに筒先付近で盛り上がり、さらに打込みが進行すると一気にコンクリートが崩れて急速に流末に流れる現象が観察された。その現象により、流末において粗骨材が分離する傾向が見受けられるとともに、流動勾配は約1/9となった。これは、一般的なIBLの延長である10.5 mを流動させた場合、打込み位置と流末で約120 cmの高低差を生じるものであり、型枠への負荷等を考えると好ましい状況ではないと考えられる。一方、スランプフローが520 mmであった2層目は、コンクリートがスムーズに流動し、流動勾配も約1/16 (同約65 cm)となった。また、粗骨材の分離は観察されず、良好な打上がりであった。これらのことから、打込み時のスランプフローは、500 mm以上が必要であることが確認された。SF600 の1層目は、流動勾配が約1/35、2層目が約1/16であり、天端付近においても充填性が確保され、問題なく打ち上がる様子が確認できた。



図一7 流動勾配の測定結果

(4) コンクリート表面の出来栄

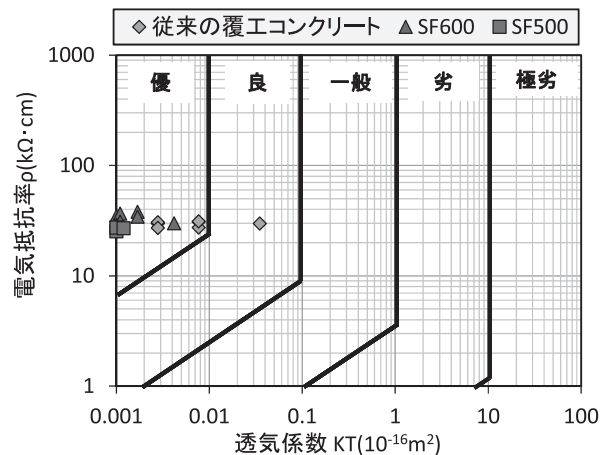
写真一2 に示すように、覆工用高流動コンクリートを打ち込んだBLの表面は、目標スランプが15 cmである従来のコンクリートを打ち込んだBLに比べて天端部の流動跡が非常に少なく、顕著な表面気泡等もなかった。また、打重ね線上で透気試験を実施した結果も、打重ね線のない箇所で計測した結果と同程度であり、打重ね部における一体性が確保されていることを確認した。



写真一2 覆工コンクリートの出来栄比較

(5) 表面の透気試験 (品質)

図一8 に、含水率補正ノモグラムを用いた透気試験結果のグレード評価⁶⁾を示す。図に示すように、従来の覆工コンクリートが「優」~「良」であるのに対して、覆工用高流動コンクリートでは、すべて「優」の評価であり、ばらつきの少ない均質な躯体を構築できたことが確認された。



図一8 透気試験の結果

5. おわりに

今後、覆工用高流動コンクリートは、打込みの省人化、さらに自動化の実現に向けて欠かせない技術になると考えられる。今回の実構造物への適用で得られた知見を踏まえ、トンネル施工における生産性向上に向けた検討を、さらに進めていく所存である。

J C M A

《参考文献》

- 1) ㈱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.
- 2) 坂井吾郎ほか：特殊な混和剤を用いたトンネル覆工用中流動コンクリートの開発，セメント・コンクリート，No.787，2012.9.
- 3) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針，2012.6.
- 4) 小山広光・大野誠彦・西岡和則・坂井吾郎・松本修治：凝結促進剤を添加した中流動および高流動覆工コンクリートの各種性状について，土木学会 第70回年次学術講演会，VI -640，土木学会，2015.
- 5) 松本修治・坂井吾郎・林大介・坂田昇：締固めを必要としないトンネル二次覆工コンクリートに関する基礎的検討，VI -649，土木学会，2015.
- 6) 蔵重勲ほか：透気係数の含水依存性を考慮したコンクリートの表層品質の非破壊評価法の一提案，Cement Science and Concrete Technology，No.65，2011.

【筆者紹介】

松本 修治 (まつもと しゅうじ)
鹿島建設㈱
技術研究所 土木材料グループ
研究員



坂井 吾郎 (さかい ごろう)
鹿島建設㈱
技術研究所 土木材料グループ
グループ長 (上席研究員)



手塚 康成 (てづか やすなり)
鹿島建設㈱
土木管理本部 土木工務部 トンネルグループ
担当部長

