

山岳トンネルにおける 覆工用高流動コンクリートの適用実績

松本 修治¹・佐藤 崇洋²・坂井 吾郎³
手塚 康成⁴・青柳 隆浩⁵・西岡 和則⁶

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）
E-mail:matsushu@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 東北支店（〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町1-27）
E-mail:satot@kajima.com

³正会員 正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）
E-mail:sakaig@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木工務部トンネルGr.（〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11）
E-mail:tezuka-yasunari@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木工務部トンネルGr.（〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11）
E-mail:aoyagi-t@kajima.com

⁶正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木工務部トンネルGr.（〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11）
E-mail:nishiokk@kajima.com

従来，トンネル覆工においては，狭小かつ閉空間となる型枠内で，スランブ 15cm 程度のコンクリートを内部振動機を用いて締め固める施工が行われており，このことは，締固め不足等の品質上の問題だけでなく，施工の合理化や生産性の向上の妨げとなっている．施工方法の改善策として，締固め作業を一切必要としない高流動コンクリートの適用が考えられる．しかし，高流動コンクリートには，「型枠に作用する側圧の増大」，「凝結遅延による施工への影響」および「粘性を付与するための材料が増えることによるコストアップ」などの課題が考えられる．本稿では，これらの課題解決を図るために実施した，覆工用高流動コンクリートの仕様の検討，実規模流動実験および実構造物への適用結果について報告する．

Key Words :Self compacting concrete, tunnel lining concrete, real scale flow experiment

1. はじめに

従来，トンネル覆工の施工においては，スランブ 15cm 程度のコンクリートを，覆工厚が 30cm 程度の狭小かつ閉空間となる移動式型枠（セントル）内で内部振動機を用いて，人力による締固め作業が行われている．特に，天端部については逆打ちになることから締固めが不十分になりやすく，背面空洞やひび割れなどの初期欠陥を発生させやすい状況である．このため，最近では，型枠面板に取り付けた型枠パイプレータで締固めを行うトンネル覆工用の中流動コンクリート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，狭隘なセントル内での締固め作業が大幅に減少し，コンクリートの品質向上が図られている．一方で，軽微でありながらも

内部振動機による締固め作業が必要となる．今後の，トンネル作業員の高齢化による人手不足や，掘削作業の機械化・自動化による掘進速度の向上に対処するためには，さらなる合理化とそれによる生産性の向上が求められている．そこで，覆工用中流動コンクリートの技術をもとに，中流動コンクリートと同等の品質を確保しつつ，一切の締固め作業を必要としない覆工用高流動コンクリートの検討を行った．

覆工用高流動コンクリートは，土木学会「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．）において，増粘剤系高流動コンクリートに分類されるものである．写真-1 に示すようにスランブフローは 500～600mm 程度と設定しており，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が一液となった高

性能 AE 減水剤を用いるものとした。

著者らは、覆工コンクリートにおいて、締固めを不要とするための要求性能がどの程度なのかを検証し、より経済的かつ合理的となる高流動コンクリートの配合検討を行っている。

本稿では、覆工用高流動コンクリートの仕様、実規模流動実験および実構造物への適用結果について報告する。

2. 覆工用高流動コンクリートの配合条件

一般に、高流動コンクリートは、高い流動性と材料分離抵抗性を両立させ、自己充填性を具現化している。流動性は、耐久性の観点から単位水量を増やさず高性能 AE 減水剤を多量に用いていることで付与されている。また、流動性と相反する材料分離抵抗性は、セメントなどの粉体量の増大や増粘剤の使用によって確保される。そのため、「型枠に作用する側圧の増大」、「凝結遅延による施工への影響」および「粘性を付与するための材料が増えることによるコストアップ」などの課題が挙げられる。そこで、これら課題の解決策として行った、覆工コンクリートの施工条件に対する要求性能および目標性能の設定について以下に述べる。

(1) 施工条件および要求性能

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。これを土木学会の指針に照らすと、高流動コンクリートとして必要となる自己充填性のランクは「3」に該当する。表-1に覆工用高流動コンクリートの要求性能の設定を示す。ここで、指針では、ランク3のスランブフローの中心値として550～650mmという目安を与えており、著者らは、

- ・打ち込む空間の厚さが30cm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踏まえて、下限値となるスランブフローの550mmを要求性能とした。また、空気量は、標準的範囲である3.0～7.0%とし、U形充填高さは、指針により、障害なしで300mm以上という要求性能を設定した。さらに、設計基準強度は、一般的な覆工コンクリートとして設定される18N/mm²程度とした。

(2) 目標値の設定

a) 配合要因と各種単位量の目標値

著者らは、これまでに、覆工用高流動コンクリートの配合検討において、高流動コンクリートの側圧低減方法⁴⁾、後添加での製造方法⁵⁾および単位粉体量が低い配合等の室内試験を実施し検討を行っている。これらで得ら

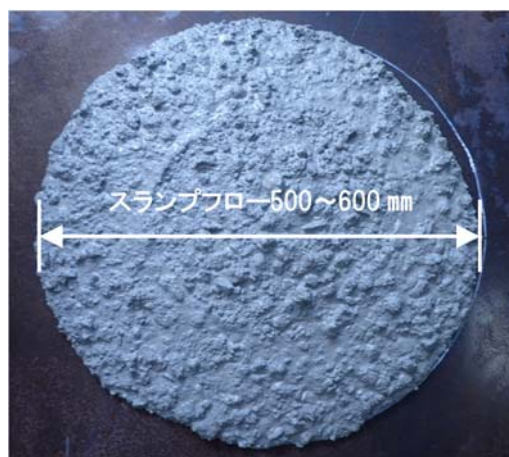


写真-1 覆工用高流動コンクリートの性状

表-1 覆工用高流動コンクリートの要求性能

設計基準強度 (σ_{28}) (N/mm ²)	スランブ フロー (mm)	空気量 (%)	U形充填高さ (障害なし) (mm)
18程度	550±50	3.0～7.0 ±1.5	300 以上

表-2 配合要因と各種単位量の目標値

配合要因	配合設計・施工 指針 ³⁾	覆工用高流動 コンクリート
単位セメント量	340kg/m ³ ～ 450kg/m ³	400kg/m ³ 以下
単位粗骨材 絶対容積	290L/m ³ ～ 320L/m ³	290L/m ³ ～ 320L/m ³
単位水量	165～185kg/m ³	175kg/m ³ 以下

表-3 目標の流動勾配および側圧

項目	配合設計・施工 指針 ³⁾	覆工用高流動 コンクリート
流動勾配	—	1/11以下
液圧に対する 側圧の比	1.0 (液圧)	0.7以下

れた知見により、表-2 に示す配合要因と各種単位量の目標値を設定した。指針では、界面活性剤系高流動コンクリートの単位セメント量は 340～450kg/m³、単位水量は 165～185kg/m³、水セメント比は 35～50%、単位粗骨材絶対容積は 290～320L/m³が目安とされている。これに対して、覆工用高流動コンクリートの単位セメント量は、一般的に覆工コンクリートの設計基準強度が 18N/mm²程度で設定されることから、できるだけ少なくすることとし、400kg/m³以下として設定した。また、単位水量は、覆工コンクリートが部材厚に対して表面積が大きく、乾燥収縮が卓越しやすいことを考慮して、175kg/m³以下とした。単位粗骨材絶対容積に関しては、指針での目安と同値に設定した。

b) 流動勾配および側圧に関する目標値の設定

表-3 に覆工用高流動コンクリートにおける目標の流

動勾配および側圧を示す。流動勾配は、一般的な 1BL の延長である 10.5m を流動させて 10cm 以下の高低差であれば施工上問題がないと考え、1/11 以下を目標とした。また、高流動コンクリートの側圧は、液圧として型枠の設計を行うことが標準である。しかしながら、元々作業空間が狭隘なトンネル工事においては、補剛材を入れるスペースがなく、セントルの補強を行うことが容易ではない。そこで、高性能 AE 減水剤の添加量をできるだけ少なくして覆工用中流動コンクリートと同程度の側圧とすることを目標とした。すなわち、側壁の高さ 5m での液圧 120kN/m^2 程度に対し、中流動コンクリートを対象とした場合のセントルの設計上の耐力計算値が 80kN/m^2 程度に設定されていることを参考に、液圧に対する側圧の比を 0.7 以下とすることとした。

3. 実規模流動実験による要求性能の確認

(1) 実験目的

前述で設定したコンクリートの目標性能において、スランプフローや材料分離抵抗性等の要求性能を確認する目的で、側壁部を模擬した実規模流動実験を実施した。

(2) 実験ケース

流動実験は、スランプフロー 500mm、550mm（以下、それぞれ SF500、SF550 と称す）となる覆工用高流動コンクリートの 2 種類を室内試し練りで決め、図-1 に示すような箱枠を製作し、アジテータ車から直接落し込むような方法で打設を行った。なお、実験に用いた覆工用高流動コンクリートの配合は、表-4 に示す。

(3) 実験方法

流動実験は、覆工コンクリートの一般的な覆工厚 0.3m と、1 スパンの長さ 12.5m において、スパン中央からの打込みを想定した流動距離 6.3m で行った。

型枠は、幅 0.3m、延長 7.2m（最大流動距離 6.3m）、高さ 0.9m とした。

流動実験では、フレッシュコンクリートの性状を確認した後、型枠端部から 900mm の位置に配置したアジテータ車のシュートよりコンクリートを直接打ち込み、コンクリートが 900mm の高さに達した時点で打込みを停止して流動勾配を測定した。

流動勾配の測定後、コンクリートの材料分離抵抗性を評価するため、打込み口のコンクリートと、打込み箇所から 1500mm 間隔の計 5 箇所のコンクリートをそれぞれ採取し、洗い試験を実施した。洗い試験では、エアメータ容器の試料を 5mm のふるいでふるって、表乾状態にした上で、粗骨材量を測定した。

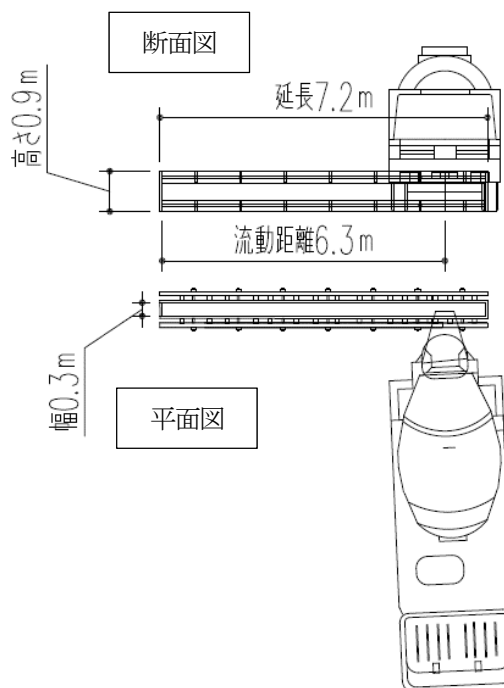


図-1 箱枠及び配置図

表-4 覆工用高流動コンクリートの配合

W/C %	s/a %	単位量 kg/m^3				混和剤 C*%	
		W	C	S	G		
48.3	52.0	157	345	940	876	SF550 1.10 SF500 1.03	

表-5 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 ($^{\circ}\text{C}$)
SF500	515×505	6.2	26
SF550	590×560	5.8	26

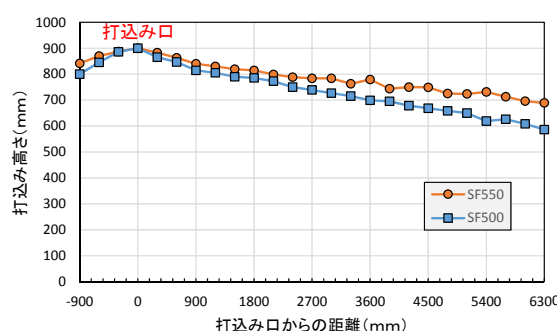


図-2 流動勾配

(4) 実験結果

表-5 に流動試験時のフレッシュコンクリートの性状を示す。スランプフローの平均は、SF500 で 510mm、SF550 で 575mm であった。

図-2 にコンクリートの流動勾配を示す。SF500 と SF550 の流動勾配は、それぞれ 1/20 と 1/30 であり、どちらも目標とする流動勾配は満足する結果であった。

図-3に流動勾配測定後に採取した試料の洗い試験結果を示す。SF500とSF550のいずれも80%以上であり、流動による著しい分離が生じていないことが確認できた。

4. 実構造物への適用

(1) 適用現場の概要

前述の実規模流動実験では、一般的な1スパンの長さ12.5mにおいて、スパン中央からの打込みを想定し、流動距離6.3mで検証を行い、良好なフレッシュコンクリートの性状を確認できた。しかし、実構造物への適用にあたっては、品質を確実に確保するためにも側壁において流動距離3m程度の覆工コンクリートにて適用を行った。

覆工用高流動コンクリートを適用した現場は、岩手県釜石市で施工中の「国道45号唐丹第3トンネル工事」である。

図-4に示すようにトンネル断面が内空幅10m、内空高8m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300mmの仕様であった。また、一区間がR=80m程度の曲線であるため、構造上、一般的なセントルより1BLの延長が6m程度と短く、補剛材との取り合いの関係で検査窓に限られた特殊セントルを用いていた。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であった。このことから、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。

(2) 適用方法

図-5に検査窓の位置とSF500、SF600の打込み範囲を、図-6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込みは、側圧が大きくなることが想定されたため、4m³積載したアジテータ車のコンクリートを15分程度で打ち込んだ後に15分間隔を持たせるようすることを繰り返してコンクリートの打込みを行った。また、SF500とSF600ともに締固めは行わないこととした。

(3) 覆工用高流動コンクリートの使用材料および配合

表-6に使用材料を示す。セメントおよび骨材は、実施工で使用するレディーミクストコンクリート工場で常備する材料を用いた。

表-7にコンクリートの配合を示す。配合選定にあたっては、覆工用高流動コンクリートとして必要な流動性を見極めることを目的に、スランプフローを500mmと

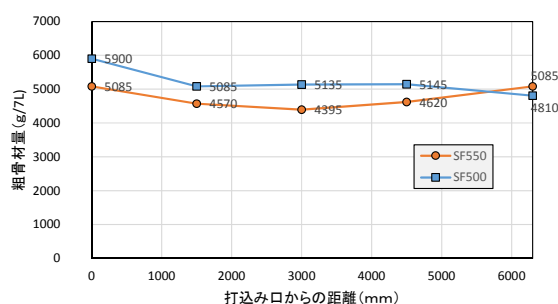


図-3 粗骨材洗い試験の結果

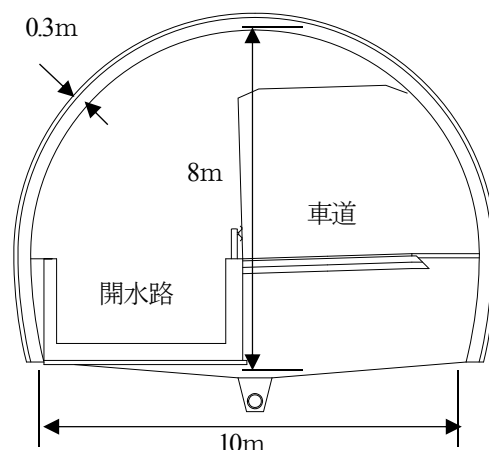


図-4 トンネル断面の仕様

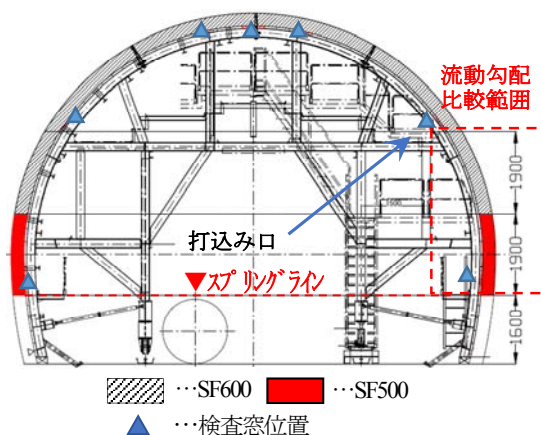


図-5 打込みの位置と流動勾配の比較範囲

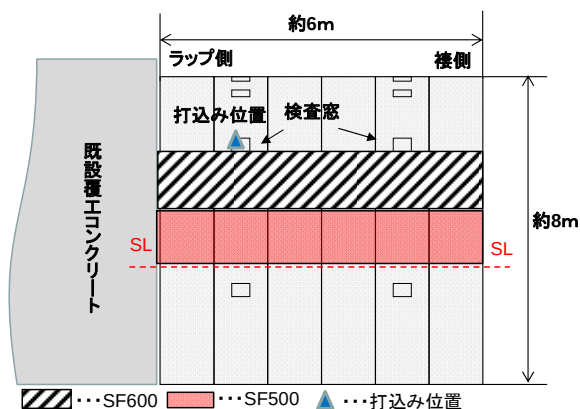


図-6 打込み位置 (縦断面図)

600mmの2種類（以下、それぞれSF500、SF600と称す）に設定し、配合選定を実施した。

(4) 測定概要

スランプフローは、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。

流動勾配は、SF500、SF600を打ち込んだ側壁部で、コンクリートを1層当り4m³打ち込んだごとに、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、コンクリートを打込み口から4.5m程度流動させた後に打込み口と流動距離3mの位置で計測した。

側圧は、SF500を適用した箇所の最下部となる底盤から1.6mの位置の地山側に荷重計を設置し測定した。

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、従来の覆工コンクリートを用いた区間でも同様にS.Lから天端まで計9点の計測を行った。

(5) 適用結果

a) フレッシュコンクリートの性状

表-8 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。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す。SF500、SF600のいずれの配合も粗骨材が分離するような傾向はなく、所定の性状が確保されていることを確認した。

b) 流動勾配

図-7に、流動勾配の測定結果を示す。スランプフローが470mm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、ある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。その結果、流末において粗骨材の分離傾向が見受けられるとともに、流動勾配は約1/9で目標の勾配以上となった。スランプフローが520mm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と目標以下となった。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、覆工用高流動コンクリートの適正なスランプフローとしては470mmから520mmの間に閾値が存在し、打込み時の目標スランプフローの値を500mmとすることには、施工性確保の観点から問題のあることが確認された。一方、SF600の1層目は、流動勾配が約1/35、2層目が約1/16であり、いずれも目標

表-6 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：3.04g/cm ³
細骨材	S	苫小牧市宇勇払産砂	表乾密度：2.68g/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：2.70g/cm ³ 実積率：59.0%、 混合比 70%
	G2	板木山地区 碎石	表乾密度：2.72g/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-7 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

表-8 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	—	—

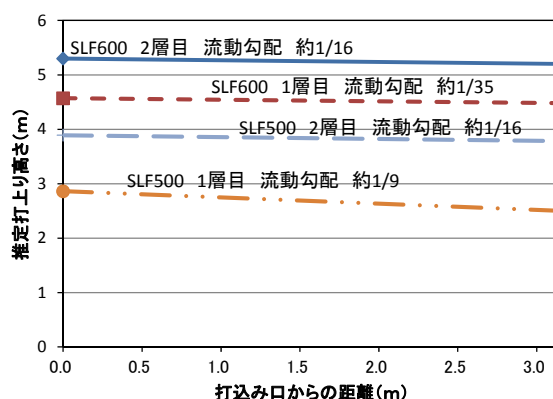


図-7 流動勾配の測定結果

以下であった。SF600では、天端付近においても充填性が確保されており問題なく打ち上がる様子が確認できた。

c) 側圧

SF500の打込みを開始した直後は、液圧程度の側圧が生じたが、荷重計の位置から約2時間かけて3.8m打ち上げた時点においては、液圧計算では90kN/m²程度であるのに対し、40kN/m²程度の側圧となり、その後はほぼ一

定となった。これは、スランプ15cm程度である従来の覆工コンクリートを打ち込む際の型枠に作用する側圧の設計値程度である。この理由としては、細骨材率がSF500で54%、SF600で55%と細骨材が多いため、一度流動が止まると骨材粒子が噛み合っただけで圧力が伝わりにくくなることや、高性能AE減水剤の添加率は1.0%であるものの、単位セメント量が少ないことからその絶対量が少なく、フレッシュコンクリートの経時変化が大きいことなどが考えられる。また、施工要因としては、1時間当たり4m³という比較的スローペースで打ち込んだことも影響したと考えられる。しかしながら、打込みを開始した直後に液圧程度の側圧が生じたことや、測定箇所や環境条件によっても型枠に作用する側圧は変動することから、安全率を考慮して、中流動コンクリートと同程度の側圧である60～80kN/m²程度は想定して設計をすべきだと考えられる。

一方、これまで一般的な高流動コンクリートをトンネル覆工に適用した実績は少ない。また、移動式型枠（セントル）の設計を行う際は、液圧で設定している。そのため、打込み高さ8mとした場合、約200kN/m²の側圧を想定する必要があるが、補剛材、スキンプレーットの厚さ等の複数の部材においてサイズアップが必要となり、経済性は損なわれる。本施工では支障がなかったことから、覆工用高流動コンクリートの優位性は得られるものと考えられる。さらに、高流動コンクリートを適用する際の型枠に作用する側圧は、偏圧を含めた側圧の検証等を行うことで、セントルの補強において、今後さらに合理化を図れるものだと考えられる。

d) コンクリート表面の仕上り

写真-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15cm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、打重ね線のない箇所でも計測した結果と同程度であり、一体性が確保されていることを確認した。

e) 透気試験

図-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⁹⁾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」評価となった。また、そのばらつきも少なく均質な躯体を構築できたことが確認された。

(6) まとめ

以上の結果をまとめると、以下のとおりである。

- a) 覆工用高流動コンクリートでは、スランプフローの目標値を500mmに設定した場合、スランプフローが下

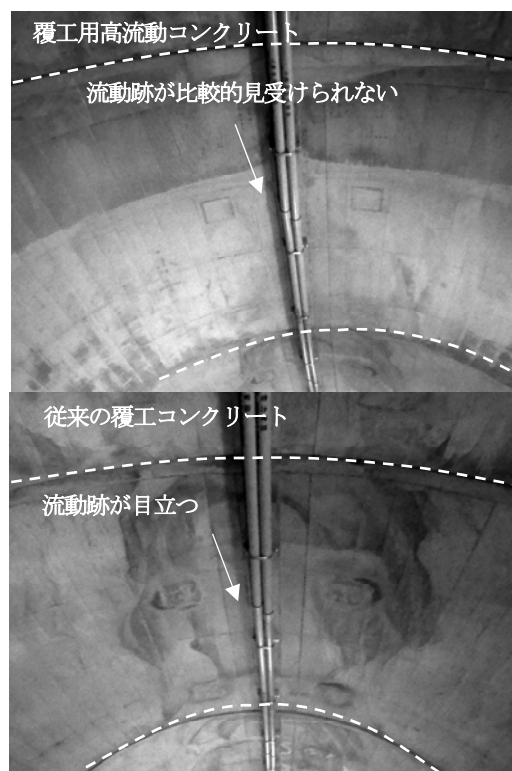


写真-2 覆工コンクリートの仕上り比較

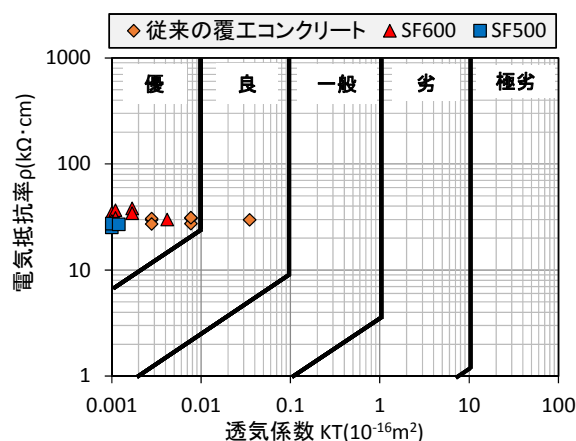


図-8 透気係数による品質のグレード評価

限值側に振れたときに良好な施工性が得られない可能性がある。

- b) スランプフローが520mm以上の場合、打ち込んだコンクリートの流動勾配は約1/16～約1/35となり、良好な施工性を示した。
- c) 側圧は当該リフトでは液圧になるが、打込みの進行と共に軽減され、最終的には液圧の0.5倍程度になった。
- d) 覆工用高流動コンクリートを用いることで、天端部の流動跡は非常に少なくなり、良好な表面の仕上がりが見られた。
- e) 透気係数はすべてが「優」評価となり、表層品質の向上が確認された。

5. 残された課題

本検討により，省人化や品質向上に対する覆工用高流動コンクリートの優位性を確認することができた。しかしながら，未だ実施例が少なく，管理値の設定や側圧の低減など，更なる確認を必要とする点が残っている。また，本格的に省人化や生産性の向上を達成するためには，材料的な工夫のみならず，型枠や打込み方法にも改良が必要であろうと思われる。コスト面も含め，標準的工法としての確立に向けて，継続的な検討が望まれる。

6. おわりに

今後，高流動コンクリートのトンネル覆工への適用は，打込みの自動化や無人化の実現に向けて欠かせない技術になると考える。今回の実構造物への適用で得られた知見を踏まえ，山岳トンネル工事の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。

参考文献

- 1) 株式会社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・安齋勝・近藤啓二・菅俣匠：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，pp. 35-40，セメント協会，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，第 70 回年次学術講演会，VI-640，pp. 1279-1280，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，第 70 回年次学術講演会，VI-649，pp. 1297-1298，土木学会，2015.
- 6) 蔵重勲・廣永道彦：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，pp. 225-232，2011.

(2017. 8. 11 受付)

APPLICATION RECORD OF HIGH FLUIDITY CONCRETE FOR LINING IN MOUNTAIN TUNNEL

Shuji MATSUMOTO, takahiro SATO, Goro SAKAI, Yasunari TEZUKA,
Takahiro AOYAGI and Kazunori NISHIOKA

Conventionally, in tunnel lining, construction is carried out in which concrete of about 15 cm in slump is compacted using an internal vibrator in a mold which becomes narrow and closed space. This is not only a quality problem such as insufficient compaction, but also impedes rationalization of construction and improvement of productivity. As an improvement method of construction method, application of high fluidity concrete which does not require any compaction work is conceivable. However, for high fluidity concrete, problems such as "increase of lateral pressure acting on the formwork" can be considered. In this paper, we report on the examination of the specification of high fluidity concrete for lining.