

論文 トンネル覆工用増粘剤系中流動コンクリートの実用化検討

桜井 邦昭*1・近松 竜一*2・谷口 信博*3・秋好 賢治*4

要旨：中流動コンクリートは、従来の覆工コンクリートに比べ充てん性に優れ、トンネル覆工の施工性改善や品質向上に寄与するコンクリートである。本稿では、増粘剤の混和により材料分離抵抗性を確保した中流動コンクリートの実用化に向けて実験的検討を行った。その結果、骨材の種類やその品質が相違しても増粘剤を混和することで単位粉体量を増やさずに所要の品質を確保できること、トンネル覆工の天端部を模擬したモデル試験施工により従来の覆工コンクリートに比べ均質性を向上できること、などを確認した。

キーワード：中流動コンクリート、増粘剤、トンネル、覆工コンクリート、流動性、充てん性

1. はじめに

トンネル覆工は、狭い空間内にコンクリートを打ち込んで締め固める、天端部はコンクリートを上方に吹き上げながら締め固めるなど、施工条件が厳しく充てん不良などの初期欠陥が生じやすい。

このため、トンネル覆工の施工性改善と品質向上を目的として、スランプで流動性を管理する従来の覆工コンクリートに代わり、スランプフローで流動性を管理するコンクリートを用いて、移動式型枠(セントル)に取り付けた型枠振動機により締め固めを行う工法がトンネル施工管理要領(以下、施工管理要領と呼称)に定められている¹⁾。本文では、トンネル覆工に用いるスランプフロー35~50cmのコンクリートを中流動コンクリートという。著者らも既にこの中流動コンクリートをトンネル全線に適用し、品質のばらつきが小さく美観に優れたトンネル覆工が構築できることを確認している²⁾。

施工管理要領に示されている中流動コンクリートは、材料分離抵抗性を確保するため、従来の覆工コンクリートに比べ単位粉体量を増加させる必要がある(以下、粉体系中流動コンクリートと呼称)。単位セメント量を増加すると温度ひび割れの発生リスクが高まり、フライアッシュや石灰石微粉末などの混和材を用いると専用サイロや計量器が必要になるなど、実施工への適用に際しては検討すべき課題も多い。

著者らは、増粘剤を混和することにより材料分離抵抗性を確保し、従来の覆工コンクリートと同程度の単位粉体量で所要の性能を満足する中流動コンクリート(以下、増粘剤系中流動コンクリートと呼称)が製造できること、増粘剤系中流動コンクリートの強度発現性や耐久性(中性化や塩分浸透に対する抵抗性)は従来の覆工コンクリートと同等以上であること、更にトンネル側壁部を模擬して5m程度流動させて締め固めても品質の変動が小さ

いこと等を確認している³⁾。

本稿では、この増粘剤系中流動コンクリートの実用化に向け、いくつかの事項について実験的に検討した。まず、使用材料が増粘剤系中流動コンクリートの配合条件に及ぼす影響を検討するため、骨材の品質やセメント種類が異なる場合、覆工コンクリートの曲げ靱性向上や剥落防止に用いられる非鋼繊維を混入した場合について配合選定試験練りを行った。次に、実施工を想定し、覆工天端部を模擬した実物大型枠を用いた施工実験を行い、中流動コンクリートの施工状況および充てん後のコンクリートの品質について検証した。

2. 使用材料が増粘剤系中流動コンクリートの配合条件に及ぼす影響

2.1 中流動コンクリートの目標性能の設定

既往の文献^{2), 4), 5)}によれば、表-1の性能を満足するコンクリートを用いることで、高品質なトンネル覆工を構築できることが確認されている。そこで、本研究でも、中流動コンクリートの目標性能として表-1の各値を用いた。

加振変形試験とは、振動下におけるコンクリートの変形性能を調べるために行う試験である(写真-1)。装置下面に棒状振動機が設置してあり、10秒間の振動で平板面全体に3.7J/Lの振動エネルギーが作用するように設定されている。試験方法は、平板面の上でスランプフロー

表-1 中流動コンクリートの要求性能

設計基準強度(σ_{28}) (N/mm ²)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	加振変形量 (cm)	U形充てん高さ (障害なし) (cm)
18	35~50	4.5±1.5	10±3 (10秒加振後のスランプフローの広がり)	28以上

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 工修 (正会員)

*2 (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 工博 (正会員)

*3 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 トンネル技術部 担当課長 工修

*4 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 トンネル技術部 課長 工修

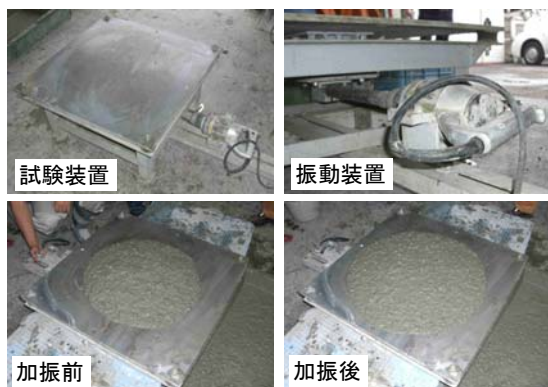


写真-1 加振変形試験の概要

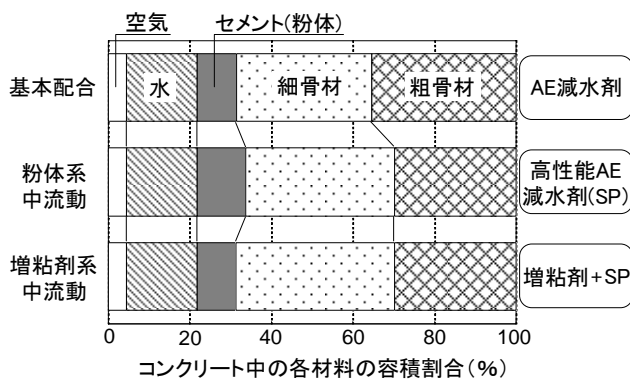


図-1 各種コンクリートの材料構成の概念図

表-2 使用材料

種類	記号	ケース1	ケース2	ケース3
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³		高炉セメントB種, 密度3.04g/cm ³
フライアッシュ	FA	JIS II種相当品, 密度2.25g/cm ³	—	—
膨張材	EX	—	—	低添加タイプ(20kg/m ³), 密度3.16g/cm ³
細骨材	S1	勇弘産陸砂 表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率1.60% 粗粒率2.64	相模原産陸砂(粗目) 混合比75% 表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率2.86% 粗粒率3.07	熊本県芦北町宮浦産砕砂 混合比40% 表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率0.77% 粗粒率2.60(混合砂として)
	S2	—	市原市万田野産山砂(細目) 混合比25%, 表乾密度2.57g/cm ³ 吸水率2.44%, 粗粒率1.66	長崎県杵冲産海砂 混合比60% 表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率1.56% 粗粒率2.60(混合砂として)
粗骨材	G1	勇弘産砂利(容積比35%) Gmax25mm 表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.88% 実積率66.9%	相模原産碎石 Gmax20mm 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.95% 実積率60.3%	熊本県芦北町宮浦産碎石 Gmax20mm 表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.88% 実積率59.0%
	G2	由仁産玉砕石(容積比65%) Gmax20mm 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率1.84% 実積率59.1%	—	—
非鋼繊維	FB	—	—	ポリプロピレン繊維, 密度0.91g/cm ³ 繊維長12mm, 直径42.6μm
混和剤	WR	AE減水剤(リグニンスルホン酸) *基本配合で使用		
	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸) *粉体系中流動コンクリートで使用		
	VA	増粘剤成分含有高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系化合物 増粘剤はグリコール系) *増粘剤系中流動コンクリートで使用		

試験を行った後、振動機を10秒間振動させ、加振前後のスランプフローの変化量(加振変形量)を測定する。加振変形量が10±3cm以内の場合、中流動コンクリートは所要の流動性および材料分離抵抗性を満足すると判定する。

充てん試験は、JSCE-F511「高流動コンクリートの充てん装置を用いた間隙通過試験方法(案)」のうちU形容器を用いた障害鉄筋がない場合(ランク3)の試験である。充てん高さ28cm以上の場合に、中流動コンクリートは所要の充てん性を満足すると判定する。

2.2 増粘剤系中流動コンクリートの配合の考え方

従来の覆工コンクリートと中流動コンクリートの材料構成の概念図を図-1に示す。

各発注機関の仕様書に示される標準的な覆工コンクリート(以下、基本配合と呼称)の配合条件は、水セメント比60%以下(無筋コンクリート構造物の場合)、単位水量175kg/m³以下(粗骨材の最大寸法20もしくは25mmの場合)、単位セメント量270kg/m³以上、スランプ15cm、空気量4.5%である。セメントは普通ポルトランドセメ

ントまたは高炉セメントB種、混和剤はAE減水剤が一般的に用いられている。実際には、水セメント比の規定から、呼び強度24のレディーミクストコンクリートが使用される場合が多い。

粉体系中流動コンクリートは、高性能AE減水剤を使用して高い流動性を付与する一方、単位粉体量を増加させることで材料分離抵抗性を確保している。この場合の単位粉体量は350kg/m³を標準としている¹⁾。

増粘剤系中流動コンクリートの場合、単位粉体量を増加させることなく、増粘剤の混和により材料分離抵抗性を確保する。なお、単位粗骨材容積については、流動性の増大に見合うように基本配合に比べ少なく設定する(粉体系中流動コンクリートと同様にする)。

2.3 配合の考え方に関する検証実験

(1) 実験概要

使用する骨材やセメントが相違する場合でも、前節の考え方で所要の性能を満足する増粘剤系中流動コンクリートが製造できるかを検証するため、各地の生コン工場で使用している骨材を用いて試験練りを行った。また、

表-3 コンクリート配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

ケース	コンクリート種類	W/B (%)	s/a (%)	Vg (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)								混和剤(B×%)			FB (外割) (kg/m ³)	フレッシュコンクリートの性状			
					W	B			S1	S2	G1	G2	WR	SP	VA		スランブフロー(cm)		空気量 (%)	U形穴高さ (cm)
						C	FA	EX									加振前	加振後		
1	基本配合	58.3	48.0	0.36	175	300	0	0	881	0	330	614	0.25	0	0	0	スランブ17.5cm		4.9	-
	粉体系	47.3	50.0	0.32	175	300	70	0	876	0	302	556	0	0.8	0	0	41.5	53.5	4.9	34.0
	増粘剤系	58.3	52.7	0.32	175	300	0	0	967	0	302	556	0	0	0.95	0	44.0	52.0	4.8	33.0
2	基本配合	57.4	48.5	0.35	174	303	0	0	650	213	939	0	1.2	0	0	0	スランブ16.0cm		5.2	-
	粉体系	46.6	55.5	0.30	174	373	0	0	720	236	782	0	0	1.2	0	0	41.0	52.0	4.5	32.6
	増粘剤系	57.4	56.9	0.30	174	303	0	0	764	251	782	0	0	0	1.3	0	41.5	53.3	4.3	30.5
3	基本配合	53.6	48.1	0.35	175	326	0	0	337	499	919	0	0.25	0	0	0	スランブ15.0cm		4.5	-
	粉体系	46.8	52.8	0.31	175	354	0	20	361	535	819	0	0	0.95	0	0.91	43.5	55.5	4.6	30.3
	増粘剤系	55.6	54.2	0.31	175	295	0	20	381	565	819	0	0	0	1.05	0.91	46.0	55.8	4.8	32.1

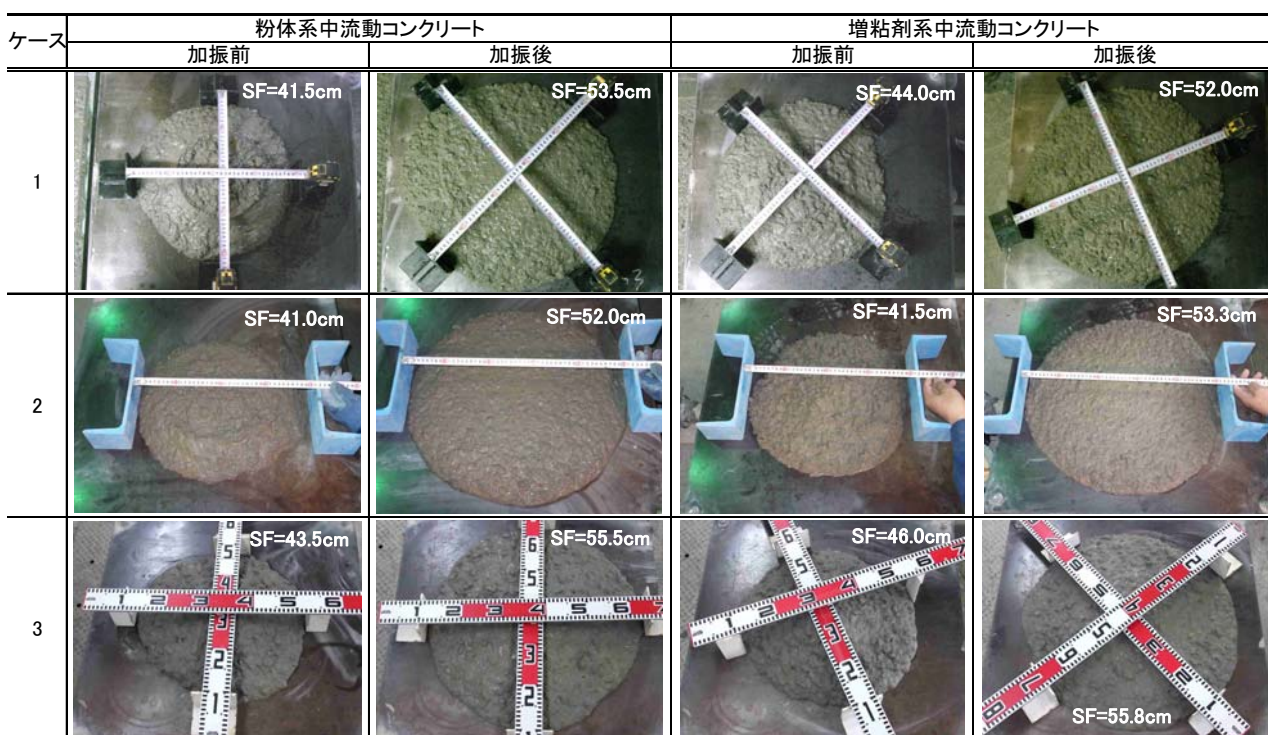


写真-2 加振変形試験前後の各種中流動コンクリートの状況

近年では温度ひび割れ対策として膨張材、曲げ靱性向上や剥落防止として非鋼繊維を覆工コンクリートに混入する事例も多いので、これらの材料を混入した場合についても検討した。

使用材料を表-2に、コンクリート配合を表-3に示す。ケース1は細骨材に陸砂、粗骨材に砂利および玉砕石を用いた場合である。ケース2は細骨材に陸砂と山砂の混合砂、粗骨材に砕石を用いたケースである。ケース3は細骨材に海砂と砕砂の混合砂、粗骨材に砕石を用いるとともに、セメントに高炉セメントB種を使用し、膨張材および非鋼繊維を混入した配合である。各ケースにおける基本配合は、それぞれの生コン工場出荷しているレディーミクストコンクリートの種類 24-15-20(25)NもしくはBBに相当する配合とした。

混和剤は、基本配合には各生コン工場で使用しているAE減水剤、粉体系中流動コンクリートには高性能AE減水剤、増粘剤系中流動コンクリートには増粘剤成分を含有した高性能AE減水剤を使用した。

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサ（公称容量60L）を使用し、1バッチの練混ぜ量を40Lとして行った。練混ぜ方法は、セメント、混和材および骨材を投入して10秒間練り混ぜた後、予め混和剤を溶解させた練混ぜ水を投入して60秒間練り混ぜた。なお、試験は20℃の室内で実施した。

(2) 実験結果および考察

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3に、加振変形試験における加振前後のコンクリート状況を写真-2に示す。各種材料を用いた場合でも、表-1の目標

性能を満足する増粘剤系中流動コンクリートが得られた。また、加振後のコンクリート試料は、流動先端まで粗骨材が行き渡っており、モルタル分と粗骨材との分離は認められなかった。

本試験結果から、増粘剤成分を混和した高性能 AE 減水剤を用いることで、使用材料が異なる場合でも、24-15-20(25)N もしくは BB の配合をベースとして、粉体量を増加させることなく所要の流動性と材料分離抵抗性を持つ中流動コンクリートが製造できることを確認できた。なお、ケース3では基本配合に比べ粉体量を低減できている。糸状の極めて細い非鋼繊維が、見かけ上、粉体量を増加した場合と同じような働きをすることで、粉体量が低減できたものと推測される。

中流動コンクリートの単位粗骨材容積(Vg)は、表-3に示すように、いずれのケースでも基本配合に比べ0.04~0.05m³/m³程度低減している。最適な単位粗骨材容積の設定には、粗骨材の形状や粒度等を考慮した理論的な検討が必要であるが、実用的には本実験結果を目安に設定していくことも可能と考えられる。

ブリーディング試験結果を図-2に示す。増粘剤系中流動コンクリートは、基本配合に比べブリーディング率が少ない。打ち込んだ後に生じるブリーディング水に伴う沈下ひび割れや砂すじ等の発生を低減できるコンクリートであると言える。

圧縮強度試験結果を図-3に示す。一般に、覆工コンクリートは、打設翌日に移動式型枠(セントル)を移動させるため、材齢16~18時間で1~2N/mm²程度の脱型時強度を確保する必要がある。増粘剤系中流動コンクリートの材齢16時間の圧縮強度は、いずれの場合でも約2N/mm²確保できており、基本配合と同等以上の強度発現性を有している。増粘剤系中流動コンクリートを用いても従来通りのサイクルで施工できることを示す結果である。また、材齢7日および28日の圧縮強度も基本配合と同程度で、従来の覆工コンクリートと同等の強度発現性を有していることが確認できた。

3. 天端模擬型枠による施工性確認実験

3.1 実験概要

増粘剤系中流動コンクリートを実機プラントで製造し、実物大の覆工天端部を模擬した施工実験を行い、コンクリートの覆工天端部への流動、充てん状況ならびに充てん後のコンクリート品質を検証した。

(1) 検討ケースおよびコンクリートの製造方法

実験には前章のケース2の基本配合コンクリートならびに増粘剤系中流動コンクリートを用いた。練混ぜは二軸強制練りミキサ(容量2.75m³)を用いた。1バッチの練混ぜ量は1.5m³とし、3バッチ(合計4.5m³)製造して、ア

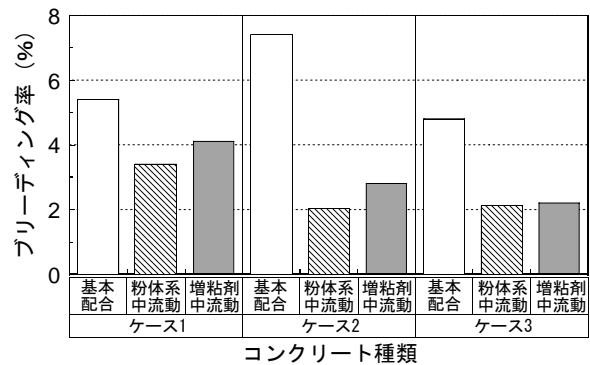


図-2 ブリーディング試験結果

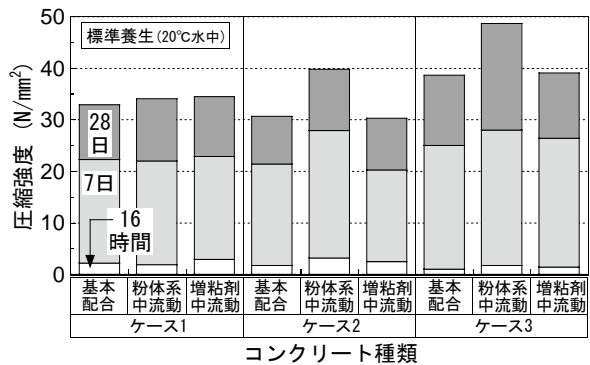


図-3 圧縮強度試験結果

ジータ車にて施工実験現場まで約30分間運搬した。荷卸し時のコンクリート品質は、増粘剤系中流動コンクリートがスランプフロー40cm、空気量5.0%、基本配合のコンクリートがスランプ16.5cm、空気量5.4%で、コンクリート温度はどちらも約17℃であった。

(2) 天端模擬型枠の概要とコンクリートの打込み方法

実験に用いた型枠の概要を写真-3に示す。標準的なトンネル覆工の天端部形状を模擬した型枠で、覆工厚さは30cmである。打設計画量は約3.7m³である。

締固めには型枠振動機を用い、既往の知見²⁾から出力400Wの型枠振動機を天端部下面に3台設置した。コンクリートの打設は、実際の覆工施工を模擬し、コンクリートポンプ車(4t車)に輸送管(輸送管の径5A、水平換算距離33m)を配管して圧送し、片側端部下面の吹上げ口よりコンクリートを上方に吹き上げて打ち込んだ。

コンクリートを1m³打ち込むごとに型枠バイブレータ3台を15秒間作用させた。作用時間は既往の知見^{1), 2)}を参考に設定した。コンクリートが流動先端側の上方に設置した開口部(25cm角)から吹き上げてきた時に、そのコンクリート試料を約100L採取して打込みを終了した。

コンクリート試料は、均等に練り混ぜた後、圧縮強度試験用供試体を採取するとともに、5mmふるいで洗い試験を行いコンクリート中に含まれる粗骨材量を測定した。試験方法の概要を表-4に示す。なお、比較用データを採取するため、コンクリートの荷卸し時でもコンクリート試料を約100L採取し、圧縮強度試験用供試体の採取および洗い試験による粗骨材量の測定を行った。



(a) 天端部模擬型枠の外観 (b) 型枠振動機，輸送管設置状況 (c) 流動先端の開口部と試料採取状況

写真-3 天端模擬型枠による施工実験の概要

コンクリート試験体は、型枠外周をブルーシートで覆い材齢5日まで養生した後に脱型した。脱型後に試験体外観を調査し充てん状況を検証するとともに、テストハンマー(NR型)を用いて試験体各部位の反発度を調べた。

3.2 実験結果および考察

(1) コンクリートの施工状況および品質変化

増粘剤系中流動コンクリートの圧送負荷は輸送管の根元部で約1MPaであり、基本配合のコンクリートを圧送した場合と同程度であった。また、圧送時に輸送管の閉塞や大きな脈動は生じなかった。

増粘剤系中流動コンクリートの模擬型枠内での流動状況を写真-4に示す。流動先端部までペースト分と骨材とが分離せずに充てんされていることを確認した。

流動前後の粗骨材量の変化量および圧縮強度試験結果を表-5に示す。増粘剤系中流動コンクリートの流動先端部から採取したコンクリート試料中の粗骨材量は、流動前の試料に対し93%であり、基本配合の89%に比べ粗骨材の割合が多く、増粘剤系中流動コンクリートが材料分離を生じにくいことを示す結果が得られた。また、圧縮強度はいずれも流動前後で顕著な違いは認められなかった。

(2) 脱型後のコンクリート試験体の外観調査

脱型後のコンクリート試験体の外観を写真-5に示す。実施工の覆工コンクリートの仕上り面に相当する下面(表面側)は、いずれのコンクリートの場合もあばた等は生じておらず、良好な仕上がりであった。

上面(地山側)では、基本配合を用いた場合、吹上げ口および流動先端箇所まで広範囲にわたって比較的大きなあばたが生じていた。基本配合は、ブリーディング率が

表-4 流動前後の品質変化検討の試験方法の概要

試験方法の概要	
粗骨材量の変化率	①エアメータ容器(約7L)にコンクリート試料を採取する。 ②コンクリート試料を5mmふるいでふるう。 ③ふるいに残留した試料を洗い、粗骨材を取り出す。 ④粗骨材表面の水分をふき取り、表乾状態として質量を測定する。 $\text{粗骨材量の変化率(\%)} = \frac{\text{流動先端で採取した試料中の粗骨材量(g)}}{\text{打込み前に採取した試料中の粗骨材量(g)}} \times 100$
圧縮強度比	①流動先端および打込み前のコンクリート試料を採取し、円柱供試体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を各3本作成する。 ②材齢28日まで標準養生(20°C・水中)した後、JIS A 1108に準じて圧縮強度試験を実施する。 $\text{圧縮強度比(\%)} = \frac{\text{流動先端で採取した試料の圧縮強度(N/mm}^2\text{)}}{\text{打込み前に採取した試料の圧縮強度(N/mm}^2\text{)}} \times 100$

表-5 流動前後のコンクリート品質試験結果

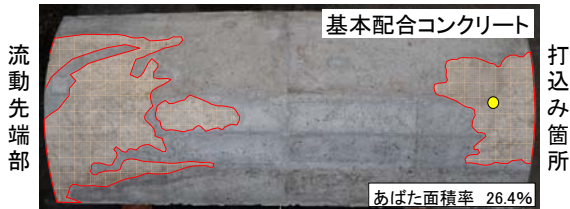
コンクリートの種類	流動前後の粗骨材量変化率(%)	流動前後の圧縮強度比(%)
基本配合	89.2	100.5
増粘剤系中流動コンクリート	93.2	100.6



写真-4 増粘剤系中流動コンクリートの流動状況



(a) 下面(覆工の仕上がりり面である表面側に相当。写真の奥が打込み箇所、手前が流動先端)



(b) 上面(覆工の背面の地山側に相当)

あばた発生部分 ● 吹上げ口

写真-5 脱型後のコンクリート試験体の外観状況

約 7%と大きく、流動に伴いペースト分と骨材との材料分離が生じ、上面にブリーディング水が堆積した結果によるものと推測される。一方、増粘剤系中流動コンクリートの場合、あばたはほとんど認められず、覆工背面にも空げきが生じにくいことを確認した。なお、本実験結果は一例であり、基本配合を用いた場合に、必ずしも地山側にあばたが生じることを示すものではない。

試験体各部位の反発度測定結果を表-6に示す。測定は表面側(下面)と地山側(上面)の打込み箇所と流動先端部とし、それぞれ 6 点測定して平均値を求めた。なお、測定はあばた発生部分を外して行った。

基本配合のコンクリートの場合、コンクリートの吹上げ口近傍である表面側の打込み箇所を除き、測定値のばらつきがやや大きく、表面側・地山側ともに流動先端部での反発度は打込み箇所より小さい結果が得られた。

一方、増粘剤系中流動コンクリートを用いた場合は、普通配合の場合に比べ、各測定箇所での値のばらつきが小さく、打込み箇所と流動先端部での反発度の差もほとんど生じていなかった。増粘剤系中流動コンクリートを用いることで、均質性に優れたトンネル覆工が構築できることを示すものと考えられる。

4. まとめ

増粘剤系中流動コンクリートの実用化に向けて実験的に検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 種類の異なる材料を用いても、増粘剤の混和により単位粉体量を増加することなく要求性能を満足する中流動コンクリートが製造できる。
- (2) 増粘剤系中流動コンクリートは、現状の覆工施工と同様の設備でコンクリートを圧送できる。
- (3) 増粘剤系中流動コンクリートは、従来の覆工コン

表-6 試験体各部位の反発度測定結果

コンクリートの種類	基本配合のコンクリート				増粘剤系中流動コンクリート			
	表面側(下面)		地山側(上面)		表面側(下面)		地山側(上面)	
	打込み箇所	流動先端	打込み箇所	流動先端	打込み箇所	流動先端	打込み箇所	流動先端
平均値	35.5	33.4	35.9	33.0	35.9	35.5	34.9	35.3
最大値	36.1	35.7	37.5	36.0	36.6	36.6	35.6	35.9
最小値	34.0	31.9	33.2	31.0	34.9	34.5	33.9	34.2
標準偏差	1.0	1.8	2.0	1.9	0.7	0.9	0.6	0.6
打込み箇所と流動先端の差	2.1		2.9		0.4		-0.4	

リートでは充てんが難しい地山側にも良好に充てんでき、背面の空げきが生じにくい。

- (4) 増粘剤系中流動コンクリートを打ち込んだ天端部模擬試験体は品質のばらつきが小さく、均質なトンネル覆工を構築できる可能性が高い。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路株式会社；トンネル施工管理要領「中流動覆工コンクリート編」, 2008.8
- 2) 中間祥二他；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
- 3) 桜井邦昭他；増粘剤を用いた中流動コンクリートのトンネル覆工への適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1301-1306, 2010.6
- 4) 城間博通, 小川澄, 佐伯徹；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, pp.49-57, 2009.4
- 5) 日本トンネル技術協会；トンネルの高速施工技術に関する検討報告書 第四章 中流動覆工コンクリートの適用性検討, pp.104-109, 2009.1