

論文 増粘剤含有型流動化剤を用いた中流動コンクリートの施工性および硬化性状に関する検討

前原 聡*1・笠倉 亮太*1・早川 健司*2・伊藤 正憲*2

要旨: 本研究では、トンネル覆工に用いられている一般的なコンクリートと増粘剤含有型流動化剤を現場にて添加して製造する中流動コンクリート、生コン工場にて製造する中流動コンクリートの3種類を用いて施工性および硬化性状について比較検討した。施工性の確認では中流動コンクリートの流動勾配および型枠に作用する側圧を、硬化性状では圧縮強度、骨材面積率、音波伝播速度、表層透気係数および中性化深さを測定した。それらの結果から、増粘剤含有型流動化剤を用いた中流動コンクリートは、圧縮強度、骨材面積率および超音波伝播速度におけるバラツキが小さく、トンネル覆工への適用に有効であると考えられる。

キーワード: 中流動コンクリート、トンネル覆工、流動化剤、流動勾配、超音波伝播速度

1. はじめに

山岳トンネルの覆工におけるコンクリート打設では、狭隘な作業空間での締固めが余儀なくされており、アーチ形状の天端部ではコンクリートを吹き上げて打設する必要があるなど、コンクリートの締固め不足による密実性の低下や充填不良による背面空洞の発生などの初期欠陥を生じる恐れがある。この様に、トンネル覆工のコンクリート打設では、厳しい施工条件下での作業となるため、トンネル覆工の品質や仕上がりは作業員の技量や熟練度に影響を受けることが現状である。

このため、トンネル覆工の施工性と品質の向上を目的とした中流動コンクリートの採用が注目されており、東・中・西日本高速道路(株)では、中流動コンクリートを規準化したトンネル施工管理要領¹⁾を制定している。中流動コンクリートは、粉体系および増粘剤系に分類されているが、現場において増粘剤含有型流動化剤を添加し、中流動コンクリートを製造する方式は、生コン工場において特別な設備等を必要としないため、比較的容易に実施に適用可能である。また、アジテータ車運搬時間によるスランプロス²⁾を考慮して、打設直前に流動化剤の添加量を調整することで、適切な材料分離抵抗性と流動性を得ることができる等の利点がある。

本稿は、適用事例が少ない増粘剤含有型流動化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を視野にいれ、壁状試験体を用いて、流動性や型枠に作用する側圧等の施工性に関する確認実験と硬化コンクリートを対象とした材料分離抵抗性に関する検討結果を報告する。

実験においては、従来のトンネル覆工に適用されるスランプ15cm程度の普通コンクリートとこのコンクリートに現場にて増粘剤含有型流動化剤を添加して製造した中流動コンクリート(以下、現場製造方式と称す)、生コ

ン工場にて増粘剤含有型高性能 AE 減水剤を添加して製造した中流動コンクリート(以下、プラント製造方式と称す)の3種類のコンクリートを使用した。

2. コンクリートの配合と基本物性

2.1 実験概要

(1) 中流動コンクリートの要求性能

表-1に施工管理要領における中流動コンクリートの要求性能を示す。

中流動コンクリートは、スランプフローが35~50cm程度で、従来の覆工コンクリートに適用されるスランプ15~18cmの普通コンクリートと高流動コンクリートの中間的な性状を有するコンクリートである¹⁾。

トンネル覆工は、無筋もしくは単鉄筋構造であることから高流動コンクリート程度の自己充填性までは求められない。また、全断面型枠(セントル)を使用することから型枠に作用する側圧が大きい場合、大規模なセントル補強が必要となることや締固めが型枠振動機のみにより行えることなどのトンネル覆工における特有の施工条件を背景に中流動コンクリートの性能が規定されている¹⁾。

(2) 使用材料、配合および製造

表-2にコンクリートの使用材料を示す。セメントは、トンネル覆工に標準的に用いられる高炉セメントB種、骨材は使用する生コン工場が常用しているものを用いた。

表-1 中流動コンクリートの要求性能¹⁾

設計基準強度 (σ_{28}) (N/mm ²)	スランプ、 スランプフロー (cm)	空気量 (%)	加振変形量 (cm)	U形充填高さ (障害なし) (mm)
24	21±2.5 35~50	4.5±1.5	10±3 ^{*)}	280以上

※1 10秒加振後のスランプフローの広がり

*1 東急建設株式会社 土木本部 土木技術設計部 工修 (正会員)

*2 東急建設株式会社 土木本部 土木技術設計部 博士(工学) (正会員)

混和剤は、比較対象の普通コンクリート用として高性能 AE 減水剤、プラント製造方式の中流動コンクリート用として増粘剤含有型高性能 AE 減水剤、現場製造方式として増粘剤含有型流動化剤を用いた。なお、プラント製造方式と現場製造方式に用いた高性能 AE 減水剤と流動化剤は、同成分のものである。

表-3に、コンクリートの計画配合を示す。現場製造方式の中流動コンクリートのベース配合は、普通コンクリートと同一配合であり、現場製造方式は、セメント重量に対して 0.4%の流動化剤を現場にてアジテータ車に添加し、3 分間の高速回転をして製造した。プラント製造方式は、増粘剤含有型高性能 AE 減水剤による実績配合を考慮し、セメント量を 340kg/m³とした。

(3) 試験方法

トンネル覆工に中流動コンクリートを適用する際は、型枠パイプレータの振動によりコンクリートが型枠内を流動し充填されることから振動時のコンクリートの流動性と材料分離抵抗性が重要となる。

図-1に加振変形試験の状況を示す¹⁾。流動性と材料分離抵抗性は加振変形試験、充填性は、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」にて評価した。

表-2 使用材料

種類	記号	物性等
セメント	C	高炉セメント B 種, 密度 3.04g/cm ³
細骨材	S ₁	相模原産砕砂, 表乾密度 2.63g/cm ³ , FM=3.00
	S ₂	八王子産砕砂, 表乾密度 2.63g/cm ³ , FM=3.00
	S ₃	君津産陸砂, 表乾密度 2.56g/cm ³ , FM=1.80
粗骨材	G ₁	相模原産砕石, 表乾密度 2.66g/cm ³ , 実積率 60.0%
	G ₂	八王子産砕石, 表乾密度 2.66g/cm ³ , 実積率 60.0%
混和剤	Ad ₁	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)
	Ad ₂	増粘剤含有高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系化合物と増粘性高分子化合物の複合体)
	Ad ₃	増粘剤含有流動化剤 (ポリカルボン酸系化合物と増粘性高分子化合物の複合体)

表-3 コンクリートの計画配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)									
			W	C	S ₁	S ₂	S ₃	G ₁	G ₂	Ad ₁	Ad ₂	Ad ₃
普通コンクリート	53.1	47.7	168	317	340	298	213	475	475	C*0.95%	—	—
プラント製造方式	51.4	51.9	175	340	408	362	136	427	427	—	C*1.3%	—
現場製造方式	53.1	47.7	168	317	340	298	213	475	475	C*0.95%	—	C*0.4%

表-4 フレッシュ性状試験結果

種類	スランブ (cm)	スランブフロー(mm)		空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)	U 形充填高さ(mm)	凝結時間(h-m)		ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
		加振前	加振後					始発	終結	
普通コンクリート	17.0	—	—	4.5	30	30	—	4-15	6-35	0.045
プラント製造方式	—	38.0	51.0 (+13.0)	5.4	32	27	320	5-25	6-55	0.030
現場製造方式	—	43.5	55.0 (+11.5)	4.1	32	27	298	5-10	6-20	0.020

なお、基本物性としてブリーディング率、凝結時間および圧縮強度に関して、それぞれの配合で現場環境下にて試験を実施した。特に、トンネル覆工では打設 18 時間程度後に、全断面型枠を脱型し、次スパンに移動するサイクルとなることから、コンクリートの凝結性状および初期の圧縮強度発現の把握は必要となる。

2.2 実験結果および考察

表-4にフレッシュ試験結果を示す。プラント製造方式と現場製造方式のそれぞれの中流動コンクリートは、トンネル施工要領の各要求性能を満足した。

中流動コンクリートのブリーディング量は、プラント製造方式と現場製造方式の両方も普通コンクリートより小さくなる傾向を示し、これは増粘剤の影響によりセメントペーストの粘性が大きくなることでブリーディングを抑制したものと考えられる²⁾。

凝結性状については、中流動コンクリートと普通コンクリートの打設日が異なり、コンクリート温度および外気温が異なるため一概に比較することはできないが、中流動コンクリートは、終結時間では各コンクリートで大きな違いは認められなかったものの、始発時間はプラント製造方式と現場製造方式の両方も普通コンクリートより 1 時間程度遅れる傾向になった。これは、高性能 AE 減水剤または流動化剤の使用量の増加に伴い、凝結時間が若干遅延する傾向を示したものと考える²⁾。

図-2に圧縮強度試験結果を示す。普通コンクリートと現場製造方式のベース配合は、同一配合であるが、現場製造方式の圧縮強度は、普通コンクリートよりも材齢



図-1 加振変形試験の状況

7日、28日にて2割程度の低下傾向を示した。現場製造方式において、流動化剤をセメント重量に対して0.4%添加することは、見掛けの単位水量が1.2kg/m³程度、水セメント比が0.4%程度増加することになる。ただし、そのことだけが圧縮強度を2割程度低下する要因になるとは考え難く、打設日の違いによる生コン工場における細骨材の表面水率や各材料の計量における誤差も影響していると考えられる。また、4章にて後述するが、表-7に示すように材齢6ヶ月でのコア供試体による圧縮強度は、普通コンクリートと現場製造方式とで1割程度の差となった。中流動コンクリートの強度発現は、凝結の遅延に伴い初期強度が抑制され、材齢28日以降においても強度発現が促進したものと推測される。

3. 施工性確認実験

3.1 実験概要

(1) 実大模擬試験体の概要

表-5に実験条件を、図-3に試験体の概要を示す。実大模擬試験体は、前面擁壁と3つの翼壁からなる壁状試験体とした。試験体寸法は、前面擁壁で長さ8.0m、壁厚さ0.5mとし、翼壁で長さ5.2m、壁厚さ0.35mおよび0.3m、高さ2.15mとした。トンネル覆工の打設スパンは10m程度であり、その間に2箇所の打設口を設けるものが一般的であることから中流動コンクリートを打設する翼壁の長さはトンネル覆工の打設1スパンの半分相当とした。配筋条件は、有筋区間を縦方向鉄筋D19@250mm、横方向鉄筋D16@300mmとして、中央翼壁は無筋区間とした。

(2) 施工方法

普通コンクリートでは、前面擁壁の両端部2箇所を打設口とし1層ごとに交互にコンクリートを打込み、中央に向けてコンクリートを打設した。1層当たりの打設高さは50cm程度とし4層に分割した。締固めは、棒状パイプ（振動部直径40mm）を用いて打設口付近のみ締固めを行った。

図-4に中流動コンクリートの施工方法の概要を示す。中流動コンクリートでは、前面擁壁側の端部1箇所

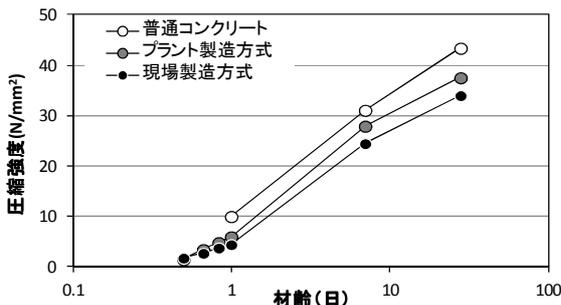


図-2 圧縮強度試験結果 (現場封緘養生)

を打設口として片押しにてコンクリートを打込み、打設高さは普通コンクリートと同様に50cm程度4層打設とした。各打設層においてコンクリートを打込み後、型枠パイプ（図-4に示す位置に2箇所配置し、20秒間を2回振動作用させ締固めた。また、中央および左翼壁の型枠一部に透明型枠を用いて各打設層の高さを記録し、型枠パイプの振動前後による中流動コンクリートの流動勾配を求めた。打設速度は、4.0m/h程度を基本とし¹³⁾、比較として2.0m/h程度の条件も実施した。各実験条件における型枠に作用するコンクリートの側圧は、型枠内部に圧力計とセパレーターにひずみゲージを設置して求めた。

3.2 実験結果および考察

図-5にプラント製造方式と現場製造方式の中流動コンクリートの流動勾配の結果を示す。プラント製造方式（中央翼壁、無筋）の打込み直後の流動勾配は2~7%程度であり、型枠パイプを作用させることにより4%程度以下になった。現場製造方式（左翼壁、有筋）の打込み直後の流動勾配は13~16%程度であり、型枠パイプを作用させることにより8~12%程度に低下す

表-5 実験条件

ケース	打設箇所	コンクリート配合	鉄筋有無	打設速度(m/h)	流動勾配	側圧
1	前面擁壁	普通コンクリート	有り	4.0	—	○
2	右翼壁	プラント製造方式	有り	2.0	—	○
3	中央翼壁	プラント製造方式	無し	4.0	○	—
4	左翼壁	現場製造方式	有り	4.0	○	○

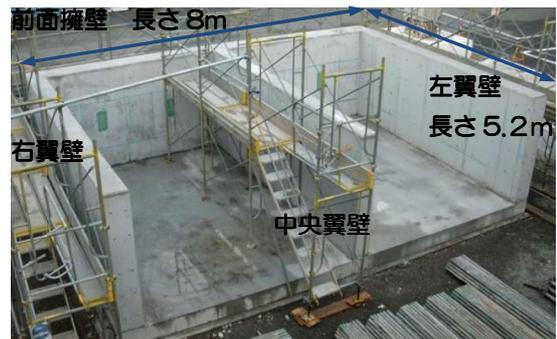


図-3 実大模擬試験体の概要

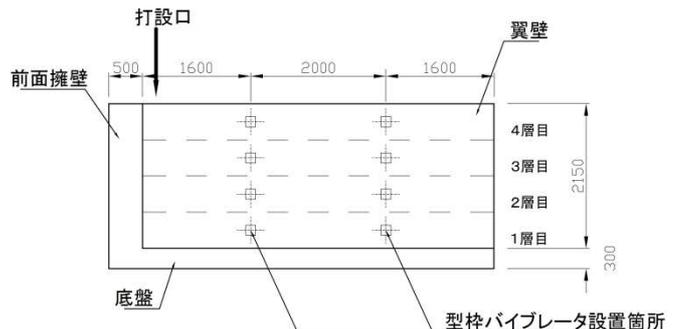


図-4 中流動コンクリートの施工方法の概要

ることがわかる。

両者の中流動コンクリートは、フレッシュ性状におけるスランプフロー、加振変形試験で大きな違いはないことを考慮すると、プラント製造方式（中央翼壁，無筋）の流動勾配が現場製造方式（左翼壁，有筋）よりも小さくなった主な要因は、配筋の影響であると思われる。また、プラント製造方式（中央翼壁，無筋）では、流動勾配が比較的小さいため前層の影響を受けにくい、現場製造方式（左翼壁，有筋）では、流動勾配が比較的大きいことと鉄筋が障害となることから打設層を重ねる毎に流動勾配が大きくなったものと考えられる。

次に、型枠パイプレータの振動1回目後と2回目後での流動勾配は、1%程度のみ低下であった。型枠パイプレータの振動時間を増やし、コンクリートに作用させる振動エネルギーを大きくしても流動勾配への影響は小さいものと考えられる。なお、型枠パイプレータ付近と2箇所に配置した型枠パイプレータの中間（型枠パイプレータより水平方向 1.0m 離れた箇所）における加速度を測定し、以下の式(1)より振動エネルギーを求めた⁴⁾。表一6に算出した振動エネルギー測定結果の一例を示す。中流動コンクリートの充填に必要とされる振動エネルギーは、型枠パイプレータ付近と中間における振動エネルギーの平均値で3.0~4.0J/Lとされており⁴⁾、今回の振動エネルギーの平均値は、適正範囲内の3.1J/Lとなった。

$$E = \frac{m \cdot \alpha_{\max}^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot f} \quad (1)$$

E ：振動エネルギー(J/L)， f ：振動数(Hz)， t ：振動時間(s)， m ：コンクリート密度(kg/L)， α_{\max} ：最大加速度(m/s²)

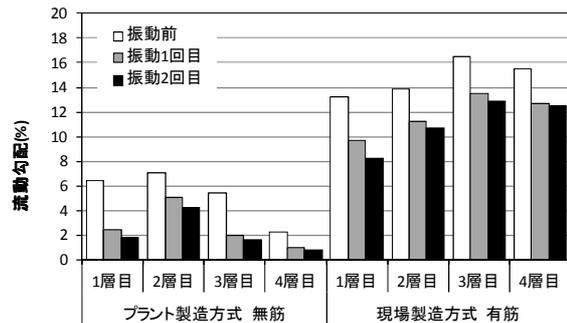
図一6にコンクリートの側圧と打上り面からの高さの関係を示す。図一6には土木学会コンクリート標準示方書に示されている関係式から求まる側圧を併せて示す。なお、この関係式は、スランプ18cm程度のコンクリートで、打設速度10m/h以下、打込み高さ4m以下の場合のものである。図一7に現場製造方式の側圧の経時変化を示す。これは、型枠セパレーターを高さ方向に5段450mmピッチに設置し、ひずみゲージにより求めたものである。

図一6より、普通コンクリートの側圧は、打上り面からの高さが1.0m以上となっても側圧で20.0kN/m²以下となった。これは、コンクリートが経時的に凝結が進むことで自立し、型枠に作用する側圧を減少させるものであり、コンクリート標準示方書の関係式における変化点(打上り面からの高さ1.5m)が1.0m程度になったものと考えられる。

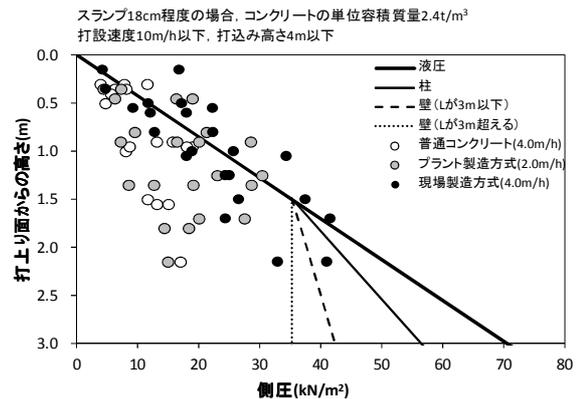
中流動コンクリートは、プラント製造方式で打設速度

表一6 振動エネルギー測定結果（現場製造方式2層目）

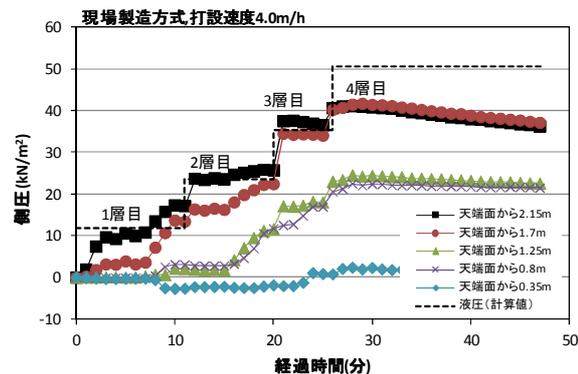
	記号	型枠パイプレータ付近	中間
振動数(Hz)	f	106	106
振動時間(s)	t	18.5	18.5
コンクリート密度(kg/L)	m	2.286	2.286
最大加速度(m/s ²)	α_{\max}	23.92	6.01
振動エネルギー(J/L)	E	5.8	0.4
平均振動エネルギー(J/L)	E_a	3.1	



図一5 中流動コンクリートの流動勾配



図一6 側圧と打上り面からの高さの関係



図一7 側圧の経時変化

を2.0m/hと小さくした場合で側圧が小さくなる傾向を示したが、普通コンクリートと同じ打設速度4.0m/hとした現場製造方式では、側圧は大きくなり液圧に近い傾向を示した。ただし、図一7より型枠天端面から2.15m下に作用する側圧は、4層目打設時において天端面から1.7mの位置での側圧と同程度となり、経時的に型枠に作

用する側圧の増加量が小さくなる傾向が見られる。これは、普通コンクリートにおいては、側圧の変化点が1.0mであったの対して中流動コンクリートでは側圧の変化点が2.0m付近になったものと考えられる。つまり、中流動コンクリートにおいても打設速度、温度および凝結性状等を考慮することで型枠に作用する側圧と打上り高さの関係を整理することができ、側圧が液圧よりも小さくなることが示唆されている。

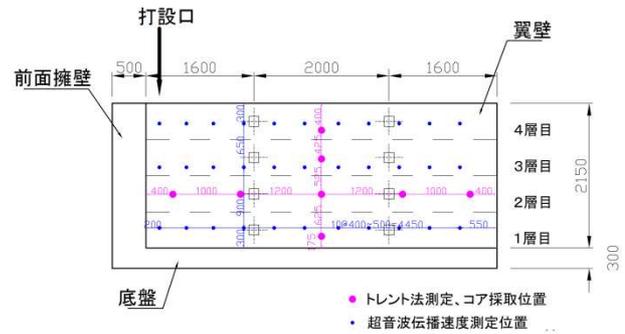


図-8 品質評価試験の測定位置

表-7 品質評価試験結果 (材齢6ヵ月)

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	骨材面積率 (%)	超音波伝播速度 (km/s)	表層透気係数 ×10 ⁻¹⁶ (m ²)	中性化深さ (mm)
普通コンクリート	45.8 (0.12)	37.7 (0.16)	4.37 (0.03)	0.037 (0.92)	4.0 (0.32)
プラント製造方式	46.1 (0.08)	35.2 (0.09)	4.52 (0.02)	0.052 (0.99)	3.4 (0.19)
現場製造方式	42.4 (0.06)	43.7 (0.08)	4.51 (0.01)	0.331 (1.34)	6.0 (0.09)

()内値、変動係数

4. 品質評価試験

4.1 実験概要

一般的にトンネル覆工のコンクリート打設では、施工条件よりコンクリートをある程度、横移動させて打ち込むことになる。そこで、コンクリートを横移動させた場合の硬化後の品質の均一性を圧縮強度、骨材面積率、超音波伝播速度、表層透気係数および中性化深さにて評価した。

評価試験は、トレント法による表層透気係数および透過法による超音波伝播速度の測定を材齢6ヵ月で実施した。その後、コア供試体を採取して圧縮強度、粗骨材面積率を測定した。なお、中性化深さは、採取したコア供試体の表層部分を対象として促進中性化環境下（二酸化炭素濃度5%、温度20℃、湿度60%）にて促進期間28日曝した後に測定した。

図-8に中流動コンクリートにおける表層透気係数、コア採取位置および超音波伝播速度の測定位置を示す。なお、プラント製造方式は、有筋、無筋区間の両者を施工しているが、各測定は表-5に示すケース2の右翼壁の有筋区間を対象とした。

表層透気係数とコア供試体の採取は、高さ0.8m付近の打設2層目における水平方向の分布と試験体の壁中心における高さ方向に4箇所において実施した。超音波伝播速度は、高さ方向で3測線（上段、中段、下段）、水平方向で11箇所（400~500mmピッチ）における分布を測定した。

4.2 実験結果および考察

表-7に各試験における全ての試験結果の平均値と変動係数を示す。図-9に材齢28日の圧縮強度に対する各コア供試体の圧縮強度比を、図-10に粗骨材面積率比を示す。ここで、粗骨材面積率比は、採取したコア供試体の断面における粗骨材面積率を計画配合における単位粗骨材かさ容積率にて除したものである。現場製造方式とプラント製造方式の中流動コンクリートの圧縮強度比および粗骨材面積率比は、打設箇所付近である水平距離0.4mの箇所と打設箇所より5m程度離れた箇所ではほぼ同等な値となり、コンクリートの横移動による材料分離は少ないと考えられる。普通コンクリートでは、水平距離

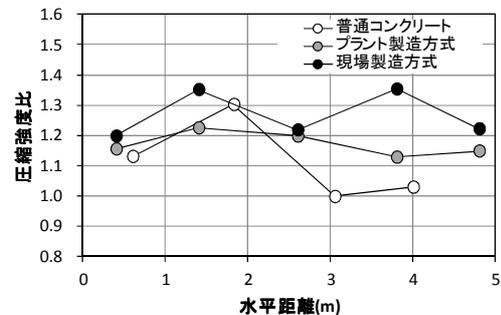


図-9 圧縮強度比の水平分布

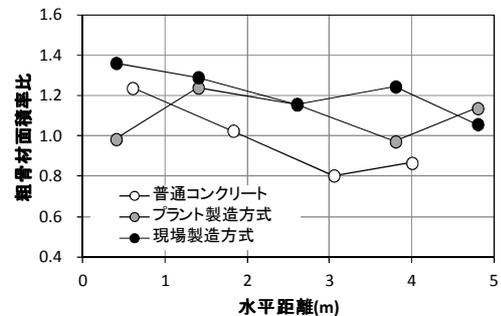


図-10 骨材面積率比の水平分布

が大きくなると圧縮強度比および粗骨材面積率比とも減少する傾向を示した。また、全ての試験結果の平均値および変動係数を示した表-7より、中流動コンクリートの圧縮強度、骨材面積率、超音波伝播速度の変動係数は、普通コンクリートより小さくなった。

図-11に超音波伝播速度分布を示す。超音波伝播速度は、コンクリートの圧縮強度および粗骨材かさ容積が大きくなると超音波伝播速度が大きくなると言われている²⁾。超音波伝播速度は、下段においてはコンクリートの種類および水平方向に大きな差は見られないが、中段においては、普通コンクリートの水平距離が大きくなるにつれて超音波伝播速度が小さくなった。また、上段にお

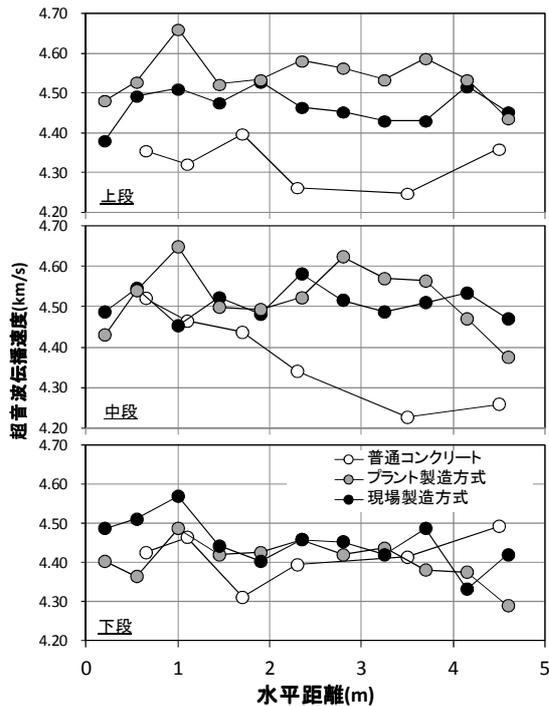


図-11 超音波伝播速度の水平分布

いては、現場添加方式とプラント製造方式の中流動コンクリートよりも普通コンクリートの超音波伝播速度は、全体的に小さくなる傾向を示した。これは、上段では下段、中段よりもブリーディングの影響を受け易いことにより、普通コンクリートで超音波伝播速度の低下が全体的に顕著になったものと考えられる。以上より、増粘剤成分含有型の流動化剤を普通コンクリートに添加して製造した中流動コンクリートは、圧縮強度、骨材面積比および超音波伝播速度の結果から、適切な流動性と材料分離抵抗性を有していることが確認され、トンネル覆工への適用に有効であると考えられる。

図-12 にトレント法による表層透気係数の水平分布を、図-13 に表層透気係数と中性化深さの関係を示す。表層透気係数は、コンクリートの種類や水平方向の分布に様な傾向は見られなかった。また、表層透気係数と中性化深さの関係では、表層透気係数が大きくなると中性化深さは大きくなる傾向を示した。表層透気係数と中性化深さは、コンクリートの表層部分の緻密性を評価するものであり、測定対象物の日射、立地方向、雨がかり等の養生条件の違いが表層部分の緻密性に影響し、圧縮強度、骨材面積率および超音波伝播速度と異なる傾向を示したものと考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) スランプ 15cm 程度のコンクリートに増粘剤含有型流動化剤を現場にて後添加することでトンネル施工要領の各要求性能を満足する中流動コンクリートを製造することが出来る。

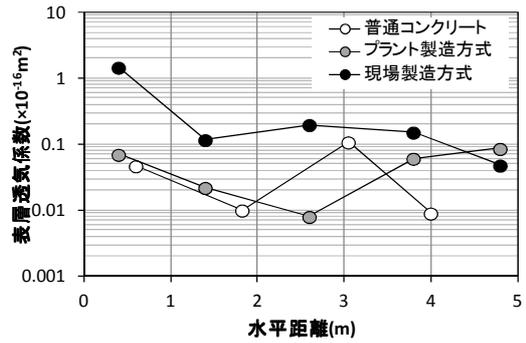


図-12 表層透気係数の水平分布

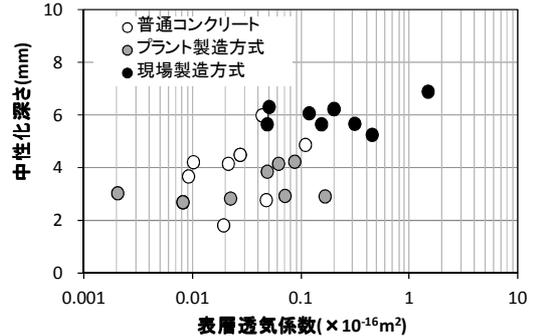


図-13 表層透気係数と中性化深さの関係

- (2) 中流動コンクリートの流動勾配は、配筋状態に影響を受け、有筋区間では鉄筋が障害となることから打設層を重ねる毎に流動勾配が大きくなった。
- (3) 型枠に作用する側圧は、中流動コンクリートは普通コンクリートよりも大きくなるが、打設速度、温度および凝結性状等を考慮することで打上り高さとの関係を整理することができ、液圧よりも小さくなること示唆された。
- (4) 普通コンクリートでは、水平方向に 5m 程度の横移動をさせると、圧縮強度 12%、粗骨材面積率 16%の変動が見られた。現場製造方式とプラント製造方式の中流動コンクリートでは、普通コンクリートよりもバラツキが小さくなる傾向を示した。

以上より、現場製造方式の中流動コンクリートは、適切な流動性と材料分離抵抗性を有していることが確認され、トンネル覆工への適用に有効であると考えられる。

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「中流動コンクリート編」、平成 25 年 7 月
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧「第二版」
- 3) 桜井 邦明, 近松 竜一, 谷口 信博, 秋好 賢治：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.1，2010
- 4) 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，平成 23 年 12 月