

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

山下 信一¹・泉水 大輔²・堤 哲平³・桜井 邦昭⁴

¹国土交通省 九州地方整備局 八代河川国道事務所 (〒866-0831 熊本県八代市萩原町1-708-2)

E-mail: yamashita-s8912@qsr.mlit.go.jp

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

E-mail: sensui.daisuke@obayashi.co.jp

³正会員 株式会社大林組 津奈木トンネル工事事務所 (〒869-5601 熊本県葦北郡津奈木町千代657)

E-mail: tsutsumi.teppey@obayashi.co.jp

⁴正会員 株式会社大林組 技術本部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

近年、トンネル覆工の品質向上を目的として、補助的な振動締固めにより充填が可能なレベルまで流動性を高めた中流動コンクリートを適用する事例が増加しており、トンネル覆工の均質性や美観性を向上できることが報告されている。

本稿では、増粘型高性能AE減水剤の使用により従来の覆工コンクリートと同等のセメント量で充填性を高めた増粘剤系中流動コンクリートをトンネル全線に初適用した際のコンクリートの配合選定、製造、施工管理方法およびトンネル覆工の仕上りに関する検証結果等を報告する。

Key Words : *Middle-fluidity concrete, tunnel, lining, viscosity agent*

1. はじめに

トンネル覆工は、厚さが30～35cmと薄く、狭い作業空間内でコンクリートを打ち込み、締め固める必要があり、充填不良等の発生が懸念される。また、コンクリートの打込み箇所が限定されるため、コンクリートの流動距離が大きくなり、均質性が低下することも懸念される。

そこで、近年、トンネル覆工の品質向上を目的として、補助的な振動締固めにより型枠の隅々まで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を適用する事例が増加している。すでに、一部の発注機関では中流動コンクリートを用いたトンネル覆工の施工管理要領(以下、管理要領と称する)が制定されている¹⁾。また、この管理要領に準じた中流動コンクリートをトンネル全線に適用し、均質で美観性に優れたトンネル覆工が構築できるとともに、施工性改善にも大きく寄与することが確認されている²⁾。

一方で、管理要領に示される中流動コンクリート(以下、粉体系中流動コンクリートと称する)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、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。粉体増量材としてフライアッシュ等の副産物を用いることは環境負荷低減の観点からは望ましい一方で、専用サイロや計量器が必要なため設備面で課題となる場合もある。

そこで、著者の一部は、中流動コンクリートの適用拡大を図る一方法として、増粘型高性能AE減水剤を用いることで、従来の覆工コンクリートと同等の粉体量で高い流動性と材料分離抵抗性を確保できる増粘剤系中流動コンクリートを開発した^{3), 4)}。

そして、2011年5月より、南九州西回り自動車道の津奈木トンネル(仮称)全線において増粘剤系中流動コンクリートの適用を開始した。本稿では、増粘剤系中流動コンクリートの基礎的性質に関する室内試験結果、実施工における製造、施工管理方法ならびに品質試験結果、およびトンネル覆工の仕上りに関する検証結果等について報告する。なお、本件に関してはすでに文献⁵⁾にて施工初期段階におけるデータを取りまとめた報告がなされている。本稿は、その後に得られた施工データならびに知見を追加し、新たに取りまとめたものである。

2. 工事概要

南九州西回り自動車道は、熊本県八代市から鹿児島市に至る総延長140kmの高規格幹線道路である。津奈木トンネル（仮称）は、上記区間のうち、熊本県葦北郡芦北町から津奈木町に位置するトンネル(全長1 848m)である。トンネル掘削断面積は約75m²、覆工厚さは30～50cmで、支保パターンD断面では曲げじん性を確保するために棒状繊維を、支保パターンC断面では剥落抵抗性を確保するために綿状繊維を混入した繊維補強コンクリートを用いている。工事概要を表-1、繊維の外観を写真-1に示す。

3. 増粘剤系中流動コンクリートの特徴

各種コンクリートの材料構成割合の概念図を図-1に示す。中流動コンクリートは、従来の覆工コンクリートに比べ高い流動性を有するため、この流動性に見合う材料分離抵抗性を確保する必要がある。粉体系中流動コンクリートは、単位粉体量の増加により材料分離抵抗性を確保するコンクリートである。一方、増粘剤系中流動コンクリートは、単位粉体量(セメント量)は強度や耐久性の確保に必要な最小量(従来の覆工コンクリートと同等)とし、増粘型高性能AE減水剤の使用により高い流動性と材料分離抵抗性を両立させるコンクリートである。追加する材料は増粘型高性能AE減水剤のみであり、一般の生コン工場において追加設備が不要となる利点を有する。

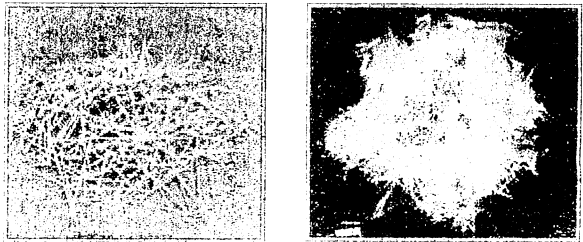
4. 増粘剤系中流動コンクリートの配合選定

(1) コンクリートの要求性能の設定

管理要領^りで中流動コンクリートの配合決定の基準が示されており(表-2)、この基準に適合した粉体系中流動コンクリートにより、均質で美観性に優れたトンネル覆工が構築できることが確認されている。そこで、増粘剤系中流動コンクリートでも表の各値を目標値に仮定した。なお、加振変形量試験とは、振動条件下におけるコンクリートの流動性や材料分離抵抗性を調べる試験である。下面に棒状パイププレートが配置された平板上でスランプフロー試験を実施したのち、10秒間振動を与えた場合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、その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。U型充填高さ試験は、JSCE-F511に準拠した障害条件なし(ランク3)の試験で、充填高さは280mm以上と規定されている。これらの試験概要を図-2に示す。

表-1 工事概要

工 事 名 称	熊本3号 津奈木トンネル新設工事		
工 事 場 所	熊本県葦北郡芦北町山川地先～津奈木町千代地先		
発 注 者	国土交通省 九州地方整備局		
施 工 者	(株)大林組		
工 期	平成22年3月～平成25年3月		
ト ン ネ ル 概 要	延長 L=1,848m	掘削断面積	約75m ²
	支保パターンD	覆工厚さ	35cm, 棒状繊維
	支保パターンC	覆工厚さ	30cm, 綿状繊維



棒状繊維(支保パターン D) 綿状繊維(支保パターン C)

写真-1 繊維の外観

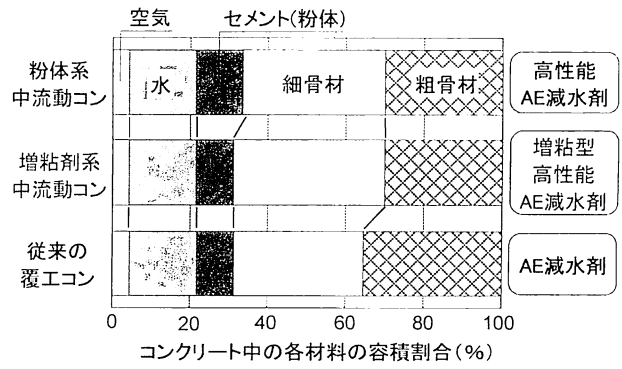


図-1 各種コンクリートの材料構成割合の概念図

表-2 中流動コンクリートの配合決定のための基準

材齢28日における圧縮強度(N/mm ²)	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプおよびスランプフロー(cm)	空気量(%)	加振変形量試験(cm)	U型充填高さ(障害なし)(mm)
18	20もしくは25	21±2.5 35～50	4.5±1.5	10秒加振後のスランプフローの広がり10±3	280以上

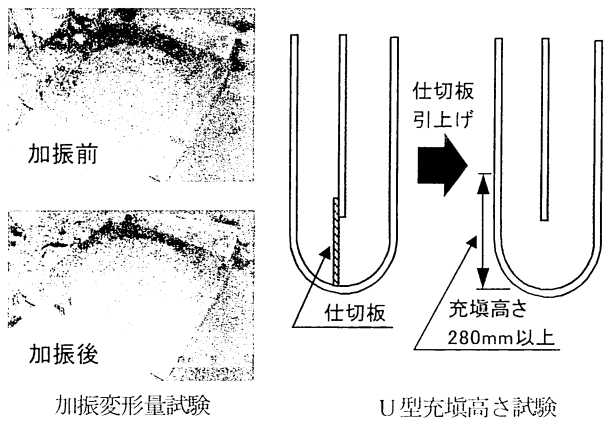


図-2 加振変形量試験およびU型充填高さ試験の概要

表-3 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの品質試験結果

コンクリートの種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位粗骨材絶対容積 (m^3/m^3)	単位量(kg/m^3)						非鋼繊維 (kg/m^3)	混和剤 (B×%)	フレッシュコンクリート試験結果					
				W	B		S1	S2	G			スランブフロー(cm)			空気量 (%)	U形充填高さ (mm)	ブリーディング率 (%)
					C	EX						加振前	加振後	変形量			
従来の覆工	53.7	48.1	0.35	175	326	0	334	502	919	—	0.25 (WR)	スランブ15.0			4.5	—	4.8
粉体系中流動	46.8	52.8	0.31	175	354	20	368	545	819	2.73 (PP1)	0.95 (SP)	43.5	55.5	12.0	4.6	30.3	2.1
増粘剤系中流動 (支保パターンD)	51.5	53.6	0.31	175	320	20	373	554	819	2.73 (PP1)	1.05 (VA)	46.0	55.0	9.0	5.1	33.0	1.7
増粘剤系中流動 (支保パターンC)	55.6	54.1	0.31	175	295	20	381	564	819	0.91 (PP2)	1.05 (VA)	46.0	56.0	10.0	4.8	32.1	2.2

C: 高炉セメントB種, EX: 膨張材(低添加タイプ), S1: 砕砂(混合比率40%), S2: 海砂(混合比率60%), G: 砕石2055
非鋼繊維 PP1: 棒状繊維(ポリプロピレン製, $\phi 1\text{mm} \times \text{L}48\text{mm}$), PP2: 綿状繊維(ポリプロピレン製, $\phi 0.043\text{mm} \times \text{L}12\text{mm}$)
混和剤 WR: AE減水剤, SP: 高性能AE減水剤, VA: 増粘型高性能AE減水剤

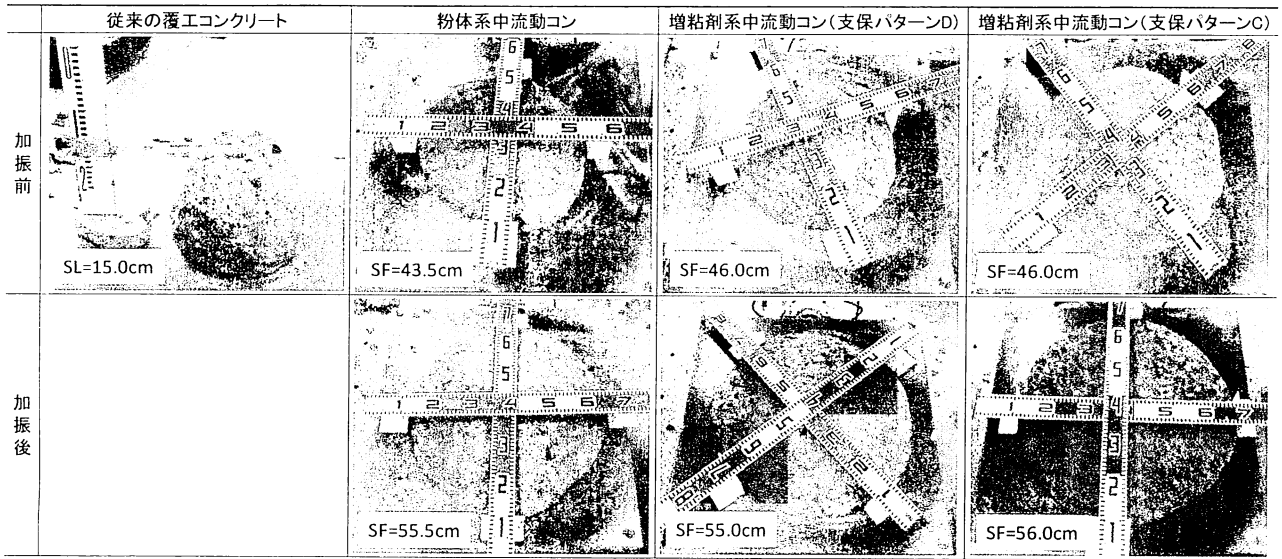


写真2 各種中流動コンクリートの加振変形量試験状況

(2) 室内試験

施工に先立ち室内にて試験練りを行った。コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの品質試験結果を合わせて表-3に、加振変形量試験状況を写真-2に示す。

増粘剤系中流動コンクリートは、粉体系中流動コンクリートに比べ単位粉体量を最大で約 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 低減しても、振動作用下において骨材とペースト分の分離等は認められなかった。増粘剤の混入によりペースト分の粘性が高められるため、少ない粉体量でも適切な材料分離抵抗性が付与できたと考えられる。なお、支保パターンD断面に用いる増粘剤系中流動コンクリートは、曲げじん性を確保する観点から単位粉体量(セメント+膨張材)を $340\text{kg}/\text{m}^3$ としている⁹⁾。

増粘剤系中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に比べ半分程度と小さく、粉体系中流動コンクリートと同程度であった(表-3)。増粘剤系中流動コンクリートを用いることで、沈下ひびわれや砂すじの発生を抑制でき、均質性に優れたトンネル覆工が構築できることを示唆する結果と考えられる。

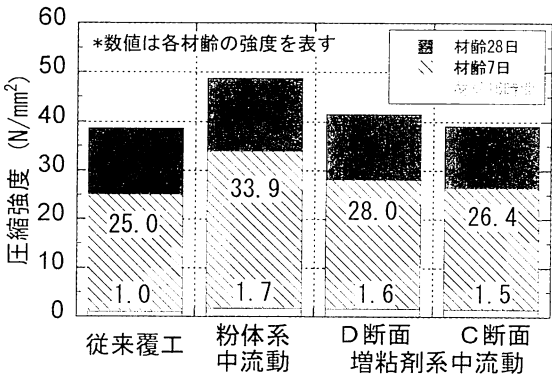


図-3 圧縮強度試験結果

各材齢における圧縮強度試験結果を図-3に示す。増粘剤系中流動コンクリートの初期強度発現性は、従来の覆工コンクリートと同等以上であり、従来の覆工と同じサイクルで施工可能であることを確認した。

試験練りにより得られた配合を用いて3次元FEMモデルによる温度応力解析を行った。増粘剤系中流動コンクリートは、単位セメント量の低減効果により、粉体系中流動コンクリート(仮に粉体増量材としてセメントを増量した場合)に比べ、ひびわれ指数が0.15程度増加でき

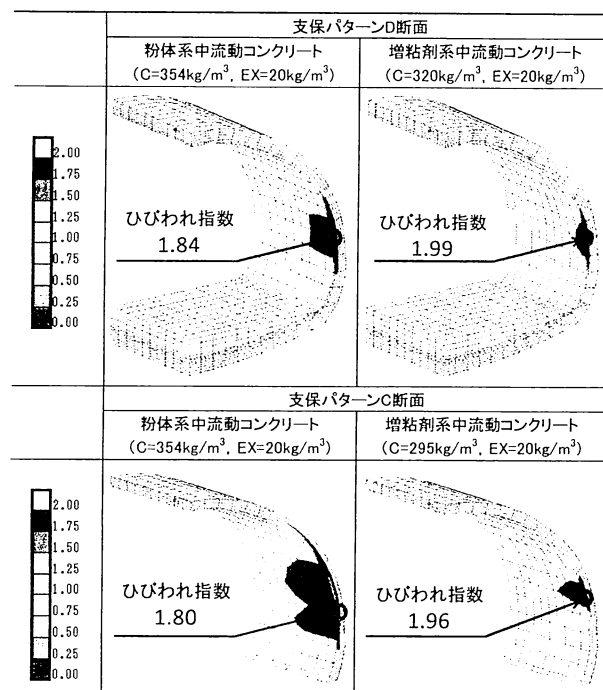


図4 温度応力解析結果(最小ひびわれ指数分布図)

ており、温度ひびわれ発生リスクの低減の観点からも効果的であることを確認した(図4)。

(3) 実機試験

配合選定後、実機プラントにてコンクリートを製造し、運搬や繊維投入に伴うフレッシュコンクリートの品質変化を確認した。試験の結果、①現場までの運搬(約30分)に伴うスランプフローの変化は5cm程度以下であること、②非鋼繊維投入に伴うスランプフローの低下量は10～15cmであること、③現場にて非鋼繊維を投入後、45分程度であれば表-2の基準を満足できることを確認した。

5. コンクリートの製造管理と品質試験

(1) 製造管理計画

増粘剤系中流動コンクリートは、従来の覆工コンクリートと同等の粉体量で流動性を高めるため、細骨材中の水分量の変動に伴い単位水量が変動すると、フレッシュコンクリートの品質が変化しやすいと想定された。

そこで、コンクリート製造時に、①製造5台ごとに細骨材の表面水率を測定する、②コンクリート練混ぜ時のミキサの電流負荷値およびミキサに設置したモニタリングカメラにより、全バッチのコンクリートの練上り状況を目視確認する、③午前午後1回ずつ、出荷時、荷卸し時および繊維混入後のコンクリートの品質試験を実施する、などの対策を講じることでコンクリートの品質変化が生じていないことを継続的に確認することにした。

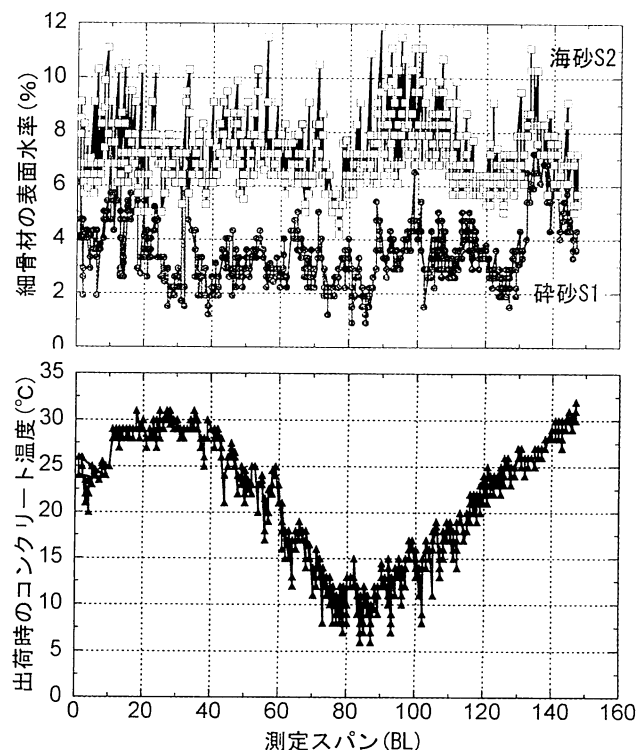


図5 細骨材の表面水率と出荷時コンクリート温度の推移

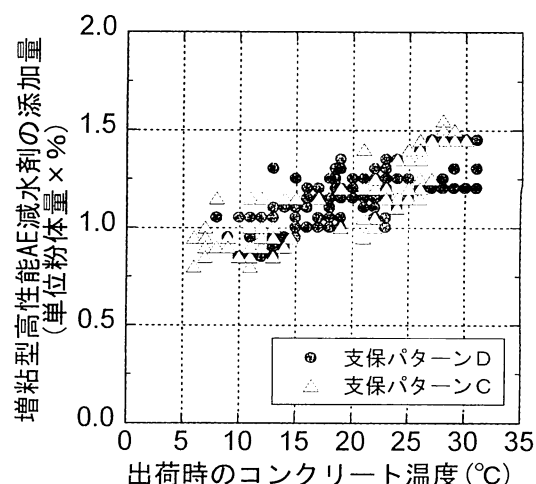


図6 出荷時のコンクリート温度と増粘型高性能 AE 減水剤の添加量の関係

なお、実機試験の結果から、出荷時のスランプフローの目標を 55 ± 5 cm程度に設定し、上述の表面水率管理を確実にを行った上で、施工時期によるコンクリート温度の変化に応じて、目標スランプフローが得られるように増粘型高性能AE減水剤の添加量を調整する計画とした。

(2) 品質試験結果

本工事の覆工は、2011年5月より施工を開始し、2012年9月現在で約160スパン(1スパン長:10.5m)、約14 500m³の施工を完了している。約1.5年におよぶ通年施工で得られた製造管理および品質試験結果を以下に示す。

コンクリート製造時の細骨材の表面水率は、図-5に示すように、砕砂が1～7%程度、海砂が4～11%程度の範

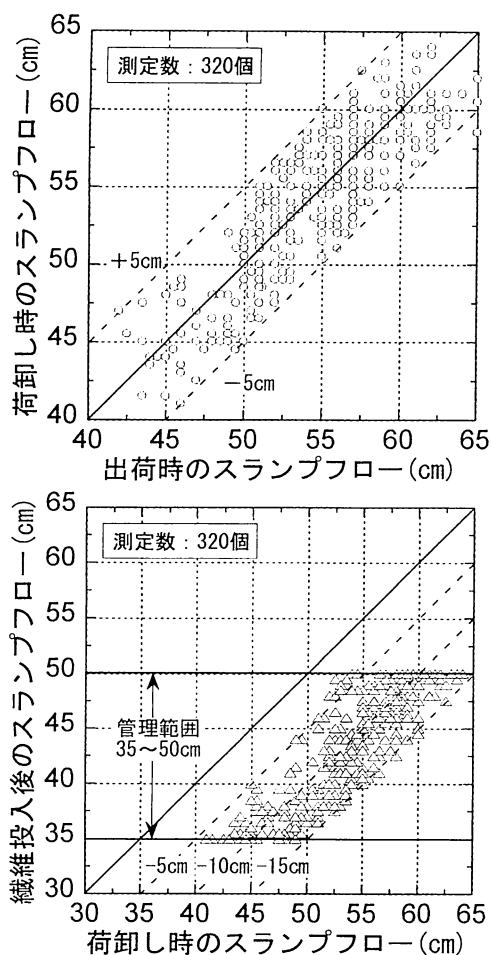


図-7 運搬および繊維投入に伴うスランプフローの変化

囲で変化した。また、出荷時のコンクリート温度は外気温の変化に応じて6～32℃の範囲で変化した。

目標とする出荷時スランプフローを得るために必要な増粘型高性能AE減水剤の添加量と外気温の関係を図-6に示す。所要の混和剤添加量は、コンクリート温度が低い冬期ほど少なく、温度の高い夏期ほど多くなる傾向を示している。本工事で使用した添加量範囲(0.8～1.5%)は、混和剤メーカーの推奨する標準添加量(0.5～2.0%程度)の範囲内であった。配合選定時に適切な単位水量に設定すると、外気温の変動に伴い混和剤の添加量を調整することで、冬期および夏期における配合変更を行うことなく、所要の流動性を有する中流動コンクリートが製造できることが確認できた。

実施工における出荷時、荷卸し時および繊維投入後のスランプフロー測定結果を図-7に示す。当初の計画どおり、運搬に伴うスランプフローの変化量は概ね±5cm以下と比較的小さく、繊維投入に伴うスランプフローの低下量は10～15cm程度の範囲となっている。なお、運搬および繊維投入に伴うスランプフローの変化は、施工時期による顕著な傾向は認められなかった。

荷卸し時点における単位水量測定結果を図-8に、圧縮強度試験結果を図-9に示す。単位水量測定値の平均値は

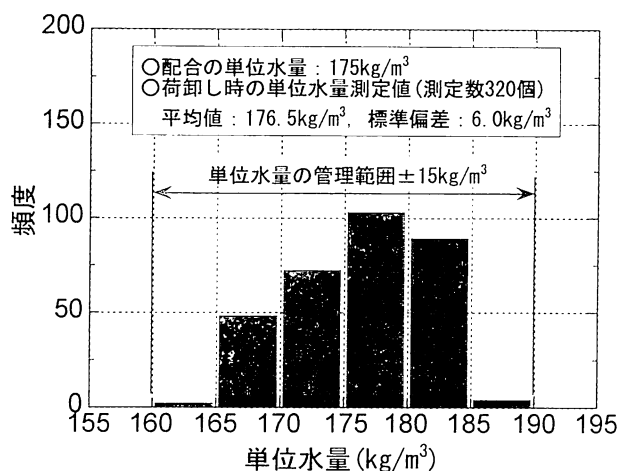


図-8 荷卸し時の単位水量測定結果

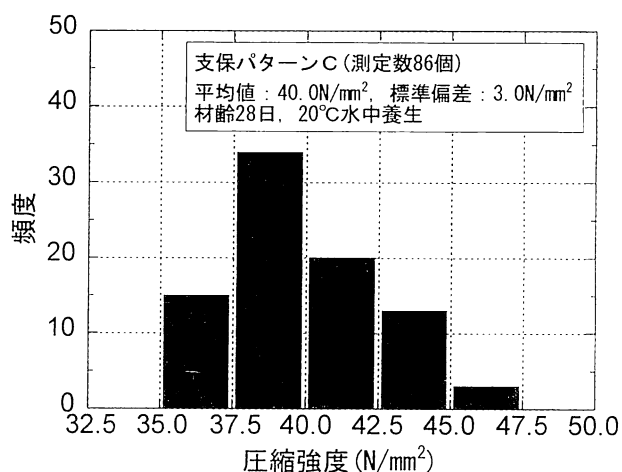
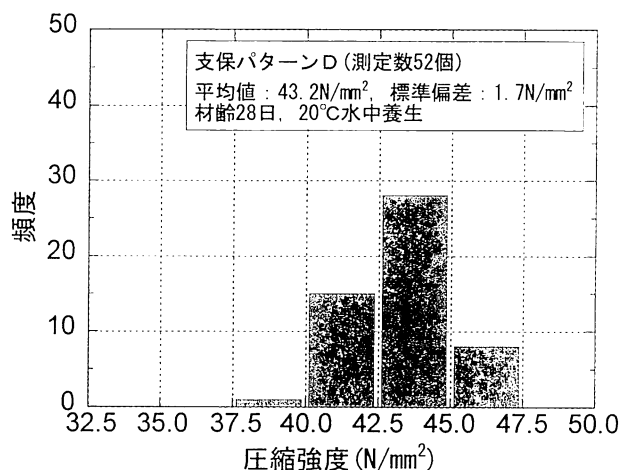


図-9 圧縮強度試験結果

配合の単位量とほぼ等しく、標準偏差も小さな値が得られている。また、各支保パターンの圧縮強度の平均値も図-3に示す配合選定時の圧縮強度とほぼ等しい値となっており、標準偏差も小さな値となっている。

これらの結果から、一般的なレディーミクストコンクリート工場においても、適切な製造管理を実施することで、製造時期によらず品質の安定した増粘剤系中流動コンクリートを継続的に製造できることが確認できた。

6. 施工管理方法の概要

(1) 側壁部

側壁部でのコンクリートの打込みは、スパン中央の左右の打込み口より行った。1回の打込み量は、打上り高さが50cm程度となるように、アジテータ車1台のコンクリート(4m³)を左右に半分ずつ振り分けた。コンクリート自体の流動が終わった後、打上り面が水平になる程度に補助的にバイブレータで締め固めた。

中流動コンクリートは流動性が高く、セントルに作用する側圧の増加が予測された。そこで、施工実績²⁾にもとづきセントル側部の耐力を増強するとともに、打上り速度が1.5m/h以下となるよう管理した。更に、セントル側壁部2箇所土圧計を設置し、セントルに作用する圧力を確認しながら施工した。測定の結果、作用する側圧は、施工実績²⁾と同様に、コンクリートの打上りに伴い直線的に増加し、その最大値は0.04N/mm²程度であった。

(2) 天端部

天端部の打込みは、従来の覆工施工と同様に既設コンクリート側の吹上げ口より行った。増粘剤系中流動コンクリートの流動状況を写真-3に示す。流動距離は最大10m程度となるが、粗骨材とモルタル分の分離や、ブリーディング水の先走りなどは認められず、均質な状態でコンクリートが充填できることを確認した。なお、天端部でも、中流動コンクリートの特性を活かし、コンクリート自体の流動が停止した時点で補助的にバイブレータによる締め固めを行った。

天端部にコンクリートが確実に充填していることを確認するため、セントル天端部3箇所にも土圧計を設置した。側壁部の施工と同様に、モニタに表示される圧力をリアルタイムで確認しながらコンクリートを打込み、所要の覆工厚さに相当する圧力がセントルに作用していることを確認したのち施工を終了した。モニタリング状況を写真-4に示す。

天端部の圧力測定結果を、施工実績²⁾における従来の覆工コンクリートを用いた場合の測定結果と合わせて図-10に示す。従来の覆工コンクリートの場合には、コンクリートの打込み箇所である吹上げ口やスパン中央部の圧力が大きい一方、流動先端箇所の妻側では圧力の増加が小さく、コンクリートが流動・充填しにくいことを示唆している。一方、増粘剤系中流動コンクリートの場合には、天端部各所に作用する圧力値はほぼ均等であり、セントル全体にわたりコンクリートが均質に流動し、充填している結果が得られた。中流動コンクリートが、狭い空間でかつ流動距離の大きい部位においても型枠の隅々まで容易に充填できることを示す結果と考えられる。



写真3 天端部でのコンクリートの流動状況

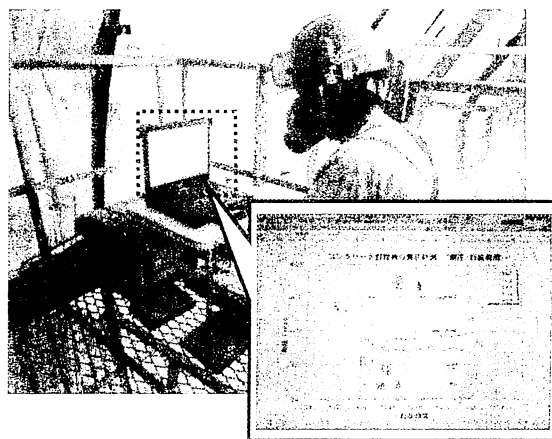


写真4 セントルへの作用圧力確認状況

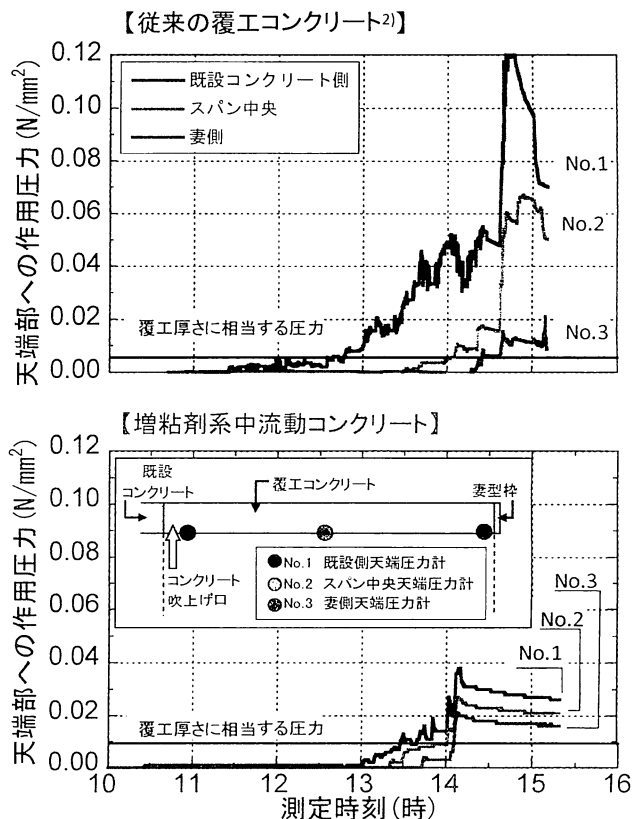


図-10 天端部の圧力測定結果の一例



写真-5 トンネル覆工の仕上り状況

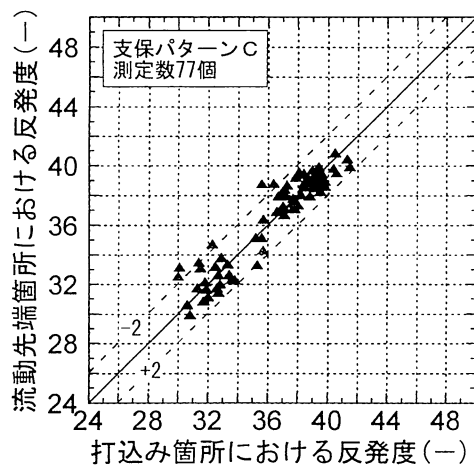


図-11 側壁部における反発度測定結果

表4 天端部での反発度および透気係数の測定結果

支保 パタ ー	測定 スパン No.	反発度（－）		透気係数（ $\times 10^{-16} \text{m}^2$ ）	
		打込み 箇所	流動先端 箇所	打込み 箇所	流動先端 箇所
D 断面	27	40.8	40.0	0.4	0.5
	28	43.3	42.5	0.1	0.5
	29	39.7	38.9	0.1	0.4
C 断面	30	37.8	38.5	0.6	0.6
	31	40.2	39.0	0.4	0.4
	32	39.3	38.6	0.3	0.5

7. トンネル覆工の仕上り状況

(1) 美観性の検証

増粘剤系中流動コンクリートを用いたトンネル覆工の仕上り状況を写真-5に示す。従来の覆工コンクリートで生じるような天端付近での縞模様は生じておらず、美観性が向上できている。流動性の高い増粘剤系中流動コンクリートを用いることで、天端部でも層状にコンクリートが流動し、充填できるためと推測される。また、現段階で、ひびわれは全く発生していない。

(2) 側壁部の均質性の検証

増粘剤系中流動コンクリートにより構築したトンネル覆工の均質性を検証するため、トンネル覆工側壁部においてテストハンマーにより反発度を測定した(図-11)。

側壁部では、コンクリートの打込み口と流動先端まで約5mの距離があるが、両者における反発度の差異は ± 2 以内と小さく、均質性に優れたトンネル覆工が構築できていることが確認できた。

(3) 天端部の均質性の検証

トンネル覆工天端部の均質性を検証するため、テストハンマーにより反発度を、トレント法⁷⁾により透気係数を測定した。透気係数とは物質の通りやすさを表す指標で、値が小さいほど緻密なコンクリートであることを示している。測定は、支保パターンごとにそれぞれ3スパンで行った。測定箇所は、コンクリートの打込み箇所と流動先端箇所とし、5点測定して平均値を求めた。なお、測定は覆工施工の3ヶ月後に行った。

測定結果を表-4に示す。支保パターンの種類によらず、打込み箇所と流動先端箇所と同様の値が得られている。覆工天端部は、コンクリートの打込み箇所が限定され、コンクリートの流動距離が長くなるが、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が確認できた。

8. まとめ

増粘型高性能AE減水剤を用いることで、従来の覆工コンクリートと同等の単位粉体量で、流動性を高めた増粘剤系中流動コンクリートをトンネル全線に初適用した。得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリート製造時に、適切な製造管理を行うことで、施工時期によらず品質の安定した増粘剤系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高い流動性を有するため、側壁部および天端部においてもコンクリート自身の流動性により型枠の隅々まで流動でき、流動停止後に補助的にバイブレータにより締め固めることで確実に充填できる。
- (3) 増粘剤系中流動コンクリートを用いることで、均質性および美観性に優れたトンネル覆工が構築できる。

謝辞：本工事の施工に際して、ご協力いただいた関係各位に感謝の意を表します。

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」, 2010.7
- 2) 中間祥二, 谷藤義弘, 森俊介, 桜井邦昭; 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, 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, pp.1301-1306, 2010.
- 4) 桜井邦昭, 近松竜一, 谷口信博, 秋好賢治; 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1343-1348, 2011.
- 5) 諏訪菌和彦, 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
- 6) 国土交通省九州地方整備局; 土木工事設計要領
- 7) 例えば, 日本コンクリート工学会; 施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書, pp.90-93, 2009.7

(2012. 9.3受付)

CONSTRUCTION OF TUNNEL LINING USING MIDDLE-FLUIDITY CONCRETE WITH VISCOSITY AGENT

Shin-ichi YAMASHITA, Daisuke SENSUI, Teppei TSUTSUMI and Kuniaki
SAKURAI

The application instance of middle-fluidity concrete is increasing for the improved quality of tunnel lining. The concrete has high mobility and can be filled up all the corners of form by auxiliary compaction. We first applied new type middle-fluidity concrete using viscosity agent to the tunnel whole line of this construction. Although new type middle-fluidity concrete is the same unit cement content as the conventional lining concrete, it can secure high mobility and material segregation resistance.

This paper reports the management method about manufacture and the construction of middle-fluidity concrete with viscosity agent, and the various test results about lining built by the concrete.