

充填性を向上させた トンネル覆工コンクリートの開発

古屋 元規¹・佐藤 貴史²・萩原 秀樹³・後藤 隆之⁴・桜井 邦昭⁵

¹正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局木古内鉄道建設所
(〒049-0431 北海道上磯郡木古内町木古内184)

E-mail: mot.furuya@jrtr.go.jp

²正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局技術管理課
(〒060-0002 札幌市中央区北2条西1)

E-mail: tks.satou@jrtr.go.jp

³正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部設計技術部設計技術第二課
(〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

E-mail: hid.hagiwara@jrtr.go.jp

⁴正会員 (株)大林組 札幌支店新茂辺地トンネル西JV工事事務所 (〒060-0003 札幌市中央区北3条西4)

E-mail: goto.takashi@obayashi.co.jp

⁵正会員 (株)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

高品質で経済的なトンネル覆工コンクリートを構築するため、従来と同じ最大寸法40mmの粗骨材を用い、単位水量を同等以下としつつ、高い減水性を有する混和剤とフライアッシュを用いることで流動性のレベルをスランプ21cmにまで高め、充填性能を向上させたコンクリート「高充填コンクリート」を開発した。

今回、室内試験を実施し、従来の覆工コンクリートに比べ充填性が大幅に改善し、ブリーディングを半減できるなど、フレッシュコンクリート品質が向上するとともに、従来と同等以上の強度発現性や耐久性を有することを確認した。その後、新幹線トンネルの覆工で試験施工を行ったところ、側壁および天端部においてセメント全体に流動し、補助的に締め固めることで充填できること、従来と同じ覆工設備で施工できること等を確認した。

Key Words : tunnel lining concrete, high fluidity concrete, high slump flow, fly ash

1. はじめに

近年、建設設備投資額の減少に伴い、耐久性に優れたコンクリート構造物をより経済的に構築することが強く求められている。山岳トンネルにおいても、トンネル覆工の品質および施工性向上を目的として、流動性に優れた中流動コンクリート（スランプフロー35～50cm程度）を適用する事例が増えており¹⁾、補助的な振動締固めにより覆工各部位にコンクリートを確実に充填できること、均質で美観性に優れたトンネル覆工を構築できることが確認されている²⁾。

平成24年度に認可された整備新幹線の新規区間は、トンネル延長が長く、とくに北海道新幹線（新函館（仮

称）・札幌間）は、完成工期が20年以上と長いことから、早期に着手されるトンネルについては、高品質な覆工コンクリートの構築が重要な課題である。

また非破壊検査技術の進展により、覆工コンクリート深部の不具合箇所（背面空洞、防水シートの剥れ、覆工厚さ不足、材料分離等）が確認されるようになり、覆工コンクリートの確実な施工方法が求められている。このため、整備新幹線では、覆工コンクリートの品質向上にあたり、平成24年度からFILM（背面平滑型ライニング工法）³⁾を覆工コンクリートの基本工法として展開するとともに、充填性および耐久性の良好なコンクリートの開発を推進している。

一方、東日本大震災を契機として、火力発電所への電

力供給依存が高まっており、産業副産物であるフライアッシュの発生量は今後さらに増大することが予測される。フライアッシュは古くからコンクリート用混和材としての有効性が認められた材料であり、それを有効利用することは環境保全の観点からも望ましいものである。

これらの背景を踏まえ、高品質なトンネル覆工を構築することを目的とし、最大粗骨材寸法40mm、スランプ21cmとして、充填性能を向上させたコンクリート（以下、高充填コンクリートという）を開発した。本稿では、高充填コンクリートの概要、ならびに基本的性質の把握および試験施工の結果等について報告する。

2. 高充填コンクリートの概要

コンクリートの充填性を高めるには、流動性はできるだけ高いことが望ましい。しかし単位水量やセメント量が増加するため、硬化コンクリートの品質や経済性の面から不利となる場合もある。また流動性を著しく高めたコンクリートを打ち込むと型枠への作用圧力が増加し、型枠設備（セントル）の補強が必要となる場合もある。

単位水量の増加を抑制するには、粒径の大きな粗骨材を用いることが望ましいが、流動性を高めた場合に材料分離抵抗性を確保することが難しくなることから、土木学会コンクリート標準示方書やJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」では、粗骨材の最大寸法が40mmの場合は、スランプの上限を15cmに設定している現状にある。

高い充填性を確保するには「流動性」と「材料分離抵抗性」をともに高める必要がある。またコンクリートの施工性能を高めることで、硬化コンクリートの品質が低下することのないようにする配慮も必要である。よって

これらの背景を踏まえ、以下の基本方針を設定した。

- ① 最大寸法40mmの粗骨材を使用する。
単位水量は、従来の覆工コンクリートと同等、もしくはそれ以下とする。
- ② スランプを21cmとする。
流動性のレベルは、セントル天端部において、補助的な振動締固めにより型枠の隅々までコンクリートが充填でき、かつ最大寸法40mmの粗骨材を用いた場合にも、適切な材料分離抵抗性を確保できるスランプとする。
- ③ フライアッシュを積極的に活用する。
単位セメント量は、強度や耐久性の確保に必要な最小限とし、フライアッシュをセメントの一部および材料分離抵抗性を確保するための粉体増量材として使用する。
- ④ 硬化コンクリートの品質は従来と同等とする。
硬化したコンクリートの圧縮強度等の品質は従来の覆工コンクリートと同等を確保できるものとする。
- ⑤ 一般のレディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場という）での製造を可能とする。
一般の生コン工場での製造可能なコンクリートとし、フライアッシュの貯蔵および計量設備が確保できないなどの場合には、増粘型高性能AE減水剤を用いるなど、対策を講じるものとする。

これらの基本方針を満足するコンクリートを「高充填コンクリート」と呼称することとした。トンネル覆工に用いられる主なコンクリートの概要を表-1に示す。

表-1 トンネル覆工用の各種コンクリートの概要

項目	従来の覆工コンクリート	高充填コンクリート			中流動コンクリート (代表的なもの)
		粉体系	増粘剤系 (FA)	増粘剤系 (N)	
スランプ	15±2.5cm	21±2cm			スランプフロー 35～50cm
粗骨材の最大寸法	40mm	40mm			20mm
単位水量の最大値	165kg/m ³	165kg/m ³			175kg/m ³
セメント	NもしくはBB	N			NもしくはBB
セメント一部置換材料	—	フライアッシュ	フライアッシュ	—	—
混和材	—	フライアッシュ	—	—	フライアッシュ 石灰石微粉末
混和剤	AE 減水剤	高性能 AE 減水剤	増粘型高性能 AE 減水剤	増粘型高性能 AE 減水剤	高性能 AE 減水剤

N：普通ポルトランドセメント，BB：高炉セメントB種

3. 室内試験練りによるコンクリート配合選定と基本性質の把握

(1) 目標品質および配合

前項で示した基本方針に合致したコンクリートの配合を選定すること、および選定した高充填コンクリートの基本的性質を把握することを目的に、室内において試験練りを実施した。目標品質を表-2に、使用した材料の概要を表-3に示す。

検討した高充填コンクリートは、以下の3種類である。

①粉体系高充填コンクリート：

セメントの一部(15%)をフライアッシュで置換するとともに、粉体増量材としてもフライアッシュを用いた配合

②増粘剤系高充填コンクリート(FA)：

セメントの一部(15%)をフライアッシュで置換し、増粘型高性能 AE 減水剤を用いて材料分離抵抗性を確保した配合

③増粘剤系高充填コンクリート(N)：

粉体の全量に普通ポルトランドセメントを用い、増粘型高性能 AE 減水剤を用いて材料分離抵抗性を確保した配合

室内試験練りによって決定した配合をフレッシュコンクリートの試験結果とともに表-4に示す。

(2) フレッシュコンクリートの品質

スランプ試験状況を写真-1に示す。写真右は、粉体系のものであるが、他2配合も同様の性状を呈しており、目標どおりのコンクリートが製造できた。

高充填コンクリートのフレッシュ状態の性状試験として、充填試験(JSCE-F511, ランク3) およびブリーディング試験を実施した。その結果を図-1および図-2に示す。

表-2 高充填コンクリートの目標品質

項 目	目 標 性 能
設計基準強度	18N/mm ² (材齢 28 日)
ス ラ ンプ	21±2cm
空 気 量	5.5±1.5%

表-3 使用材料の概要

項 目	記号	名称、物理的性質等
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
フライアッシュ	FA	JIS II 種適合品 密度 2.36g/cm ³
細骨材	S1	石灰砕砂
	S2	陸砂
粗骨材	G1	石灰碎石 2005
	G2	石灰碎石 4020
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



従来の覆工コンクリート

高充填コンクリート

写真-1 スランプ試験状況

表-4 高充填コンクリートの配合

コンクリートの種類		目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)								混和剤 ((B+FA)×%)			試験結果	
							W	P		S1	S2	G1	G2	スランプ (cm)				空気量 (%)	
								B							FA				
								C	FA										
従来	Nセメント	15	5.5	55.8	55.8	46.2	154	276	0	0	347	510	613	410	1.0	—	—	16.5	6.9
高充填コンクリート	粉体系	21	5.5	52.8	44.8	50.9	149	240	42	50	368	541	633	271	—	1.0	—	21.0	6.5
	増粘剤系FA			52.8	52.8	52.3	149	240	42	0	389	573	633	271	—	—	1.0	21.5	6.8
	増粘剤系N			52.8	52.8	52.1	149	282	0	0	386	568	633	271	—	—	1.0	21.0	6.0

高充填コンクリートの充填高さは30cm以上であり、従来の覆工コンクリートに比べ充填性が大きく改善できることを確認した。また高充填コンクリートのブリーディング率は1%以下と小さく、従来の覆工コンクリートに対し大幅に低減できることが分かった。これらの結果は沈下ひびわれ、砂すじおよび天端部の背面空洞等の発生防止に大きく寄与するものと考えられる。

(3) 強度試験結果

従来の覆工コンクリートと高充填コンクリート（粉体系）の初期強度試験結果（材齢 18 時間）の比較を図-3 に、材齢と圧縮強度の関係を図-4 に示す。

高充填コンクリートの初期強度は、従来の覆工コンクリートと同程度の結果が得られており、従来の施工サイクル（セントルの脱型）と同じサイクルでの施工が可能であるといえる。また材齢7日の時点で設計基準強度（18N/mm²）を十分に満足する結果が得られた。従来のものと比較すると、高充填コンクリートはセメントの一部にフライアッシュを混入するため、材齢7日の圧縮強度は、従来の覆工コンクリートに比べやや低い値となっているが、材齢28日では同程度となり、それ以降の材齢でも強度増進が継続する結果が得られた。

(4) 耐久性試験結果

硬化後の耐凍害性を確認するために凍結融解試験を実施した。凍結融解試験結果を図-5に示す。結果は従来の覆工コンクリートと同程度であり、十分な凍結融解抵抗性を有することが確認できた。

4. 模擬型枠を用いたコンクリート打設試験

(1) 試験の目的

前項で選定した高充填コンクリートを、一般の生コン工場の実機プラントにて製造し、それを施工場所までアジテータ車にて実際に運搬し、覆工の側壁部を模擬した型枠にコンクリートポンプ車にて打設した。本試験の目的は以下のとおりである。

- ①生コン工場の実機ミキサにより製造できることを確認する。
- ②アジテータ車による運搬およびその運搬時間経過に伴うフレッシュコンクリートの品質変化を把握する。
- ③コンクリートを型枠に打ち込んだ際の流動状況、充填状況、その他施工状況を確認する。

(2) 試験の概要

模擬型枠は、覆工側壁部を模擬して幅 0.3m、高さ

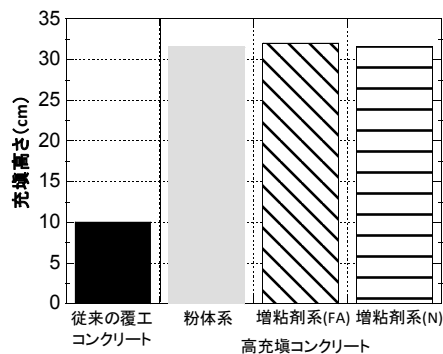


図-1 充填試験結果

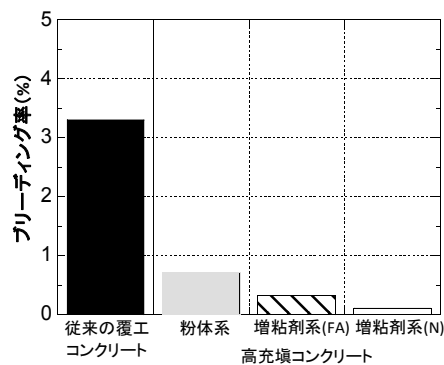


図-2 ブリーディング試験結果

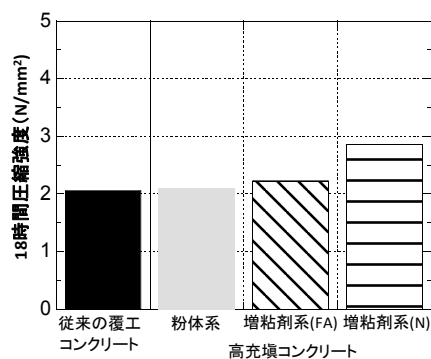


図-3 18時間強度試験結果

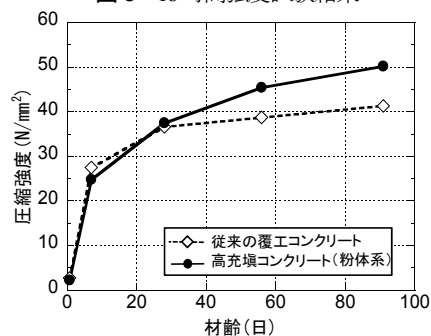


図-4 材齢と圧縮強度試験の関係

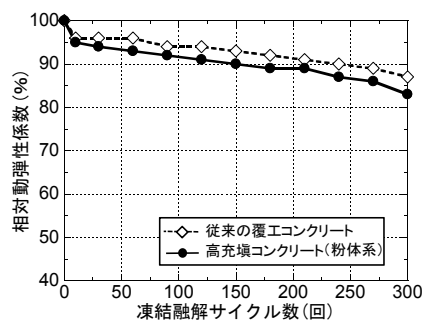


図-5 凍結融解試験結果

1.2m, 長さ 5.4m のものを 4 基用意した。コンクリートは前項で配合決定した 3 種の高充填コンクリートおよび従来の覆工コンクリートをそれぞれ実機プラントで 4m³ 製造後, アジテータ車にて 30 分間かけて施工現場まで運搬し, コンクリートポンプ車を用いて型枠の端部から打ち込んだ。コンクリート自身による流動が停止した時点で流動勾配を測定し, 最後にバイブレータによる締固めを行った。試験状況を写真-2 に示す。



写真-2 模擬型枠を用いた打設試験状況

(3) 試験結果

a) フレッシュコンクリートの品質試験結果

各種コンクリートのスランプの経時変化を図-6 に示す。従来の覆工コンクリートは, 時間経過に伴いスランプが低下する結果に対し, 高充填コンクリートは, いずれもアジテート時間120分の範囲において, 顕著な低下は認められず, スランプの保持性能が向上していることが分かる。空気量についても同様の結果が得られている。

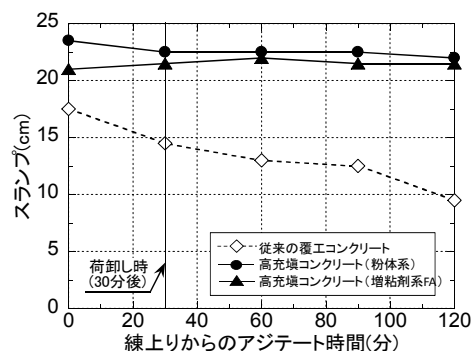


図-6 スランプの経時変化の比較

覆工コンクリートの施工では, セントル内にコンクリートを打ち込んだあとでも, そのコンクリートが適切な流動性を保持していないと, 吹上げ口周辺にコンクリートが堆積して圧送圧力が過剰に上昇したり, 未充填箇所の発生を引き起こしたりする要因となる。高充填コンクリートを用いることで, これらの発生リスクを大幅に低減できると考えられる。

b) コンクリートの流動状況

各種コンクリートの流動勾配の測定結果を図-7 に示す。従来の覆工コンクリートは, 打込み箇所（型枠端部）にコンクリートが堆積したのに対し, 高充填コンクリートを用いた場合は, 打込み箇所から5.4m先の流動先端個所までコンクリートがスムーズに流動し, 流動勾配はほとんど生じず, コンクリートは一様に流動しており, ペースト分の先走りは認められなかった。

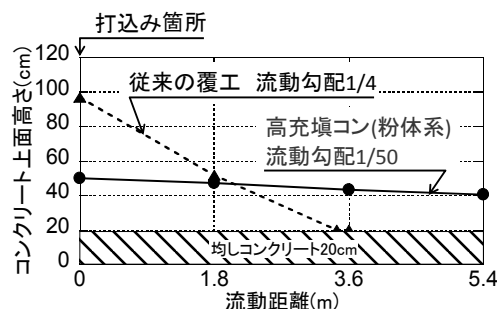


図-7 流動勾配測定結果

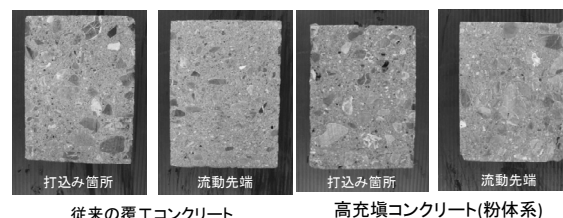


写真-3 コア断面状況

硬化後, コンクリートの打込み箇所および流動先端個所からコア抜きを行い, 圧縮強度および粗骨材の含有状況を調査した。圧縮強度については差異は認められなかったが, 写真-3 に示すように, 高充填コンクリートは打込み箇所と流動先端個所での粗骨材含有状況の差異がほとんど認められないことから, 均質性に優れたコンクリートであることを確認した。

5. 試験施工

(1) 試験施工の目的

前項までに高充填コンクリートの性状等について検証してきた。次に従来と同じ覆工設備で高充填コンクリートが施工できること等を検証するため, 実際の新幹線トンネルの覆工にて, 試験施工を行った。試験の目的は以

下のとおりである。

- ①製造：一般の生コン工場で, 安定した品質の高充填コンクリートが継続的に製造・出荷できることを検証すること
- ②施工設備：高充填コンクリートを用いた場合に, セントルに作用する圧力が従来の覆工コンクリートと比べ, どの程度変化するかを検証すること
- ③充填性：高充填コンクリートを適用することで, アーチ肩部および天端部の充填性が改善できることを検証すること
- ④作業時間・施工サイクル：高充填コンクリートを用いても, 従来と同じ作業時間およびサイクルで

施工できることを検証すること

- ⑤仕上り：高充填コンクリートを用いることでトンネル覆工の品質（均質性），美観性が向上できるかを検証すること

(2) 試験施工の概要

試験施工は，北海道新幹線，新茂辺地トンネル西工区において，覆工12スパン（10.5m/スパン，コンクリート総数量1,200m³）にて行い，3種類の高充填コンクリートをそれぞれ4スパンずつ施工し，各種データを取得した。

(3) 試験施工の結果

a) コンクリートの品質

高充填コンクリートの荷下し時のスランブ試験結果を図-8に，空気量試験の結果を図-9に示す。いずれの高充填コンクリートを用いた場合においても，荷下し時に測定したスランブおよび空気量のばらつきは許容範囲内であった。

各施工スパンにおける材齢7日および28日圧縮強度試験の結果を図-10に示す。いずれのコンクリートとも材齢7日の時点で設計基準強度を満足する結果が得られた。コンクリートの配合種類によって，強度にわずかな差異は生じているものの，同一配合のコンクリートの圧縮強度はほぼ同様の値が得られ，安定した品質のコンクリートが製造・出荷が可能であることが確認できた。

b) 施工設備

コンクリートの打込みによるセントルの変形量を3Dトータルステーションにより測定した。測定結果を表-5に示す。高充填コンクリートを用いて施工した場合のセントル各部位の変形量は，従来の覆工コンクリートと同程度であった。

またセントルの側壁部に圧力計を設置し，高充填コンクリートの打上りに伴いセントルに作用する側圧を計測した。コンクリートの打上り速度は1.5m/hに調整した。計測結果を図-11に示す。計測の結果，高充填コンクリートを用いた場合の側圧は，従来の覆工コンクリートと同等もしくはそれ以下であった。流動性を高めたコンクリートを用いるとセントル側部への作用圧力が増加する場合がある²⁾とされているが，高充填コンクリートの場合は，粗骨材寸法は40mmであることから，単位ペースト量の増加を最小限に抑えられたなどの要因により，従来の覆工コンクリートと同程度の側圧しか生じなかったものと推測される。

そのほか，コンクリートの圧送時の輸送管の脈動，閉塞や妻枠の変形等の問題も発生していないことから，今回の施工の結果より，高充填コンクリートは，従来の覆工施工で用いている通常の設備にて十分に施工できると考えられる。

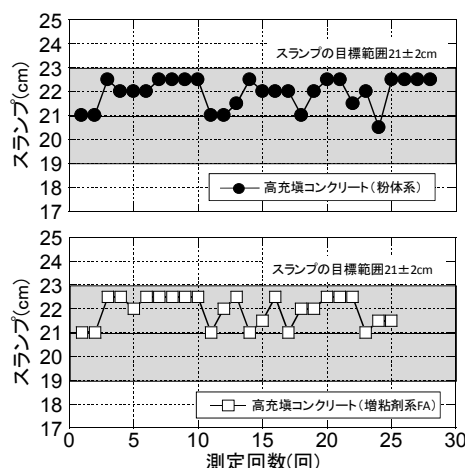


図-8 荷下し時のスランブ測定結果

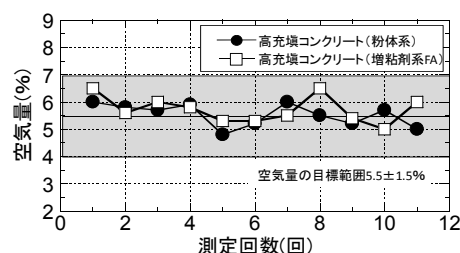


図-9 荷下し時の空気量測定結果

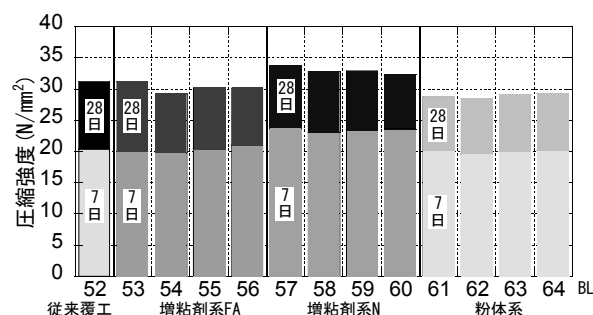
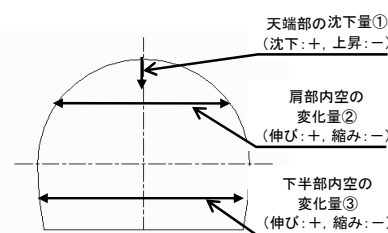


図-10 圧縮強度試験結果

表-5 セントルの変形量測定結果(単位 mm)

コンクリート種類	天端 沈下量①	肩部内空 変化量②	下半内空 変化量③
従来	0.8	-0.9	-12.7
高充填(増粘剤系 FA)	3.0	-1.3	-11.7
高充填(増粘剤系 N)	2.5	-1.1	-9.7
高充填(粉体系)	2.1	-1.2	-12.2



c) コンクリートの流動性・充填性

天端部の充填状況を検証するためにセントル天端部3か所（吹上げ部、中間部，妻部）に圧力計を設置した。

計測結果を図-12に、圧力計設置位置を図-13示す。

従来の覆工コンクリートを用いた場合、吹上げ口での圧力が大きくなる一方、スパン中央や妻側の圧力が小さい結果が得られた。コンクリートの流動性が低く、吹上げ口周辺にコンクリートが堆積しているためと考えられる。また施工終了後に圧送圧力を除去すると、吹上げ口やスパン中央での測定点での作用圧力は大きく低下した。

高充填コンクリートを用いた場合、吹上げ口の圧力の極端な上昇は認められず、各点に作用する圧力の差異が大きく低減できている。コンクリートがセトル全域に一樣に流動しているためと考えられる。圧送終了後の圧力の低下は、従来の覆工コンクリートに比べ小さく、いずれの測点においても 0.01N/mm^2 程度であった。

天端部に16台の型枠パイプレータを設置し（出力550W、約3m間隔）、棒状パイプレータと併用した場合には、各点の作用圧力はほぼ等しくなり、棒状パイプレータのみの施工に比べて、さらにコンクリートが一樣に流動していることが確認された。圧送終了後の圧力の低下は、高充填コンクリートを棒状パイプレータで締め固めた場合よりも小さくなっており、全体にコンクリートが充填できているものと考えられる。

d) 仕上り状況

高充填コンクリートによる覆工の仕上り状況を写真4に示す。高充填コンクリートは、天端部でも流動性が高く、隅々まで流動したため、従来の覆工コンクリートに比べて、縞模様が低減し、美観性が向上できる結果が得られた。

また天端部の充填性を確認するため、電磁波探査による空洞調査を3測線（トンネルセンターと左右1.5m）で実施したところ、すべての測線で空洞は認められず、完全に充填されていることを確認した。

6. 高充填コンクリートの展開に向けての取組み

(1) 地域性について

生コンクリートの構成材料のうち、粗骨材・細骨材は地域によって大きく異なり、コンクリートの品質に大きく影響を及ぼす。

よって今後の北海道新幹線工事(新函館(仮称)・札幌間)等、他地域においても、高充填コンクリートが製造できることを確認するために、北海道内の他地域の代表的な生コン工場の所有する骨材を用いた試験練りを行った。

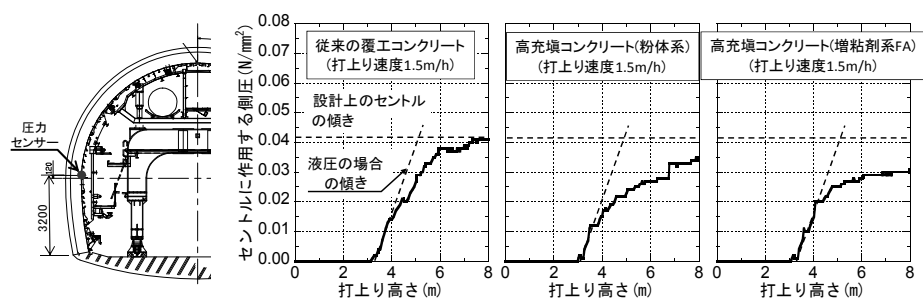


図-11 側圧計測結果

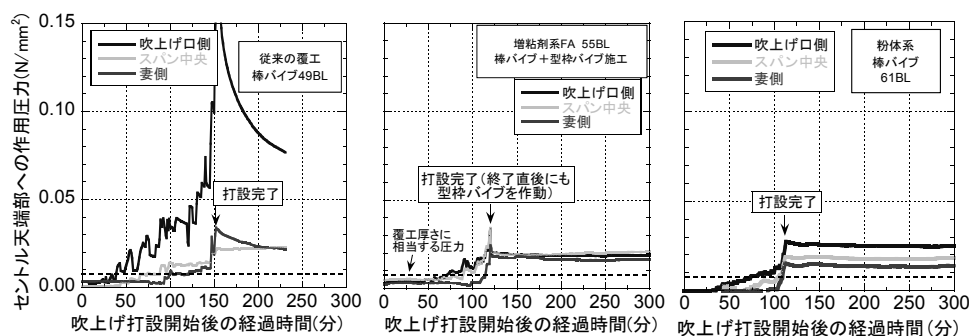


図-12 天端圧力計測結果

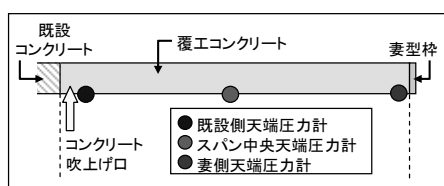


図-13 圧力計設置位置

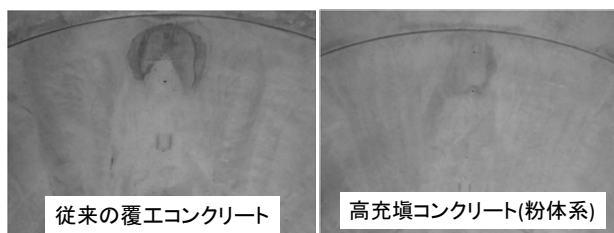


写真4 天端部仕上り状況

その結果、他地域の骨材を用いた場合でも、フライアッシュを混入し、同じ性状を有する高充填コンクリートが製造できることを確認できた。

(2) 示方化について

高充填コンクリートを広く展開していくために、配合設計手法を確立する必要がある。よって所要のコンクリート品質を確保する上で必要となる最低セメント量、フライアッシュ混入量および最大水セメント比等について今後検討を行っていく予定である。

7. おわりに

これまで室内試験、実機試験および試験施工を行い、高充填コンクリートを覆工コンクリートに適用できることを確認した。

今後は、整備新幹線工事をはじめとする全国展開を見据え、①全国各地域の材料を用いた場合にも高充填コン

クリートを製造できることを確認すること、②フレッシュコンクリート品質、強度特性および耐久性を考慮した上で、合理的な配合設計手法を確立すること等を検討し、今回開発した高充填コンクリートとFILM工法によって、高品質な覆工コンクリートの構築を推進していく。

参考文献

- 1) 城間博通ほか：トンネル覆工専用中流動コンクリートの開発，土木技術，Vol.64，No.4，pp.49-57，2009.4.
- 2) 村崎慎一ほか：トンネル全線に中流動コンクリートを適用し高品質覆工に挑戦—北海道横断自動車道久留喜トンネル—，トンネルと地下，Vol.41，No.12，pp.7-16，2010.12.
- 3) 秋田勝次ほか：山岳トンネルにおける新しい覆工工法の実用化に向けた課題の克服，トンネル工学報告集第22巻，pp.233-238，2012.11.

(2013.9.2 受付)

DEVELOPMENT OF TUNNEL LINING CONCRETE WITH HIGH FLUIDITY

Motonori FURUYA, Takashi SATO, Hideki HAGIWARA, Takashi GOTO,
and Kuniaki SAKURAI

To construct a high-quality and economical tunnel lining concrete, the new type concrete was developed, which has high level fluidity, 21cm slump, using the coarse aggregate of largest dia. 40 mm, and fly ash.

As result of labo-test, this concrete improved fresh-concrete quality such as fluidity and bleeding, strength development and durability. Next pilot lining works at Shinkansen tunnel verified this concrete had sufficient fluidity at tunnel sidewall and crown by means of moderate vibration and usual equipment.