

トンネル覆工用「スムースクリート™」の開発

桜井 邦 昭 近 松 竜 一
秋 好 賢 治
(本社土木本部)

Development of SMOOTH-CRETE™ for Tunnel Lining

Kuniaki Sakurai Ryuichi Chikamatsu
Kenji Akiyoshi

Abstract

For building durability tunnel lining, it is necessary to use concrete for high filling property. Usually, to increase the unit of cement content is required to improve filling property, the subject a crack generating risk increases occurs. So, we developed Smooth-Crete with a viscosity agent that provides an ameliorative filling property without increasing the unit of cement content. In this study, we experimentally verified the applicability of Smooth-Crete to tunnel lining. The following results were obtained: 1) various characteristics of Smooth-Crete are better than or equal to existing lining concretes; 2) Smooth-Crete can improve the homogeneity of lining, for example, in a construction experiment where a full-scale formwork simulates the side and upper parts of the lining.

概 要

耐久的なトンネル覆工の構築には、充てん性に優れたコンクリートを用いる必要がある。従来、充てん性の改善には単位セメント量の増加が必要で、ひび割れ発生リスクが増加する等の課題があった。そこで、増粘剤を用いることで単位セメント量を増加せずに充てん性を改善できるトンネル覆工用「スムースクリート」を開発した。本稿では、スムースクリートの諸性質を室内試験により検討し、従来の覆工コンクリートと同等以上であることを確認した。また、トンネル覆工の側壁部や天端部を模擬したモデル試験施工を行い、スムースクリートを用いることで、従来の覆工コンクリートに比べトンネル覆工の充てん性や均質性を向上できることを示した。

1. はじめに

社会資本整備への投資額が年々減少する現状では、経済的で耐久性に優れたコンクリート構造物を構築することが益々求められている。耐久的なコンクリート構造物の構築には、施工性が確保できる範囲内でできるだけ単位水量やセメント量の少ないコンクリートを用い、内部振動機により確実に締固めを行うことが前提である。しかし、耐震基準の見直しに伴い鉄筋が密に配置された構造物が増加傾向にある。また、山岳トンネルの覆工コンクリートの天端部のように、狭い空間内で長距離にわたりコンクリートを流動させて充てんする必要がある構造物もある。このような構造物では、物理的に内部振動機による締固めが困難であったり、過剰な振動締固めにより材料分離が生じ、コンクリートの均質性が損なわれる可能性もある。

そのため、従来の高流動コンクリートのような完全な自己充てん性は有しないものの、軽微な振動締固めで充てん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いる。具体的には、トンネル覆工に用いる「中流動覆工コンクリート」¹⁾や

鋼コンクリート合成構造の沈埋函に用いられる「加振併用型充てんコンクリート」²⁾などがある。これらのコンクリートは、高性能AE減水剤を用いることで高い流動性を確保する一方で、材料分離抵抗性を確保するために従来のコンクリートに比べ単位粉体量を増加させている。しかし、セメント量を増加するとひび割れの発生リスクが高まり、混和材料を追加すると専用のサイロや計量器が必要となり設備面で課題が生じる場合がある。

そこで、増粘剤を用いることで、単位粉体量を増加することなく、充てん性を改善しつつ均質性を高めることができる「スムースクリート™」を開発した³⁾。

本稿では、スムースクリートのトンネル覆工への適用性について実験的に検討した。初めに、スムースクリートのフレッシュ性状、強度特性および耐久性などの基礎的性質を室内試験により確認した。次に、実施工を想定し、トンネル覆工の側壁部および天端部を模擬した実物大型枠を用いた施工実験を行い、その施工性および硬化後の品質について検証した。

2. スムースクリートの概要

2.1 流動性から見たスムーズクリートの位置づけ

先述のように、スムーズクリートは、軽微な振動締め固めにより充てんが可能なコンクリートであり、コンクリートの流動性と締め固めに要するエネルギーから分類した場合、自己充てん性を有する高流動コンクリート（ニューロクリート）と内部振動機により締め固めを行う従来のコンクリート（一般にスランブ18cm程度以下）の中間に位置するコンクリートである（Fig. 1）。先述の中流動覆工コンクリートや加振併用型充てんコンクリートも同じ位置に分類される。

2.2 スムースクリートの配合の考え方

各種コンクリートの材料構成の概念図をFig. 2に示す。従来のコンクリートとは、各発注機関の仕様書で示されるコンクリートのことであり、スランブは適用部位によって相違するものの、一般構造物の場合には8cm、トンネル覆工の場合には15cmであることが多く、一般にAE減水剤が用いられている。

粉体増量コンクリートとは、中流動覆工コンクリートや加振併用型充てんコンクリートを想定した配合である。高性能AE減水剤を用いることで流動性を、単位粉体量（セメントあるいは混和材料）を増加することで材料分離抵抗性を確保している。

スムーズクリートは、上記の粉体増量コンクリートと同等の充てん性を確保しつつ、従来コンクリートの配合に比べ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コンクリートである。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従来のコンクリートに比べ少なく設定する（粉体増量コンクリートと同様にする）。

3. トンネル覆工コンクリートの要求性能

トンネル覆工は、先述のように、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。そのため、東日本高速道路、中日本高速道路および西日本高速道路では、トンネル覆工の施工性改善と品質向上を目的として従来の覆工コンクリートに比べ流動性を改善した「中流動覆工コンクリート」（本文では、粉体増量コンクリートと呼称）を施工管理要領に制定している¹⁾。施工管理要領における中流動覆工コンクリートの要求性能をTable 1に示す。著者らは、このコンクリートをトンネル全線に適用し、施工性が大幅に改善できることに加え、美観性および均質性に優れたトンネル覆工が構築できることを既に確認している^{4)、5)}。そこで、トンネル覆工用のスムーズクリートの目標性能もTable 1と同様とすることとした。

加振変形量試験とは、振動下におけるコンクリートの変

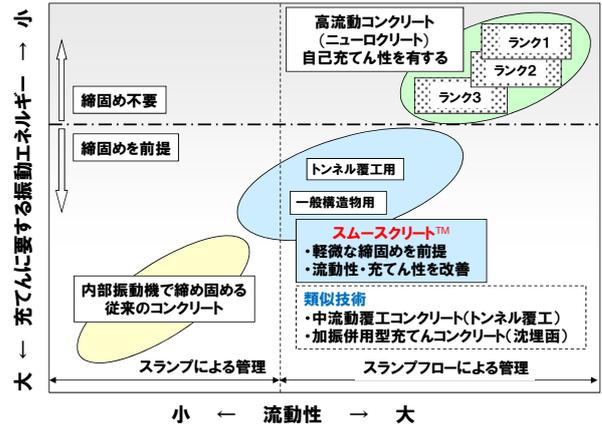


Fig. 1 スムースクリートの位置づけ
Concept of Smooth-Crete

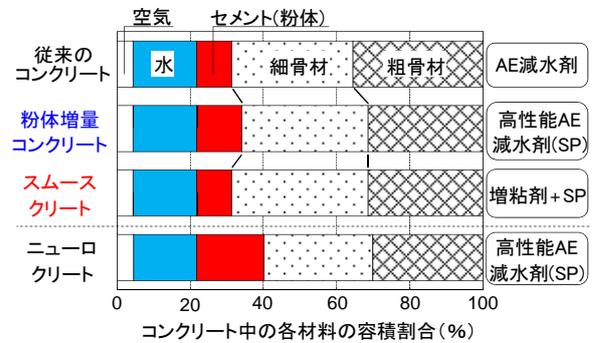


Fig. 2 各種コンクリートの材料構成の概念図
Conceptual diagram of material composition of several concrete

Table 1 中流動覆工コンクリートの要求性能¹⁾
Demand performance of middle fluidity concrete in construction management points for lining

設計基準強度 (σ_{28}) (N/mm ²)	スランブフロー (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秒加振後のスランブフローの広がり)	28以上

形性能を調べるために行う試験である（Photo 1）。装置下面に棒状振動機が設置してあり、平板面全体に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ブフロー試験を行った後、振動機を10秒間振動させ、加振前後のスランブフローの変化量（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型充てん高さ試験は、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、所要の充てん性を満足すると判定する（Fig. 3）

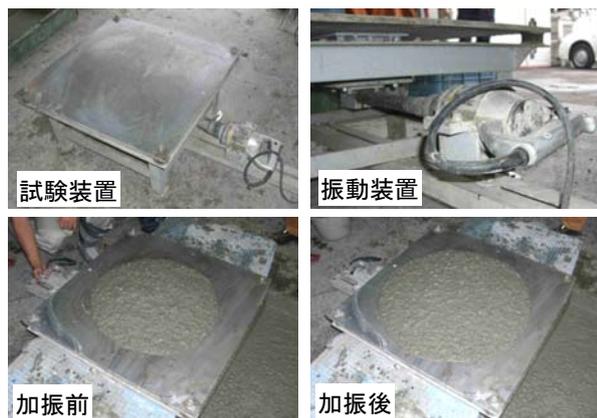


Photo 1 加振変形量試験の概要
Test for deformation ability of concrete by vibration action

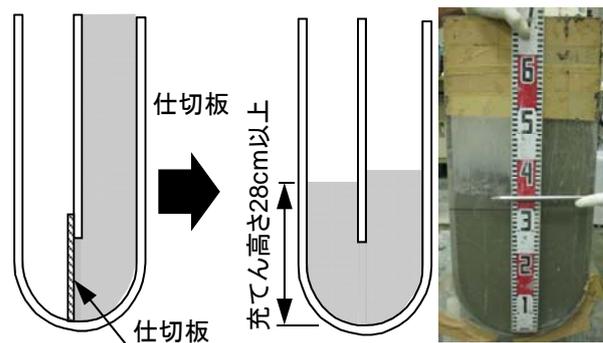


Fig. 3 U型充てん高さ試験の概要
Test method of passability through obstacle of concrete

Table 2 使用材料
Employed material

ケース	種類	記号	物理的性質など
1	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種相当品, 密度2.25g/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
	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%
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%	
2	セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
	細骨材	S1	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
		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
	粗骨材	G1	相模原産砕石 Gmax20mm, 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.95%, 実積率60.3%
3	セメント	C	高炉セメントB種, 密度3.04g/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	熊本県芦北町官浦産砕砂 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	長崎県老沖産海砂 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	熊本県芦北町官浦産砕石 Gmax20mm, 表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.88%, 実積率59.0%
共通	混和剤	WR	AE減水剤(リグニンスルホン酸) *基本配合コンクリートで使用
		SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸) *粉体増量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) *スムーズクリートで使用

4. スムースクリートの基礎的性質の検証

使用材料が相違する場合でも、所要の性能を満足するスムーズクリートが製造できること、およびスムーズクリートの諸性質が従来の覆工コンクリートと同等以上であることを検証するため、各地の生コン工場で使用している骨材を用いた試験練りを行い、フレッシュコンクリートの性状、強度発現性および耐久性を調べた。

4.1 実験概要

4.1.1 使用材料とコンクリート配合 使用材料をTable 2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(砂利を砕いたもの)を用いた。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、膨張材および有機繊維(非鋼繊維)を混入した。

また、混和剤は、基本配合にはAE減水剤、粉体増量コ

ンクリートには高性能AE減水剤、スムーズ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。

コンクリート配合とフレッシュコンクリートの試験結果をTable 3に示す。各ケースにおいて、従来の覆工コンクリート(以下、基本配合と呼称)、Table 1に示す所要性能を満足するように単位粉体量(セメント量もしくは混和材量)を増加させた粉体増量コンクリートおよびスムーズクリートの3種類の配合について試験した。

なお、基本配合は、各発注機関の仕様書における覆工コンクリートの配合条件(水セメント比60%以下、単位水量175kg/m³以下、単位セメント量270kg/m³以上、スランプ15cm、空気量4.5%)を参考に、各々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に相当する配合を用いた。

4.1.2 練混ぜ方法 練混ぜには二軸強制練りミキサ(公称容量60L)を用い、1バッチの練混ぜ量を40Lとした。練混ぜ方法は、セメント、混和材および骨材を投入し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

Table 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試験結果
Mix proportion of concrete and test result of fresh concrete

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×%)			フレッシュコンクリートの性状				施工実験適用有無	
					W	B			S1	S2	G1	G2	WR	SP	VA	FB (外割) (kg/m ³)	スランプフロー (cm)		空気量 (%)		U形充てん高さ (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	スランプ17.5cm		4.9	—	—
	粉体増量	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	側壁部
	スームスクリート	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	側壁部
2	基本配合	57.4	48.5	0.35	174	303	0	0	650	213	939	0	1.2	0	0	0	スランプ16.0cm		5.2	—	天端部
	粉体増量	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	—
	スームスクリート	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	天端部
3	基本配合	53.6	48.1	0.35	175	326	0	0	337	499	919	0	0.25	0	0	0	スランプ15.0cm		4.5	—	—
	粉体増量	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	—
	スームスクリート	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	—



Photo 2 加振変形量試験前後のコンクリートの状況
Test result of deformation ability of concrete by vibration action

投入して60秒間練り混ぜた。ケース3では、ベースコンクリート練り上げ後に有機繊維を投入して、さらに30秒間練り混ぜた。なお、試験は20±1℃の室内で実施した。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 フレッシュコンクリートの品質
フレッシュコンクリートの試験結果をTable 3に、加振変形量試験における加振前後のコンクリート状況をPhoto 2に示す。各種材料を用いた場合でも、Table 1の目標性能を満足するスームス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、使用材料が異なる場合でも、増粘剤成分を混和した高性能AE減水剤を用いることで、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スームス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。糸状の極めて細い有機繊維が、見かけ上、粉体量を増加した場合と同じように粘性を増す働きをすることで、粉体量が低減できたものと推測される。

なお、所要の性能を満足するスームスクリートの単位

粗骨材容積(Vg)は、Table 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することも可能と考えられる。

ブリーディング試験結果をFig. 4に示す。スムーズクリートは、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。

4.2.2 圧縮強度試験結果 圧縮強度試験結果をFig. 5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。スムーズクリートの材齢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。スムーズ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。

4.2.3 耐久性試験結果 ケース1における各種コンクリートの中性化促進期間2ヶ月(二酸化炭素濃度5%)における中性化深さ、および塩分濃度10%の塩水に2ヶ月間浸漬させた際の塩分浸透深さの測定結果をFig. 6に示す。なお、各試験は2ヶ月間の標準養生(20℃水中)後に実施した。スムーズクリートの中性化深さおよび塩分浸透深さは、基本配合コンクリートと同様であり、十分な耐久性を有していることが確認できた。なお、粉体増量コンクリートは、混和材として混入したフライアッシュのポゾラン反応により水和組織が緻密化したため、他の配合に比べ中性化や塩分浸透に対する抵抗性が向上したと考えられる。

5. 覆工側壁部での施工性確認実験

5.1 実験概要

スムーズクリートの実施工への適用性について検討するため、覆工の側壁部を模擬した実物大型枠を用いた施工実験を行った。スムーズクリートを実機プラントで製造し、時間経過に伴う品質変化を把握するとともに、コンクリートの打込み状況ならびに充てん後のコンクリートの品質について検証した。

5.1.1 検討ケースとコンクリートの製造方法 施工実験は、Table 3中のケース1の粉体増量コンクリートとスムーズクリートで行った。使用材料はTable 2と同様である。練混ぜには二軸強制練りミキサ(容量2m³)を用いた。1バッチの練混ぜ量は1.5m³とし、2バッチ(合計3m³)製造してアジテータ車に積み込んだ。練上りからの経過時間が0, 30, 60, 90および120分後に、アジテータ車より試料を採取してスランプフローおよび空気量を測定し

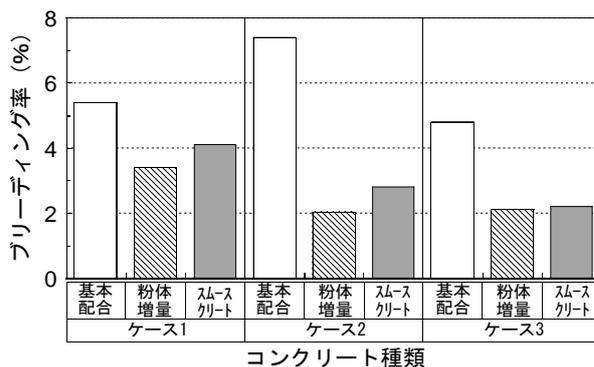


Fig. 4 ブリーディング試験結果
Result of bleeding test

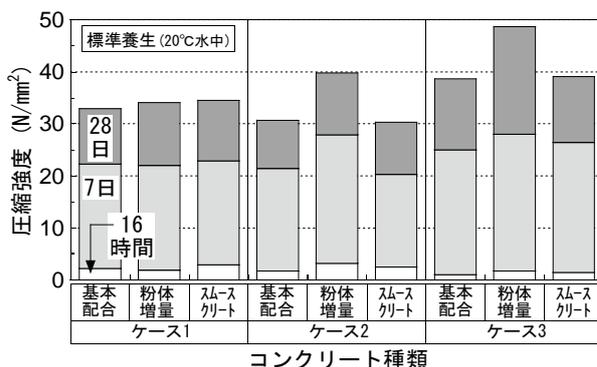


Fig. 5 圧縮強度試験結果
Result of compressive strength of concrete

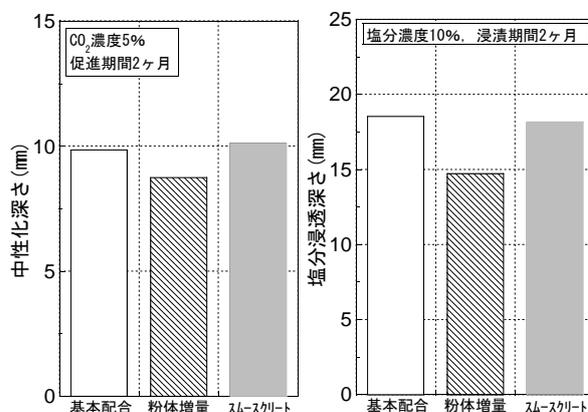


Fig. 6 中性化深さ、塩分浸透深さ測定結果(ケース1)
Result of a measurement for depth of carbonation and penetration depth of chloride ion

た。

なお、施工実験時のコンクリート温度は11~15℃であった。

5.1.2 模擬型枠の概要 実験に用いた模擬型枠の概要をPhoto 3に示す。標準的な覆工形状は、覆工厚さ30~35cm, 1スパン長10.5mであり、側壁部はスパン中央の1箇所からコンクリートを打ち込むことが多いため、図に示す形状の型枠とした。また、施工管理要領¹⁾を参考に、締固めは型枠パイプレータにより行うこととし、片側面に3m間隔で2台設置した。

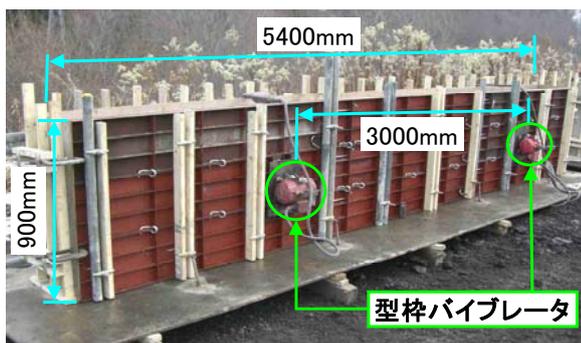


Photo 3 側壁部模擬型枠の概要
Outline of full-scale formwork for side part

5.1.3 コンクリートの打込み方法 コンクリートの打込みは、練上りから30分経過した時点で型枠端部より行った (Photo 4)。コンクリート自身の流動性で流動するように、打設速度 $5\text{m}^3/\text{h}$ 程度で打ち込んだ。コンクリートの流動先端が、型枠端部に到達した時点で打込みを停止し、流動勾配を測定した。その後、打込み口から2.7m地点の打込み高さが40cmになるまで再度コンクリートを打ち込んだ後、型枠パイププレートを作動させ、コンクリート上面が平滑になるまで締め固めた (Photo 5)。作動時間は約5秒であった。この後、同様の手順で2層目のコンクリートを打ち込んだ。

2層目のコンクリートの締め固め完了後に、流動先端側にてコンクリート試料を約100L採取した。試料を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、洗い試験を実施して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Table 4に示す。なお、比較用データを採取するため、コンクリートの打込み前においても試料を採取し、上記と同様に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。

5.2 実験結果および考察

5.2.1 コンクリート品質の経時変化 各種コンクリートの時間経過に伴う品質変化をFig. 7に示す。スムーズクリートは、練上り120分後でも、スランプフローの低下は3~4cmであった。なお、空気量の低下量も同様にほとんど生じなかった。本研究で用いた増粘剤成分を混和した高性能AE減水剤が十分なスランプおよび空気量保持性能を有していることを示す結果と考えられる。

5.2.2 コンクリートの流動状況 コンクリート打込み時の流動勾配をFig. 8に示す。いずれのコンクリートも流動勾配は $1/15\sim 1/25$ 程度であった。スムーズクリートが高い流動性を有することを示す結果である。なお、



Photo 4 コンクリートの打込み状況
Placing situation of Smooth-Crete

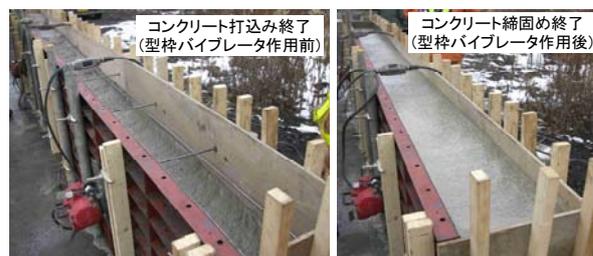


Photo 5 コンクリートの締め固め前後の状況
Compaction situation of Smooth-Crete

Table 4 流動前後の品質変化検討の試験方法の概要
Examination procedure of concrete quality variation before and after flow

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本作製する。 ②材齢28日まで標準養生 ($20^\circ\text{C} \cdot \text{水中}$) した後、JIS A 1108に準じて圧縮強度試験を実施する。 $\text{圧縮強度比 (\%)} = \frac{\text{流動先端で採取した試料の圧縮強度 (N/mm}^2\text{)}}{\text{打込み前に採取した試料の圧縮強度 (N/mm}^2\text{)}} \times 100$

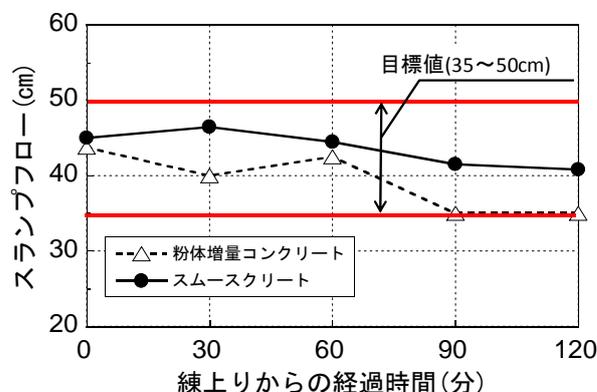


Fig. 7 スランプフローの経時変化
Change in slump-flow according to passage of time

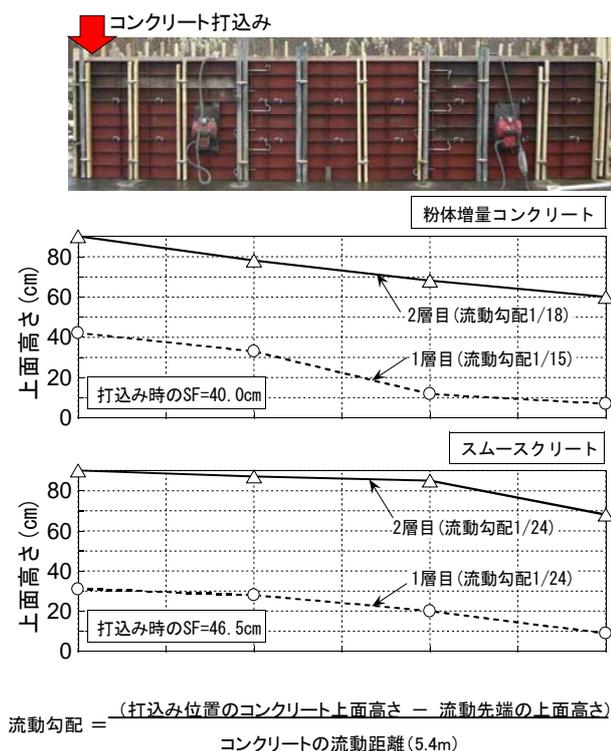


Fig. 8 コンクリート打込み時の流動勾配
Flow inclination of concrete in placing

粉体増量コンクリートの流動勾配がスムースクリートに比べやや大きいのは、打込み時のスランプフローが5cm程度小さかったためと推測される。

流動時のコンクリートの状況をPhoto 6に示す。ペースト分と骨材とが材料分離することなくコンクリートが打ち込まれていることが分かる。

5.2.3 打ち込んだコンクリートの品質 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Table 5に示す。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、流動前試料に対し92~94%であった。同様に、流動先端部で採取したコンクリート試料の圧縮強度は、流動前に採取した試料とほぼ同等であった。Table 1に示す性能を満足するコンクリートであれば、一般的なトンネル覆工の施工方法と同様に、5m程度流動させて打ち込んでも、材料分離を生じることなく均質なコンクリートを充てんできることを示す結果と考えられる。また、いずれのコンクリートの試験体においても、脱型後に未充てんやジャンカなどの初期欠陥は認められなかった。

6. 覆工天端部での施工性確認実験

6.1 実験概要

スムースクリートの覆工天端部への適用性を検証するため、実機プラントでスムースクリートを製造し、覆工天端部を模擬した型枠に打込み、コンクリートの流動および充てん状況を確認するとともに、硬化後のコンクリート品質を調べた。



Photo 6 スムースクリートの打込み時の流動先端状況
Situation for the point end of flow in placing of Smooth-Crete

Table 5 流動前後のコンクリート品質試験結果(側壁部)
Test result of concrete quality variation before and after flow

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 (%)
粉体増量コンクリート	93.7	96.9
スムースクリート	92.1	101.3

6.1.1 検討ケースとコンクリートの製造方法

実験には、Table 3のケース2の基本配合コンクリートとスムースクリートを用いた。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、アジテ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、スムース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。

6.1.2 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Photo 7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、流動距離は約6m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⁴⁾・⁵⁾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パイプレータ3台を15秒間作用させた。作用時間は既往の知見⁴⁾・⁵⁾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



(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

Photo 7 天端部模擬型枠の概要
Outline of full-scale formwork for upper part

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。試験方法の概要は前節のTable 4と同様である。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、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。

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、硬化コンクリートの品質調査として、テストハンマー(NR型)を用いて反発度を、トレント法⁶⁾を用いて透気係数を調べた。

6.2 実験結果および考察

6.2.1 コンクリートの施工状況および品質変化

スムース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。

スムースクリートの模擬型枠内での流動状況をPhoto 8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流動し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Table 6に示す。スムースクリートの流動先端部から採取した流動後の試料中の粗骨材量は、流動前の試料に対し93.2%であり、基本配合の89.2%に比べ粗骨材の割合が多く、スムース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。

6.2.2 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Photo 9に示す。実施



(a) 流動先端側から打込み側を向いて撮影

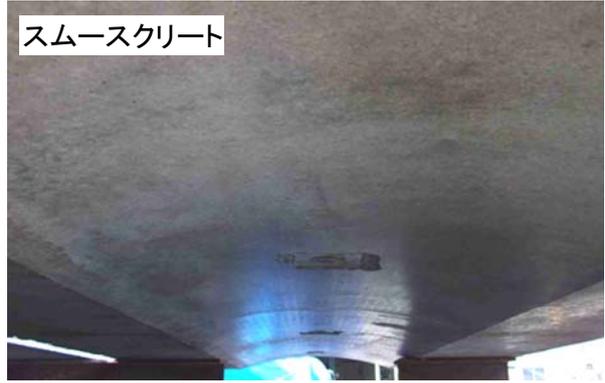


(b) 流動先端側で撮影

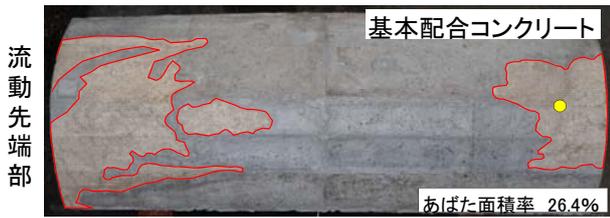
Photo 8 スムースクリートの流動状況
Placing situation of Smooth-Crete

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、良好な仕上りであった。

一方、上面(地山側)では、基本配合を用いた場合、吹



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



(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

Photo 9 脱型後のコンクリート試験体の外観
External of concrete test model after remolding

上げ口および流動先端箇所で大範囲にわたって大きなあばた(最大深さ10mm程度)が生じていた。基本配合は、室内試験の結果よりブリーディング率が約7%と大きいことから、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。一方で、スムースクリートの場合、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。

6.2.3 反発度および透気係数測定結果 試験体各部位の反発度測定結果をTable 7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箇所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、スムースクリートを用いた場合は、基本配合の場合に比べ、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箇所での反発度の差もほとんど生じていなかった。

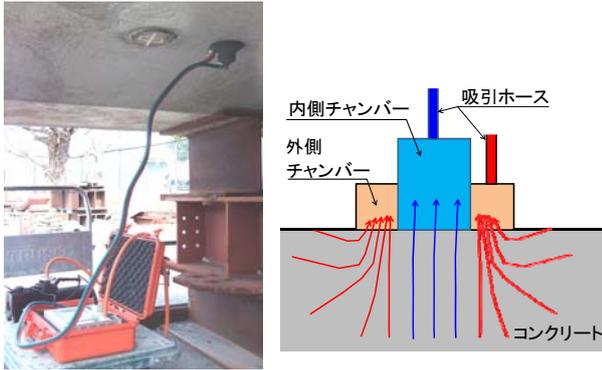
トレント法による透気係数の測定概要をFig. 9に、試験体各部位の透気係数測定結果をTable 8に示す。なお、測定は上記の反発度と同様の箇所で行った。透気係数の測定は、まず、外側と内側の2層構造からなるチャンバー

Table 6 流動前後のコンクリート品質試験結果(天端部)
Test result of concrete quality variation before and after flow

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
スムースクリート	93.2	100.6

Table 7 試験体各部位の反発度測定結果
Test result for rebound number on surface of concrete

コンクリート種類	反発度							
	基本配合コンクリート				スムースクリート			
	表面側(下面)		地山側(上面)		表面側(下面)		地山側(上面)	
測定位置	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	



(a)測定状況 (b)測定原理

Fig. 9 トレント法による透気係数の測定概要
Outline of measurement of air permeability on concrete by Torrent method

をコンクリート表面に設置し、ほぼ真空状態となるまで空気を吸引する。その後、外側チャンバーのみ吸引を続け、内側チャンバー内の圧力変化を測定する。圧力変化が小さいほど、コンクリート表面から空気が通り難いこと(コンクリートの表面組織が緻密であること)を表し、得られる透気係数は小さな値となる。

測定の結果、スムーズクリートを用いた場合の方が、測定部位によらず透気係数の値は小さく、ばらつきが小さい結果が得られた。

反発度および透気係数の測定結果を踏まえると、スムーズクリートを用いることで、従来の覆工コンクリートを用いる場合に比べ、均質性に優れたトンネル覆工が構築できると考えられる。

7. まとめ

増粘剤を用いることで、単位粉体量を増加せずに充てん性および均質性を改善できるスムーズクリートのトンネル覆工への適用性について実験的に検討した。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 使用する骨材種類によらず、増粘剤を混和することで、単位粉体量を増量しなくとも、スランプフロー35~50cm, U形充てん試験における充てん高さ28cm以上(障害鉄筋のない場合)を満足するコンクリートが製造できる。
- 2) スムーズクリートは、従来の覆工コンクリートと同等の強度発現性、ならびに中性化や塩分浸透に対する抵抗性を有している。
- 3) 覆工側壁部の施工を模擬し、スムーズクリートを5m程度流動させて打ち込んでも、流動先端における品質低下は認められない。
- 4) スムーズクリートは、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。

Table 8 試験体各部位の透気係数測定結果
Test result for air permeability on concrete

コンクリート種類	透気係数 ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)			
	基本配合コンクリート		スムーズクリート	
測定位置	表面側(下面)	地山側(上面)	表面側(下面)	地山側(上面)
平均値	2.5	1.7	0.1	0.8
最大値	12.3	11.0	0.4	2.8
最小値	0.1	0.2	0.0	0.1
標準偏差	4.0	1.8	0.1	0.9

- 5) スムーズクリートは、従来の覆工コンクリートでは充てんが難しい天端部の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。
- 6) スムーズ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。

スムーズクリートは、単位粉体量が少なく、増粘剤成分を含有した高性能AE減水剤により材料分離抵抗性を確保している。そのため、従来の粉体増量コンクリートに比べ、水量変動や外気温の変化に伴うコンクリートの品質変動が大きくなる場合も想定される。今後、実構造物への適用を通して、安定した品質のスムーズクリートを製造するための管理手法を確立していく予定である。

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「中流動覆工コンクリート編」, (2008.8)
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：鋼コンクリートサンドイッチ構造沈埋函を対象とした加振併用型充てんコンクリートマニュアル, (2004.2)
- 3) 桜井邦昭, 近松竜一：増粘型高性能AE減水剤によるコンクリートのワーカビリティ改善効果に関する検討, 土木学会第66回年次学術講演会, V-565, pp.1129~1130, (2011.9)
- 4) 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)
- 5) 村崎慎一, 森俊介, 中間祥二, 桜井邦昭：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)
- 6) 例えば, 日本コンクリート工学協会：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)