

報告 SENS 一次覆工コンクリートに用いる新規混和材料の検討

奥山 康二*1・野口 守*2・水野 清*3・宮川 美穂*4

要旨：SENS 一次覆工コンクリートでは、自己充填性、流動性の保持性、ポンプ圧送性、水中分離抵抗性、強度発現性など多岐にわたる要求性能を満足する必要がある。本検討では、新規混和材料として、セルロース・バイオポリマー複合系の増粘剤、高性能 AE 減水剤、スランプ調整剤の 3 剤の組合せによる配合の適用性を室内試験および現場適用を通して検討した。その結果、当該混和材料を組み合わせて使用し、各剤の添加量を適宜調整することで、要求性能を満足するとともに、SENS による支障のない連続掘進が可能であった。

キーワード：SENS、一次覆工コンクリート、流動性保持性、ポンプ圧送性、連続掘進

1. はじめに

SENS (Shield ECL NATM System) とは、自立性の低い地山にトンネルを構築する新しい工法であり、シールドマシンで地山を掘削し、場所打ちコンクリートによって一次覆工を構築するトンネル工法である。一般に、シールドマシンでのトンネル構築では、プレキャストセグメントによって一次覆工を構築するが、これを場所打ちコンクリートとすることによって、トンネル工法のコストダウンを目指している。

SENS は、東北新幹線の三本木原トンネルで適用実績があり¹⁾、今回、北海道新幹線の津軽蓬田トンネル(L=6.2km)で新たに適用された。これらのトンネルは地下水位以下に構築するトンネルであるため、いずれのトンネルにも水中不分離性コンクリートが適用された。

津軽蓬田トンネルでは、掘進速度に応じてコンクリートの流動性保持時間を調整することにより、安定したトンネル掘進を実現した²⁾。また、コンクリートの年間の温度依存性に対し、各種減水剤添加率の調整だけで、性状を安定化させた³⁾。以上のようなコンクリートの性状調整を実現するためには、使用する増粘剤や減水剤を含む各種混和材料の組合せの適合性が重要と考えられる。

三本木原トンネルと津軽蓬田トンネルで使用されたコンクリートには、同一成分系の増粘剤(アルキルアンモニウム塩およびアルキルアリルスルホン酸塩)が用いられ、津軽蓬田トンネルでは実施工においてコンクリートの性状調整を実施した。また、SENS のコストダウンを推進するには、コンクリート単価の低減も必要であり、安価で現状と同様にコンクリートの性状調整が可能な混和材料の組合せの開発が求められている。

本報では、新規混和材料として、セルロース・バイオポリマー複合系の増粘剤および高性能 AE 減水剤、スラ

ンプ調整剤(初期流動性の抑制作用と流動性保持性を併せ持つ。)の 3 剤の組合せによる SENS コンクリートについて、コンクリートの性状調整が可能な各種混和剤の添加率の調整方法を検討し、津軽蓬田トンネルの一部区間において現場適用に至ったので、その内容を報告する。

2. SENS の概要

2.1 SENS の掘進方法

SENS では、シールドマシンでの掘進と同時進行で一次覆工コンクリートを打設する。津軽蓬田トンネルのコンクリート打設方法を図-1 に示す。コンクリートは、マシン内に設置された内型枠と地山の間に、妻型枠に設置された打設ポートから打設される。内型枠は、マシン後方で脱型され、その際はコンクリートが地山を保持できる程度の強度を発現している必要がある。コンクリート打設手順を図-2 に示す。掘進は内型枠 1 リング分ごとに進行し、1 リング分の掘進が終了した後、次の 1 リング分の内型枠を設置し掘進を再開する。掘進時は、掘進と同時進行でコンクリートを圧入し、コンクリート圧によって地山を保持する。シールドの推進ジャッキは内型枠に当てられており、推進反力は、打設したコンクリートが硬化するのにもない発生する内型枠とコンクリートの付着力を介し、硬化した一次覆工コンクリートに伝達される。

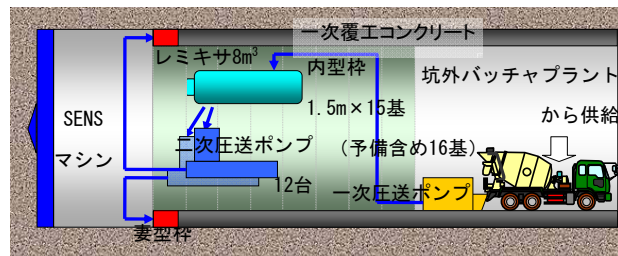


図-1 コンクリート打設方法

*1 電気化学工業(株) 青海工場セメント・特混研究部 トンネルグループ リーダー 工修 (正会員)

*2 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 青森新幹線建設局 次長 (工事)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 主任研究員 (正会員)

*4 グレースケミカルズ(株) 技術部 R&D エンジニア 工修 (正会員)

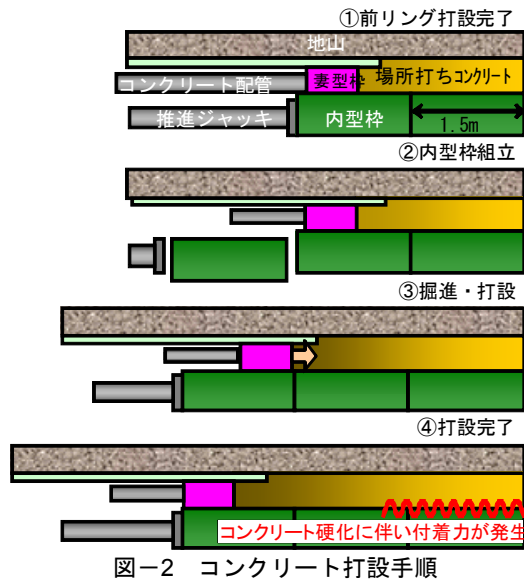


図-2 コンクリート打設手順

2.2 一次覆工コンクリートへの要求性能

(1) 品質目標

コンクリートの品質目標を表-1に示す。これらは、津軽蓬田トンネルで使用されたコンクリートに対する品質目標であり³⁾、今回の開発においても同様の品質を目標とした。

(2) 安定した掘進のための性状調整

SENSの掘進においては、掘進が継続する限り、コンクリートを圧送しなければならない。コンクリートを長時間圧送し続けると、セメント水和物が徐々にポンプ配管内に付着することによって圧送抵抗が上昇し、ポンプ油圧がポンプ能力の限界を超え、それ以上のポンプ圧送が不可能となることがある。圧送速度が速い場合やコンクリートの流動性保持時間が長い場合は、セメント水和物が輸送管内に付着しにくくなるため、油圧上昇は発生しにくい。圧送速度は掘進速度と比例し、掘進速度は地山条件によって変化するため、圧送抵抗の変化に応じて圧送速度を調整することはできない。油圧上昇を発生させないためには、掘進速度の低下に応じてコンクリートの流動性保持時間を長くする必要がある。一方、流動性保持時間が長すぎる場合は、推進反力を発揮するための付着力や脱型時強度の確保に影響がおよぶ場合がある。

以上より、SENSの一次覆工コンクリートには、ポンプ油圧が上昇せず、強度発現も満足できるように、掘進速度に応じてコンクリートの流動性保持時間を調整する必要がある。

3. 新規混和材料の検討

3.1 増粘剤の検討

本検討では、新たな増粘剤としてセルロース・バイオポリマー複合系増粘剤（以下、VCB）を用いた。水中不分離性コンクリートで一般的に用いられているセルロー

表-1 コンクリートの品質目標

品質項目	品質目標
スランプフロー	650±50 mm
フレッシュ保持性	練上りから4時間後の50 cmフロー到達時間が180秒以下
圧縮強度	材齢24時間で15 N/mm ² 以上、28日で30 N/mm ² 以上
ポンプ圧送性	3インチ配管で30 mの距離に5 m ³ /hを打設可能であること
材料分離抵抗性	圧送および充填時に材料分離を生じない
水中不分離性	JSCE-D104により、pH 12.0以下・懸濁物質質量500 mg/L以下

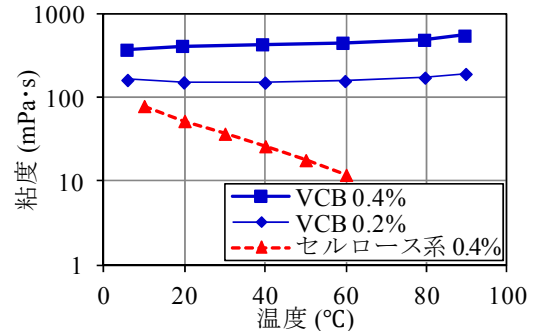


図-3 各種増粘剤水溶液の温度と粘度の関係

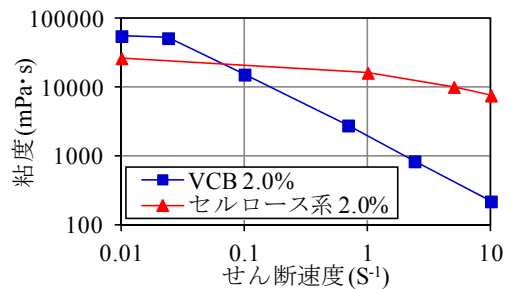


図-4 各種増粘剤水溶液のせん断速度と粘度の関係

ス系増粘剤では、粘性の温度依存性が課題であった。

そこで、温度と濃度を調整した増粘剤水溶液（500 ml）の粘度をB型粘度計で測定した。図-3の増粘剤水溶液の温度と粘度の関係に示すように、VCBはセルロース系に比べて粘度の温度依存性が低いことがわかる。また、VCBは、図-4の粘度とせん断速度の関係に示すように、セルロース系に比べて、せん断速度の増加にともない大きく粘度が低下する傾向を示す。この特徴により、ポンプ圧送時の圧力緩和が期待できる。

次に、VCBによる水中不分離性改善効果を検証するために、JSCE-D104 附属書2「水中不分離性コンクリートの水中分離度試験方法」に準拠して、VCB添加率を変化させて作製したW/C 45%のセメントペーストを漏斗により静水中に流下させ、その上澄み水を採取しpHを測定した。増粘剤VCB添加率と上澄み水のpHの関係を図-5に示す。上澄み水のpHは、増粘剤添加率の増加にともない低減する傾向を示した。

さらに、VCBの強度発現性への影響を検証するために暫定的に設定したW/C 34.3%、S/C 1.16のモルタル配合でVCBの添加率を変化させて供試体を作製し材齢24時

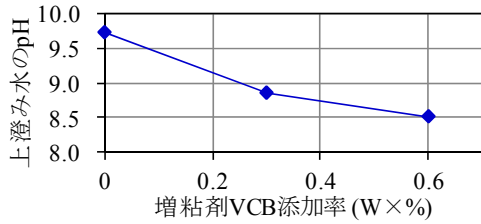


図-5 増粘剤添加率と上澄み水 pH の関係

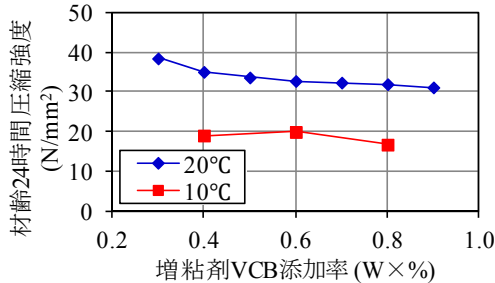


図-6 増粘剤添加率と 24 時間圧縮強度の関係

間圧縮強度を測定した。練混ぜ時の環境温度は 10, 20°C, 養生温度は練混ぜ時環境温度+10°Cとした。増粘剤添加率と材齢 24 時間圧縮強度の関係を図-6 に示す。添加率の増加とともに圧縮強度の低下傾向が見られた。10°C で増粘剤の添加率 0.8%は、圧縮強度が若干低下していることから 0.6%を標準添加率として用いることとした。

3.2 コンクリート性状の調整方法の検討

環境温度の変化に対応する混和剤添加率の調整や初期スランブフローおよび流動性保持時間の調整方法の検討を目的に、室内試験を行った。なお、環境温度は、10°C, 20°C, 30°C の 3 水準を設定した。

使用材料を表-2 に、試験配合を表-3 に示す。ここで、添加率を変化させたのは高性能 AE 減水剤 AD1 およびスランブ調整剤 AD2 のみであり、増粘剤添加率は、単位水量に対して 0.6%一定とした。混和剤の添加率は、粉体 (C, LP) 質量に対する百分率で表した。

SENS 施工では、ポンプ配管内にコンクリートが滞留する場合があります、これにともなうセメント水和物の配管内への付着を予防するためにコンクリートの可使用時間、すなわち流動性保持時間を調整する必要がある。本報では、SENS 施工実績¹⁾を参考に、流動性保持時間を「初期スランブフローの 85%以上を保持する時間」と定義し、4~10 時間の範囲で検討した。

(1) 初期スランブフローと流動性保持時間に対応する混和剤添加率の調整方法

図-7 に、AD1 を粉体に対して 2.1%一定にして AD2 添加率を変えた場合のスランブフローの経時変化を示す。AD2 添加率を変化させることで流動性保持 10 時間まで調整することが可能であった。また同時に、AD2 添加率の増加とともに、初期スランブフローが低下する傾向が認められた。このことから、AD2 は、流動性保持時間の延長と同時に初期スランブフローの抑制にも寄与して

表-2 使用材料

材料名	記号	摘要
早強ポルトランドセメント	C	密度 3.14 g/cm ³ , 比表面積 4460 cm ² /g
石灰石微粉末	LP	密度 2.70 g/cm ³ , 比表面積 3500 cm ² /g
水	W	地下水
細骨材	S	富産産洗砂, 密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 1.51%, 粗粒率 2.12
粗骨材	G	平内産玄武岩, 最大粒径 15 mm, 密度 2.73 g/cm ³ , 吸水率 1.92%, 粗粒率 6.46
増粘剤	VCB	セルロース・バイオポリマー複合系, 粉末
高性能 AE 減水剤	AD1	ポリカルボン酸系, 標準添加率の範囲 (C+LP)×5.0%以下
スランブ調整剤	AD2	オキシカルボン酸とアニオン系高縮合物の混合物, 標準添加率の範囲 (C+LP)×5.0%以下

表-3 試験配合

W/(C+LP) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					VCB (W×%)
		W	C	LP	S	G	
30.5	44.4	198	511	139	650	846	0.6

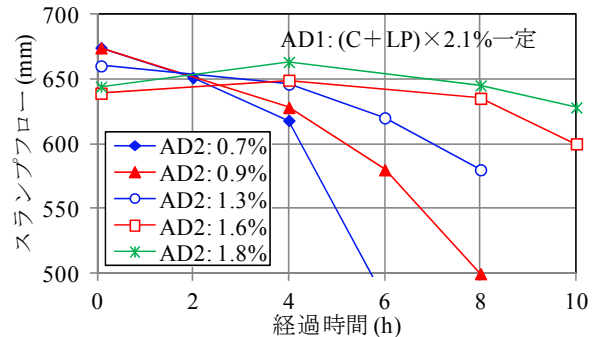


図-7 スランブフローの経時変化

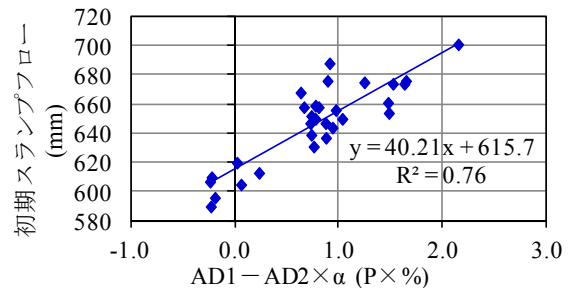


図-8 換算混和剤添加率と初期スランブフローの関係

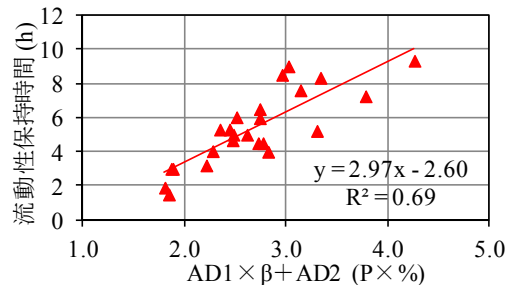


図-9 換算混和剤添加率と保持時間の関係

いることがわかる。このような AD1, AD2 の相互作用を室内試験に基づき解析すると、図-8, 図-9 のような関係が得られた。すなわち、初期スランブフローおよび流動性保持時間に対して直接的に相関性が高い換算混和剤添加率をそれぞれ AD1 と AD2 の添加率を用いて式(1), 式(2)のように表すことができた。

表-4 初期スランプフローに対応する
混和剤添加率調整幅

混和剤種類	混和剤添加率調整幅 ((C+LP)×%)				
	初期スランプフローの変化量 (mm)				
	-50	-30	0	30	50
AD1	-0.85	-0.51	0	0.51	0.85
AD2	0.60	0.36	0	-0.36	-0.60

表-5 流動性保持時間に対応する混和剤添加率調整幅

混和剤種類	混和剤添加率調整幅 ((C+LP)×%)				
	流動性保持時間の変化量 (h)				
	-4	-2	0	2	4
AD1	-0.40	-0.20	0	0.20	0.40
AD2	-0.60	-0.30	0	0.30	0.60

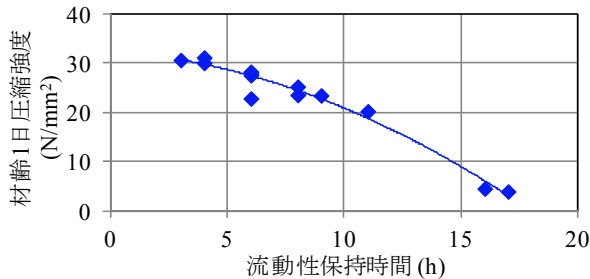


図-10 流動性保持時間と材齢1日圧縮強度の関係

$$D_{SF} = AD1 - \alpha AD2 \quad (1)$$

$$D_{RT} = \beta AD1 + AD2 \quad (2)$$

D_{SF} : 初期スランプフローのための混和剤添加率 (%)

D_{RT} : 流動性保持時間のための混和剤添加率 (%)

$AD1$: AD1 添加率 (%)

$AD2$: AD2 添加率 (%)

α : AD2 の初期スランプフローへの寄与係数 (0.70)

β : AD1 の流動性保持時間への寄与係数 (0.71)

以上より、任意の初期スランプフローおよび流動性保持時間の変化量に対応する AD1 と AD2 の添加率の調整幅を、それぞれ表-4、表-5 に示す。これらに従って AD1 と AD2 の添加率を同時に調整することで、目標とする初期スランプフローおよび流動性保持時間を得られる。また、表-4、表-5 に示した各混和剤添加率を累加することで、初期スランプフローと流動性保持時間を同時に調整することが可能であると考えられる。

図-10 に、流動性保持時間と材齢 24 時間圧縮強度の関係を示す。なお、試験室温度は 20℃、養生温度は 30℃ である。流動性保持 10 時間以内であれば、材齢 24 時間の品質目標である圧縮強度 15 N/mm² を満足することが可能であった。

(2) 環境温度に対応する混和剤添加率の調整

図-11 に、環境温度 20℃ で初期スランプフロー値 650 mm、流動性保持 8 時間で保持率 89% であった混和剤添加率で、環境温度を 10℃ および 30℃ に変化させた場合のスランプフローの経時変化を示す。環境温度が 30℃ の場合は、初期スランプフローが大きくなり、流動性保持時

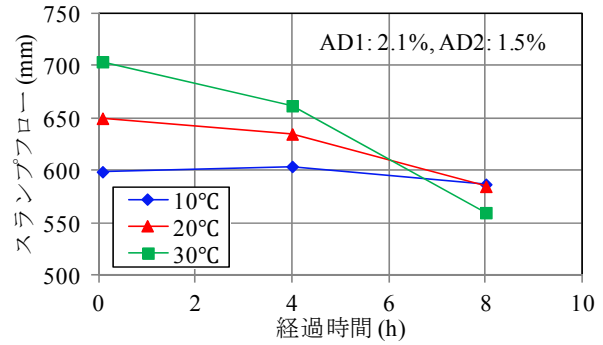


図-11 スランプフローの経時変化 (環境温度の影響)

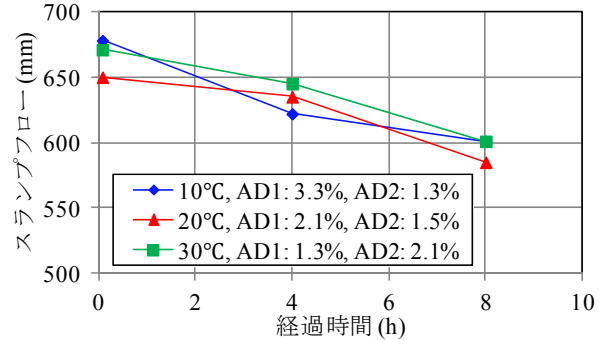


図-12 スランプフローの経時変化 (添加率調整)

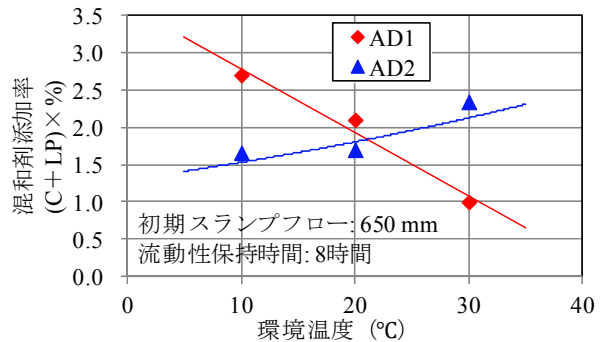


図-13 環境温度と混和剤添加率の関係

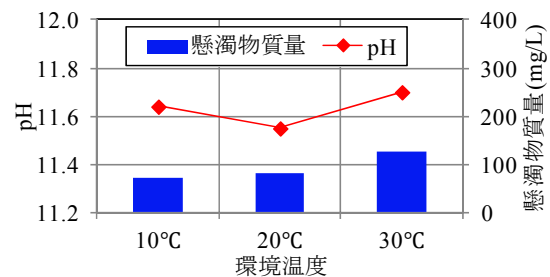


図-14 各温度における懸濁物質質量と pH

間が短くなる傾向であった。しかし、環境温度が 10℃ の場合は、初期のスランプフロー値が小さくなり、流動性保持時間が長くなる傾向にあった。これらの結果に基づき、環境温度 10℃、30℃ においても、環境温度 20℃ と同様の初期スランプフローと流動性保持時間を得るために AD1、AD2 の添加率調整を行った。その結果得られたスランプフロー経時変化を図-12 に示す。各混和剤の添加率を調整することで、環境温度 10℃、20℃、30℃ においてコンクリート配合ならびに増粘剤添加量が一定であっ

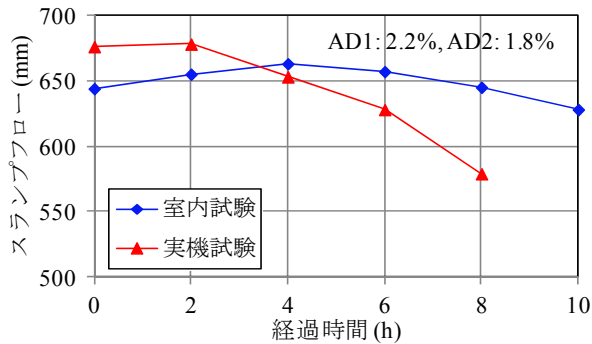


図-15 スランプフローの経時変化（実機試験結果）

表-6 初期スランプフローに対応する
混和剤添加率調整幅

混和剤種類	混和剤添加率調整幅 ((C+LP)×%)				
	初期スランプフローの変化量 (mm)				
	-50	-30	0	30	50
AD1	-0.85	-0.51	0	0.51	0.85
AD2	0.70	0.42	0	-0.42	-0.70

表-7 流動性保持時間に対応する混和剤添加率調整幅

混和剤種類	混和剤添加率調整幅 ((C+LP)×%)				
	流動性保持時間の変化量 (h)				
	-4	-2	0	2	4
AD1	-0.92	-0.46	0	0.46	0.92
AD2	-0.52	-0.26	0	0.26	0.52

でも、同様のコンクリート性状を得ることができた。

各環境温度で行った上記を含む試験結果から、表-4、5に示す混和剤添加量の調整幅に基づき、初期スランプフローが650 mm、流動性保持時間が8時間となるAD1、AD2の添加率を推定した。それらと環境温度との関係を図-13に示す。AD1とAD2の添加率は、環境温度20℃程度で逆転しており、低温時には初期スランプフローを確保するためにAD1の添加率が高く、高温時には流動性を保持させるためにAD2の添加率が高くなるのがわかる。なお、前項の表-4、表-5で示した混和剤添加率の調整幅は、環境温度が10℃、30℃であっても、同等であり、AD1、AD2の添加量調整によりコンクリート性状の調整が可能であることを室内試験で確認した。

図-14に、各環境温度において実施した水中不分離性試験結果（懸濁物質量、pH）を示す。懸濁物質量およびpHは、環境温度にかかわらず水中不分離性の要求性能を満足することが確認された。

4. 現場適用

津軽蓬田トンネルにてSENSコンクリートの試験施工を実施した。冬期（11月）に実機試験を実施した後、試験施工を実施した。施工期間は、冬期（2月）、夏期（8月）の平均気温が異なる2シーズンとした。

4.1 実機試験

表-2、表-3に示した使用材料および配合にて実機試験を行った。図-15に同一混和剤添加率の実機試験と室

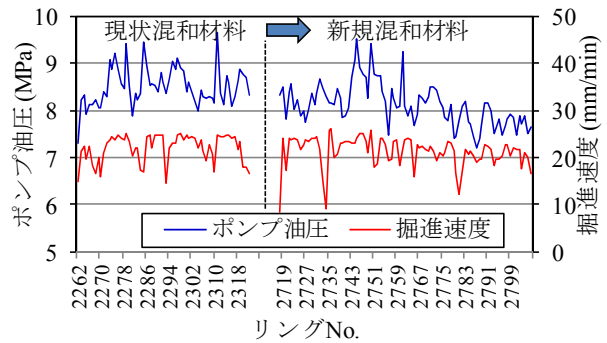


図-16 リングごとの掘進速度とポンプ油圧

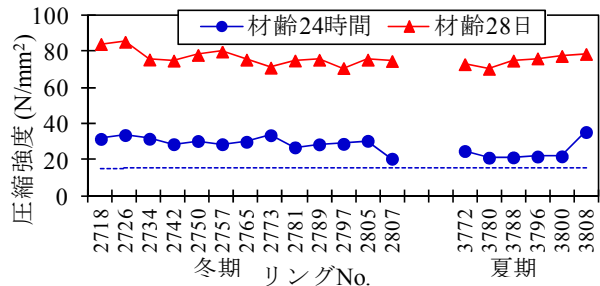


図-17 現場適用における圧縮強度試験結果

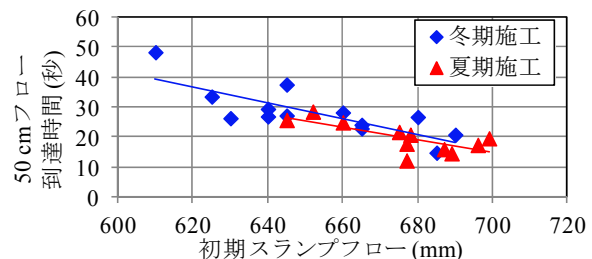


図-18 初期スランプフローと50cmフロー時間の関係

内試験の結果を示す。室内試験よりも実機試験の方が、初期スランプフローが大きく、流動性保持時間が短い結果であった。この要因としては、実機ミキサの練混ぜ性能の差異が考えられる。これらの結果から、実機試験における混和剤添加率のずれを、式(1)、式(2)を用いて再計算し補正した。新たに設定した混和剤の調整幅を表-6、表-7に示す。なお、式(1)、式(2)で用いた寄与係数 α 、 β は、室内試験の値と同じであった。

4.2 ポンプ圧送性

リングごとの掘進速度と二次圧送ポンプの油圧平均を図-16に示す。現状混和材料を用いた場合のポンプ油圧が平均8.5 MPa程度であったのに対し、新規混和材料を用いた場合は平均8.1 MPa程度であり、比較的低いポンプ油圧での順調な施工が可能であった。

4.3 圧縮強度試験結果

図-17に、養生温度30℃における材齢24時間と標準養生材齢28日の圧縮強度試験結果を示す。全て要求性能である材齢24時間で15 N/mm²以上、材齢28日で30 N/mm²以上であった。また、掘進にともなう内型枠の脱型も順調に行われ、掘進反力確保の観点においても支障のない強度発現性が安定的に得られた。

4.4 スランプフローの調整方法の検証

図-18に、各施工期間における初期スランプフローと50cmフロー到達時間の結果を示す。AD1, AD2の添加率は、図-13の環境温度に応じた添加率を基本とし、表-6, 表-7に基づき調整を行った。初期スランプフローは、要求性能を全て満足した。図-19に、各施工期間におけるスランプフロー経時変化の一例を示す。混和剤添加率を調整することで、初期フロー650±50mm, 保持8時間を満足することが可能であった。

図-20に、各施工時期の想定初期スランプフローに対する実測初期スランプフローの差と、AD1, AD2添加率ならびに初期スランプフローに関連する換算添加率を示す。初期スランプフローは、冬期で想定よりもやや小さく、夏期で想定よりもやや大きくなる傾向であったが、いずれの施工時期においても想定した初期スランプフローに対して+40mm以内での調整が可能であった。図-21に、想定流動性保持時間に対する実測流動性保持時間の差と、AD1, AD2添加率ならびに流動性保持時間に関連する換算添加率を示す。流動性保持時間は、各施工時期で想定よりも短くなる傾向にあったが、冬期で-2時間以内、夏期で-1時間以内での調整が可能であった。以上より、初期スランプフロー、流動性保持時間とも、AD1, AD2添加率を調整することで、施工に支障のない範囲で調整することが可能であった。なお、各施工時期における環境温度は、冬期-6.2~3.9℃, 夏期19.7~33.7℃, コンクリート温度は、冬期13.4~21.7℃, 夏期28.8~33.7℃の範囲であり、このような幅広い温度条件に対しても、AD1, AD2添加率の調整により、温度変化に起因する品質変化への対応が可能であったと考えられる。

5. まとめ

本検討では、津軽蓬田トンネルでの現場適用により、SENS一次覆工コンクリート用新規混和材料の適用性の検証を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 一般的なセルロース系増粘剤に比べて粘度に対する温度依存性が少なく、せん断速度の増加にともなう粘度低下が大きい特徴を有するセルロース・バイオポリマー複合系増粘剤 VCB の使用により、ポンプ油圧が低く良好なポンプ圧送性を有する SENS コンクリートの施工が可能であった。
- 2) 今回用いたポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤とオキシカルボン酸とアニオン系高縮合物の混合物を主成分とするスランプ調整剤の2剤の添加率調整により、10時間程度以内の流動性保持性と季節間のスランプフローの調整が可能であり、現状の混和材料の組合せと同様にコンクリートの性状調整が可能であった。

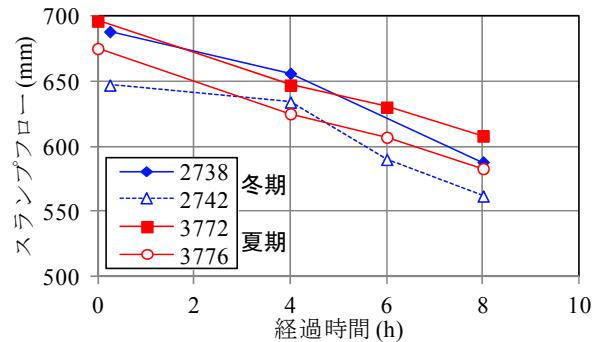


図-19 スランプフローの経時変化（現場適用時）

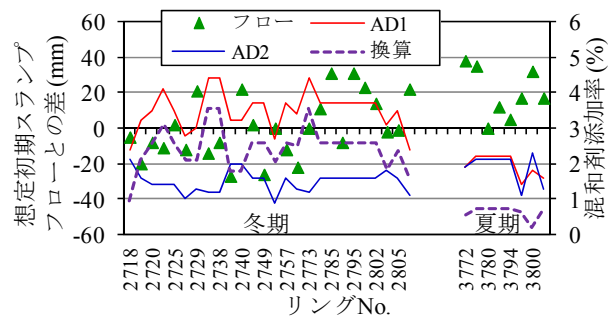


図-20 混和剤添加量の検証結果（初期スランプフロー）

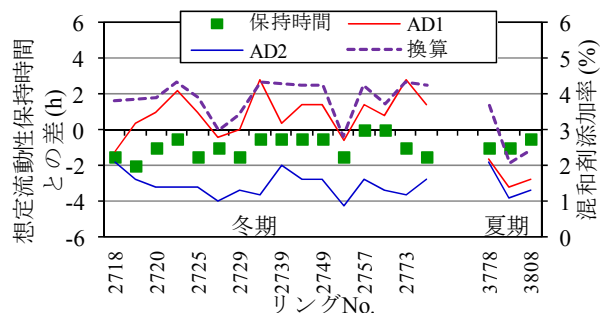


図-21 混和剤添加量の検証結果（流動性保持時間）

- 3) 新規混和材料を用いた SENS 一次覆工コンクリートは、上記のフレッシュ性状に加えて要求される水中不分離性と圧縮強度発現性を満足した。
- 4) 本検討で得られた混和剤添加率は、特定の使用材料および条件によって得られた値であり、使用材料、コンクリート配合、施工条件、要求性能などにより変化する可能性があることに留意する必要がある。

参考文献

- 1) 佐伯ほか：シールドを用いた場所打ち支保システムによる新幹線トンネルの施工，土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集，pp.175-176，2007.9
- 2) 神田ほか：SENS で用いる水中不分離性コンクリートの性状調整，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，pp.847-848，2012.9
- 3) 野口ほか：水中不分離性コンクリートの SENS 一次覆工への適用，セメント・コンクリート，No.788，pp.10-16，2012.10