

論文 シールドを用いた場所打ち支保システムに用いる一次覆工コンクリートの基本性状に関する検討

水野 清*1・野口 守*2・小川 淳*2・宮崎 俊彦*2

要旨：シールドを用いた場所打ち支保システム（以降、SENS）は、シールド掘進と同時に打設する場所打ちの一次覆工コンクリートによってライニングを構築するトンネル工法である。SENS で用いる一次覆工コンクリートは、被水圧下でも適用可能な水中分離抵抗性とポンプ圧送により地山と内型枠間に充てんされる自己充てん性、また、ポンプ圧送が一時的に停止しても再圧送が可能な流動性を一定時間保持することが求められる。本研究では、一次覆工用コンクリートの要求性能を定めて、各種の基礎性状試験を行ってコンクリートの配合を検討するとともに、SENS 一次覆工コンクリートの基本性状を評価する指標を明らかにした。

キーワード：SENS、一次覆工コンクリート、水中分離抵抗性、フレッシュ保持性

1. はじめに

シールド掘進と同時に打設する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施工法である SENS (Shield Tunnel Method, Extruded Concrete Lining, New Austrian Tunnel Method, System) は、東北新幹線三本木原トンネルにおいて 1 例目の施工が行われ、北海道新幹線津軽蓬田トンネルにおいて 2 例目の施工が実施された。

SENS における一次覆工コンクリートの打設は、シールドマシン内部に設置した一次圧送ポンプ、二次圧送ポンプ、レミキサーからなるコンクリート圧送設備と内型枠、妻型枠からなる打設設備で行う。コンクリートは、あらかじめバッチプラントで練り混ぜたものをアジテータ車で一次圧送ポンプまで運搬し、一次圧送ポンプでレミキサーまで圧送した後、複数台の二次圧送ポンプに分配して妻型枠の打設ポートから内型枠と地山間に加圧充てんする (図-1)。このため、SENS の一次覆工コンクリートには、被水圧条件下でも打設が可能な水中分離抵抗性、自己充てん性、ポンプ圧送が可能な流動性と材料分離抵抗性、また、掘進中に内型枠を脱型することから地山保持に必要な強度を発現する早強性も要求される¹⁾。

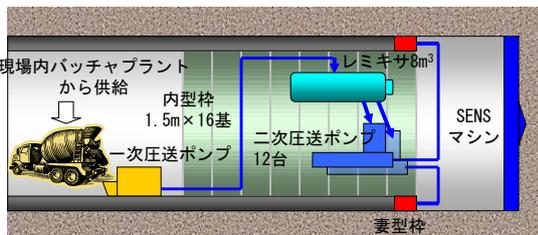


図-1 SENSのコンクリート打設設備

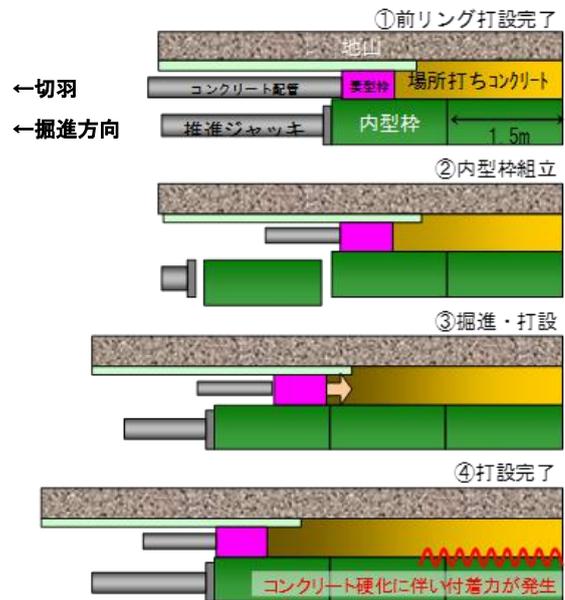


図-2 コンクリートの打設サイクル

さらに、SENS におけるコンクリートの圧送は、内型枠 1 リング分ごとに進行し、1 リングの掘進が終了した後、次の内型枠を設置して掘進が再開される (図-2)。そのため、一時的に配管やポンプ内にコンクリートが滞留した状態から圧送を再開するといった工程が繰り返されるので、一定時間練上がり直後の流動性を保持することが必要とされる。これらの条件を満たすコンクリートとして、1 例目の三本木原トンネルの施工に開発されたコンクリートは粘性が高く、実施工ではポンプ圧送性の低下がみられたという。このように様々な性能を満足させる必要のある SENS の一次覆工用コンクリートの基本性状を評

*1 (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) (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

価して把握することは、非常に重要である。

本研究では、SENS に用いるコンクリートの配合選定と品質評価のために、コンクリートの基本性状についてあらかじめ一定の要求性能を定めて、この要求性能を満足し、相反する性質である粘性の低減と流動性の向上を図ったコンクリートの配合を検討して、フレッシュコンクリートのスランプフロー試験、L形フロー試験、水中分離度試験（pH および懸濁物質量測定）や硬化コンクリートの強度試験など比較的汎用性が高い試験を実施して検討した。さらに、SENS の一次覆工に用いるコンクリートが備えるべき基本性状を評価する指標に関して、実施した各種試験結果の関連性を把握することで明らかにした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。

2.2 配合条件および配合一覧

実験にあたり設定したコンクリートの要求性能を表-2に示す。また、実験に使用したコンクリートの示方配合を表-3に示す。ここで示した配合レベルとは水中分離抵抗性や増粘剤の添加量、種類の違いに応じて設定した水準である。すなわち、配合レベル1は水中分離抵抗性を1例目の三本木原トンネルの一次覆工コンクリートと同等とした配合、配合レベル2は増粘剤の種類や添加量

を減量するなどしてレベル1より水中分離抵抗性を減じた配合、配合レベル3は増粘剤を使用せず、高流動コンクリートと同等の配合として設けた水準である。

表-1 使用材料

種類	仕様
セメント (C)	早強ポルトランドセメント 密度：3.14g/cm ³ 比表面積：4460cm ² /g
水 (W)	上水道水
細骨材 (S)	山砂 密度：2.61g/cm ³ 吸水率：1.51% 粗粒率：2.12
粗骨材 (G)	碎石1305 密度：2.66g/cm ³ 吸水率：2.80% 粗粒率：6.13
混和剤	表-3 参照

表-2 コンクリートの要求性能^{2), 3)}

スランプフロー	練上がりで60±5cm
フレッシュ保持性	4時間後のスランプフローが練上がり時の80%以上
強度発現性	材齢24時間強度で15N/mm ² 以上 材齢28日強度で30N/mm ² 以上
水中分離抵抗性	地下水環境下での打設においてもセメント分の分離を抑制でき、所定の強度を発現できること

表-3 各コンクリートの示方配合

配合レベル	配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
				W	LP*	C	S	G	増粘剤	減水剤	硬化促進剤	消泡剤
1	T-1	40	43.3	190	—	475	709	947	1.33	7.13	4.75	0.3
	P-1	35	52.4	200	—	571	804	745	2.50	9.71	—	—
	D-1	34.3	41.0	185	—	540	666	979	1.30	21.6	—	—
	K-1	42	33.8	189	200	450	623	812	8.51	11.06	4.5	0.21
	S-1**	35	38.0	190	—	543	597	948	15.2	17.37	—	—
2	T-2	45	46.9	175	—	389	820	947	0.88	4.28	2.33	0.3
	P-2	35	54.6	185	—	529	880	745	3.70	8.20	—	—
3	P-3	35	54.6	185	—	529	880	745	—	8.20	—	—

*石灰石微粉末：密度=2.70g/cm³，比表面積=3500cm²/g

**三本木原トンネル使用コンクリート，施工時の材料（C，S，G，増粘剤，減水剤）を用いて再現

増粘剤の種類：

T 配合：配合レベル1，2ともに水溶性メチルセルロース系（粉体）

P 配合：配合レベル1=水溶性アクリル系（粉体），配合レベル2=水溶性メチルセルロース系（粉体）

D 配合：配合レベル1=セルロース・バイオポリマー複合系（粉体）

K 配合：配合レベル1=アルキルアンモニウム塩（液体）+アルキルアリルスルホン酸塩（液体）

減水剤の種類：

T 配合，P 配合，D 配合，K 配合：ポリカルボン酸系

硬化促進剤：

T 配合：硫酸塩系，K 配合：カルシウム塩

消泡剤：

T 配合：ポリエーテル系，K 配合：シリコン系

2.3 試験方法

コンクリートは、以下の試験を行って基本性状を把握した。

(1) スランプフロー試験

JIS A 1150に規定された方法に準じて行った。ただし、スランプフローは測定開始から5分間経過時に測定した。また、フローが50cmに到達するまでの時間もストップウォッチで計測した。さらに、練上がりから60、120、240分経過後にもスランプフロー、50cmフロー到達時間を測定した。

(2) L形フロー試験

土木学会基準 JSCE-F 514「(高流動)コンクリートのL形フロー試験」に準じて行った。また、L形フロー試験器にコンクリートを静置状態で保持し、所定時間(60、120、240分)が経過した後にフロー(仕切りゲートから5cm、10cm位置の通過時間とコンクリートの最大Lフロー(最大到達距離))を測定した。

(3) 水中分離度試験

土木学会基準(JSCE-D 104 附属書2)に記載された方法に準じて行った。すなわち、練上がり直後のコンクリートを一定量分取して所定量の水中に自由落下させて得

た懸濁液のpHと懸濁物質量を測定した。

(4) 硬化コンクリートの圧縮強度試験

コンクリートの打設時、あるいは養生時の環境が強度発現に及ぼす影響を検討するため、圧縮強度試験用供試体を表-4に示す条件で作製した。なお、SENSによる安定な掘進中には一次覆工コンクリートが水中に打設されることはないが、ここでは、極端な条件として水中作製水中養生で作製した試験体でも試験を実施した。供試体作製時、コンクリートは型枠内へ自然落下させ、突き棒による突き固め等は行わなかった。

表-4 供試体作製条件と養生期間

No.	作製条件	養生条件	養生期間
1	気中	20℃気中	24時間、48時間、7日、28日
2	水中	20℃水中	
3	水中	20℃気中	24時間

3. 実験結果および考察

各配合のフレッシュコンクリートの基本性状試験結果、ならびに各養生期間における硬化コンクリートの圧縮強度の実測値を表-5、6に示す。

表-5 各コンクリートのフレッシュ性状

測定項目	条件	配合レベルⅠ					配合レベルⅡ		配合レベルⅢ
		T-1	P-1	D-1	K-1	S-1	T-2	P-2	P-3
スランプフロー (cm)	練上がり直後	63.5	64.5	62.0	66.5	51.0	66.5	62.5	67.0
	240分後	57.5	54.0	51.0	61.0	47.0	44.3	56.0	70.5
フロー保持率(%)		90.5	83.7	82.3	91.7	92.1	66.6	89.6	105.2
50cmフロー到達 時間 (秒)	練上がり直後	20.7	13.8	9.5	56.0	375	13.6	8.1	6.2
	240分後	56.3	87.5	44.5	91.7	流動せず	流動せず	25.0	5.0
Lフロー速度 (cm/s)	練上がり直後	3.2	2.2	2.6	9.4	0.5	4.6	3.9	7.6
	60分後	1.6	0.3	1.5	4.8	0.3	1.2	0.4	2.8
	240分後	0.3	流動せず	0.8	1.3	0.1	流動せず	流動せず	流動せず
水中分離度試験	pH	11.6	11.2	11.8	11.8	11.5	11.9	12.0	12.0
	懸濁物質量 (mg/l)	342	5	96	179	18	928	1480	4580

表-6 各コンクリートの硬化性状

測定項目	条件	材齢	配合レベルⅠ					配合レベルⅡ		配合レベルⅢ
			T-1	P-1	D-1	K-1	S-1	T-2	P-2	P-3
圧縮強度 (N/mm ²)	気中作製 気中養生	24時間	33.8	36.5	17.7	20.1	22.5	28.0	28.4	44.9
		48時間	51.2	56.1	48.3	42.9	40.1	40.7	53.6	61.3
		7日	61.8	72.4	68.2	62.3	54.3	51.2	73.7	77.5
		28日	69.9	81.1	80.1	74.2	64.9	58.3	83.7	85.4
	水中作製 水中養生	24時間	17.0	5.9	4.5	4.9	3.9	9.1	4.9	4.5
		48時間	39.3	30.5	34.0	26.4	26.3	20.5	24.8	13.0
		7日	55.0	55.0	63.8	54.5	49.8	30.7	53.1	24.7
		28日	62.6	62.4	76.1	67.5	58.2	62.5	54.7	30.0
	水中作製 気中養生	24時間	18.7	15.6	17.2	14.8	15.3	10.6	5.5	6.2

3.1 スランプフロー試験

表-5 に示したように、フレッシュコンクリートのスランプフローを配合毎にみると、S-1 配合は、元々粘性が高いコンクリートであったので5分経過時のスランプフローは60cmに到達しなかったが(10分で到達)、他の配合はいずれも60cmを超える流動性を示した。各配合のスランプフローの経時変化を図-3に示す。前述したようにいずれの配合も比較的経時変化が小さいが、T-2 配合はスランプフローの変化が比較的大きく、P-3 配合では練上がり直後より一定時間経過後のスランプフローが大きくなる傾向を示した。これをスランプフローの保持率でみると、T-2 配合を除いて4時間経過時のフロー保持率は80%以上であった。さらに、練り混ぜ直後の50cmフロー到達時間で比較すると、いずれの配合もS-1 配合より小さくなった(図-4)。このことは、S-1 配合が水中分離抵抗性を意識して粘性を高める配合であったのに対し、本研究で検討した配合は、粘性と流動性の相反する性質を両立した配合であるといえる。

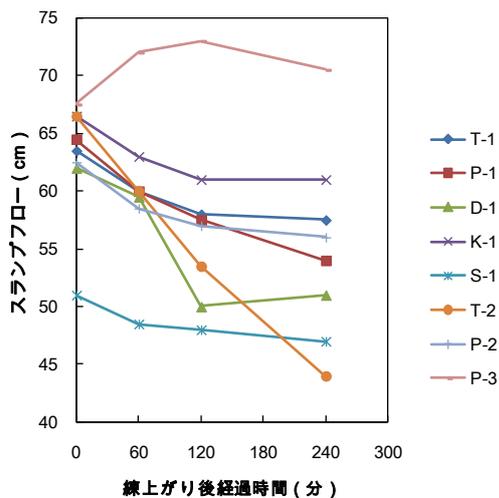


図-3 スランプフローの経時変化

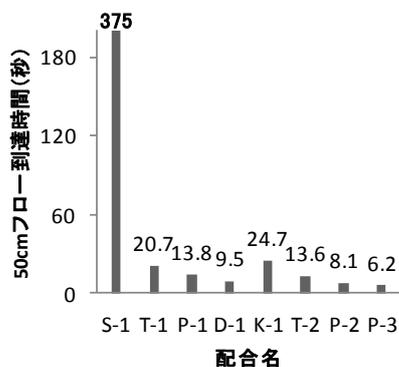


図-4 練上がり直後の50cmフロー到達時間

3.2 L形フロー試験

L形フロー試験で求めた流動速度の経時変化を図-5に示す。図からS-1 配合は練上がり直後から流動速度が低く、このことから粘性の高いコンクリートであったことがわかる。一方、他の配合レベル1に属する各コンクリートは流動速度がS-1 配合より速く、3.1 節で述べた50cmフロー到達時間の短縮にみられるように、いずれも流動性が高い、変形しやすいコンクリートであると考えられる。また、流動速度の経時変化に注目するとL形フロー試験器内での静置時間が長くなると流動速度は減少する傾向を示し、P-1 配合は4時間後に流動性を示さなくなった。一方、T-1、K-1、D-1 配合は本実験で設定した時間内では流動性を保持していた。また、配合レベル2、3に属するコンクリートについては4時間経過後に流動性を示さなくなった。SENSの一次覆工コンクリートの打設は断続的に進行するもので、一時的にポンプや配管内にコンクリートが滞留した後に圧送が再開される工程が繰り返される。今回の実験でみられたコンクリートの流動性低下現象は、実施工においてはコンクリート圧送設備内でコンクリートがこわばって再圧送が困難になる可能性を示唆するものである。Lフロー試験では前述のスランプフロー試験の経時変化測定と異なり、コンクリートの練り直しを行わなかったため、各配合、各配合レベルの差が大きくなったものとみられ、今後、このコンクリートのこわばりについて検討する必要があることを示唆している。

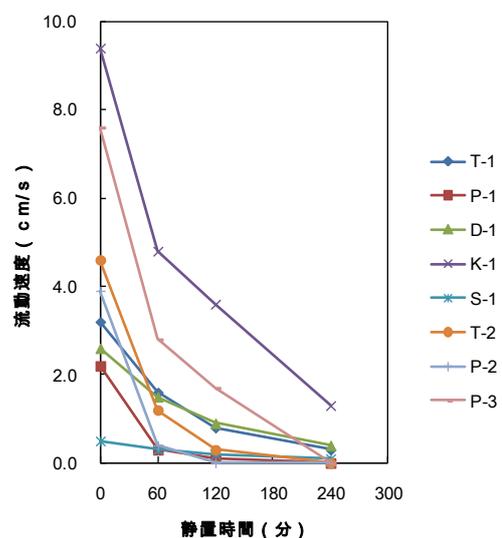


図-5 流動速度の経時変化

3.3 水中分離度試験

SENSの一次覆工コンクリートの要求性能に水中分離抵抗性に関する項目を設け、それを満たす条件として、土木学会基準で定めるpHと懸濁物質量を測定して、各

配合コンクリートの水中分離度を評価した。図-6 に pH と懸濁物質量の関係を示す。

図から明らかなように、pH は全ての配合レベルにおいて土木学会基準にある水中不分離性混和剤の性能規定 (pH=12 以下) 内に適合した。しかしながら、懸濁物質量でみると配合レベル 3 に属する P-3 配合は極めて大きな値を示し、次いで配合レベル 2 に属する P-2 配合、T-2 配合が大きな値を示した。

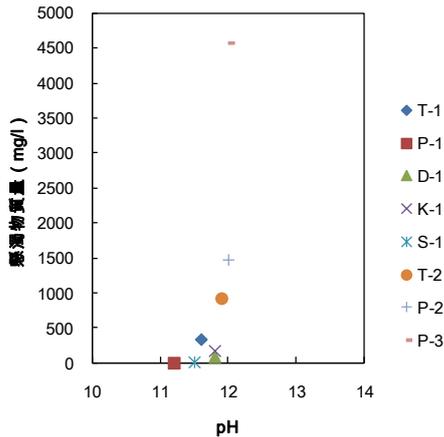


図-5 各配合の pH と懸濁物質量の関係

SENS の一次覆工に用いるコンクリートは水中コンクリートの開発を目指すものではないので、水中分離度を示す指標のうち、短時間で測定が可能な pH を用いることを考えたが、SENS の一次覆工コンクリートにおいても懸濁物質量を合わせて指標にするのがよいと考えられる。なお、懸濁物質量については、コンクリートの硬化性状との関連性についても次節で検討する。

3.4 コンクリートの硬化性状

コンクリートの強度発現性状を比較検討するため、一般的な気中作製気中養生を行った供試体と土木学会基準 JSCE-F 504 「水中不分離性コンクリートの圧縮強度試験用水中作製供試体の作り方」に準じて水中作製水中養生を行った供試体について圧縮強度試験を実施した。図-7、図-8 に各供試体の圧縮強度を示す。

図から気中作製気中養生した供試体の圧縮強度は、全ての配合レベル、各配合で実験のために設定した材齢 24 時間強度 15N/mm^2 以上、材齢 28 日強度 30N/mm^2 以上となった。最も極端なコンクリート打設環境を模擬した水中作製水中養生を行った供試体の圧縮強度に関しては配合レベル 1 に分類される配合であっても強度発現の遅延が顕著であったが、水中作製気中養生では配合レベル 1 のコンクリートは材齢 24 時間強度 15N/mm^2 以上をほぼ超えた。また、配合レベル 3 に分類される P-3 配合の場合、

さらに供試体作製条件が強度発現性状へ与える影響が大きく、材齢 7 日以降で 15N/mm^2 以上となった。

安定な SENS による掘進が進行していれば、一次覆工コンクリートが水中に打設されるような状況は発生しないが、より高い安全を担保するため、配合レベル 1 に属するコンクリートを SENS に適用する必要があると考えられる。

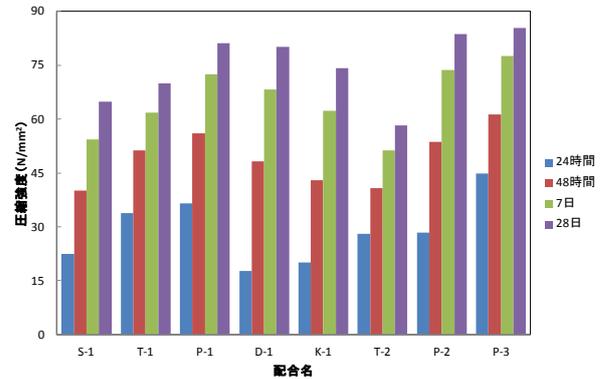


図-7 各配合コンクリートの圧縮強度 (気中作製気中養生)

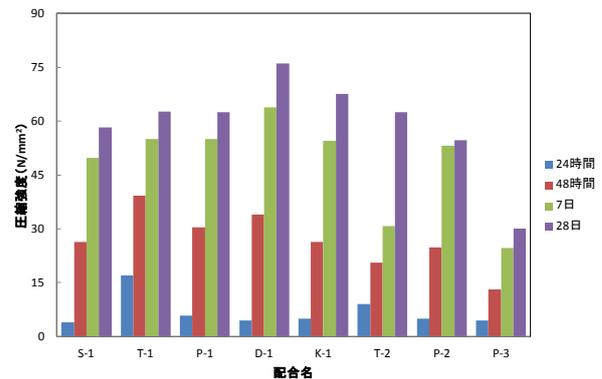


図-8 各配合コンクリートの圧縮強度 (水中作製水中養生)

図-9 は、前述したコンクリートの水中分離性抵抗性を示す指標である懸濁物質量と水中作製水中養生供試体、気中作製気中養生供試体の材齢 24 時間強度の比との関係を示すものである。図から懸濁物質量が大きい配合レベル 2,3 に分類されるコンクリートの水中作製時の強度発現低下が顕著であり、水中分離抵抗性を低減させた影響が大きいことが明らかである。この結果からも、SENS の一次覆工に用いるコンクリートとしては、配合レベル 1 に分類されるような品質のコンクリートが適切であると考えられる。また、今回の試験結果からみると SENS に用いる一次覆工用コンクリートの懸濁物質量は、可能な限り小さいことが望ましいが、土木学会基準の水中不分離性混和剤の性能規定にある値 (50mg/l 以下) より大きい

500mg/l 程度が強度性状への影響を抑えることができる上限値と考える。また、本研究で実施した供試体作製条件や養生条件の異なる供試体を用いたコンクリート供試体の強度試験結果は、SENS に用いるコンクリートの配合選定に重要な指標であると考えられる。

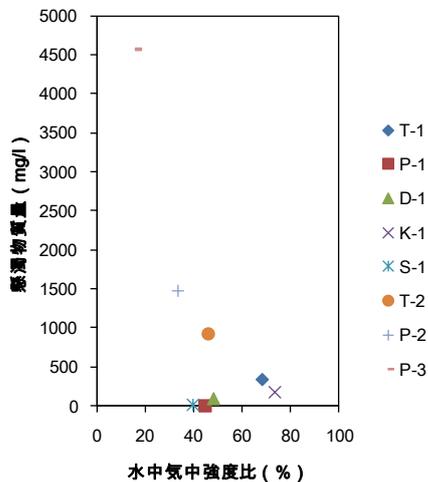


図-9 水中気中強度比と懸濁物質量の関係

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) SENS の一次覆工用コンクリートとして、1 例目の三本木原トンネル仕様配合と同等の品質を持ち、より流動性の向上したコンクリートの配合を見いだすことができた。
- (2) SENS の一次覆工用コンクリートとしては、水中分離抵抗性を 1 例目の三本木原トンネルの一次覆工用コンクリートと同等とした配合レベル 1 が全ての点で適合した。増粘剤の種類や添加量を減量するなどしてレベル 1 より水中分離抵抗性を減じた配合レベル 2、増粘剤を使用せず、高流動コンクリートと

同等の配合レベル 3 のコンクリートは、解決すべき課題が多かった。

- (3) SENS の一次覆工用コンクリートの水中分離抵抗性を評価する指標である懸濁物質量が有効である。今回の試験結果からみると SENS に用いる一次覆工用コンクリートの懸濁物質量は、500mg/l 程度が強度性状への影響を抑えることができる上限値と考える。
- (4) SENS の一次覆工用コンクリートを一定時間静置した後に L フロー試験を実施すると全く流動性を示さなくなる配合があった。コンクリートの練り返しを行わなかったために、各配合、各配合レベルの差が大きくなったものとみられ、今後、この種のコンクリートのこわばりについて検討する必要があると考える。
- (5) SENS の一次覆工用コンクリートを水中打設して水中養生した供試体ではコンクリートの強度発現に遅延が認められた。気中作製気中養生、水中作製気中養生では配合レベル 1 の各配合であれば材齢 24 時間で概ね 15N/mm² 以上の強度を発現した。

参考文献

- 1) 飯田廣臣, 磯谷篤実, 井浦智実, 川嶋潤二, 小西真治: シールドを用いた場所打ち支保システムの施工, トンネル工学報告集, 第 14 巻, pp.195-202, 2004.11
- 2) 佐伯則幸, 石岡英敏, 中島活哉, 岩永茂治: 小土かぶり未固結地山を SENS で貫通—東北新幹線 三本木原トンネル—, トンネルと地下, 第 38 巻 10 号, pp.687-693, 2007.10
- 3) 佐々木幹夫, 佐原圭介, 井浦智実, 川嶋潤二: 場所打ち支保システムによる山岳密閉シールド—東北新幹線 三本木原トンネル—, トンネルと地下, 第 36 巻 4 号, pp.295-303, 2005.4