

報告 シールドを用いた場所打ち支保システムに用いるコンクリートの性能比較

野中 英^{*1}

要旨：シールドを用いた場所打ち支保システム（以下、SENS と略記）では、シールド掘進と同時並行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 用のコンクリートには、充填性、フレッシュ保持性、材料分離抵抗性、強度発現性、水中不分離性が要求され、各々の性能を満たすための配合バランスが難しい。そこで、セメント、細骨材、粗骨材の種類を同一とし、混和剤種類および配合を変えた 4 種類の SENS 用コンクリートについて、要求性能を比較した結果について報告する。本実験の範囲では、フレッシュ保持性、強度発現性を一部で満足しなかったが、それ以外では要求性能を満足した。

キーワード：シールド、コンクリート、一次覆工、充填性、初期強度、水中不分離性

1. はじめに

シールドを用いた場所打ち支保システム（以下、SENS と略記）は、「地下水位が高く、流砂を起こしやすい」「難透水層に囲まれて存在する地下水は、完全に排水することが困難である」の箇所に用いられ、密閉型シールドによりトンネルを掘削して切羽の安定を図り、シールドの掘進と並行してシールドテール部で連続して打設される場所打ちコンクリートを一次覆工とし、その後、力学機能を付加しない二次覆工を施工することで、トンネルを完成させることを特徴としている。SENS ではシールド掘進と同時並行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ため、シールド掘進時の切羽圧とコンクリート打設圧とのバランスが取れるような施工を行う必要がある¹⁾。

SENS の一次覆工に用いられるコンクリート（以下、SENS 用コンクリートとする）の要求性能設定の目的は、流動性としてポンプ圧送および充てんが確実に行えること、フレッシュ保持性として練上がりから打設までの工程を考慮して定めたフレッシュ保持時間を満たすこと、強度性状として所定の推進反力を内型枠と一次覆工コンクリートの付着力から得られるために必要な強度ならびに完成時の設計基準強度を発現すること、ポンプ圧送性としてポンプ圧送が確実に行えること、材料分離抵抗性として圧送および充てん時に材料分離が生じないこと、水中不分離性として地下水が作用する条件下での打設でも目標強度と材料分離を生じないことが挙げられ、それに対する要求性能が表-1 のように示されている。

SENS 用のコンクリートは、要求性能を満足させるため、流動性およびフレッシュ保持性は高性能減水剤や流動性保持剤により、強度発現性は水セメント比などの配

合や硬化促進剤により、材料分離抵抗性や水中不分離性は増粘剤によりその性能を満たしている。過去の施工²⁾³⁾では、早期の強度発現性と材料分離抵抗性の双方の性能を満足させることが困難であることから、コンクリートの凝結を阻害しない界面活性剤系の増粘剤を使用していた。一方近年では、コンクリートの凝結が遅延傾向にあるメチルセルローズ系の増粘剤を用い、配合や硬化促進剤などにより初期の強度発現を実現した SENS 用コンクリートが現場適用された⁴⁾。ほかに、現場適用はされていないが、メチルセルローズ系の増粘剤を用いた SENS 用コンクリートも提案されている⁵⁾。これらの SENS 用コンクリートは、それぞれ流動性、フレッシュ保持性、強度発現性、水中不分離性を確保するため、水セメント比、混和剤種類・量などの配合や流動性、粘性（水中不分離性）が異なっているが、それらの品質を比較した結果は少ない。

本報告では、セメント、細骨材、粗骨材の種類を同一とし、混和剤種類、水セメント比および単位水量などの配合を変えた 4 種類の SENS 用コンクリートについて、流動性、フレッシュ保持性、強度発現性、水中不分離性

表-1 SENS 用コンクリートの要求性能¹⁾

要求性能項目	要求性能
流動性	スランプフロー 練上り時：650±50mm
フレッシュ保持性	所定のフレッシュ保持時間における 50cm フロー到達時間≤180 秒
強度発現性	24 時間：15N/mm ² 以上 28 日：30N/mm ² 以上
ポンプ圧送性	3 インチ配管で 30m の距離に 5m ³ /h を打設可能
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	pH=12.0 以下 懸濁物質量≤500mg/L

^{*1} (株)熊谷組 技術本部技術研究所 上席主任研究員 博士(工学) (正会員)

表－2 SENS 用一次覆工コンクリートの配合、使用材料および混和剤

配合 No.	W/C (%)	s/a	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (左：添加率, 右：単位量)									
			水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	増粘剤		高性能減水剤		流動性調整剤		流動性保持剤		硬化促進剤	
							W×%	kg/m ³	C×%	kg/m ³	C×%	kg/m ³	W×%	kg/m ³	W×%	kg/m ³
A-4H	37.5	40.6	185	493	647	976	6.0 ^{*1}	11.1	2.0 ^{*5}	9.86	—	—	—	—	—	—
A-8H	37.5	40.6	185	493	647	976	6.0 ^{*1}	11.1	4.0 ^{*5}	19.7	—	—	—	—	—	—
B-4H	39.0	42.5	215	551	624	871	0.63 ^{*2}	1.35	2.5 ^{*6}	13.8	—	—	—	—	2.3 ^{*11}	12.7
B-8H	39.0	42.5	215	551	624	871	0.63 ^{*2}	1.35	2.5 ^{*6}	13.8	—	—	—	—	2.3 ^{*11}	12.7
C-4H	30.0	40.0	200	667	580	898	0.60 ^{*3}	1.20	2.0 ^{*7}	13.3	—	—	1.5 ^{*10}	10.0	—	—
C-8H	30.0	40.0	200	667	580	898	0.60 ^{*3}	1.20	2.0 ^{*7}	13.3	—	—	2.5 ^{*10}	16.7	—	—
D-4H	34.3	38.0	192	560	592	996	0.60 ^{*4}	1.15	3.5 ^{*8}	19.6	0.50 ^{*9}	2.80	—	—	—	—
D-8H	34.3	38.0	192	560	592	996	0.60 ^{*4}	1.15	3.8 ^{*8}	21.2	0.70 ^{*9}	3.92	—	—	—	—

【使用材料】セメント (C) : T 社製早強ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm³)、細骨材 (S) : 歌棄産洗砂 (表乾密度 2.60g/cm³)、粗骨材 (G) : 峯朗産石灰砕石 1505 (表乾密度 2.68g/cm³)

【混和剤】増粘剤 : *1 A 社製界面活性剤系増粘剤、*2 B 社製メチルセルロース系増粘剤、*3 C 社製メチルセルロース系 SENS 用増粘剤、*4 D 社製無機有機複合特殊増粘剤、*5 A 社製ポリカルボン酸系高性能減水剤、*6 B 社製ポリカルボン酸系高性能減水剤、*7 C 社製ポリカルボン酸エーテル系 SENS 用分散剤、*8 D 社製ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤、*9 D 社製アニオン系高縮合物塩系流動性調整剤、*10 C 社製ポリカルボン酸エーテル系 SENS 用保持剤、*11 B 社製硫酸塩系硬化促進剤

を比較した結果について示すものである。また、SENS 用コンクリートの試験方法が、経時 8 時間まで測定することや、強度は材齢 1 日の結果で判定することから、試験方法を省力化するため、小型の装置による試験や超音波により測定する方法を検討した。

2. 実験概要

2.1 SENS 用一次覆工コンクリートの要求性能

表－1 に、SENS 用コンクリートの要求性能を示す。SENS 用のコンクリートは、シールドマシンの推進のための反力の確保や地山の保護に用いるため、以下の性能が要求されている。流動性はシールドマシンの妻部より 3 インチの配管で打込みを行うため、練上がり時のスランブフローは 650±50 mm を確保する。シールドの掘進に合わせて 4-8 時間の流動性を保持するため、所定のフレッシュ保持時間におけるスランブフロー 50cm 到達時間を 180 秒以下とする。シールドマシン掘進時の反力をコンクリートより得るため、材齢 24 時間の圧縮強度を 15N/mm² 以上、完成時の設計基準強度を満足させるため材齢 28 日の圧縮強度を 30N/mm² 以上とする。また、地下水が作用する条件下では水中不分離性を確保するため、文献⁹⁾の試験方法で pH が 12.0 以下、懸濁物質量が 500mg/L 以下とすることとしている。

2.2 SENS 用コンクリートの配合、使用材料および混和剤

表－2 に、SENS 用コンクリートの配合、使用材料および混和剤を示す。

セメントは T 社製早強ポルトランドセメント、細骨材は歌棄産洗砂、粗骨材は峯朗産石灰砕石 1505 を使用した。混和剤は、A 社、B 社、C 社、D 社の 4 社とし、詳細は表－2 に示すとおりである。

コンクリートの配合は A 社、B 社、C 社、D 社の混和剤を使用した 4 種類に目標経時保持時間 4 時間（以下、4 時間配合とする）、8 時間（以下、8 時間配合とする）の 2 種類とした計 8 種類とした。なお、配合 B は、4 時

表－3 要求性能に対する試験項目および方法

要求性能	試験項目	試験方法	備考
流動性	スランブフロー	JIS A 1150	練り直
	ミニスランブフロー	JIS A 1171	練り直
フレッシュ保持性	スランブフロー	JIS A 1150	目標保持時間
	スランブフロー 50cm 到達時間	土木学会基準	目標保持時間
	ミニスランブフロー	JIS A 1171	1 時間ごと
	超音波伝搬速度	超音波測定器にて測定	材齢 1 日まで測定
強度発現性	圧縮強度試験	JIS A 1108	材齢 24 時間および材齢 28 日
	超音波伝搬速度	超音波測定器にて測定	材齢 1 日まで測定
水中不分離性	懸濁物質量	土木学会基準	練り直
	pH	pH 計にて測定	練り直

※表中の試験項目の下線は独自の試験を示している。

間配合が 8 時間配合でも満足することから 1 つの配合として提案した。

2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、配合 A、配合 C では初めから全ての材料を一括投入して行い、配合 B、配合 D ではモルタルを練り混ぜた後、粗骨材を投入することにより行った。練り混ぜ方法の違いは、混和剤の分散性を考慮して、各配合で判断した。コンクリート排出後の切り返しは 100L のバケツに投入後、ハンドミキサーを用いて 60 秒練り混ぜることにより行った。また、経時変化を確認する試験前にもハンドミキサーを用いて 60 秒間再攪拌した。

2.4 試験方法

表－3 に、要求性能に対する試験項目および方法を示す。要求性能に対する試験項目および方法は、文献⁹⁾で示す方法で実施した。また、試験の省力化のため、表中の斜体で示す試験を行った。

流動性は、スランブフローおよびミニスランブフロー、フレッシュ保持性はスランブフロー、スランブフロー 50cm 到達時間、ミニスランブフローおよび超音波伝搬速度、強度発現性は圧縮強度試験、超音波伝搬速度の測定、水中不分離性は pH および懸濁物質量を測定した。測定

時期は、流動性、水中不分離性では練上がり直後（以下、練り直とする）に、フレッシュ保持性では、目標の経時時間におけるフレッシュ保持（以下、経時保持とする）時間に、強度発現性は材齢 24 時間および材齢 28 日で測定を実施した。以下に、試験の省力化として実施した、ミニスランプフローおよび超音波伝搬速度の詳細を示す。

(1) ミニスランプフロー

スランプフロー試験による経時変化の測定は、JIS A 1150（コンクリートのスランプフロー試験方法、以下、JIS A 1150 の試験をスランプフロー試験という）により行っている。スランプフロー試験は、コンクリートの使用量が多い等労力が大きく試験回数を多くすることが困難であること、粗骨材の最大寸法が 15 mm と小さいことから、試験方法の省力化として JIS A 1171（ポリマーセメントモルタルの試験方法）に規定される容積の小さいスランプ試験方法の装置を使用してスランプフローを測定（以下、ミニスランプフロー試験とする）することにより評価が可能かを検討した。

ミニスランプフロー試験は、JIS A 1171 の試験方法により、上端内径 50 ± 0.5 mm、下端内径 100 ± 0.5 mm および高さ 150 ± 0.5 mm の鋼製のスランプコーンを用いて実施した。

図-1 に、スランプフローとミニスランプフローの関係を示す。スランプフローとミニスランプフローの関係は、式(1)に示す直線の関係にあり、決定係数 R^2 も 0.86 と高かった。このことから、ミニスランプフロー (MSF) の値から式(1)により求めた換算スランプフロー (換算 SF) として示すこととした。

$$\text{換算 SF} = 1.63 \times \text{MSF} + 188 \quad (1)$$

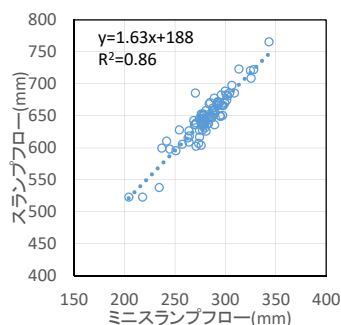
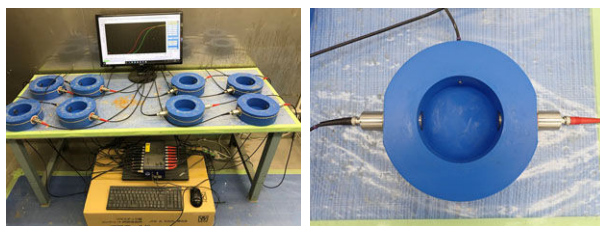


図-1 スランプフローとミニスランプフローの関係



(a) 全体

(b) 型枠・プローブの設置状況

写真-1 超音波測定器

(2) 超音波伝搬速度

超音波伝搬速度は、写真-1 に示す超音波測定器を用いて測定した。測定は、プローブの距離が一定になるように加工した内径 115 mm の樹脂製の型枠にプローブを間隔 112 mm で設置した状態でコンクリートを打ち込み、コンクリート打ち込み直後から 1 分間隔で 24 時間超音波伝搬時間を測定した。

超音波は、硬化前には伝搬せず、コンクリートの水和反応の進行に伴い硬化することにより伝搬する。そのため、超音波の反応が認められ、200m/s 程度まで急激に大きくなる時を超音波立ち上がり時間として、経時保持の指標とした。配合 A の混和剤を用いた予備実験で、超音波立ち上がり時間と経時保持時間を比較した結果、超音波立ち上がり時間の 60 分前程度で流動性保持が満足しかなかった。そのため、フレッシュ性状が保持する超音波立ち上がり時間は、4 時間配合で 300 分（240 分プラス 60 分）、8 時間配合で 540 分（480 分プラス 60 分）とすることとした。

強度発現性は、材齢 1 日までの超音波伝搬速度の経時変化から、強度がどのように発現しているのか、相対的比較した。

3. 実験結果および考察

3.1 流動性

図-2 に、練り直のスランプフローを示す。練り直のスランプフローは、SENS 用コンクリートの要求性能である 650 ± 50 mm をすべての配合で満足した。

図-3 に、練り直のスランプフロー 50cm 到達時間を示す。スランプフロー 50cm 到達時間は、配合 A で 40 秒から 50 秒程度と遅く、配合 B、配合 C、配合 D では

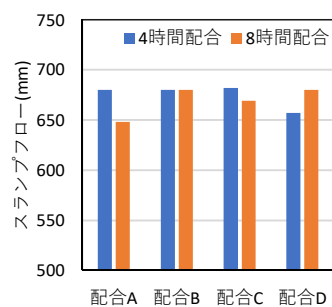


図-2 スランプフロー(練り直)

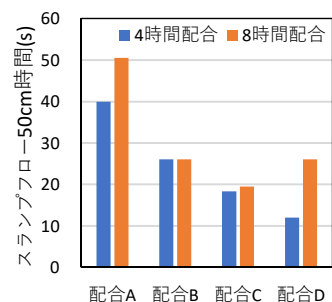


図-3 スランプフロー50cm 到達時間(練り直)

20 秒から 25 秒程度と早かった。スランプフローが同じであるとき、スランプフロー50cm 到達時間は、遅いほど粘性が高いことから、配合 A の粘性は他の配合と比較して高いといえる。

コンクリートの粘性は、高い場合に水中不分離性が高いが、流動性、強度発現性は低下する場合がある。配合 B、配合 C、配合 D で粘性が低くなった原因としては、粘性を高める（≒水中不分離性を高める）とコンクリートの硬化が遅れ、初期強度発現が得られないことが影響していると考えられる。

3.2 フレッシュ保持性

図-4 に、練り直および経時後のスランプフロー50cm 到達時間を示す。

4 時間配合の経時 4 時間後のスランプフロー50cm 到達時間は、すべての配合で SENS 用コンクリートの要求性能である 180 秒以下であった。練り直との比較でも若干の増加が認められるが、大きな変化は認められなかった。配合の違いでは練り直と同様に配合 A が遅くなっており、他の配合と比べて粘性が高かった。

8 時間配合の経時 8 時間後のスランプフロー50cm 到達時間は、配合 B を除き SENS 用コンクリートの要求性能である 180 秒以下を満足した。配合 B は、スランプフローが 50cm に到達しなかったため、計測不可であった。このことから、配合 B は経時保持 8 時間は満足していないが、6 時間経過時にスランプフローを測定したときには、スランプフロー50cm 到達時間は 180 秒以下であり、経時保持時間は 6 時間を有していた。練り直との比較では、スランプフロー50cm 到達時間は 30%から 50%の増加が認められた。これは、コンクリートの粘性が上がったことも考えられるが、後述するようにスランプフローの値が小さくなったことも 1 つの要因と考えられる。

図-5 に、練り直および経時後のスランプフローを示す。

4 時間配合の経時 4 時間後のスランプフローは、すべての配合で 600 mm以上であった。

8 時間配合の経時 8 時間後のスランプフローは、配合 A で練り直 648 mmに対して経時後 640 mm、配合 B で練り直 680 mmに対して経時後 437 mm、配合 C で練り直 669 mmに対して経時後 599 mm、配合 D で練り直 680 mmに対して 613 mmと全体的に 8 時間経過後のスランプフローは小さくなった。

本実験の範囲では、スランプフローが 600 mm以上であればスランプフロー50cm 到達時間の要求性能を余裕をもって満足することを確認した。

図-6 に、換算スランプフローの経時変化を示す。

4 時間配合における換算スランプフローの経時変化は、配合 A では計測した 7 時間までほぼスランプフローに変

化が認められなかった。配合 B では、2 時間までスランプフローが変化なしもしくは増加した後、時間の経過に伴いスランプフローは低下し、6 時間以降ではその低下量は大きくなった。配合 C ではスランプフローが 1 時間で低下した後、4 時間までおおむね変化がなく、その後低下した。配合 D では、スランプフローが 2 時間まで変化がなく、3 時間以降で徐々に低下した。

8 時間配合における換算スランプフローの経時変化は、配合 A では 8 時間までほぼスランプフローに変化はなかった。配合 B では、2 時間までスランプフローが変化なしもしくは増加した後、時間の経過に伴いスランプフローは低下し、6 時間以降ではその低下量は大きくなった。配合 C では、スランプフローが 1 時間で低下した後、3 時間までは若干増加、その後徐々に低下した。配合 D では、スランプフローは時間の経過に伴い徐々に低下し、7 時間以降では低下量が大きくなった。

これらのスランプフローの経時変化による違いは、混和剤の影響によるものと考えられる。

スランプフローの測定では、試験装置が大きいこと、試験に使用する試料が多いことから、練り直と経時後の

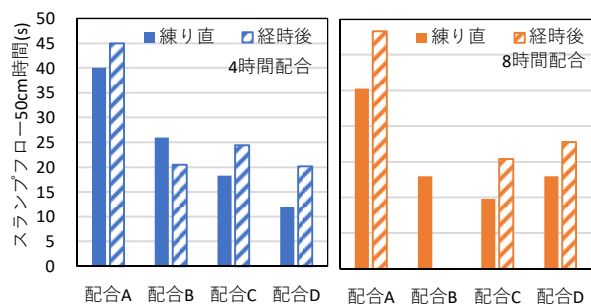


図-4 スランプフロー50cm 到達時間(練り直および経時後)

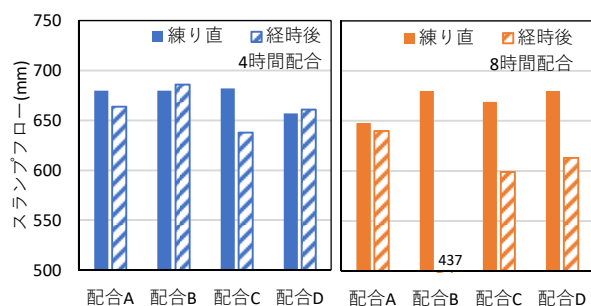


図-5 スランプフロー(練り直および経時後)

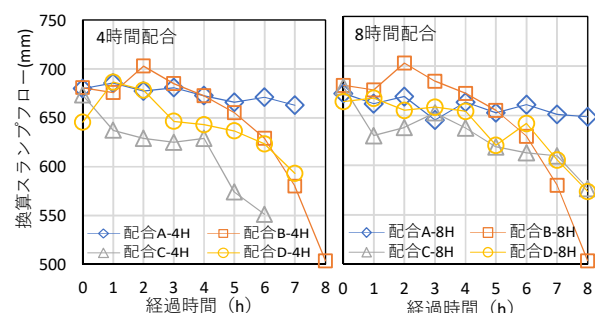


図-6 換算スランプフローの経時変化

測定のみ行うことが多いが、簡易な方法であるミニスランプフロー試験では試料が少なく、装置も小さく軽量であることから、多くの測定が可能であり、一時間ごとのスランプフローの挙動を把握することができた。

図-7 に、超音波立ち上がり時間を示す。超音波立ち上がり時間の目標値は、予備実験により4時間配合で300分、8時間配合で540分とした。

4時間配合の超音波立ち上がり時間は、配合Aで530分、配合Bで340分、配合Cで420分、配合Dで580分となった。超音波立ち上がり時間が目標に近い配合B、配合Cでは、換算スランプフローが4時間保持後に低下が大きく、目標より遅い配合A、配合Dでは目標以上の経時保持時間であった。

8時間配合の超音波立ち上がり時間は、配合Aで710分、配合Bで340分、配合Cで570分、配合Dで650分と配合Bでは目標よりも早く、配合A、配合Dでは目標よりも遅くなった。換算スランプフローで比較すると、超音波立ち上がり時間が目標よりも早い配合Bではフレッシュ保持時間が6~7時間と推測されるが、配合C、配合Dで

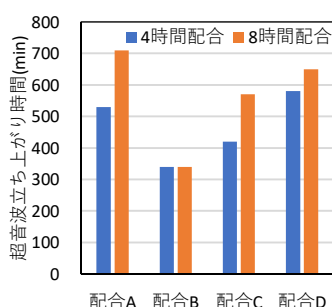


図-7 超音波立ち上がり時間

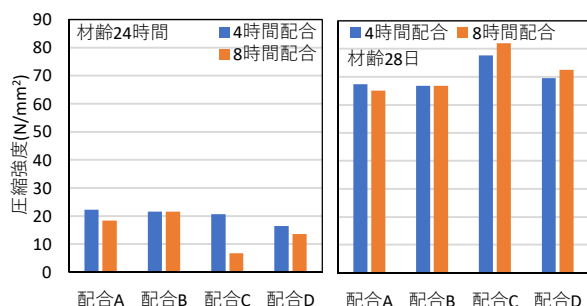


図-8 圧縮強度

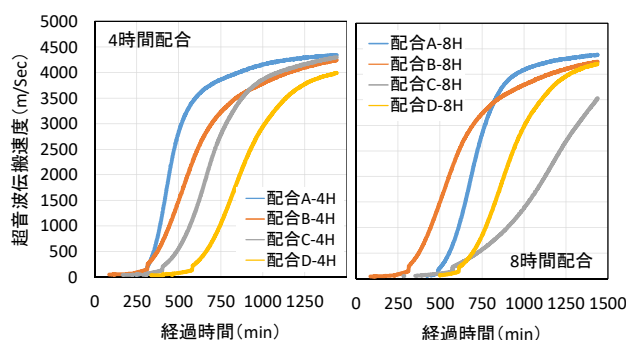


図-9 超音波伝搬速度の経時変化

はおおむね目標の8時間で換算スランプフローの低下が認められ、配合Aでは8時間でも換算スランプフローの低下は認められなかった。

超音波立ち上がり時間を用いた経時保持性の評価では、予備実験と整合の取れる結果となった。配合Aなどは、経時保持時間に余裕があり、混和剤や配合などの調整が可能と考えられる。

3.3 強度発現性

図-8 に、圧縮強度を示す。材齢24時間圧縮強度は、4時間配合ではすべての配合でSENS用コンクリートの要求性能である15N/mm²以上であったが、8時間配合では配合Aと配合Bは15N/mm²以上であったが、配合Cと配合Dでは15N/mm²を下回った。増粘剤がメチルセルロース系である配合では、配合Bでは硬化促進剤を使用するなど、経時を保持しながら初期強度を得るのは困難であった。また、配合選定のための事前実験では、配合C、配合Dの8時間配合でも圧縮強度の目標品質を満足しており、日間の違い程度でも品質に違いがあることが確認された。

材齢28日圧縮強度は、全ての配合で60N/mm²以上であり、SENS用コンクリートの目標値である30N/mm²を満足した。

図-9 に、超音波伝搬速度の経時変化を示す。4時間配合の超音波伝搬速度は、配合Aでは超音波立ち上がり時間後の傾きが大きく、硬化開始からの強度発現が早いことが確認できた。その他の配合では、超音波立ち上がり時間以降の傾きが配合Aと比べると小さくなるが、3つの配合ではその差は小さかった。

8時間配合の超音波伝搬速度は、4時間配合と同様に、

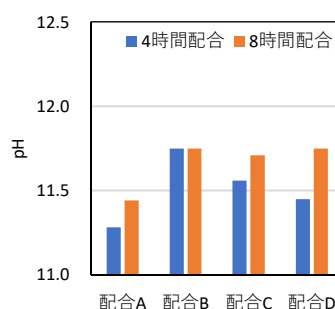


図-10 pH(練り直)

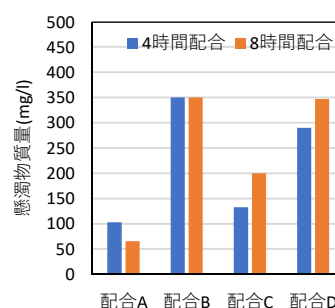


図-11 懸濁物質質量(練り直)

配合 A の超音波立上り時間後の傾きが大きく、配合 C では大幅に傾きが小さくなり、配合 B、配合 D ではその間となる結果であった。配合 C で傾きが小さくなったが、経時保持性を確保するため、流動性保持剤の添加量が多くなったため、凝結が遅延したことが原因と考えられる。

材齢 1 日の圧縮強度は、超音波立上り時間すなわち、経時保持時間が影響しているが、それ以降混和剤を過添加しなければ強度発現性を超音波伝搬速度で推測できることを確認した。

3.4 水中不分離性

図-10 に練り直の pH を示す。pH は、全ての配合で、SENS 用コンクリートの要求性能の 12 以下を満足した。配合別にみると、界面活性剤系である配合 A の pH は小さく、メチルセルロース系の配合 B、配合 C、配合 D の pH は比較的大きかった。4 時間配合と 8 時間配合の違いでは、8 時間配合の pH が若干大きくある傾向にあった。これは、経時を保持させるため、高性能減水剤や流動性保持剤の量が多くなったことが原因と考えられる。

図-11 に、練り直の懸濁物質量を示す。懸濁物質量は、配合 A で 50~100mg/l と小さく、配合 B、配合 D では懸濁物質量が 290~350mg/l と SENS コンクリートの要求性能の 500mg/l に近くなり、配合 C ではその間の 130~200mg/l であった。4 時間配合と 8 時間配合の違いは、pH とおおむね同様な傾向であった。

水中不分離性は、増粘剤の量が多い（粘性が高い）と性能が良くなる。一方で、メチルセルロース系の増粘剤は、添加量が多くなると水和が阻害される。そのため、水和への影響が少ないといわれている界面活性剤系の配合 A 以外は、初期強度発現と水中不分離性のバランスを考えながら配合されていることがわかった。

4. まとめ

SENS 用のコンクリートについて、4 種類の混和剤を用いて用いた比較実験を行い、以下の知見を明らかにした。

- (1) 流動性は、全ての配合で練り直での目標値を満足した。
- (2) 経時保持性は、4 時間配合では全てが、8 時間配合では配合 B を除き目標値を満足した。
- (3) ミニスランプフロー試験により、1 時間ごとの流動性を確認し、配合、混和剤の違いにより経時での挙動が

異なることを明らかにした。

- (4) 強度発現性は、材齢 24 時間強度では、配合 A、配合 B で全て目標値を満足したが、配合 B、配合 D では 8 時間配合で目標を満足しない場合があった。
- (5) 水中不分離性は、全て目標値を満足したが界面活性剤系の配合 A で目標値より大幅に小さく、メチルセルロース系では目標の範囲内だが、一部で大きい値となった。

本実験では、SENS 用コンクリートについて、4 社の混和剤を用いた比較実験を行った。従来、施工に向けて長期間配合検討を行うが、今回の実験では、配合 A 以外は数日で配合を選定した。圧縮強度などは予備実験では、目標品質を満足していたが、比較実験を行った際には、目標品質を満足しないことがあった。流動性、経時保持性、水中不分離性と相反する性能を目標とするため、微妙なバランスで配合が成り立っていることが考えられる。

なお、全ての混和剤について、従来と同様な期間試験練り等を実施することにより、実施工で十分使用できる配合を選定することが可能と考えている。

参考文献

- 1) 岸田潔ほか：シールドを用いた場所打ち支保システムの設計施工結果のとりまとめ報告書，独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構，平成 26 年 5 月
- 2) 中島活哉，石岡英敏：東北新幹線三本木原トンネルの施工実績について，土木学会東北支部研究発表会，V-47，平成 18 年
- 3) 長谷川正明，野口守，玉井竜毅：SENS（シールドを用いた場所打ち支保システム）コンクリートの開発ー北海道新幹線，津軽蓬田トンネル，コンクリート工学，pp.106-109，2011.1
- 4) 常田和哉，和田幸治，佐藤一義：都市部で SENS を初適用した鉄道トンネルの施工実績，土木学会第 70 回年次学術講演会，pp.165-166，平成 27 年 9 月
- 5) 奥山康二，野口守，水野清，宮川美穂：SENS 一次覆工コンクリートに用いる新規混和剤量の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2029-2034，2013
- 6) 土木学会編：水中不分離性コンクリート設計施工指針（案），土木学会，平成 3 年 5 月