

報告 全国生コン工場における新規高性能 AE 減水剤を用いた高流動・低収縮コンクリートの実現性の検討

近藤 慎一*1・菅沼 勇輝*2・井上 和政*3・小川 亜希子*4

要旨: 新たに開発した収縮低減性と材料分離抵抗性を併せもつ一液タイプの新規高性能 AE 減水剤 SRF1 および SRF2 を用いて、粗骨材に石灰石を使用している全国 7 地域の 15 の生コン工場で室内実験を行った。その結果、SRF1 および SRF2 を用いた高流動コンクリートは、使用材料が異なる条件においても市販高性能 AE 減水剤（増粘剤一液タイプ）と同等の材料分離抵抗性を示し、かつ SRF1 を使用することで乾燥収縮率を約 10 ～15%低減することができる高流動・低収縮コンクリートが、また SRF2 と膨張材を併用することで見かけがほぼ無収縮の挙動となる高流動・無収縮タイプコンクリートを実現できることが確認できた。

キーワード: コンクリート, 高流動, 材料分離抵抗性, 乾燥収縮, 収縮低減, 収縮ひび割れ抵抗性

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高耐久化への要求からひび割れ低減の重要性が高まっている。また、建設業界の人手不足を背景に建設工事の省力化、施工性向上が求められている。筆者らはこれらの課題に対して、ひび割れ低減の観点から収縮低減性と、省力化、施工性向上の観点から普通強度レベルの高流動コンクリートの製造を可能とする材料分離抵抗性を併せもつ 2 種類の新規高性能 AE 減水剤 SRF1 および SRF2 を開発し、これらを用いたコンクリートの諸性質について報告^{1),2),3)}した。しかし、高流動コンクリートの間隙通過性は骨材の粒度や形状の影響を強く受けること^{4),5)}や、コンクリートの乾燥収縮は骨材の品質の影響が大きいこと⁶⁾が知られており、種々の材料を用いて実現性の検証が必要であると考えた。本報告では、間隙通過性の面で比較的に粒形が良好で実積率が高く、収縮低減性の面で骨材自体の収縮が小さい石灰石に着目し、第 1 ステップとして新規高性能 AE 減水剤との組合せで積極的に収縮を低減することを目的に、粗骨材に石灰石を使用している全国 7 地域の 15 の生コン工場にて室内実験を行い、SRF1 を用いた高流動・低収縮コンクリート、SRF2 を用いた高流動・超低収縮コンクリートおよび SRF2 と膨張材を併用した高流動・無収縮タイプコンクリートの実現性を検討した。また、次のステップの参考のため、石灰石以外の粗骨材を使用している一部の生コン工場についても検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 新規高性能 AE 減水剤

新規高性能 AE 減水剤は、ポリカルボン酸系のセメン

ト分散成分と、ポリエーテル誘導体を主成分とする材料分離低減成分、および上記とは異なるポリエーテル誘導体を主成分とする収縮低減成分を一液化したもので、収縮低減性能の異なる SRF1, SRF2 の 2 種類を開発^{1),2),3)}した。これらの収縮低減性能の目標は、市販の高性能 AE 減水剤（以下、SP）や高性能 AE 減水剤（増粘剤一液タイプ）（以下、SPV）を用いたコンクリートに対する収縮低減率において、SRF1 は 10～15%、SRF2 は 20～25%である。流動性、粘性、材料分離抵抗性および強度発現性は、SPV と同等を目標としている。

2.2 実験の組合せ

実験の組合せを表-1 に示す。No.1 は SP を用いたスランプ 21 cm の普通コンクリート、No.2 は SPV を用いた高流動コンクリート、No.3 は SRF1 を用いた高流動・低収縮コンクリート、No.4 は SRF2 を用いた高流動・超低収縮コンクリート、No.5 は SRF2 と膨張材を併用した高流動・無収縮タイプコンクリートである。

2.3 生コン工場の概要

生コン工場は、粗骨材に石灰石を使用している工場を主として選定した。各工場は A～O のアルファベットで

表-1 実験の組合せ

No.	コンクリート種類	混和剤	膨張材量 (kg/m ³)	目標スランプまたはスランプフロー (cm)	目標 空気量 (%)
1	普通	SP	—	21±1.5	4.5±1.5
2	高流動	SPV		57.5±5	
3	高流動・低収縮	SRF1			
4	高流動・超低収縮	SRF2			
5	高流動・無収縮タイプ	SRF2	25		

*1 竹本油脂（株） 第三事業部 研究開発部 マネージャー（正会員）

*2 竹本油脂（株） 第三事業部 研究開発部 修士（応用生物科学）

*3 （株）竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ 主任研究員 博士（工学）（フェロー会員）

*4 （株）竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ 研究員 修士（工学）（正会員）

表記し、A～C は関東地域、D～E は関西地域、F～G は中部地域、H～I は九州地域、J～K は北海道地域、L は中国地域、M～O は四国地域である。

2.4 コンクリートの使用材料および配（調）合

実験には各工場が常用している材料をそのまま用いた。コンクリートの配（調）合は、No.1 は各工場の普通ポルトランドセメントを用いた JIS A 5308 の呼び強度 33、スランブ 21 cm の標準配（調）合とし、No.2～5 は、No.1 と同一単位水量で、単位粗骨材かさ容積を 0.53～0.54 m³/m³ 程度に調整した。膨張材を使用する No.5 は、膨張材を細骨材に置換して使用した。各工場の単位水量、単位セメント量および骨材の種類と比率を表－2 に示す。なお、E 工場は No.4～5 に、K 工場は No.5 の配（調）合に石灰碎石を 100%使用した。フレッシュコンクリートの目標値は、No.1 はスランブ 21±1.5 cm とし、No.2～5 は JIS A 5308 の呼び強度 33 におけるスランブフローの最大値 50 cm に、荷卸し地点での許容差 7.5 cm を加えた 57.5 cm を中心値に設定して、スランブフロー57.5±5 cm を目標値とした。空気量はいずれも 4.5±1.5%を目標値とした。

2.5 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表－3 に示す。J リングフロー試験は、コンクリートが J リングを通過する能力を示す PJ 値（J リング中央部とリング外部との高さの差）およびブロッキング値（以下、B 値：通常のスランブフローと J リングフローとの差）を測定した。L フロー試験は、図－1 に示す鉄筋による障害の有無が異なる 2 種類の試験器を用い、仕切りゲートを引き上げた後のコンクリート投入箇所の沈下量を L スランブとして測定した。

表－2 単位水量、セメント量および骨材の種類と比率

地域	工場	単位水量 (kg/m³)	単位セメント量 (kg/m³)	骨材の種類と比率 (%)							
				細骨材							粗骨材
				山砂	陸砂	海砂	砕砂	加工砂	砕石	石灰砕石	
関東	A	175	354	65	-	-	35	-	-	-	100
	B	172	370	100	-	-	-	-	-	-	100
	C	175	351	-	100	-	-	-	-	-	100
関西	D	175	372	-	-	70	30	-	-	-	100
	E※1	175	372	-	-	-	100	-	70	30	
中部	F	175	377	20	30	-	-	-	-	-	100
	G	175	373	30	70	-	-	-	50	50	
九州	H	175	373	-	-	100	-	-	-	-	100
	I	180	383	-	-	100	-	-	-	-	100
北海道	J	162	324	-	50	-	-	50	-	-	100
	K※2	174	357	-	100	-	-	-	70	30	
中国	L	180	392	-	-	-	50	50	-	-	100
四国	M	174	378	-	-	-	100	-	-	-	100
	N	175	368	-	-	55	45	-	-	-	100
	O	180	383	-	-	15	85	-	50	50	

※1 No.4～5 は石灰砕石 100%使用
※2 No.5 は石灰砕石 100%使用

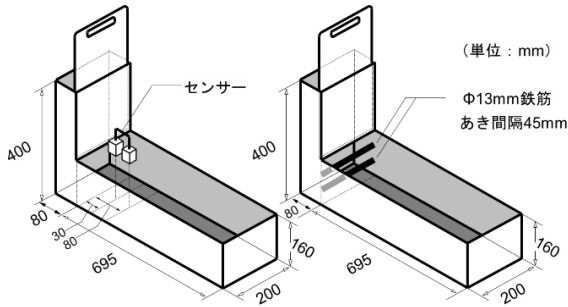
また、障害なしの試験器を用いて L フロー初速度（以下、Lv：L フロー試験器の流れの始動面より 3 cm から 8 cm までの流動速度）を測定した。乾燥収縮試験は、脱型後直ちに標準養生して材齢 7 日の長さを基長とし、乾燥期間 26 週まで測定した。拘束膨張試験は、脱型後直ちに標準養生して材齢 14 日まで測定した。コンクリートの練混ぜは、各工場の室内用強制練りミキサを用い、No.1 は各工場の標準とする練混ぜ方法とし、No.2～5 はセメントと細骨材を投入して 15 秒間空練りを行い、水と混和剤を投入して 45 秒間練り混ぜた後に粗骨材を投入して 60 秒間練混ぜ、5 分間静置後、更に 30 秒間練り混ぜた。

2.6 コンクリートの目標性能

新規高性能 AE 減水剤を用いた No.3～5 のコンクリートの目標性能を表－4 に示す。粘性は、各種骨材と SPV を用いた高流動コンクリートのフレッシュ性状を調べた既往の研究結果 7)により、L フロー初速度が 15～45 cm/s

表－3 試験項目および試験方法

	試験項目	試験方法
フレッシュ性状	スランブ	JIS A 1101 に準拠
	スランブフロー	JIS A 1150 に準拠
	空気量	JIS A 1128 に準拠
	コンクリート温度	JIS A 1156 に準拠
	J リングフロー	JIS A 1159 に準拠
	L フロー	既発表論文 4) に準拠
硬化物性	圧縮強度	JIS A 1108 に準拠， 標準養生，材齢 1，4 週で測定
	乾燥収縮率	JIS A 1129 に準拠， 乾燥期間 26 週まで測定
	拘束膨張率	JIS A 6202 附属書 B (A 法) に準拠，材齢 14 日まで測定



図－1 L フロー試験器（左：障害なし、右：障害あり）

表－4 No.3～5 のコンクリートの目標性能

項目		目標性能
粘性		Lv が 15～45cm/s、かつ No.2 と同等
材料分離抵抗性		PJ 値≦40mm、かつ B 値≦75mm、 L スランブ比≧0.9 ⁴⁾
圧縮強度		No.2 と同等
収縮低減性能	No.3	No.2 に対する低減率 10%以上
	No.4	No.2 に対する低減率 20%以上
	No.5	No.2 に対する低減率 30%以上、 かつ拘束膨張率と乾燥収縮率の 合成値が-100 μ 以下

の範囲、かつ No.2 と同等を目標とした。材料分離抵抗性は、JIS A 1160 の間隙通過性の評価基準を参考に、PJ 値が 40 mm 以下、かつ B 値が 75 mm 以下を目標とした。さらに障害あり L スランプ（以下、 Ly' ）と障害なし L スランプ（以下、 Ly ）との比率 Ly'/Ly を L スランプ比とし、既往の研究⁴⁾により良好な鉄筋間通過性の指標となる 0.9 以上を目標とした。収縮低減性能は、No.2 の乾燥収縮率に対する低減率で評価し、No.3 は低減率 10% 以上、No.4 は低減率 20% 以上を目標とした。No.5 については、百瀬、関田らの既往の研究結果⁸⁾から、JIS A 6202 で得られる拘束膨張率の 2 倍を有効膨張率と仮定し、本研究で想定している拘束膨張率 300μ をもとに安全側を取り、有効膨張率を 550μ に設定した。この値と拘束膨張率との差が 250μ あり、拘束膨張率と乾燥収縮率の合成値が -100μ 程度以下であれば十分に見かけがほぼ無収縮の挙動が得られるものと考えている。したがって、No.5 は低減率 30% 以上、かつ拘束膨張試験によって得られる拘束膨張率と乾燥収縮率の合成値が -100μ 以下を目標とした。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

いずれも目標のスランプ、スランプフローおよび空気量を満足する材料分離のないコンクリートが得られた。試験状況の一例を写真-1～3 に示す。

3.2 混和剤使用量

目標のスランプフローを得るための混和剤使用量を図-2 に示す。No.2 は $C \times 1.05 \sim 1.70\%$ 、No.3 は $C \times 1.60 \sim 2.10\%$ 、No.4～5 は $C \times 2.20 \sim 3.30\%$ と工場によって使用量に幅があるものの、SPV に対して SRF1 は約 1.5 倍、SRF2 は約 2 倍の混和剤使用量であった。

3.3 コンクリートの粘性

L フロー初速度の試験結果を図-3 に示す。図中の青色部分は目標値の範囲を示す。いずれのコンクリートも目標の L フロー初速度を満足した。No.3～5 は、新規高性能 AE 減水剤の増粘効果により No.2 に比べてやや遅



写真-1 スランプフローの試験状況



写真-2 Jリングフローの試験状況



写真-3 障害あり L フローの試験状況

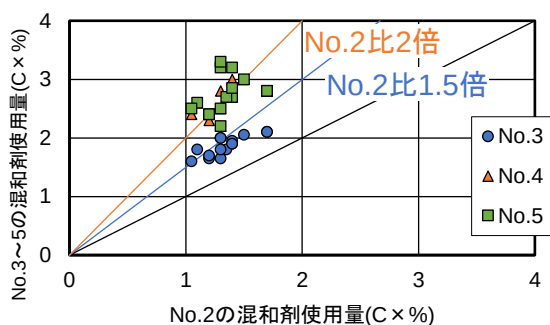


図-2 各混和剤使用量の結果

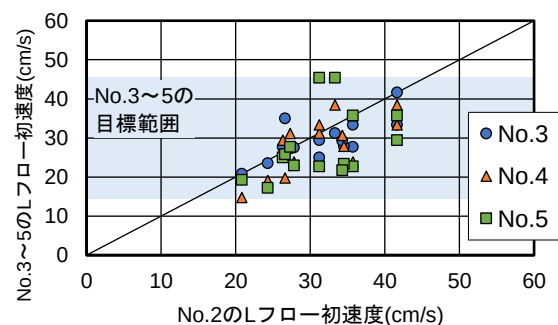


図-3 L フロー初速度の試験結果

い傾向にあり，新規高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの粘性は，SPV を用いたコンクリートより若干高いことが確認できた。

3.4 コンクリートの材料分離抵抗性

PJ 値の試験結果を図-4，B 値の試験結果を図-5，L スランプ比の試験結果を図-6 に示す。いずれのコンクリートも概ね目標値を満足した。No.3～5 は，No.2 に比べて PJ 値および B 値が小さく，L スランプ比が大きい傾向にあった。したがって，新規高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの材料分離抵抗性は，SPV を用いたコンクリートと同等以上であることが確認できた。

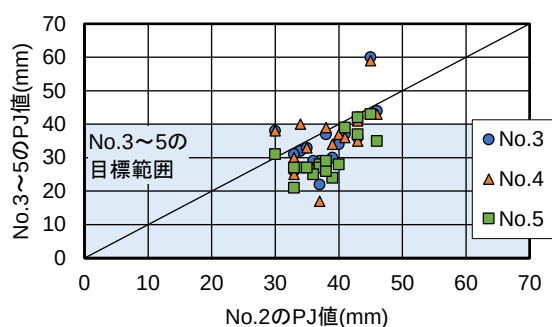


図-4 PJ 値の試験結果

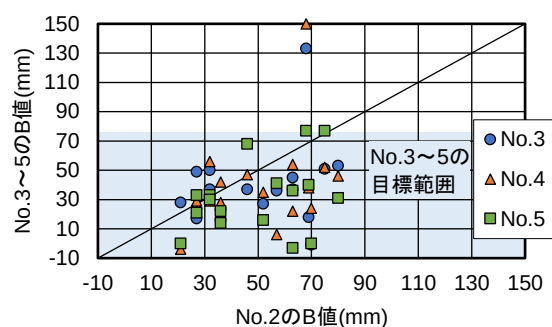


図-5 B 値の試験結果

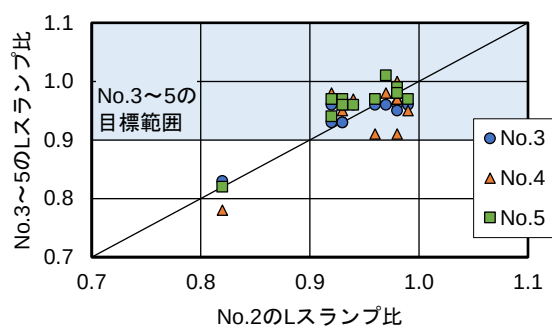


図-6 L スランプ比の試験結果

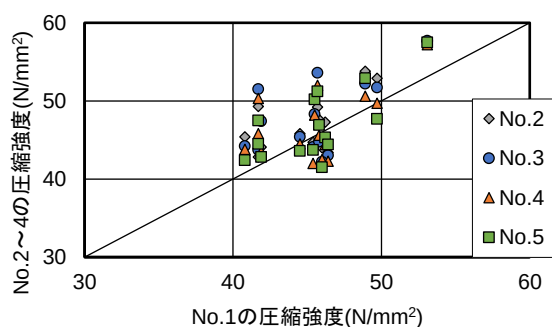


図-7 圧縮強度の試験結果

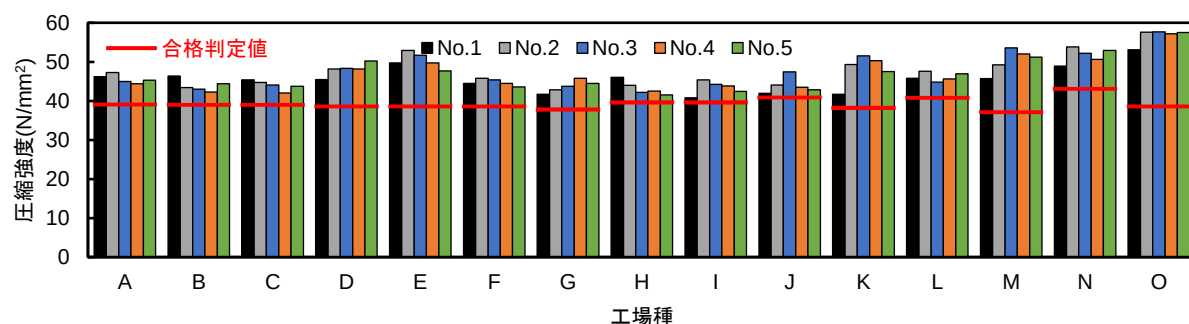


図-8 各工場の圧縮強度の試験結果

3.5 圧縮強度

標準養生した材齢 4 週の圧縮強度の試験結果を図-7，8 に示す。調合管理強度による合格判定値は 37.6～43.6 N/mm² と各工場によって異なるものの，いずれの工場においても十分にこれを満足した。No.2～5 の圧縮強度は，No.1 に比べて若干高い傾向にあった。A～O の工場種および No.2～5 のコンクリート種を要因とした二元配置（繰返しなし）の分散分析結果を表-5 に示す。P 値が 0.05 未満を統計的に有意とみなした。工場種については有意差があるものの，コンクリート種については有意差なしとなった。以上のことから，新規高性能 AE 減

表－5 圧縮強度の二元配置の分散分析結果

変動要因	変動	自由度	分散	観測された分散比	P-値	F 境界値	判定
工場種	1027.782	14	73.413	41.04	6.24E-20	1.935	有意差あり
コンクリート種	11.675	3	3.892	2.18	0.105	2.827	有意差なし
誤差	75.130	42	1.789				
合計	1114.587	59					

水剤を用いたコンクリートは、SPV を用いたコンクリートに置き換えて使用できると考えられる。

3.6 乾燥収縮率および拘束膨張率

現時点で乾燥期間 26 週までの測定が終了している A ～K 工場の乾燥収縮率の試験結果を図－9 に示す。概ね No.3 は 10%以上、No.4 は 20%以上、No.5 は 30%以上の収縮低減率を示した。E および K 工場は、粗骨材に石灰砕石と通常の砕石を混合使用しているため乾燥収縮率がやや大きい結果（E 工場の No.2 は 623 μ 、K 工場の No.2 は 690 μ ）であったが、粗骨材を石灰砕石 100%に変更した No.5 においては、新規高性能 AE 減水剤に加えて石灰砕石の収縮低減効果も加算され、No.2 に対して約 50%の収縮低減率が得られた。質量減少率の試験結果を図－10 に示す。No.3～4 は、No.2 と比べて概ね $\pm 5\%$ の範囲に入っておりほぼ同等であったが、膨張材を併用した No.5 は既往の研究^{1),2),3)}と同様に若干低い傾向が見られた。No.5 における材齢 14 日の拘束膨張率と乾燥期間 26 週の乾燥収縮率およびそれらの合成結果を図－11 に示す。いずれの工場でも目標の-100 μ よりも十分に小さく、見かけがほぼ無収縮の挙動となる結果が得られた。

4. 石灰石以外の粗骨材を使用した場合の新規高性能 AE 減水剤の性能に関する追加検討

4.1 実験概要

粗骨材に山砂利を使用している工場で、石灰石を使用している工場と同様の試験を行った。単位水量、セメント量および骨材の種類と比率を表－6 に示す。

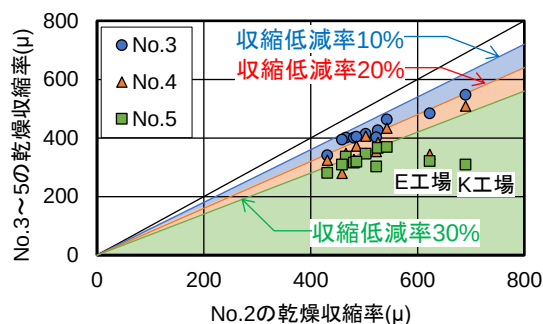
4.2 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの試験結果

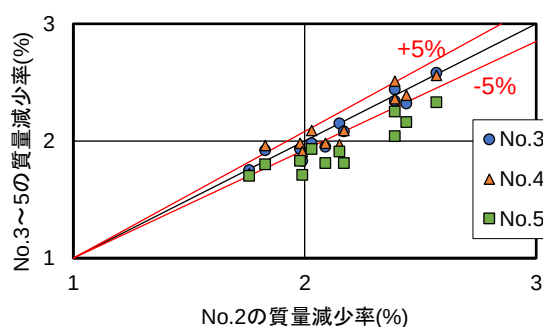
No.2～4 のフレッシュコンクリートの試験結果を表－7 に示す。新規高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートは、いずれも SPV を用いたコンクリートと同等の性状であった。混和剤使用量は 3.2 と同傾向であった。

(2) 圧縮強度および乾燥収縮率

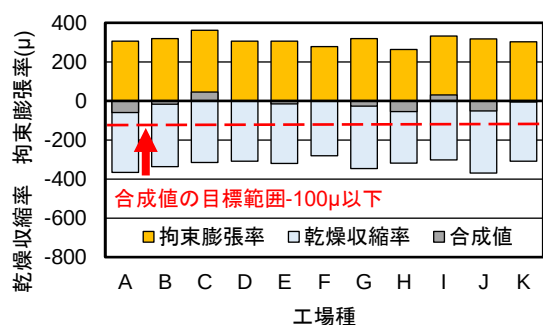
標準養生した材齢 4 週の圧縮強度および乾燥期間 26 週の乾燥収縮率の試験結果を表－8 に示す。圧縮強度はいずれも同程度であった。No.2 の乾燥収縮率 721 μ に対して、No.3 は約 31%、No.4 および No.5 は約 41%の収縮低減効果が得られた。3.6 で述べた石灰砕石を用いた実



図－9 乾燥収縮率の試験結果



図－10 質量減少率の試験結果



図－11 拘束膨張率と乾燥収縮率の合成結果

表－6 単位水量、セメント量および骨材の種類と比率

地域	工場	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	骨材の種類と比率 (%)		
				細骨材	粗骨材	
				山砂	砕砂	山砂利
関西	P	175	376	70	30	100

表－7 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	混和剤		スランブフロー (mm)	空気量 (%)	PJ 値 (mm)	B 値 (mm)	Lv (cm/s)	Ly'/Ly
	種類	使用量 (C×%)						
2	SPV	1.55	550	3.3	39	35	30.3	0.96
3	SRF1	2.10	540	3.7	30	15	32.3	0.98
4	SRF2	3.10	565	3.7	34	30	27.0	1.00
5	SRF2	3.20	590	4.1	24	20	29.4	0.97

表－8 圧縮強度および乾燥収縮率の試験結果

No.	圧縮強度 (N/mm ²)	乾燥収縮率 (μ)	No.2 に対する 収縮低減率 (%)
2	45.3	721	-
3	47.6	497	31
4	44.9	426	41
5	43.6	423	41

験結果と異なり、No.4 と No.5 との差が明確でなかった原因は、データ数が少ないため現段階でははっきりとわかっていないが、今後さらにデータを蓄積し検証を行う予定である。

以上により、新規高性能 AE 減水剤は、石灰石以外の粗骨材に適用した場合にも良好な流動性と材料分離抵抗性が得られること、および一般的な高流動コンクリートに対して乾燥収縮を 30～40%低減できることが改めて確認できた。

5. まとめ

新たに開発した収縮低減性と材料分離抵抗性を併せもつ新規高性能 AE 減水剤 SRF1 および SRF2 を用いて、全国 7 地域の 15 の生コン工場にて室内実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 目標の流動性を得るための混和剤使用量は、SPV に対して SRF1 が約 1.5 倍、SRF2 が約 2 倍であった。
- 2) 新規高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの粘性は、SPV を用いたコンクリートより若干高くなった。
- 3) 新規高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの材料分離抵抗性は、SPV を用いたコンクリートと同等以上であった。
- 4) 新規高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの圧縮強度は、SP を用いたコンクリートより若干大きく、SPV を用いたコンクリートと同等であった。したがって、新規高性能 AE 減水剤を用いた各種高流動・低収縮コンクリートは、普通コンクリートと同じ調合強度式を用いて配（調）合設計が可能であり、置き換えて使用できると考えられる。
- 5) SPV を用いたコンクリートの乾燥収縮率に対して、SRF1 を用いたコンクリートは 10%以上、SRF2 を用いたコンクリートは 20%以上、SRF2 と膨張材を併用したコンクリートは 30%以上の収縮低減率を示した。
- 6) SRF2 と膨張材を併用したコンクリートにおける材齢 14 日の拘束膨張率と乾燥期間 26 週の乾燥収縮率との合成値は、いずれの工場においても見かけがほ

ぼ無収縮の挙動となる結果が得られた。SRF2 と膨張材を併用し、乾燥収縮率が小さい骨材を選定することで高流動・無収縮タイプコンクリートが実現できる可能性が示された。

- 7) 新規高性能 AE 減水剤を石灰石以外の粗骨材に適用した場合も、上記 1)～5)と同様の効果が得られる可能性が示された。
- 8) 使用材料が異なる条件においても、新規高性能 AE 減水剤を用いることで、高性能 AE 減水剤（増粘剤一液タイプ）を用いた一般的な高流動コンクリートに対して、収縮低減性を有するより高品質な高流動・低収縮～無収縮タイプコンクリートが全国の生コン工場で実現できることが示された。

参考文献

- 1) 間瀬敦之，菅沼勇輝，井上和政，小川亜希子：新規一液型高性能 AE 減水剤を用いた高流動低収縮コンクリートの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1031-1036，2020.7
- 2) 菅沼勇輝，間瀬敦之，小川亜希子，井上和政ほか：新規一液型高性能 AE 減水剤を用いた高流動低収縮コンクリートの開発（その 1～4），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.459-466，2019.9
- 3) 間瀬敦之，井上和政ほか：新規一液型高性能 AE 減水剤を用いた高流動低収縮コンクリートの開発（その 5～6），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.379-382，2020.9
- 4) 井上和政，和泉意登志，森博嗣，谷川恭雄：簡易鉄筋間通過性評価手法による高流動コンクリートの限界粗骨材量に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 521 号，pp.1-8，1999.7
- 5) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調査・製造・施工指針（案）・同解説，1997.1
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006.2
- 7) 井上和政ほか：特殊混和剤を用いた高流動コンクリートの基礎物性とその調合方法に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 511 号，pp.31-38，1998.9
- 8) 百瀬晴基，閑田徹志，鈴木康範，小林隆芳：低熱ポルトランドセメント及び膨張材を用いたコンクリートの膨張収縮挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.495-500，2004