

## 論文 高強度コンクリート用ハイブリッド混和剤の性質

齊藤 和秀<sup>\*1</sup>・木之下 光男<sup>\*2</sup>・名和 豊春<sup>\*3</sup>

**要旨**：設計基準強度 60～150N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを対象に、高流動性、粘性低減性および収縮低減性能を兼ね備えた一液型のハイブリッド混和剤(HSP)を開発しその諸性質を調べた。その結果、HSP は良好な流動性および粘性低減性能を示すと共に、従来の高性能減水剤に比較して約 21～44%の優れた自己収縮低減効果を示し、広範囲な高強度コンクリートに対する簡便で有効な収縮低減対策であることが示された。

**キーワード**：高強度コンクリート、高流動性、粘性、自己収縮、収縮低減、耐久性

### 1. はじめに

最近、都市部を中心に超高層RC集合住宅等への高強度コンクリートの適用例が増加している。一般に高強度になるほど単位結合材量は増加しコンクリートの自己収縮が大きくなる傾向にある。そのため、初期ひび割れ防止の観点からも高強度コンクリートの収縮を低減するための簡便で有効且つ低コストで改善できる対策が必要になってきている<sup>1),2)</sup>。

そこで、筆者らは設計基準強度(以下  $F_c$  と略す)60～150N/mm<sup>2</sup> すなわち水セメント比が概ね 35～15%の高強度～超高強度領域のコンクリートを対象として、高流動性、粘性低減性および収縮低減性を兼ね備えた新しいタイプの混和剤の開発を目標として以下の項目(1)～(3)の検討を行い、一液型のハイブリッド混和剤(以下 HSP と略す)を開発した。

- (1) 高流動性と粘性低減性および収縮低減剤との相溶性に優れた減水剤成分の開発
- (2) 収縮低減性に優れた上記減水剤成分に可溶性収縮低減剤の選定
- (3) 最適な混合比率の検討

本論文では HSP の開発の概要および HSP の諸性質を  $F_c$ 60～150N/mm<sup>2</sup> を想定したコンクリート試験により確認した結果について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>,ブレン値 3300cm<sup>2</sup>/g, 記号 N), 低熱ポルトランドセメント(密度 3.24g/cm<sup>3</sup>,ブレン値 3400cm<sup>2</sup>/g, 記号 L)およびシリカフェームセメント(密度 3.08g/cm<sup>3</sup>,ブレン値 5600cm<sup>2</sup>/g, 記号 SFC), 細骨材は大井川水系産陸砂(表乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>,F.M.2.67, 記号 S1), 岩瀬産砕砂(表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>,F.M.2.67, 記号 S2), 粗骨材は岡崎産硬質砂岩砕石(表乾密度 2.68g/cm<sup>3</sup>,実積率 60.0%, 記号 G1), 岩瀬産砕石(表乾密度 2.66g/cm<sup>3</sup>,実積率 60.0%, 記号 G2)を用いた。

#### 2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。単位水量を一定にし、対象とする強度によってセメントの種類を変えて用いた。 $F_c$ 60N/mm<sup>2</sup> は普通セメント,  $F_c$ 80N/mm<sup>2</sup> は低熱セメント,  $F_c$ 100N/mm<sup>2</sup> 以上はシリカフェームセメントを使用し,  $F_c$ 150N/mm<sup>2</sup> では骨材強度の高い骨材を使用した。また、凍結融解抵抗性を考慮して W/C=35% および 25%では AE コンクリートとし, W/C=20% および 15%では Non-AE とした。

#### 2.3 試験方法

練混ぜは、強制二軸ミキサ(容量 55L)を用いて、

\*1 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 主任 (正会員)

\*2 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 部長 工博 (正会員)

\*3 北海道大学大学院 工学研究科 環境循環システム専攻 教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

記号	対象 Fc (N/mm <sup>2</sup> )	セメント	W/C (%)	s/a (%)	目標スランブ フロー(cm)	目標 空気量(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							W	C	S1	S2	G1	G2
35N	60	N	35.0	51.3	55±5	3.0±0.5	160	457	880	—	868	—
25L	80	L	25.0	48.1	65±5	3.0±0.5	160	640	761	—	852	—
20S	100	SFC	20.0	51.3	65±5	2%以下	160	800	624	—	852	—
15S	150		15.0	48.1	70±5	2%以下	160	1067	—	412	—	846

細骨材とセメントで空練り 15 秒後、水と混和剤を添加し、W/C=35%では 60 秒、25%、20%では 90 秒、15%では 300 秒練り混ぜた後、粗骨材を投入し 120 秒練り混ぜた。なお、試験温度は 20℃、練り量は 30L とし、空気量の調節は AE 剤または消泡剤を用いて行った。流動性の評価はスランブフロー(JIS A 1150)、粘性の評価は、50cm スランブフロー到達時間(以下 50cm フロー時間と略す)および L フロー試験器を用いた L フロー初速度(L フロー試験器の流れの始動面より 3cm から 8cm までの流動速度、以下 Lv と略す)で評価した<sup>3)</sup>。経時変化の測定は、練り舟に静置したコンクリートを練上がり直後、30 分後、60 分後、90 分後に測定直前に切り返してから行った。凝結時間の測定は JIS A 1147 に準拠した。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠し、標準養生における材齢 7、28、91 日で試験した。乾燥収縮試験は JIS A 1129 に準拠した。自己収縮試験は、日本コンクリート工学協会自己収縮研究委員会の試験方法<sup>4)</sup>に準拠した。ただし、ひずみの測定は埋め込み型ひずみゲージを用いて測定し、凝結始発以後のひずみ変化を自己収縮ひずみとした。凍結融解試験は JIS A 1148 に、促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠した。

### 3. ハイブリッド混和剤の開発

#### 3.1 減水剤成分

減水剤成分としてポリマーの分子設計により高強度領域での減水性能、粘性低減性能および収縮低減剤との相溶性を改良したポリカルボン酸系減水剤成分<sup>5)</sup>(以下 SSP と略す)を使用した。W/C=15%にて SSP と従来の超高強度用ポリカル

表-2 SP と SSP の比較試験結果

混和剤 種別	添加量 (セメント ×%)	スランブ フロー (cm)	50cm フロー 時間(秒)	Lv* (cm/s)
SSP	2.40	73.0	7.9	6.3
SP	2.50	71.5	18.0	3.5

\* : Lv = L フロー初速度

ボン酸系高性能減水剤<sup>6)</sup>(以下 SP と略す)を比較した結果を表-2 に示す。SSP および SP はいずれも固形分濃度を 30%に調整して使用した。

SSP は SP よりも約 5%少ない添加量で所定の流動性を得ることができ高い減水性を示した。また、SSP は SP に対して 50cm フロー時間で約 0.4 倍、Lv で約 2 倍程度の粘性低減効果を示した。

#### 3.2 収縮低減剤成分

収縮低減剤成分として収縮低減効果に優れ、減水剤成分との相溶性が高い収縮低減剤成分(以下 SRA と略す)を使用した。SRA の主成分はポリエーテル誘導体であり、その化学構造は現在実績のある代表的な収縮低減剤と同様にアルキレンオキシド重合物の範疇に属する。

乾燥収縮のメカニズムは毛細管張力説が現在最も有力である<sup>7)</sup>。また、自己収縮は外部との水分の出入りのない条件下での水和に伴うゲル空隙などに生ずる一種の乾燥に起因しており、乾燥収縮同様毛細管張力機構で説明が可能とされている<sup>7)</sup>。収縮低減剤は毛細管空隙水の表面張力を低下させることによりコンクリートの体積変化を低減するものであるが、既往の研究<sup>8)</sup>によれば自己収縮についても収縮低減剤の収縮低減効果が確認されている。従って、SRA の選定にあたってはその収縮低減効果の有効性を乾燥収縮

試験により確認した。試験は W/C=35%にて行い成分の異なる 4 種類の収縮低減剤 A~D と比較した。収縮低減効果は 26 週後の乾燥収縮ひずみから求めた収縮低減剤無添加コンクリートを基準とした収縮低減率により評価した。なお、各収縮低減剤の添加量は 2kg/m<sup>3</sup>とし、いずれも減水剤成分として SSP を併用した。

減水剤成分との相溶性は各収縮低減剤を固形分濃度 30%に調整し SP または SSP に対して 15,33,50%の割合で混合後 20°Cにて静置し、1ヶ月後の溶液の安定性で評価した。なお、溶液の安定性の判断は肉眼観察で均一透明に溶解しているものを合格(○)、分離や潤み認められるものを不合格(×)とした。なお、合格したものは溶液を上層部と下層部に分け、モルタル試験により流動性、AE 性等に差がないことを確認した。

各収縮低減剤の収縮低減率と相溶性を表-3に示す。SRA は A~D に対して約 1.1~1.3 倍程度の収縮低減効果を示した。また、SSP に対していずれの比率においても均一溶解した。

表-3 各収縮低減剤の収縮低減率と相溶性

種類	収縮低減率 (%)	減水成分との相溶性			
		対 SP		対 SSP	
		15%	15%	33%	50%
SRA	19.4	×	○	○	○
A	15.6	×	○	○	○
B	18.2	×	○	○	○
C	15.8	×	○	×	×
D	14.9	×	×	×	×

### 3.3 収縮低減剤成分の混合比率の決定

収縮低減剤成分の混合比率を決定するため、SSP と SRA をそれぞれ固形分濃度 30%に調整し 85 : 15, 67 : 33, 50 : 50 の 3 種類の比率(重量比)で混合した混和剤を使用し W/C=35%および 15%にて試験した。なお、収縮低減効果は、SSP100%の収縮ひずみを基準とした収縮低減率により評価した。各混和剤の試験結果を表-4に示す。収縮低減率は SRA の比率が高いほど大きくなる傾

表-4 混合比率の検討実験結果

W/C (%)	種別 SSP : SRA	添加量 (セメント×%)	収縮低減率 *(%)	凝結始発 (h)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
					材齢 28 日	材齢 91 日
35	100 : 0	0.60	—	6.4	84.2	94.3
	85 : 15	0.70	2.6	6.7	84.1	93.7
	67 : 33	0.90	5.3	6.5	84.6	94.0
	50 : 50	1.20	7.8	6.9	82.3	92.8
15	100 : 0	2.40	—	13.2	158	182
	85 : 15	2.25	19.8	13.8	159	186
	67 : 33	2.35	42.3	13.4	156	187
	50 : 50	2.95	53.7	14.4	148	185

\* : W/C=35%は乾燥収縮, 期間 26 週  
W/C=15%は自己収縮, 材齢 28 日

向にある。また、添加量は W/C=35%では SRA の比率に比例して増加し、W/C=15%では SRA15%と 33%は SSP100%よりも少なく SRA50%では増加した。圧縮強度は材齢 28 日では SRA33%までは SSP100%と同等であるが、SRA50%では約 2~6%程度低い値を示した。材齢 91 日では SRA の比率によらずほぼ同等であった。従って、収縮低減効果の面では SRA の比率は多い方が望ましいが、SRA の比率を 50%まで上げると、(1)混和剤添加量が 1.2~2.0 倍程度に増加、(2)凝結時間が約 0.5~1.2 時間程度遅延、(3)材齢 28 日において約 2~6%程度の強度低下、等の影響が認められたため SSP と SRA の比率を 67:33 に決定した。以下この混和剤をハイブリッド混和剤(HSP)と称する。

### 4. ハイブリッド混和剤の諸性質

HSP の諸性質を従来の超高強度用高性能減水剤 SP とコンクリート試験にて比較した。

#### 4.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5に示す。

##### (1) 流動性および粘性

HSP, SP 共にいずれの配合においても目標とする高流動性を得ることができた。また、HSP は Lv が SP の約 1.1~1.8 倍であり、SP よりも優れた粘性低減効果を有することを示した。スラ

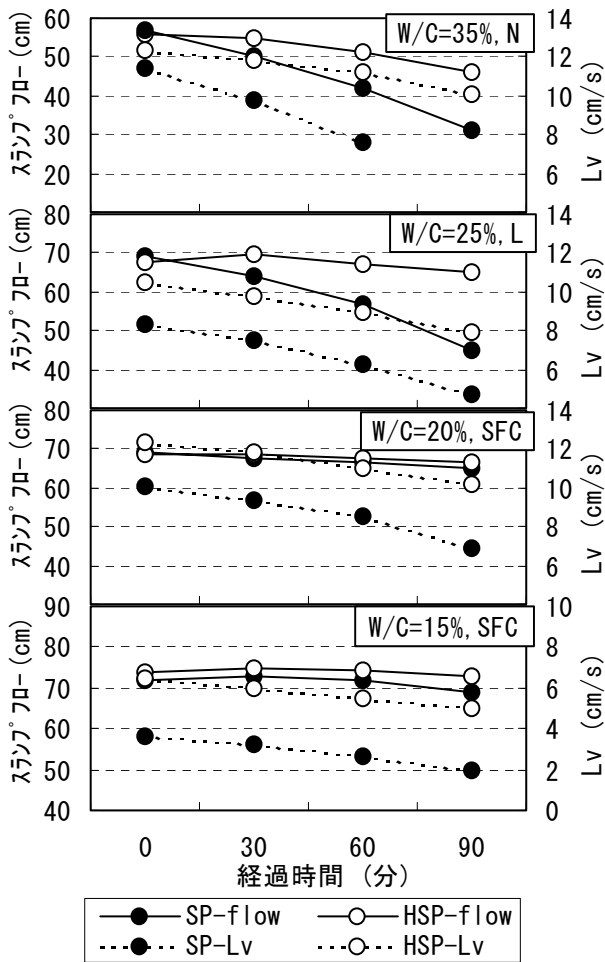


図-1 スランプフローとLvの経時変化

スランプフローとLvの経時変化試験結果を図-1に示す。いずれの配合においてもSPが速やかにスランプフロー及びLvが低下したのに対してHSPは良好な流動性および粘性低減効果を保持した。

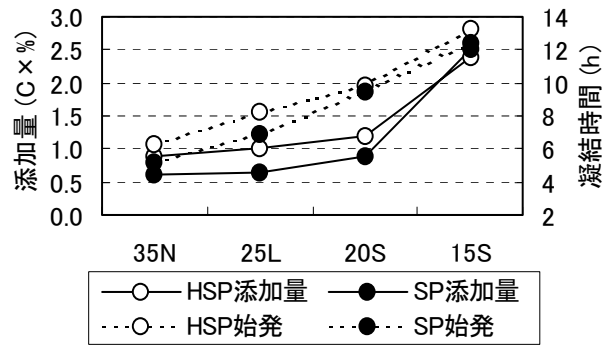


図-2 混和剤添加量と凝結時間

(2) 混和剤添加量と凝結時間

各配合における混和剤の添加量と凝結時間を図-2に示す。HSPはSPの約1~1.5倍の添加量を必要とした。HSPの添加量の増加は、収縮低減剤成分の添加により減水剤成分濃度が1/1.5倍に低下したことに起因し、減水性の不足を添加量増加で補ったためである。しかし、水セメント比が20%以下では添加量の差は小さくなる傾向が見られ、W/C=15%ではHSPはSPよりも約5%程度少なくなった。このことから、超高強度領域になると収縮低減剤がセメントの分散にある程度寄与している可能性が示唆される。減水剤添加量を固定し、収縮低減剤を外割で添加した場合スランプが増大することがあるが、今回のケースのように内割りで添加した場合に無添加のものよりも添加量が少なくなるという報告はなく興味深い。そのメカニズムの解明は今後の検討課題である。凝結時間はいずれの配合に

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

セメント	W/C (%)	混和剤種別	添加量 (セメント×%)	スランプフロー (cm)	50cmフロー時間 (秒)	空気量 (%)	Lv (cm/s)	凝結時間 (h)	
								始発	終結
N	35	SP	0.60	57.0	6.8	3.3	11.4	5.2	7.0
		HSP	0.90	56.0	6.5	3.2	12.4	6.3	8.2
L	25	SP	0.65	69.0	7.8	2.9	8.3	6.9	9.7
		HSP	1.00	67.5	6.6	3.0	10.5	8.2	10.3
SFC	20	SP	0.90	69.0	5.2	1.2	10.1	9.5	10.8
		HSP	1.20	68.5	4.6	1.4	12.4	9.8	11.0
	15	SP	2.50	72.0	17.5	1.4	3.6	12.4	16.9
		HSP	2.40	74.0	7.7	0.9	6.5	13.3	17.8

においても HSP の方が SP より約 0.5~1 時間程度遅れる傾向が見られた。既往の研究<sup>8)</sup>から収縮低減剤を使用すると凝結が遅れる傾向にあることが知られている。しかし、通常の収縮低減剤コンクリートが収縮低減剤をセメントに対して 1~4%程度(約 3~12kg/m<sup>3</sup>)含むのに対して HSP コンクリート中の SRA は 0.4~2.3kg/m<sup>3</sup>程度と少ないため HSP の凝結遅延の程度は小さい。

#### 4.2 自己収縮および乾燥収縮

自己収縮経時変化を図-3 に、自己収縮および乾燥収縮試験結果をまとめて表-6 に示す。

##### (1) 自己収縮

W/C=35%(N),25%(L),20%(SFC)において、基準とした SP の自己収縮ひずみは材齢 28 日において 215~315×10<sup>-6</sup>と比較的小さい値であったが、W/C=15%(SFC)では 730×10<sup>-6</sup>と大きな自己収縮ひずみを示した。一方、HSP は配合の違いによる自己収縮ひずみの絶対値の大小に関わらず良好な収縮低減効果を発揮し、SP の自己収縮ひずみを基準とした収縮低減率が W/C=35%(N), W/C=25%(L), W/C=20%(SFC), W/C=15%(SFC)でそれぞれ 23.3%, 40.0%, 21.3%, 43.6%であった。ここで、当初収縮低減剤成分の絶対量の多いものほど収縮低減率が大きくなると推測されたが、実際には W/C=20%よりも W/C=25%の方が収縮低減率が大きく、このことからセメントの種類により自己収縮低減効果に差があることが示唆された。

表-6 自己収縮および乾燥収縮試験結果

配合	混和剤 種別	自己収縮 (材齢 28 日)		乾燥収縮 (期間 26 週)	
		ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )	低減率 (%)	ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )	低減率 (%)
35N	SP	215	—	618	—
	HSP	165	23.3	571	7.6
25L	SP	240	—	523	—
	HSP	144	40.0	481	8.0
20S	SP	315	—	521	—
	HSP	248	21.3	478	8.3
15S	SP	730	—	400	—
	HSP	412	43.6	365	8.8

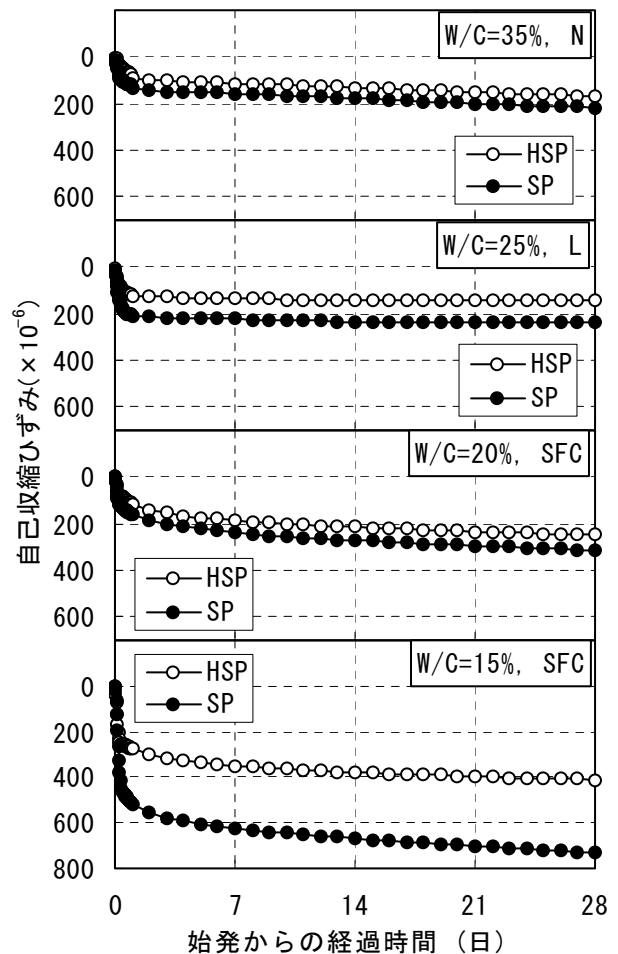


図-3 自己収縮試験結果

##### (2) 乾燥収縮

材齢 26 週において、HSP は収縮低減率 7.6~8.8%の収縮低減効果を示した。しかし、自己収縮低減効果に比べて乾燥収縮低減効果は小さく、配合の違いによる収縮低減効果の差も小さい。

#### 4.3 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-4 に示す。いずれの配合においても SP と HSP の強度発現性に差は認

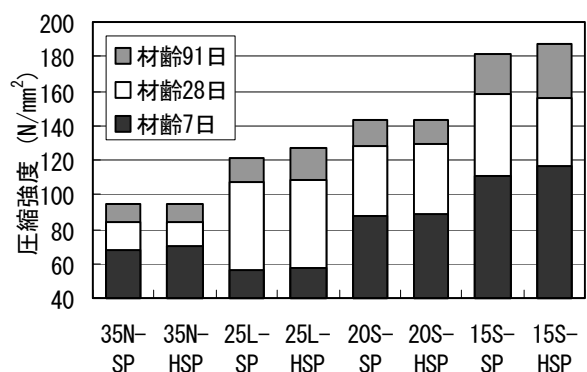


図-4 圧縮強度試験結果

められず、共に材齢 28 日または 91 日で、想定した  $F_c$  に相当する強度を十分に満足しており、収縮低減剤を併用することによる強度への悪影響は認められなかった。

#### 4.4 凍結融解抵抗性および中性化抵抗性

凍結融解および促進中性化試験結果を表-7 に示す。

表-7 凍結融解および促進中性化試験結果

配合	混和剤種別	凍結融解 (300 サイクル) 耐久性指数	促進中性化 (促進期間 26 週) 中性化深さ(mm)
35N	SP	95	0.0
	HSP	93	0.0
25L	SP	93	0.0
	HSP	91	0.0
20S	SP	99	0.0
	HSP	98	0.0
15S	SP	99	0.0
	HSP	99	0.0

##### (1) 凍結融解抵抗性

SP, HSP 共にいずれの配合においても、300 サイクルにおける耐久性指数が 90 以上であり、 $W/C=35\%$ および  $25\%$ では空気量が 3%程度、 $W/C=20\%$ および  $15\%$ では空気量が 2%以下で十分な耐凍害性を有することが確認された。

##### (2) 中性化抵抗性

SP, HSP 共にいずれの配合の促進期間 26 週においても全く中性化しておらず、十分な中性化抵抗性を有することが確認された。

#### 5. まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

(1) HSP, SP 共にいずれの配合においても目標のスランプフローを得ることができたが、HSP は L フロー初速度( $L_v$ )が SP の約 1.1~1.8 倍であり良好な粘性低減効果を示した。

(2) いずれの配合においても経時変化試験において SP が時間経過に伴いスランプフロー及び  $L_v$  が低下したのに対して HSP は良好な流動性お

よび粘性低減効果を保持した。

(3) HSP は SP の約 1.0~1.5 倍の添加量を必要としたが、水セメント比が 20%以下では添加量の差は小さくなる傾向が見られた。凝結時間は HSP, SP 共に添加量の増加に伴い遅れる傾向にあるが、大きな遅延性は見られなかった。

(4) HSP は良好な収縮低減性能を有し、SP に対して、自己収縮を約 21~44%、乾燥収縮を約 8~9% 低減できることが確認された。

(5) HSP と SP の強度発現性は共に良好であり差異は認められなかった。

(6) HSP, SP 共に今回実験した範囲内では十分な耐凍害性と中性化抵抗性を有していた。

(7) 以上から、高流動性と粘性低減性および収縮低減剤との相溶性に優れた減水剤成分と、収縮低減剤成分を一液混合したハイブリッド混和剤 HSP は高強度コンクリートの製造に適した混和剤であることが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 上原伸郎, 鈴木康範, 河上浩司, 西本好克: 超高強度コンクリートの自己収縮低減, コンクリート工学年次論文集, VoL.27, No.1, pp.1099-1104, 2005
- 2) 日紫喜剛啓, 盛田行彦, 玉井謙, 宮川豊章: 自己収縮を低減した150N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートの耐久性性能, コンクリート工学年次論文集, VoL.27, No.1, pp.1105-1110, 2005
- 3) 米澤敏男, 和泉意登志, 三井健郎, 奥野亨: 高強度コンクリートのワーカビリティに関する L 型フロー試験法による研究, コンクリート工学年次論文報告集, VoL.11, pp.171-176, 1989
- 4) (社)日本コンクリート工学協会, 自己収縮研究委員会報告書, 2002
- 5) 齊藤和秀, 飯田昌宏, 玉木伸二, 木之下光男: 超高強度用ハイブリッド高性能減水剤の開発, 第 58 回セメント技術大会講演要旨, pp.54-55, 2004
- 6) 木之下光男, 下野敏秀, 米澤敏男, 三井健郎: 超高強度コンクリート用新高性能減水剤の性質, コンクリート工学年次論文報告集, VoL.16, No.1, pp.341-346, 1994
- 7) 児島孝之編: コンクリート混和材料ハンドブック, エヌ・ティー・エス, pp.80-84, 145-146, 2004
- 8) 田澤栄一: 水和反応によるセメントペーストの自己収縮, セメント・コンクリート, (565), pp.35-44, 1994
- 9) 岸谷孝一, 三浦豊司, 山本常夫, 杉本貢: 乾燥収縮低減剤を添加したコンクリートの諸物性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.55-56, 1984