

高強度コンクリート用シリカフュームスラリー NEW SILICA FUME SLURRY FOR HIGH STRENGTH CONCRETE

小出 貴夫^{*}, 鈴木 康範^{*}, 伊藤 司^{**}, 河上 浩司^{***}
Takao KOIDE, Yasunori SUZUKI, Tsukasa ITO and Hiroshi KAWAKAMI

Keywords : *Silica fume, Slurry, Low heat portland cement, High strength concrete*
シリカフューム, スラリー, 低熱ポルトランドセメント, 高強度コンクリート

1. はじめに

本研究は、低熱ポルトランドセメントおよびシリカフューム（以下 SF と略記）を用いた圧縮強度 150N/mm² 級の高強度コンクリートの実用化にあたり、シリカフュームスラリー^{1) 2)}、（以下 SF スラリーと略記）の改良を目的としたものである。

SF は金属シリコンやフェロシリコンの製造時に副生される非晶質 SiO₂ を主成分とする平均径約 0.1 μm の球状超微粒子であり、コンクリートに混和するとその高いポゾラン活性やマイクロフィラー効果により強度が増進し、硬化体が緻密化される。一方、SF は著しく嵩高な粉体であり、粉体状態ではレディーミクストコンクリート工場（以下生コン工場と略記）における貯蔵や安定供給が難しいため、予め水でスラリー化した SF スラリーの使用が適している。SF スラリーを使用する利点として、セメントの品種を自由に選択でき、さらにセメントに対する SF の置換率も自由に設定できる点が挙げられる。ただし、単位水量を少なく抑えた高強度コンクリートの製造では、骨材の表面水率補正を考慮すると高濃度 SF スラリーが必要となる。

従来型 SF スラリーには、SF の分散性に優れたナフタレンスルホン酸ホルムアルデヒド縮合物系高性能減水剤を使用していた。しかし、高強度コンクリートに使用されるポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤（以下 SP と略記）と混合するとフレッシュコンクリートの流動性を著しく低下させ、所定の流動性を確保するための SP 添加量が過大となり、特に水結合材比（以下 W/B と略記）16% 以下

の領域で大きな問題となる。したがって、高強度コンクリートに適した改良型 SF 分散剤を用いて SF スラリーの改良を行った。また、実際の生コン工場の SF スラリー化システムを用いて実機試験を行った。

2. 試験概要

2. 1 試験項目

シリーズ 1 において、改良型 SF スラリー用の分散剤添加量を決定するために SF スラリーそのものの流動性試験と同時に、コンクリートの流動性と強度に及ぼす影響を検討するための予備試験としてモルタル試験を行った。

シリーズ 2 において、シリーズ 1 で決定した分散剤添加量を用いた改良型 SF スラリーと従来型 SF スラリーの性状を比較するため、室内でコンクリート試験を行った。また、改良型 SF スラリーの長期保存性を確認するため、SF スラリーの流動性試験とコンクリート試験を行った。

シリーズ 3 において、実機プラントにおいて改良型 SF スラリーを用いた高強度コンクリートを製造し、その性状を評価した。

2. 2 使用材料および調合

SF は JIS A 6207 適合品、低熱ポルトランドセメントは JIS R 5210 適合品（住友大阪セメント）を使用した。SF および低熱ポルトランドセメントの化学組成を表 1 に示す。なお、結合材のうち SF の置換率は、低熱ポルトランドセメントの 10% 一定とした。

表1 シリカフュームと低熱ポルトランドセメントの化学組成

結合材種類	化学組成(%)						
	lg.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
シリカフューム	1.11	96.10	0.58	0.14	0.27	0.40	0.15
低熱ポルトランドセメント	1.00	25.76	2.87	3.28	62.77	0.68	2.31

表2 SFスラリーの分散剤種類と添加量

SFスラリー種類	分散剤種類	添加量(SF×%)
従来型	ナフタレンスルホン酸ホルムアルデヒド縮合物系高性能減水剤	0.5
改良型	主成分:オキシカルボン酸	0.05~0.5

^{*} 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所

^{**} 東京エスオーシー株式会社 芝浦工場

^{***} 三井住友建設株式会社 技術研究所

SUMITOMO OSAKA CEMENT CO., LTD.,

Cement/Concrete Research Laboratory

TOKYO SOC CO., LTD., Shibaura Plant

SUMITOMO MITSUI CONSTRUCTION CO., LTD.,

Technical Research Institute

表3 使用材料

材料名	種類	混合率(%)	諸物性	記号
結合材	低熱ポルトランドセメント	90	密度:3.24(g/cm ³), プレーン比表面積:3300(cm ² /g), C ₂ S:56%	C
	シリカフェューム	10	密度:2.20(g/cm ³), BET比表面積:20.0(m ² /g), スラリー濃度60%	SF
モルタル用	細骨材	愛知県産珪砂(八草3号)	表乾密度:2.66(g/cm ³), SiO ₂ :95.0%, Ig.loss:0.2%	S3
		愛知県産珪砂(八草4号)	表乾密度:2.66(g/cm ³), SiO ₂ :95.0%, Ig.loss:0.2%	S4
		愛知県産珪砂(陣屋7号)	表乾密度:2.65(g/cm ³), SiO ₂ :93.4%	S7
		千葉県君津産山砂	表乾密度:2.59(g/cm ³), 吸水率:2.41%	S
コンクリート用	粗骨材	高知県高知山産石灰石砕砂	表乾密度:2.66(g/cm ³), 吸水率:0.60%	
		茨城県岩瀬産硬質砂岩砕砂	表乾密度:2.65(g/cm ³), 吸水率:0.81%, 粗粒率:6.76	G
化学混和剤	高性能AE減水剤	-	ポリカルボン酸系	SP

表4 モルタル調合

W/B (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						SP (B×%)
		W	C	SF	S3	S4	S7	
14.3	2.4	220	1386	154	259	259	130	2.5

表5 コンクリート調合

設計基準強度 (N/mm ²)	W/B (%)	G max (mm)	s/a (%)	g/glim	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					SP (B×%)
						W	C	SF	S	G	
120~130	16.0	20	44.0	0.520	2.0	140	787	88	643	827	1.55~2.2
150	14.0	20	35.4	0.520	2.0	150	966	107	455	827	2.2~3.5

シリーズ1において、改良型 SF スラリーには、凝結遅延剤としてコンクリートへの使用実績があるオキシカルボン酸を主成分とする改良型分散剤を使用した。従来型および改良型 SF スラリーに用いた分散剤の種類と添加量を表2に示す。SF スラリーを用いたモルタルの材料を表3、調合を表4に示す。モルタルのW/Bは14.3%、調合は同じW/Bに対応するコンクリートから粗骨材を除外し、その他の材料の質量比を維持した値とした。練り水は蒸留水を使用、細骨材は吸水率が低く品質の安定している珪砂とし、標準粒度に適合するように粒度の異なる3種類を混合した。

シリーズ2において、シリーズ1の結果から改良型分散剤の添加量は、SF スラリーの粘度を生コン工場で安定供給が可能なるまでに低減し、かつコンクリートのフレッシュ性や強度に悪影響を及ぼさない量(SF×0.17%)に決定した。コンクリートの材料を表3、調合を表5に示す。なお、設計基準強度120~130N/mm²級の調合がW/B=16%、150N/mm²級の調合がW/B=14%である。

シリーズ3において、実機プラントにおけるコンクリートの材料および調合はシリーズ2で利用したものと同様であるが、実構造物を想定し、火災時の爆裂対策としてポリプロピレン樹脂粉末を外割りで3kg/m³混合した。また、W/B=16%および14%ともに自己収縮対策としてエトリンガイトー石灰複合系膨張材(JIS A 6204)を20kg/m³加えた調合も検討した。なお調合上、膨張材は結合材としてセメントと置換し、単位水量をそれぞれ5kg/m³増やした。

2.3 試験方法

シリーズ1において、オキシカルボン酸を主成分とする改良型 SF 分散剤の添加量はSF×0.05~0.5%とし、比較として従来型 SF スラリーも使用し、SF スラリーの固形分率を60%に調整した。SF スラリーの調整方法は20℃恒温下、蒸留水4kgに所定量の分散剤を溶解させた後、SF6kgを少しずつ投入しながらハンドミキサーで約5分間高速撹拌した。SF スラリーは調整後、直ちにPロート流下時間を測定し流動性を検討した。同時にSF スラリーのモルタルの流動性と強度に及ぼす影響をモルタル試験によって検討した。モルタルのSP添加量は結合材×2.5%一定、1バッチの練混ぜ量は3L一定とした。圧縮強度の材齢は3日、7日、28日

56日、91日、供試体はφ50mm×100mm円柱供試体、養生は標準養生とした。

シリーズ2において、改良型 SF 分散剤は最適添加量(SF×0.17%)、シリーズ1と同様の方法で上水道水を用いてSF スラリーの固形分率を60%に調整し、20℃恒温下、コンクリートの流動性と強度に及ぼす影響を室内試験によって検討した。W/Bは16%および14%の2水準、目標スランプリューは70±10cmとし、比較として従来型 SF スラリーも使用した。SP添加量(改良型スラリーを用いた場合で1.55~2.2%、従来型スラリーを用いた場合で結合材の2.2~3.5%)により調整した。ミキサーは容量100Lの二軸式を使用、1バッチの練混ぜ量は40~55Lとし、圧縮強度の材齢は7日、28日、56日、91日、供試体はφ100mm×200mmの円柱供試体、養生は標準養生とした。

また、改良型 SF スラリーの長期保存性を確認するため、固形分率60%のSF スラリーを20℃恒温で密封保存し、7日おきにハンドミキサーで1分間高速撹拌後、Pロート流下時間を測定した。さらに製造直後、製造7日および56日後のSF スラリーを用いてW/B=14%、SP添加量2.2%一定でコンクリート試験を行った。

シリーズ3において、夏期に実際の生コン工場のSF スラリーシステムを使用して高強度コンクリートを実機製造した。練混ぜから60~120分後、大型試験体(4m³の実大模擬柱または1m³の模擬柱試験体)を作製し、材齢28日、56日および91日でコアを採取して圧縮強度を測定した。また同時に標準養生および簡易断熱養生した供試体の圧縮強度も測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 シリーズ1

図1に従来型および改良型 SF スラリーのPロート流下時間とpHを示す。分散剤無添加ではSF スラリーはPロートを流下せず、pHは7.6であった。従来型 SF スラリーのPロート流下時間は約12秒、pHは7.5であった。改良型分散剤は、添加量が増えるに伴ってPロート流下時間が早くなり、添加量0.17%で従来型 SF スラリーと同等の約12秒となった。pHは添加量が増えるに

伴って低下し、添加量 0.5% で約 4 まで低下した。

図 2 に従来型および改良型 SF スラリーを用いたモルタルの 0 打フローと圧縮強度を示す。従来型 SF スラリーを用いた場合は 0 打フローが著しく小さく、圧縮強度は材齢 91 日で約 180N/mm^2 であった。一方、改良型 SF スラリーは分散剤の添加量が少ないほど 0 打フローおよび圧縮強度が大きい傾向にあり、添加量 0.05~0.17% の範囲内では材齢 91 日で 200N/mm^2 を超えた。添加量が 0.2% を超えると 0 打フローと圧縮強度は低下した。

改良型分散剤の添加量が増えるに伴って 0 打フローと圧縮強度が低下した原因は、分散剤の主成分であるオキシカルボン酸の濃度が高くなり、セメントペーストの粘性が増すとともにセメントの水和反応を抑制したためと考えられる。

これらの結果からオキシカルボン酸を主成分とする改良型 SF 分散剤の最適添加量は、従来型 SF スラリーと同等の流動性を付加し、モルタルの流動性や圧縮強度に悪影響を及ぼさない量として $\text{SF} \times 0.17\%$ に決定した。

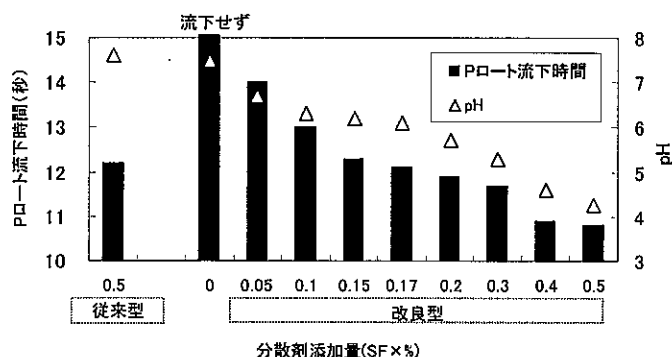


図1 分散剤の異なるSFスラリーの流動性とpHの関係

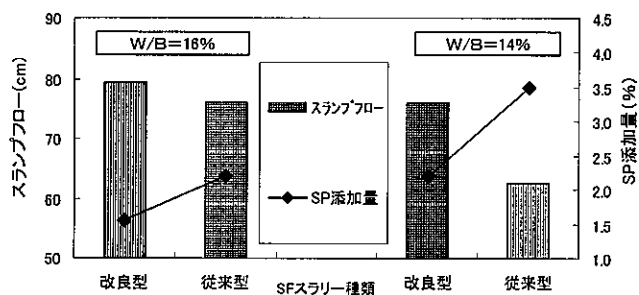


図3 フレッシュコンクリートのSP添加量とスランプフロー比較

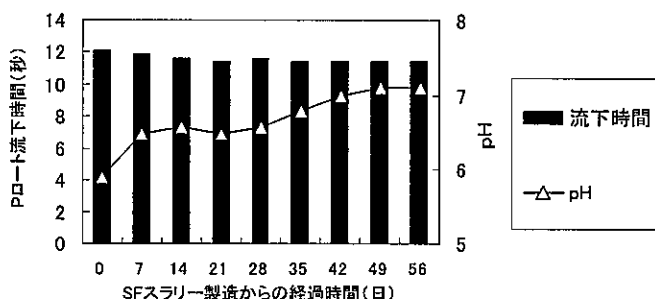


図5 改良型SFスラリーの流下時間とpHの経時変化

3. 2 シリーズ 2

図 3 に SP 添加量とスランプフローの比較を示す。改良型 SF スラリーを用いた場合、いずれの配合においても従来型 SF スラリーを用いた場合より少ない SP 添加量で良好な流動性が得られた。

図 4 にコンクリートの圧縮強度比較を示す。改良型 SF スラリーを用いた場合、 $W/B=16\%$ の材齢 28 日を除いた全ての調査と材齢において従来型 SF スラリーを用いた場合より高い圧縮強度が得られた。従来型 SF スラリーを用いたコンクリートの圧縮強度が低いのは、SP 添加量が過大であること、およびポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤との相性の良否による SF 分散性の差に起因していることが考えられる。

図 5 に改良型 SF スラリーの P ロート流下時間と pH の経時変化を示す。改良型 SF スラリーは、製造直後の P ロート流下時間約 12 秒は日数が経過しても変化せず、56 日間保存しても粘度の増大は認められなかった。一方、pH は製造直後に約 6 であったが、経時に伴って若干上昇し 56 日後で約 7 となった。pH が上昇した

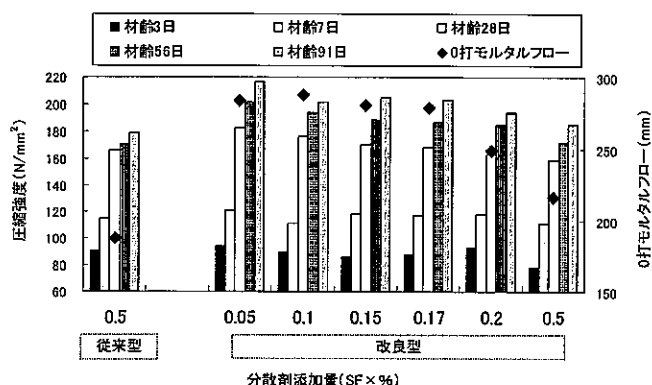


図2 分散剤の異なるSFスラリーを用いたモルタルの物性

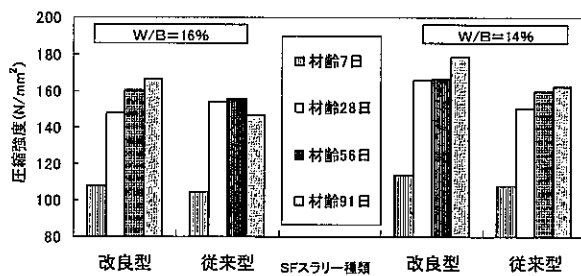


図4 SFスラリーを用いたコンクリートの圧縮強度比較

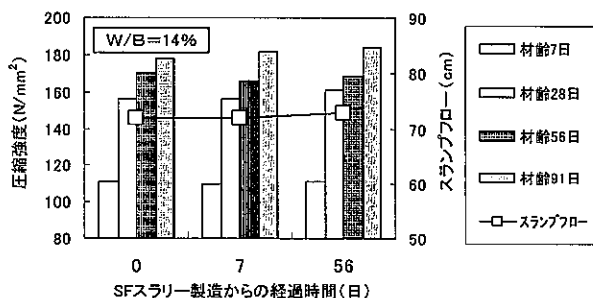


図6 改良型SFスラリー製造からの経過時間と圧縮強度およびスランプフローの関係

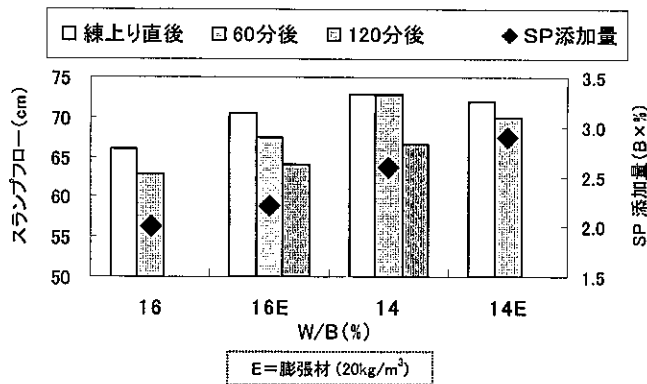


図7 SP添加量とスランプフローの経時変化

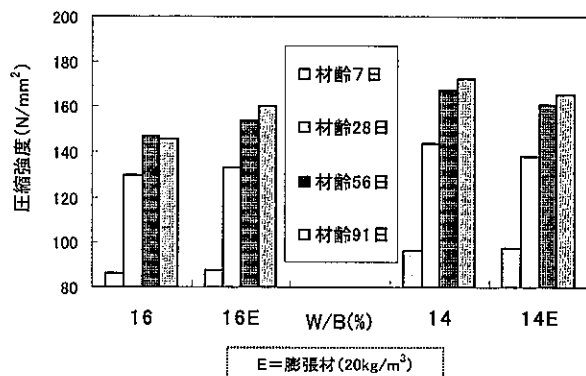


図9 標準養生供試体の圧縮強度

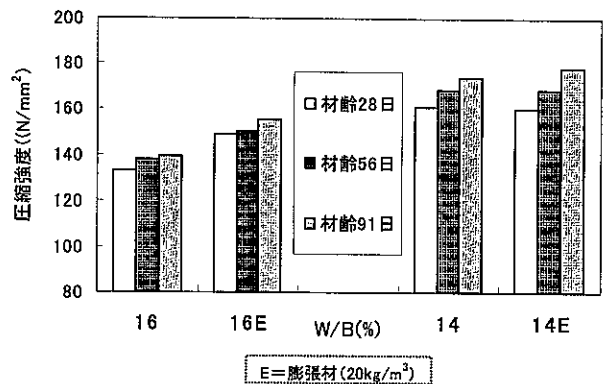


図8 大型試験体から採取したコア供試体の圧縮強度

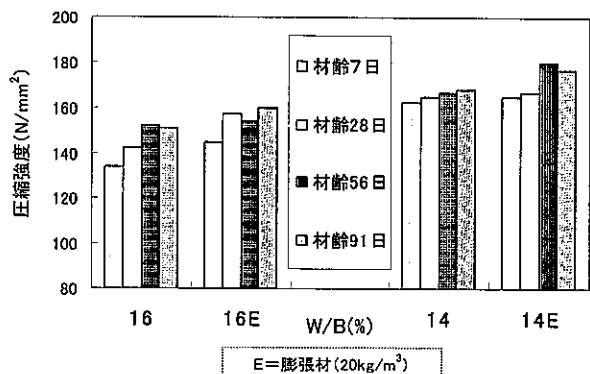


図10 簡易断熱養生供試体の圧縮強度

原因は SF に含有されている微量成分の影響と考えられる。

図 6 に長期保存した改良型 SF スラリーを用いた W/B=14% のコンクリート試験結果を示す。製造からの経過日数にかかわらず、スランプフローおよび圧縮強度は同等の値が得られ、改良型 SF スラリーの保存期間がこれらの性状に及ぼす影響は認められなかった。

3. 3 シリーズ 3

図 7 に実機製造した高強度コンクリートのスランプフローの経時変化と SP 添加量を示す。フレッシュコンクリートの練上り温度は約 30℃であったが、60～120分経過してもスランプフロー 60cm 以上の良好な流動性を保持していた。なお、SP 添加量がシリーズ 2 の室内配合試験時より増大しているのは、高温と樹脂粉末添加および膨張材添加の影響と考えられる。

図 8 に大型試験体から採取したコア供試体（中心部）の圧縮強度を、図 9 に標準養生供試体の圧縮強度を、図 10 に簡易断熱養生供試体の圧縮強度を示す。

大型試験体から採取したコア供試体（中心部）の圧縮強度は材齢 56～91 日で設計基準強度を満足した。また材齢 7～28 日において、簡易断熱養生およびコア供試体（中心部）の圧縮強度は標準養生供試体より高かった。これは高温履歴を受けた場合、低熱ポルトランドセメントと SF の反応が促進され、組織が緻密化したためと考えられる³⁾。材齢 56～91 日において、簡易断熱養生およびコア供試体（中心部）の圧縮強度は標準養生供試体と同等以上であった。なお、コア供試体の場合、大型試験体の中心部と外側で圧縮強度はほぼ同じであった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) オキシカルボン酸を主成分とする分散剤を用いた改良型 SF スラリーを使用することによって、流動性に優れた設計基準強度 150N/mm²級の高強度コンクリートの製造が可能となった。
- 2) 改良型 SF スラリーは、定期的に機械的攪拌操作を行うことによって、56 日間保存しても低粘度を保持でき、また長期保存後、高強度コンクリートに使用してもスランプフローや圧縮強度に影響を及ぼさないことを確認した。
- 3) 実機プラントにおいて、改良型 SF スラリーを用いた高強度コンクリートを安定製造し、フレッシュコンクリートの流動性の経時変化、大型試験体の圧縮強度発現に問題がないことを確認した。

参考文献

- 1) 小林隆芳ほか：高強度レディミクストコンクリートの実用化について、コンクリート工学年次論文集，vol.25，No.1，p.1001～1006，2003
- 2) 小田部裕一ほか：シリカフェームスラリー化システムを用いた高強度レディミクストコンクリート，第55回セメント技術大会講演要旨，[110]，pp.218～219，2001
- 3) 菅俣匠ほか：セメントーシリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性の関係に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，vol.26，No.1，pp.1287～1292，2004