

論文 高強度セメント硬化体への高性能減水剤とシリカフュームの影響

佐藤 正己*1・小泉 公志郎*2・梅村 靖弘*3

要旨：本研究は、高強度セメント硬化体の圧縮強度発現性，微細空隙構造，セメント水和反応に及ぼす高性能減水剤とシリカフュームの影響を明らかにし，シリカフュームの最適添加率を検証することを目的とした。実験は，低熱ポルトランドセメントに汎用および超高強度用高性能減水剤とシリカフュームを添加し，圧縮強度，水銀圧入ポロシメータによる細孔径分布，XRD リートベルト法による水和物組成，TMS 誘導体法による CSH のケイ酸鎖鎖長構造を測定した。その結果，高性能減水剤の種類による影響は少なく，シリカフュームの添加量は水和反応の観点から 10wt% が最適であることが確認された。

キーワード：高強度，シリカフューム，高性能減水剤，鉱物反応率，細孔径分布，CSH，ケイ酸鎖

1. はじめに

近年，120N/mm² を超える超高強度コンクリートの施工実績も増えてきている。このような超高強度コンクリートは，水粉体比が極めて低く有機系混和材料である高性能減水剤(SP)の添加，シリカフューム(SF)といった混和材料は不可欠となっている。一方，コンクリートの標準示方書が仕様規定型から性能照査型へ移行したことで，コンクリート構造物に対して長期的な性能保証が求められるようになってきている。従来，SP は流動性，減水性の向上に主眼が置かれていたが，汎用コンクリート硬化後の長期性能に及ぼす SP の影響について空隙構造およびセメント水和物に着目して検討が進んでおり汎用 SP の種類の違いによりカルシウムシリケート水和物(CSH)のケイ酸鎖構造が異なることが報告されている¹⁾。また，超高強度コンクリートは，SP 添加量が比較的多く，超高強度コンクリート用 SP は汎用 SP と異なる分子構造であることが知られている²⁾。さらに，高強度コンクリートに SF を添加した際の最適添加量は，フレッシュ性状や力学特性から 10～20% が最適であるとの報告がなされているが，水和反応，CSH の構造に着目した検討は少ない³⁾。そこで，本研究では，低熱ポルトランドセメントに汎用および超高強度用高性能減水剤とシリカフュームを添加した硬化体の圧縮強度，水銀圧入ポロシメータによる細孔径分布，粉末 X 線回折(XRD)リートベルト法による水和物組成，TMS 誘導体法による CSH のケイ酸鎖鎖長構造を測定し，圧縮強度発現性，微細空隙構造，セメント水和反応に及ぼす高性能減水剤とシリ

カフュームの影響を明らかにするとともに，シリカフュームの最適添加率を検証することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体作製

表 - 1 にセメントとシリカフュームの物性値および化学組成を示す。使用材料は低熱ポルトランドセメント(LC, ρ = 3.22g/cm³)，シリカフューム(SF, ρ = 2.20g/cm³)，ISO 標準砂(S, ρ = 2.63g/cm³)，練混ぜ水として蒸留水を使用した。SP は汎用-高強度用高性能 AE 減水剤(末端スルホン酸基を有するポリカルボン酸基含有多元ポリマー，SP-N)および高強度-超高強度用高性能減水剤(ポリカルボン酸系グラフトコポリマーを主成分とするアニオン型高分子界面活性剤，SP-U)，消泡剤はポリエーテル系抑泡剤(DEF)を用いた。表 - 2 に配合条件を示す。モルタルおよびペースト配合は高強度コンクリート配合をベースに決定し，水結合材比 22%，砂結合材比 1.0，SF 添加量は内割で 10，20wt%とした。また，SP は固形分を外割として添加した。圧縮強度，細孔径分布測定はモルタル配合，その他の分析はペースト配合とした。SF 無添加配合は，SP の種類の違いによる組織構造を確認するため，SP 無添加配合と SP-N および SP-U の 2 種類を比較した。SF 添加配合は SP-U のみ使用し，SF 無添加配合 SP-U に対して SP 添加量を一定および SP 添加量でフロー値を調整したものとした。フロー値は，フローコーン(JIS R 5201)を用い 0 打で測定し，SP 添加量で 250±20mm に調整した。空気量は，モルタルエアメータにて測定し，

表 - 1 セメント，シリカフュームの物性値および化学組成

	ブレン値 (cm ² /g)	BET値 (m ² /g)	強熱減量 (%)	化学組成(%)							
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
LC	3470	-	1.04	21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38
SF	-	22	1.94	96.9	0.4	0.1	0.2	0.3		0.2	

*1 日本大学 理工学部 土木工学科 助手 修士(工学) (正会員)

*2 日本大学 理工学部 一般教育学科 化学教室 専任講師 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部 土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

表 - 2 配合条件

記号	使用減水剤	水結合材比 (%)	SF添加量 (C × wt%)	SP量 (C × wt%)	DEF量 (C × wt%)	配合	
						モルタル	ペースト
NON-SP	-	22	-	-	-	-	
SP-N	SP-N		-	1.00	0.07		
SP-U	SP-U		-	1.05	0.07		
SF10-SP			10	1.05	0.05		
SF10-F			20	1.30	0.05		
SF20-SP				1.05	0.12		
SF20-F				1.80	0.06		

DEF を用い 3.0%以下に調整した。DEF 添加量増加により調整できない配合は空気量変化が無くなった上限値を添加量として作製した。

練混ぜは、モルタルミキサを用い注水後 5 分間、かき落としを行い、5 分間静置した後、1 分間とした。

供試体は 50×100mm の軽量型枠に 2 層で打込みテーブルバイブレータで各層 30 秒の振動を加えエントラップドエアを除去した。

2.2 養生及び試料調整

モルタル供試体は、1 日までラップフィルムで被い、1 日以降は軽量型枠上面をアルミテープで被い所定材齢まで 20 封緘養生を施した。ペースト試料は、250ml ポリ瓶に打設し 1 日までローテータにセットしブリーディングや分離を防いだ。脱型後、ダイヤモンドカッターを用いカット後、アルミテープで被い各材齢試料とした。養生は、モルタル供試体と同様とした。モルタル試料は、脱型後ハンマーで 2.5mm 以下まで粉碎しアセトンに 3 時間浸漬により水和停止、アセトンを吸引る過後 D-dry を 24 時間施したものをを用いた。ペースト試料は、脱型後ハンマーおよびメノウ乳鉢で 0.15mm 以下まで粉碎しエタノールおよびアセトンで水和停止を行なったものをを用いた。

2.3 測定項目

(1) 圧縮強度

JIS A 1108 に準拠して、50×100mm 円柱供試体により圧縮強度の測定を材齢 3, 7, 28 日に行った。

(2) 細孔径分布

モルタル試料を用い水銀圧入ポロシメータにより測定した。測定した細孔直径の範囲は、3 ~ 10⁵nm とした。

(3) 水酸化カルシウム生成量および水和物の結合水量

ペースト試料を用い熱重量-示差熱重量分析計 (TG-DTA) により測定した。水酸化カルシウム (CH) 量は 400 ~ 450 付近の吸熱ピーク、質量減少量から求めた。CH を除く水和物の結合水量は、105 と 1000 の間の質量減少量から CH の脱水量を差し引くことにより求めた。

(4) 選択溶解法によるシリカフェームの反応率

未反応 SF 量を求めるため、選択溶解法を用いて SF 不溶残分量を測定した⁴⁾。遠心沈殿管を 110 で乾燥し、冷却した後質量を測定した。遠心沈殿管に粉末試料 1g

を入れ、2N 塩酸 30ml を加えて 60 に加熱し、時折ガラス棒で攪拌しながら 15 分保持した。その後 4000rpm で 10 分間遠心分離を行い、上澄みを除去した。さらに、熱水を加えて遠心分離と上澄みの除去を行い、この作業を 3 回繰返した。次に 5%炭酸ナトリウム溶液を 30ml 加え、80 に加熱し、時折ガラス棒で攪拌しながら 20 分間保持した。その後、4000rpm で 1 分間遠心分離を行い、上澄みを除去し、熱水で更に 3 回遠心分離と上澄みの除去を行った。110 乾燥後、質量を測定した。

(5) 粉末 X 線回折/リートベルト解析による各鉱物および非晶質の定量

XRD の測定は、星野ら⁵⁾の手法に準じて行った。X 線源 Cu-Kα、管電圧 50kV、管電流 250mA、走査範囲 2θ = 5 ~ 65°、ステップ幅：0.02°、スキャンスピード：2°/min の条件で行い、リートベルト解析ソフトは TOPAS (Bruker AXS) を使用した。定量は、エーライト (C₃S)、ビーライト (C₂S)、間隙質 (C₃A, C₄AF)、二水石膏 (Gyp)、半水石膏 (Bas)、水酸化カルシウム (CH)、エトリンガイト (AFt)、モノサルフェート (AFm) の各セメント鉱物、水和生成物と内部標準物質として α-Al₂O₃ (10wt%) を定量対象とし各鉱物および非晶質含有量を同時に定量した。測定は、材齢 7, 28 日で行った。各鉱物の結晶構造に関するパラメーターは C₃S, C₂S, cubic-C₃A, orthorhombic-C₃A, C₄AF については Nist テクニカルノート⁶⁾と同様とし、Gyp, Bas, CH, AFt, AFm, α-Al₂O₃ に関しては ICSD Database と同様とした。

水和したセメントペーストに含まれる非晶質相は CSH だけでなく、カルシウムアルミネート水和物 (CAH)、カルシウムフェライト水和物 (CFH) も考えられるが本報では、星野ら⁴⁾と同様に CSH が大半を占めるという仮定とし CSH 量を内部標準 α-Al₂O₃ の定量値と 2.3.(4) で求めた未反応 SF 量から式 (1) に従い算出した。SF は、XRD の測定により主成分であるシリカに結晶質シリカ (石英) のピークが認められずほぼ 100% ガラス化していると考えられ非晶質とした。

$$G = \{100 \times (A - R)\} / \{A \times (100 - R) / 100\} - S \quad (1)$$

ここに、G: 非晶質量 (wt%), R: α-Al₂O₃ の混合率 (wt%),

A : α - Al_2O_3 の定量値(wt%) , S : 2.3(4)で求めた未反応 SF 量(wt%)である。

(6) CSH のケイ酸鎖鎖長分布測定

CSH のケイ酸鎖鎖長が、水和反応の進行によって増加する傾向を知るために、小泉ら¹⁾の手法に準じ TMS 誘導体法を用いて鎖長分布を測定した。粉末 X 線回折試験用のペーストをメノウ乳鉢で 150 μm 以下に粉砕し、TMS 誘導化を行い、得られた TMS 誘導体をガスクロマトグラフィーにより分析し、単量体(monomer) ~ 6 量体(hexamer)までのケイ酸陰イオンの構成比を測定した。未反応のセメントは、大部分が単量体からなり CSH が増加するにつれて、単量体は 2 量体以上の多量体にシフトする。そこで、本研究では、水和初期において変化量の大きい 2 量体を評価した。

3. 試験結果および考察

3.1 モルタル配合のフレッシュ性状

表 - 3 にフレッシュ性状測定結果を示す。SP-N は、SP-U とほぼ同一 SP 添加量でフロー値が得られた。木之下ら²⁾、三好ら⁷⁾によると SP-N は SP を増やしても SP-U と同等の流動性を得ることはできないとされているが本試験結果と異なった。従来の知見はコンクリートによるものであり、SP 添加量の差は粗骨材の有無、砕砂と ISO 標準砂の吸着量の違いが原因であると考えられる。SF 無添加配合 SP-U と同じ SP 添加量の配合 SF10-SP、SF20-SP は、フロー値 200mm 以下、空気量 3.0%以上となった。フロー調整配合 SF10-F、SF20-F の SP 添加量は、SP-U と同じ SP 添加量の配合 SF10-SP、SF20-SP 各々に対して 1.3、1.8 倍となった。

3.2 圧縮強度

図 - 1 に圧縮強度試験結果を示す。SP-U は、材齢 3、7 日で SP-N に対して 2~3%低下したが、28 日では約 7%増加した。無添加配合 SP-U と同じ SP 添加量の配合 SF10-SP、SF20-SP は、材齢 3、7 日で SP-U と同等であったが、材齢 28 日では SF 添加量の増加にともない SP-U 以下となった。原因は、同じ SP 添加量の配合 SF10-SP、SF20-SP では流動性不足による巻き込み気泡の増加によるものと考えられる。フロー調整配合 SF10-F、SF20-F は、SP-U に対して材齢 3 日で SF 添加量の増加にともない若干低

表 - 3 フレッシュ性状

記号	SP量 (C × wt%)	DEF量 (C × wt%)	フロー値 (mm)	空気量 (%)
SP-N	1.00	0.07	275 × 268	1.5
SP-U	1.05	0.07	268 × 268	1.8
SF10-SP	1.05	0.05	100 × 100	3.0
SF10-F	1.30	0.05	265 × 260	2.6
SF20-SP	1.05	0.12	100 × 100	5.0
SF20-F	1.80	0.06	235 × 233	2.4

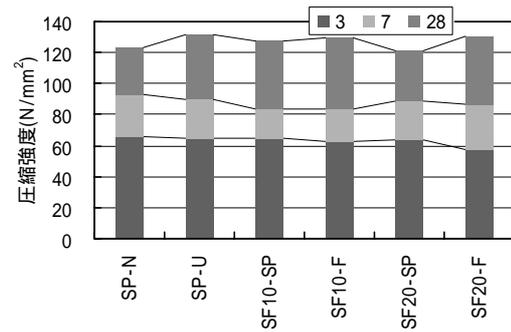


図 - 1 圧縮強度

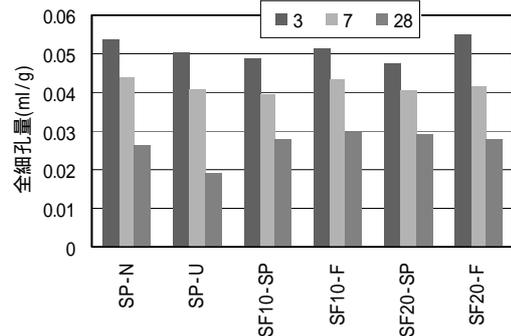


図 - 2 全細孔量

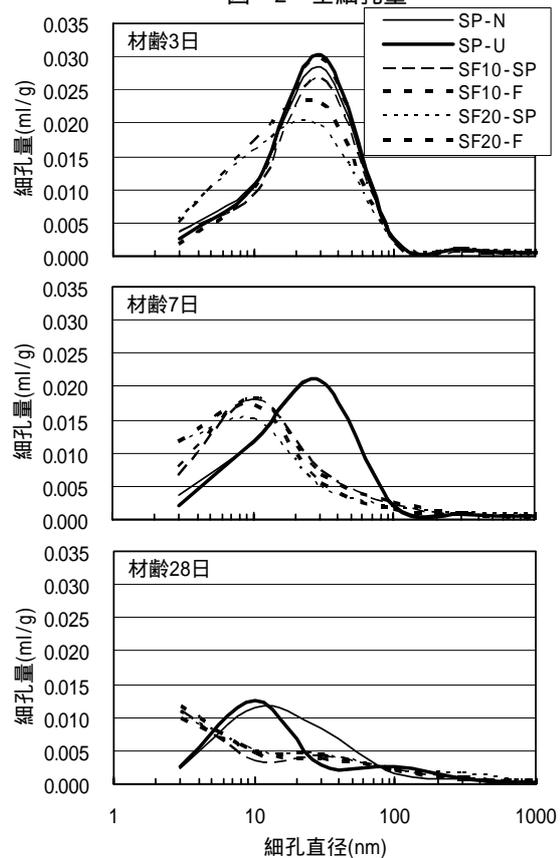


図 - 3 細孔径分布

下したが、28 日ではほぼ同等となった。原因は、フロー調整配合 SF10-F、SF20-F では SP 添加量増加による水和反応の遅延が影響であると考えられる。

3.3 細孔径分布測定結果

図 - 2 に測定した細孔直径の範囲における全細孔量, 図 - 3 に 3~1000nm の範囲における材齢 3, 7, 28 日の細孔径分布測定結果を示す。SP-N, SP-U は, 材齢 3, 7 日で空隙ピークが 30nm にあり, 材齢 28 日ではピークが 10nm にシフトした。SP の種類の影響は, 初期材齢では確認できなかったが材齢 28 日において SP-U のみ 10~100nm の空隙が減少した。SF 添加の影響は, 材齢 3 日では, SF 無添加配合 SP-U と SF10-SP, SF10-F の空隙ピークが 30nm にあるが, SF20-SP, SF20-F はピークが 30nm にあるものの 3~10nm の空隙が多くなった。材齢 7 日では, SP-U のピークが 30nm にあるが, SF10-SP, SF10-F, SF20-SP, SF20-F はピークが 10nm にシフトした。SF20-SP, SF20-F は, 3~10nm の空隙がさらに増加した。材齢 28 日では, SF 添加配合 SF10-SP, SF10-F, SF20-SP, SF20-F の空隙ピークが SF 添加量にかかわらず 3nm となった。この現象は, SF のマイクロファイラー効果とポゾラン反応の進行によって空隙充填が起こったと考えられる。

3.4 セメントの水和反応

図 - 4 に CH 量を示す。無添加配合 NON-SP と SP-N, SP-U の CH 量は, 同様の傾向を示し材齢 7 日では約 8%, 材齢 28 日で約 9% となり材齢 7 日から 28 日にかけて約 1% 増加した。SF 添加配合 SF10-SP, SF10-F, SF20-SP, SF20-F の CH 量は, フロー値調整すなわち各 SF 添加量増加による影響は認められなかった。材齢 7 日は, SF 無添加配合 SP-U に対して SF10-SP, SF10-F では約 2%, SF20-SP では約 3%, SF20-F では約 4% 低くなった。材齢 28 日は, SF10-SP, SF10-F で約 3%, SF20-SP, SF20-F では約 6% 低くなった。材齢 7 日から 28 日にかけての変化量は, SP-U で約 1%, SF10-SP, SF10-F は 1% 以下の増加であったが, SF20-SP では約 2%, SF20-F では約 1% 減少した。この CH 量の減少は, 鶴澤ら⁹⁾の知見にもある通り SF のポゾラン反応の進行により CH の生成量が消費量を上回ったためであると考えられる。

図 - 5 に CH を除く水和物の結合水量を示す。SP-N と SP-U の結合水量は, 材齢 7 日で SP 無添加配合 NON-SP に比べ約 3% 高くなったが, 28 日では同等となった。SF 添加配合 SF20-SP, SF20-F の結合水量は, 材齢 7 日で SF 無添加配合 SP-U と同等であったが, SF10-SP, SF10-F はそれより約 1% 低くなった。SP-U は材齢 7 日から 28 日にかけての増加が 1% 以下であったのに対し, SF10-SP, SF10-F では約 3%, SF20-SP, SF20-F では 1% 以下となった。

図 - 6, 7 に粉末 XRD/リートベルト法により得られた C₃S および C₂S の反応率, 図 - 8 に選択溶解法により求めたシリカフェームの反応率を示す。C₃S の反応率は, SP の種類, SF 添加にかかわらず全ての配合において材

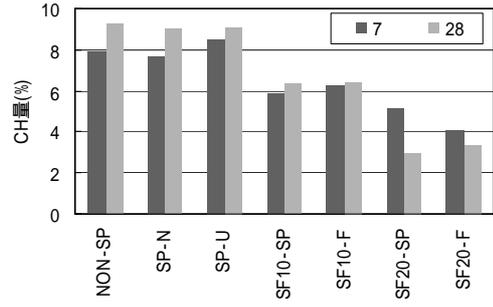


図 - 4 水酸化カルシウム生成量

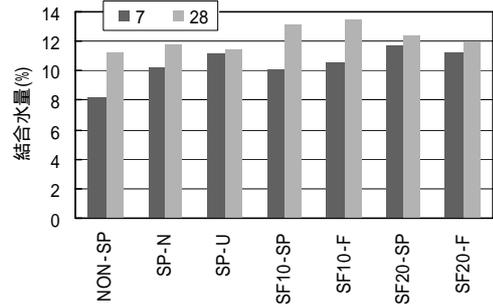


図 - 5 水和物の結合水量

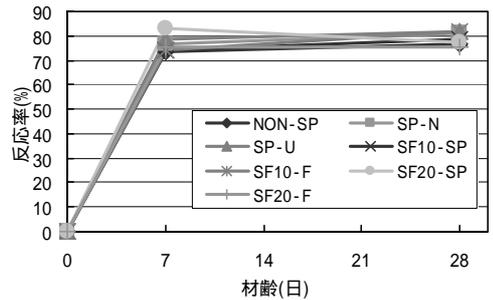


図 - 6 C₃S 反応率

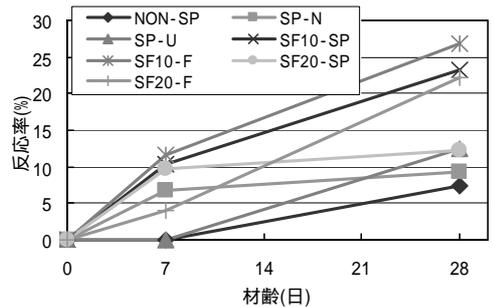


図 - 7 C₂S 反応率

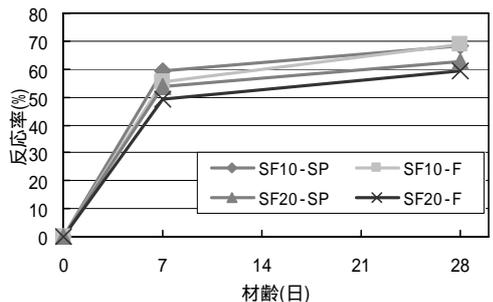


図 - 8 SF 反応率

齢 7 日で 70~85%に達し 28 日でも伸びがわずかであり反応が緩慢になった。SP 無添加配合 NON-SP と SP-N, SP-U の C₂S 反応率は, 材齢 7 日で 0~7%, 材齢 28 日では 7~10%となった。SF 添加配合 SF10-SP, SF10-F, SF20-SP, SF20-F の C₂S 反応率は, 材齢 7 日で 5~10%となったが 28 日では SF20-SP を除く SF10-SP, SF10-F, SF20-F が 22~27%となり SF 無添加配合 SP-U に対して増加した。SF 反応率は, 材齢 7 日で 45~60%, 28 日で 60~70%に達した。SF20-SP, SF20-F の反応率は, SF10-SP, SF10-F に対して約 10%低くなった。

図 - 9 に粉末 XRD/リートベルト法により得られた各配合の相組成を示す。SP-N, SP-U の CSH 量は, 材齢 7 日で SP 無添加配合 NON-SP に対して約 5%増加したが, 材齢 28 日では同等となった。SF 添加配合 SF10-SP, SF10-F, SF20-SP, SF20-F の CSH 量は, SF 無添加配合 SP-U に対して材齢 7 日で SF10-SP, SF10-F がともに約 7%, SF20-SP が約 7%, SF20-F が約 11%増加した。材齢 28 日では, SF10-SP は約 10%, SF10-F は約 13%の増加を示したが, SF20-SP は約 7%, SF20-F は約 9%増加となった。また, 材齢 28 日でフロー調整配合 SF10-F, SF20-F は, 同じ SP 添加量の配合 SF10-SP, SP20-SP に対して CSH の生成量が 2~3%多くなり, SP 添加量による影響が確認された。以上より, セメントとシリカフェームの反応による CSH 生成が最も進行する配合は SF10-F であることが確認できた。

3.5 CSH のケイ酸鎖鎖長分布

図 - 10, 図 - 11 に CSH のケイ酸鎖鎖長分布のうち 2 量体量を示す。SP-N, SP-U の 2 量体量は, SP 無添加配合 NON-SP に対して材齢 7, 28 日ともに同程度となった。SF 添加配合 SF10-SP, SF10-F, SF20-SP, SF20-F の 2 量体量は, 材齢 7 日ですべての配合において SF 無添加配合 SP-U に対して 2~5%程度増加した。材齢 28 日は, SP-U に対して SF10-SP, SF10-F では約 5%, SF20-SP, SF20-F では約 8%減少し材齢 7 日から 28 日にかけての増加はわずかであった。以上から, SF 無添加配合 SP-U の 2 量体量は, 材齢 28 日において SF 添加配合 SF10-SP, SF10-F, SF20-SP, SF20-F を上回ったが, 前項で述べた SP-U の

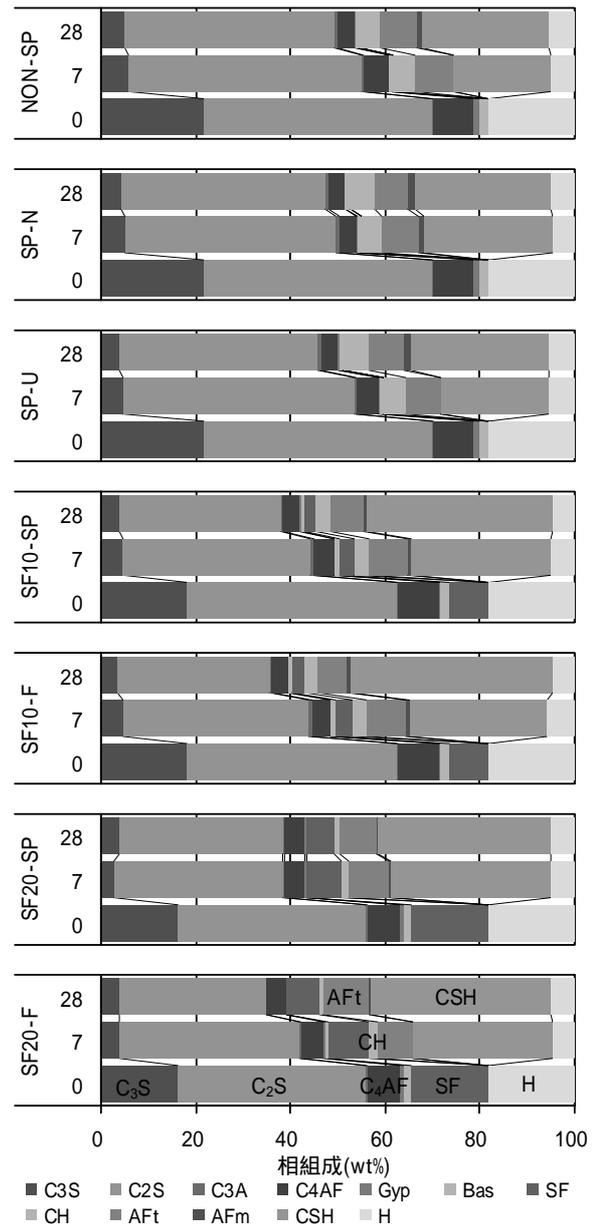


図 - 9 セメントペーストの相組成

CSH 量は, SF10-F に対しては 13%少ない。このことから, ケイ酸鎖鎖長構造と CSH 量との相関については今後の検討課題であると考えられる。

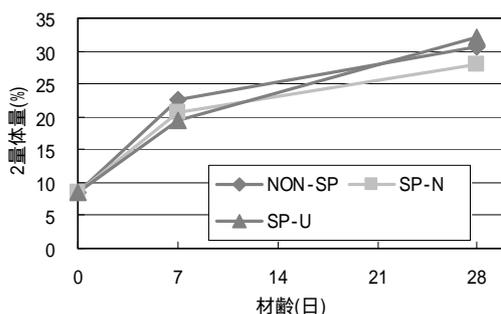


図 - 10 2 量体量(SF 無添加配合)

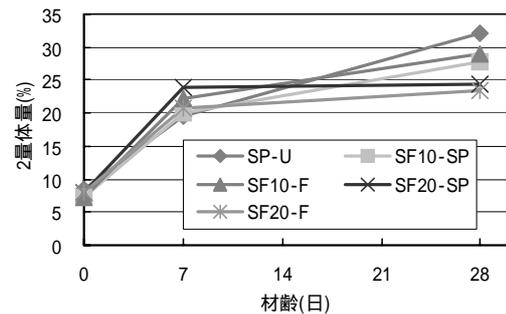


図 - 11 2 量体量(SF 添加配合)

4. まとめ

本研究では、高強度セメント硬化体に汎用 SP(SP-N)、超高強度用 SP(SP-U)を使用し、SF を添加した際の硬化体性状および水和物の分析を行なった結果、以下の知見が得られた。

- (1) 圧縮強度は、SP-U は、材齢 3, 7 日で SP-N に対して 2~3%低下したが、28 日では約 7%増加した。SF 添加配合で SP-U と同じ SP 添加量の配合は、材齢 3, 7 日で SP-U と同等であったが、材齢 28 日では SF 添加量の増加にともない SP-U 以下となった。フロー調整配合は、SP-U に対して材齢 3 日で SF 添加量の増加にともない若干低下したが、28 日ではほぼ同等となった。
- (2) 空隙構造は、SP-U と SP-N を使用した場合、各材齢で空隙ピーク値は変化しなかった。SF を添加した場合は、マイクロファイラー効果とポゾラン反応の効果により各材齢で SF 無添加配合に対して空隙ピーク値が微細側にシフトした。
- (3) CH 生成量は、SP-U と SP-N では、大きな相違は認められなかった。SF を添加した場合は、SF のポゾラン反応による CH の消費により CH 量は減少した。また、SF 添加量が増加するとその傾向は顕著となった。
- (4) C_3S の反応率は、SP の種類、SF 添加にかかわらず材齢 7 日で 70~80%に達し、以後水和反応は緩慢になった。 C_2S の反応率は、SF を添加した場合、反応が進行し易くなり材齢 28 日での反応率は 22~27%となり SF 無添加と比較して 10%以上高くなった。SF の反応率は、SF 添加率が 10%, 20%ともに材齢 7 日で 45~60%, 材齢 28 日で 60~70%に達した。SF 添加率 10%は、SF 添加率 20%に対して約 10%高くなった。
- (5) CSH の生成量は、SP-U と SP-N を使用した場合、SP 無添加に対して材齢 7 日で約 5%増加し、材齢 28 日で同等となった。SF を添加した場合、SF 無添加に対して材齢 28 日では、SF 添加率 10%は 10~13%, 添加率 20%は 7~9%増加した。
- (6) CSH のケイ酸鎖鎖長の 2 量体量は、SP の種類により影響を受けなかった。SF を添加した場合は、材齢 7 日で SF 無添加配合 SP-U に対して約 5%上回ったが、材齢 28 日では約 8%下回った。

以上の結果から、CSH の生成に対する高性能減水剤の種類による影響は少なく、シリカフュームの添加量は水和反応の観点から考察すると 10wt%が最適であることが確認された。

今後の課題として、高強度コンクリートの評価を行うにあたり、材齢 28 日以降の長期材齢での評価を今後の検討課題と考える。

参考文献

- 1) 小泉公志郎, 梅村靖弘, 露木尚光: 水和セメントのケイ酸構造に及ぼす化学混和剤の影響, セメント・コンクリート論文集, vol.60, pp.25-31, 2006.
- 2) 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.
- 3) 大池武, 中根淳, 喜田大三, 斉藤祐司: シリカフューム混入ペーストの高温履歴による強度発現性と微細構造に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.237-240, 1990.
- 4) 浅賀喜与志ほか: セメント 石英系水熱反応における未反応石英の定量, 窯業協会誌, Vol.90, pp.397-400, 1982.
- 5) 星野清一, 山田一夫, 平尾宙, 山下弘樹: 石灰石微粉末を添加したセメントの X 線回折/リートベルト法による水和反応解析と強度発現機構に関する検討, セメント・コンクリート論文集, vol.60, pp.47-54, 2006.
- 6) P. Stutzman and S. Leigh: Phase Composition Analysis of the NIST Reference Clinker by Optical Microscopy and X-ray Powder Diffraction, NIST Technical Note 1441, 2002.
- 7) 三好徹志, 三井健郎, 米澤敏男, 木之下光男, 飯田昌宏: F_c100N/mm^2 以上の超高強度コンクリート用高性能減水剤に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.899-900, 2000.
- 8) 河上浩司, 西本好克, 松田拓: 高強度セメント硬化体の強度発現と微細構造に関する実験研究, 三井住友建設技術研究所報告, 第 3 号, pp.185-190, 2005
- 9) 鶴澤正美, 下山善秀, 越川茂雄: SF 混合セメントの各種養生における水和反応の違いと RPC の超高強度発現メカニズムの推定, 材料, Vol.55, No.1, pp.114-121, 2006.
- 10) 五十嵐豪, 丸山一平, 高松伸之, 山田一夫: 高温履歴を受けるセメント硬化体中の普通ポルトランドセメントの水和反応と硬化体の物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.715-720, 2009.
- 11) 佐川孝広, 若杉伸一, 桂修, 関口岳彦: 水和物の析出空間を考慮したセメント鉱物の水和反応モデル, 第 61 回セメント技術大会講演要旨, pp.76-77, 2007.
- 12) 野崎隆人, 山田一夫, 河野克哉, 丸山一平: シリカフューム混合セメントの XRD/リートベルト法による解析, 第 63 回セメント技術大会講演要旨 pp.30-31, 2009.