

[1009] シリカフュームを混入した高強度コンクリート用材料の基礎性状

正会員 ○ 三 浦 律 彦 (大林組技術研究所)
 正会員 十 河 茂 幸 (大林組技術研究所)
 正会員 青 木 茂 (大林組技術研究所)
 正会員 入 矢 桂史郎 (大林組土木技術部)

1. ま え が き

高強度あるいは高耐久性コンクリート用の混和材料として、産業副産物であるシリカフューム（以下SFと略）の適用が有効であるとされている。SFは、平均粒子径がセメントの40分の1程度以下と大変細かく、また、主成分としてSiO₂を80%程度以上含むため、フライアッシュなどに比べて活性が高いなどの特徴がある。SFのこのような特徴を生かした多方面への適用性の検討は10年以上前から進められているが、特に最近ではコンクリート構造物の耐久性向上技術の開発と相まって各種の研究が盛んに行われている。筆者らも、高強度用、高耐久性あるいは高分離抵抗性の材料としてSFの用途開発を進めているが、この報告は高強度モルタル、高強度コンクリート、海洋コンクリートなどへの適用性を検討する目的で行った実験結果の概要について示すものである。

2. 実 験 概 要

2.1. 実 験 シ リ ーズ

本研究は、以下に示す2つのシリーズの実験から成っている。

- (1) 高強度モルタルへの適用性に関する検討
- (2) 高強度コンクリート、海洋コンクリートなどへの適用性に関する検討

2.2. 試 験 項 目

表-1に各シリーズの実験において対象としたコンクリートの種類および試験項目を示す。このうち、高強度モルタルや高強度軽量コンクリート（絶乾軽量粗骨材を使用、以下高軽コンと略）では、混練方法の違いの影響についても検討を行なった。

表 - 1 . 試 験 項 目 一 覧 表

実験シリーズ	コンクリートの種類 (水結合材比)	試 験 項 目			
		流動性	その他のフレッシュ性状	硬化性状	その他の試験
1) 高強度モルタルへの適用性	モルタル (30%)	①フロー試験 (JIS R 5201)	①加圧ブリージング率 ②単位容積重量	①圧縮強度 (φ5×10cm) ②単位体積重量 (同上)	—
2) 高強度コンクリート・海洋コンクリートへの適用性	普通コンクリート (50~55%)	①スランプ試験 (JIS A 1101)	①空気量	①圧縮強度 (φ10×20cm)	①海洋暴露試験 圧縮強度 動弾性係数 超音波伝播速度
	高強度コンクリート (30%)	②スプレッド (DIN 1048)	②加圧ブリージング率	②静弾性係数 (同上)	②中性化促進試験
	高軽コン (30%)	③充てん性試験			①クリープ ②乾燥収縮

2.3. 使用材料および配合

実験に使用した材料の種類および性状を表-2に示す。このうち普通コンクリート用の粗骨材は、最大寸法20mm (Gc₁) と15mmの碎石 (Gc₂ : 暴露試験用) を、また高軽コン用には絶乾品の人工軽量粗骨材 (G_g : 最大寸法15mm) を用いた。SFは国内産のもの (SiO₂ 92.6%) を使用し、比較のために高炉スラグ微粉末 (Sgと略: 比表面積6,200cm²/g) も使用した。

高強度モルタルの配合を表-3に示す。混和剤はD配合のみ高性能減水剤を使用し他の配合は無使用である。SFはセメントの内割混入とし、添加量は10, 20%とした。

コンクリートの配合を表-4に示す。混和剤は、普通コンクリートではAE減水剤 (WR) 高強度コンクリート、高軽コンでは高性能減水剤 (SP) と流動化剤 (FL) (どちらもスランプロス低減型) を用いた。SF, Sgはセメントの内割10, 20%添加を標準としたが、海洋暴露試験では内割15%添加、高軽コンでは外割10%添加とした。

表-2. 使用材料とその特性の概要

種類	略号	名称	銘柄、産地	比重	性状・成分
セメント	C	C ₁ C ₂	普通ポルトランド	C社	3.18 比表面積 (ブレン) 3,220 cm ² /g
				N社	3.15 比表面積 3,230 cm ² /g
細骨材	S	山砂	木更津	2.60	吸水率1.58%, FM 2.75
粗骨材	G	Gc ₁	碎石	青梅	2.64 Gmax20mm, 吸水率0.59%, FM 7.88
		Gc ₂	碎石	青梅	2.66 Gmax15mm, 吸水率0.79%, FM 6.14
		G _g	人工軽量骨材	M社	1.28 造粒型絶乾品, Gmax15mm, FM 6.41
混和材	Ad	SF	シリカフェューム	NJ社	2.25 平均粒径 0.36 μm, SiO ₂ 92.6%
		Sg	高炉スラグ微粉末	DC社	2.91 比表面積 6,200 cm ² /g, CaO 42.5 %
混和剤	Cb	WR	AE減水剤	P社	— リグニン系・ポリオール系 (標準形)
		SP	高性能減水剤	SF社	1.15 リグニン系・ナフタリン系 (遅延形)
		FL	流動化剤	SF社	1.14 リグニン系・ナフタリン系 (遅延形)

2.4. 実験条件

高強度モルタルの混練はホバート式のモルタルミキサーを使用し、一括混練方式sでは全材料投入後3分間、また分割混練方式dでは表面水率7%程度に湿った砂とセメントを投入して30秒間、1次水 (W/C+SF=25%) 投入後1分間、さらに残りの2次水 (混和剤を含む) を投入して90秒間の合計3分間とした。練上り温度は23~26℃であった。

加圧ブリーディング試験は土木学会のポンプ施工指針に準じて行い、加圧力は標準の35 kgf/cm²の他に10, 20 kgf/cm²についても行った。圧縮試験用供試体はφ5×h10cmとした。

コンクリートの混練はパン型強制練ミキサーを使用してモルタルの場合と同様な時間行った。練上り温度は18~22℃であった。なお、フレッシュコンクリートの流動性試験の1つとして、高軽コンでは障害物のある

表-3. 高強度モルタルの配合 (設計空気量: 3%)

配合名	混和材料	W/C+SF (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)				
				C	W	S	SF	SP
A	なし	30	1.03	955	287	982	0	0
B	シリカフェューム10%	30	0.96	912	301	871	91	0
C	シリカフェューム20%	30	0.88	874	315	770	175	0
D	シリカフェューム10% +高性能減水剤 1.8 %	30	0.96	912	301	871	91	16.42

表-4. コンクリートの配合

配合	種 類	粗骨材	水結合材比 W/C+SF (%)	S F混入率 SF/C+SF (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			混和剤の種類 および総加量
						W	C	S F	
NA	普 通 コンクリート	G c ₁	5.5	0	4.3	165	C ₂ 300	0	WR 0.25 %
NB			5.5	1.0	4.3	165	C ₂ 270	3.0	WR 0.25 %
NC			5.5	2.0	4.3	165	C ₂ 240	6.0	WR 0.25 %
NA		G c ₂	5.0	0	4.8	166	C ₁ 332	0	WR 0.25 %
NB			5.0	1.5	4.8	166	C ₁ 282	5.0	S P
HA	高 強 度 コンクリート	G c ₁	3.0	0	4.0	150	C ₁ 500	0	S P , F L
HB			3.0	1.0	4.0	150	C ₁ 450	5.0	S P , F L
HC			3.0	2.0	4.0	150	C ₁ 400	10.0	S P , F L
LA	高強度軽量 コンクリート	G _g	3.0	0	3.8	168	C ₂ 580	0	S P , F L
LB			3.0	8.9	3.8	185	C ₂ 580	5.6	S P , F L

容器内への充てん性をその時の打撃回数で判定する試験も行った。

普通コンクリートの海洋暴露試験は静岡県清水港沖合の防波堤で行ったもので¹⁾、干満帯、海上大気中、海中に放置した $\phi 10 \times h 20 \text{ cm}$ の円柱供試体の圧縮強度、動弾性係数、超音波伝播速度の変化を測定した。中性化促進試験は温度 $40 \pm 2^\circ \text{C}$ 、湿度 $40 \pm 5\%$ 、 CO_2 ガス濃度 $10 \pm 0.5\%$ の条件に $\phi 15 \times h 15 \text{ cm}$ 供試体を放置して、30日および60日後に割裂してフェノールフタレイン溶液により中性化深さを求めた。

乾燥収縮試験は $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ 供試体を用いてゲージプラグ法により測定を行なった。また、クリープ試験は $\phi 15 \times h 30 \text{ cm}$ 供試体に油圧載荷装置で 80 kgf/cm^2 の持続応力を作用させ供試体中央に埋め込んだひずみ計で自動計測を行なった。これらの養生条件は材令7日まで標準養生以後 $20 \pm 1^\circ \text{C}$ 、 $65 \pm 5\%$ の恒温恒湿室での気乾養生とし、乾燥収縮試験は材令7日から、クリープ試験は材令28日から1年間試験を継続した。なお、クリープ試験では1年後に除荷してクリープひずみの回復を約2ヶ月間にわたって測定した。

3. 実験結果および考察

3.1. SFを添加した高強度モルタルの基礎性状

図-1～図-4にSFの添加量および混練方法を変えた場合の高強度モルタルのフロー値、単位容積(体積)重量、加圧ブリージング率、圧縮強度の結果を示す。

SFは超微粒子であるため、添加量の増加に伴いモルタルのフロー値は減少する(図-1)。しかしD配合の様に高性能減水剤の併用により十分な流動性が確保できる。また、SFはセメントに比べて比重が小さいため、添加量の増加に伴い単位容積重量は小さくなる。なおSFを添加したモルタルでは分割混練したもの(d)の方が若干空気量が多くなり、一括混練したもの(s)に比べてフロー値は若干増加し、単位容積重量は少し減少した。これは分割混練の方が水量が少ない場合の超微粒子の混練に適しているためと思われる。

モルタルの加圧ブリージング試験結果(図-2)より、SFの添加量がA→B→Cと多くなるのに伴い加圧初期のブリージング率は

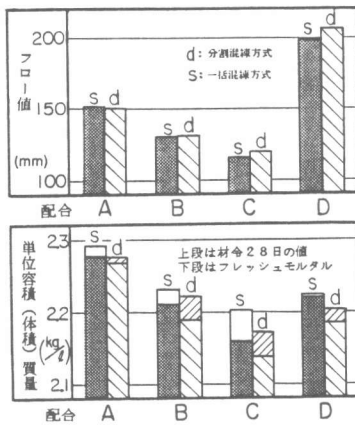


図-1. 高強度モルタルのフロー値
単位体積重量

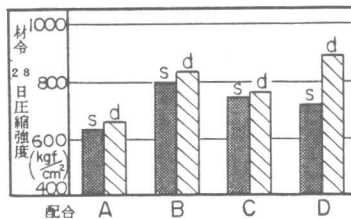


図-4. 高強度モルタルの圧縮強度

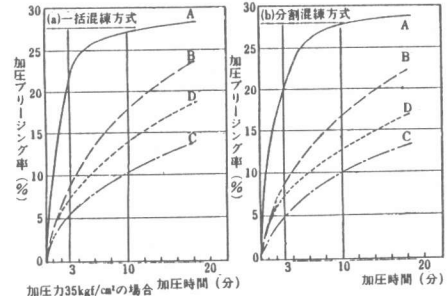


図-2. 高強度モルタルの加圧ブリージング

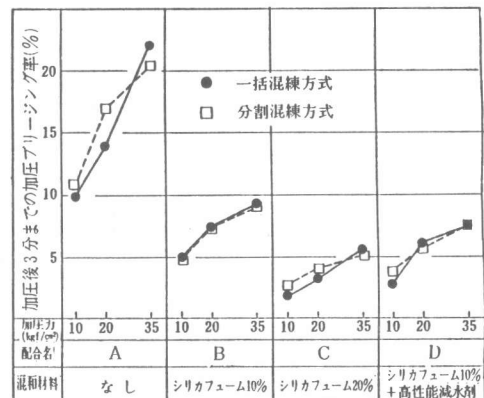


図-3. モルタルの3分間加圧ブリージング率

著しく少なくなることが判る。加圧ブリージング試験における加圧初期のブリージング率はモルタルの保水性（加圧下での分離抵抗性）を示す指標と判断できるが、例えば加圧後3分までの加圧ブリージングは、SF10%添加ではプレーンの約半分に、また20%添加では約1/4にまで減少した（図-3）。なお、SFと高性能減水剤を併用したD配合では十分な流動性が確保されるとともに、高性能減水剤の粒子分散作用により保水性もさらに改善される。

いずれの配合のものも分割混練による保水性の改善効果はほとんど認められなかったが、これは水結合材比が30%と低く、単位水量が著しく少なかったためと思われる。

SFを添加したモルタルの圧縮強度は添加量10%のもので最も高くなり、分割混練したものの方が若干高くなる傾向がある（図-4）。SFと高性能減水剤を併用したD配合で分割混練したもの（d）が最も強度増が大きく、プレーンに比べて200 kgf/cm²以上も高くなった。

3.3. SFを添加したコンクリートの性状

各種コンクリートのフレッシュ試験結果の一例を表-5に示す。配合および混和剤の使用量が同じコンクリート（NA～NC）では、SFの添加量が増加するに従ってスランプやスプレッドはかなり低下し、空気量も若干減少する。特に、添加量が15～20%程度のものではスランプなどの低下が著しく、作業性を確保するには高性能減水剤の併用が不可欠となる。

SFを添加した普通コンクリートの加圧ブリージング率は、プレーンに比べて4割程度減少し、保水性の改善効果は高強度コンクリートや高軽コンの場合も同様に認められた。

高軽コンの場合の流動性試験結果を図-5に示す。SFを添加したものや分割混練したものの方が流動性や充てん性が改善される傾向が認められる。

表-6は高強度配合のコンクリートの強度発現性状の一例を示したもので、碎石を使用した配合（H）の長期強度ではSFを20%添加したもので1割以上の強度増が得られた。高軽コン（L）で4～5%程度の強度増しか得られなかったのは軽量コンクリートの強度の限界域に近いためと思われる。

図-6に各種コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。SFを添加したものは単位体積重量が軽くなるため静弾性係数はプレーンより少し小さく

表-5. 各種コンクリートのフレッシュ試験結果

	スランプ (cm)	スプレッド (cm)	Air (%)	(3分間)加圧ブリー ジグ率(%)
NA	16.5	53.5	4.6	32.2
NB	10.0	43.5	4.5	—
NC	3.5	34.3	4.0	20.1
HA	11.0	—	5.1	—
NB	10.5	—	4.1	—
HA	13.0	42.0	2.8	12.8
HC	12.5	36.8	2.0	3.4
LA	21.0	54.0	3.7	4.4
LB	20.5	51.0	3.4	0

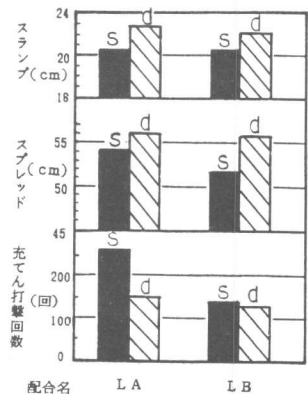


図-5. SFを添加した高軽コンの流動性状

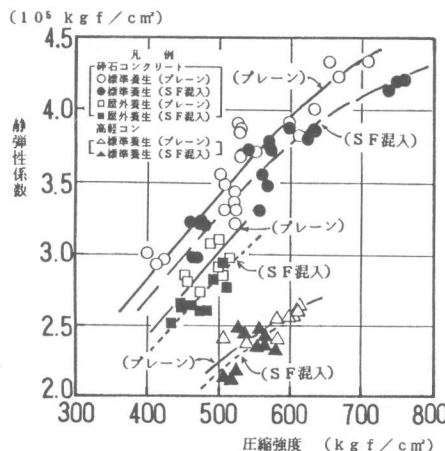


図-6. 各種コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係

表-6. 高強度コンクリートの圧縮強度

配合	圧縮強度 (kgf/cm ²)			
	7日	28日	56日	91日
HA	527	614	675	713
HC	547	633	748	795
LA	466	553	576	604
LB	519	551	597	636

なり、減少の程度は高強度になるほど著しくなる傾向がある。屋外養生したものは乾燥の影響を受けるため静弾性係数はさらに小さくなるが、SFを添加したものはその影響がやや大きくなるようである。

表-7、図-7に高軽コンの乾燥収縮試験結果を示す。乾燥材令1ヶ月まではSFを添加したものの方が重量損失率、長さ変化率ともプレーンよりやや大きい、長期材令では逆に1割程度小さくなった。なお、同じ単位ペースト量の高強度コンクリート(HA)と比べると、SFを添加した配合(LB)の収縮ひずみは7割程度と少なくなっている。

図-8に高軽コンのクリープ試験結果を示す。SFを添加した配合(LB)はプレーンに比べてクリープ係数が少し小さくなっているが、これは静弾性係数が小さくなったため弾性ひずみも小さくなったためで、実質的には、SF添加によりクリープ性状はほとんど変わらないと判断できる。

図-9に海洋環境に暴露した普通コンクリート供試体($\phi 10 \times h 20 \text{cm}$)の動弾性係数、超音波伝播速度の変化を、標準養生した供試体に対する低下量で示す。標準養生した供試体はSF添加の有無によらずほぼ同様な値を示したが、海洋環境に暴露した供試体ではどの環境条件のものもSFを添加した配合の方が低下量が若干大きくなった。SF添加の有無により、暴露開始時から既に低下量に差があることから、初期材令時の湿潤養生がやや不十分であったことがコンクリートの物性の変化に何らかの影響を及ぼしていると思われる。海上大気中に暴露したもの(□, ■)では、材令とともに低下量は少しずつ大きくなって乾燥の影響が認められるが、その傾向はSFを添加した配合(■)の方がやや大きい。なお、海水中に暴露したものではいずれも回復の傾向が見られる。

表-7. 乾燥収縮試験における供試体の重量損失率

配合	重量損失率 (%)						
	7 日	14 日	28 日	3 ヶ月	6 ヶ月	9 ヶ月	1 年
LA	0.70	0.85	1.06	1.34	1.44	1.55	1.64
LB	0.79	0.94	1.09	1.29	1.35	1.43	1.48
HA	0.56	0.69	0.89	1.12	1.20	1.32	1.38

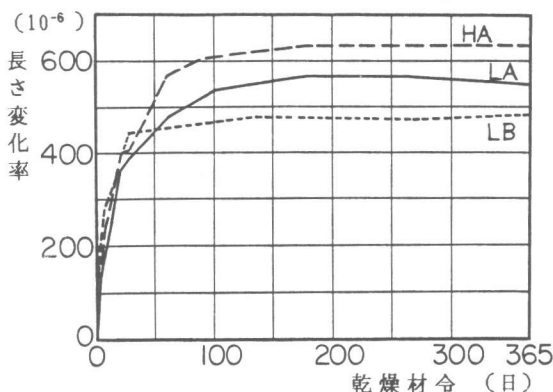


図-7. 高軽コンの長さ変化率の経時変化

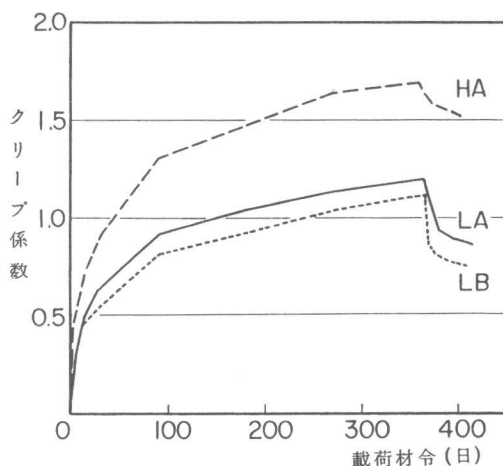


図-8. 高軽コンのクリープ係数の経時変化

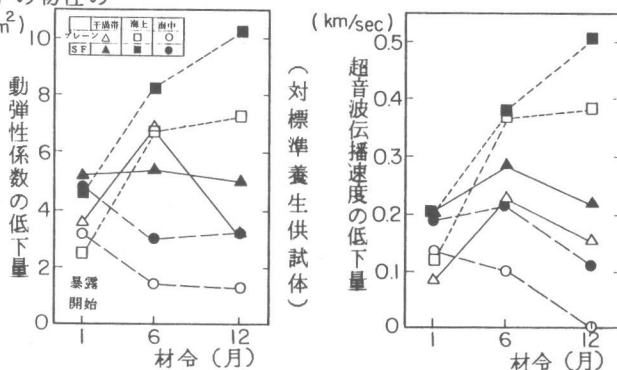


図-9. 海洋暴露供試体の動弾性係数、超音波伝播速度の低下量

なお、圧縮強度ではSF添加の有無の影響はあまり認められなかったため、ここでは省略した。

普通コンクリートの中性化促進試験の結果を図-10に示す。スラグ微粉末を添加したものはその添加量によらずプレーンとほとんど変らなかったが、SFを添加したものは添加量の増加に伴い中性化深く進行する傾向が認められた。これは、SFを添加することによりコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が反応によって消失し、その結果pHが若干低下したことや、湿潤養生がやや不十分でコンクリートの微細構造がややポーラスになったことなどが影響していると思われる。

図-9、図-10の結果から明らかなように、SFを添加したコンクリートでは初期材令におけるコンクリートの湿潤養生が不十分だと品質改善効果が得られなくなることもあるので、十分注意を要する。

4. ま と め

以上の結果から明らかになったことをまとめると以下になる。

- ①モルタルやコンクリートでは、SFを10~20%添加することにより流動性は著しく低下するので、作業性を確保するには高性能減水剤や流動化剤の併用が必要となる。
- ②SFを10~20%添加することにより、モルタルやコンクリートの保水性は著しく改善されるが、このことはポンプ圧送中の水分の分離が原因となる閉塞の防止に役立つと思われる。
- ③SFを10~20%添加することにより、圧縮強度はモルタルで2~3割、コンクリートで1割以上増加するが、静弾性係数は5%程度減少する。
- ④SFを10~20%添加することにより、コンクリートの乾燥収縮は乾燥初期でやや大きくなるが長期では1割程度減少し、クリープ係数は若干減少した。
- ⑤SFを添加したコンクリートの耐久性に関しては、さらにもう少し詳細な検討が必要と思われるが、本実験の範囲（暴露1年程度）では耐海水性については著しい変化は見られず、中性化速度はSFの添加量に比例して少し大きくなった。
- ⑥SFを添加したコンクリートでは、初期の湿潤養生が品質向上のために重要であり、初期に乾燥を受けると十分な効果が期待できなくなる。

[参考文献]

- 1) 迫田、十河、竹田：海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.125~128，1986

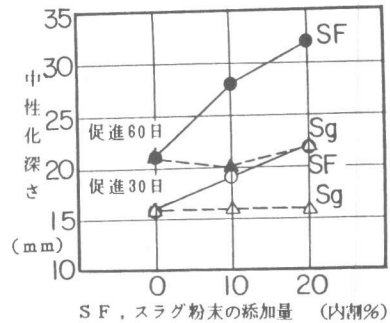


図-10. 普通コンクリートの
中性化促進試験結果