

## [1039] 高強度シリカフュームコンクリートの特性について

正会員 ○ 高木 宣章(立命館大学理工学部)

明石外世樹(立命館大学理工学部)

## 1. はじめに

高強度コンクリートは比較的新しい材料と考えられがちであるが、多年にわたり発達してきたものである。1970年代に高性能減水剤の性能が改善され、1980年代にはシリカフューム(以下、SFと略記)と高性能減水剤の使用により、水結合材比が極めて小さく緻密なSFコンクリートにより超高強度が得られており、このシステムは DSP と呼ばれている<sup>1)</sup>。Bache は、最大寸法 10mm、4mm のか焼ボーキサイト骨材を使用した SF コンクリートとモルタルで各々 2175、2683 kgf/cm<sup>2</sup> の圧縮強度を得ている<sup>1)</sup>。T.A.Burge は、石英質骨材を使用した水セメント比 23%以下の SF コンクリートで、材令 1 日で 1000 kgf/cm<sup>2</sup> (立方体強度)、材令 28 日で 1400 kgf/cm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度を得ている<sup>2)</sup>。コンクリートを高強度化するには、結合材の改善、結合材と骨材の界面特性の改善、骨材の選定などが必要である。SF コンクリートは、その内部組織の緻密さにより母材強度が増加するので、圧縮強度 1000 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の超高強度を得るために高強度で堅硬な骨材を使用し、コンクリート中への SF の分散を良好にすることが大切である。

本研究は、粗骨材の種類が超高強度 SF コンクリートの圧縮強度、静・動弾性係数をはじめとする各種特性におよぼす影響を実験的に検討したものである。

## 2. 実験概要

実験要因および使用材料の性質を各々表 1, 2 に示す。粗骨材がコンクリートの諸特性に及ぼす影響を調べるために、普通強度の高槻産硬質砂岩碎石、高強度の段戸産硅石および高温焼成して高密度、高強度化した中国産か焼ボーキサイトの 3種類の粗骨材を使用した。

コンクリートの示方配合を表 3 に示す。単位セメント量は SF=0% 時を 600 kg/m<sup>3</sup> とした。単位水量は、高槻碎石と段戸硅石シリーズ SF=20%(内割、外割)時を SF スラリーと高性能減水剤に含まれる水のみとし、SF=0% は内割と同じに、か焼ボーキサイトシリーズは高槻碎石と段戸硅石シリーズと同じ

表 1 実験要因

粗骨材 の種類	高槻産硬質砂岩 段戸産硅石 中国産か焼ボーキサイト
シリカフューム量	0%, 内割20%, 外割20%
養生方法	標準水中養生、促進養生

表 2 使用材料の性質

セメント	普通ポルトランドセメント、比重 3.16
シリカフューム	固形分50%の市販スラリー(比重 1.34) SiO <sub>2</sub> =94.0%，比表面積 20m <sup>2</sup> /g 平均粒径 0.15 μm
細骨材	野洲川産川砂、比重 2.60, FM=2.43 中国産か焼ボーキサイト、比重 3.22, FM=2.74
粗骨材	高槻産硬質砂岩、比重 2.69, MS=13mm 段戸産硅石、比重 2.61, MS=13mm 中国産か焼ボーキサイト、比重 3.16, MS=8mm
高性能 減水剤	β-ナフタリンカルボマツル化合物ナトリウム塩 比重 1.21, 固形分 41.7%

表 3 コンクリートの示方配合

粗骨材 の種類	SF量 (%)	W/(C+SF) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					S.P. (%)	Slump (cm)	Air (%)
				W	C	SF	S	G			
高槻産 硬質砂岩	0	22.9	30	137.5	600	0	495	1194	12.5	10.8	1.1
	内割20	22.9	30	137.5	480	120	487	1175	5.0	12.6	0.5
	外割20	18.6	30	134.0	600	120	461	1113	3.3	11.4	1.4
段戸産 硅石	0	22.9	30	137.5	600	0	495	1158	12.5	9.6	1.4
	内割20	22.9	30	137.5	480	120	487	1140	5.0	11.6	1.0
	外割20	18.6	30	134.0	600	120	461	1080	3.3	13.0	1.3
か焼ボーキサイト	0	22.9	30	137.5	600	0	618	1416	8.0	9.7	1.8
	内割20	22.9	30	137.5	480	120	606	1387	3.0	12.4	2.0
	外割20	18.6	30	134.0	600	120	586	1342	2.5	10.7	2.1

注) S.P. : 高性能減水剤 (C+SF) 重量に対する溶液重量

SF : シリカフューム(固形分重量)

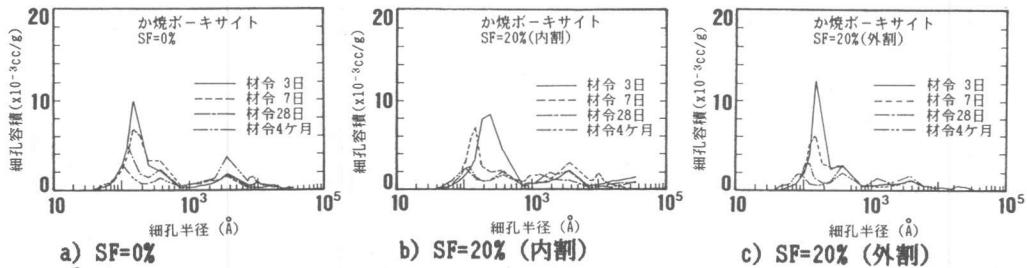


図 1 細孔径分布の経時変化（細骨材：か焼ボーキサイト）

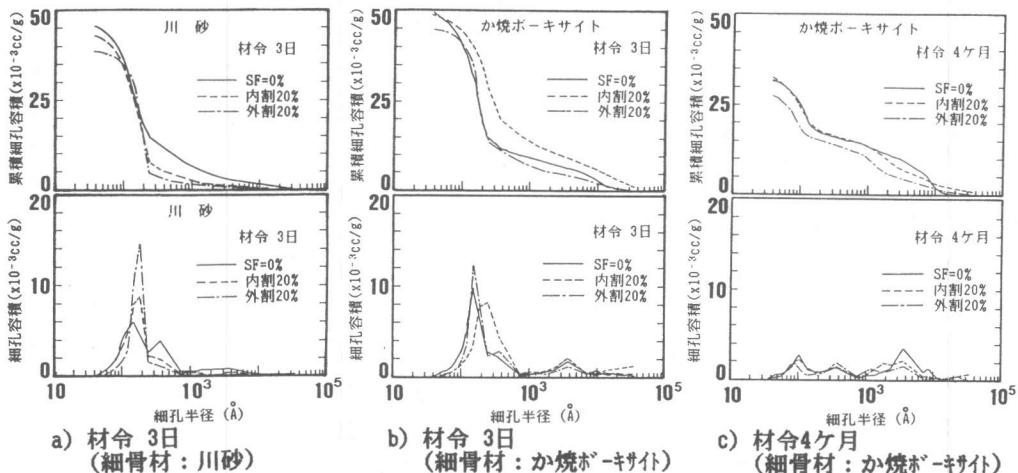


図 2 細孔径分布へのシリカフュームの影響

にした。SFは市販スラリーを使用し、セメント重量に対して、0%とSFのポゾラン反応により  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  がほとんど消失すると考えられる<sup>3)</sup> 20%(内割、外割)の3水準とした。か焼ボーキサイトシリーズは、細・粗骨材ともか焼ボーキサイトを、その他のシリーズは細骨材に川砂を使用した。か焼ボーキサイトの最大骨材寸法は8mm、他の粗骨材は13mmである。ワーカビリチーは高性能減水剤により調整し、スランプを9~13cmとした。供試体(Φ7.5×15cm)は所定材令まで標準水中養生を行なった後、圧縮強度、静・動弾性係数および音速の測定を行なった。か焼ボーキサイトのシリーズは、材令3日までの標準水中養生後、4日間温水促進養生(60°C)を行なうシリーズも合せて実験した。静弾性係数は、初期接線ヤング係数であり、音速は受振波の波形観察により測定した。細孔径分布は、ウェットスクリーニングしたモルタルの小片をアセトン処理した後炉乾燥(60°C)し、圧力制御で水銀圧入試験をおこなうことにより求めた。

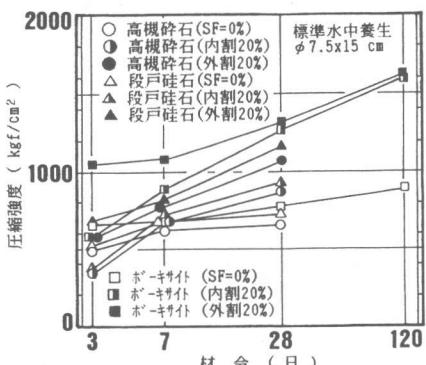
### 3. 実験結果および考察

コンクリートにSFを混入すると、内割・外割とも同一のワーカビリチーを得るのに必要な高性能減水剤量は通常増加する<sup>4)</sup>が、水結合材比が20%前後と非常に小さいコンクリートでは、SFの混入により同一ワーカビリチーを得るのに必要な高性能減水剤量は、例えば高橢碎石と段戸珪石シリーズではSF=0%時の12.5%からSF=20%の内割で5.0%、外割で3.3%とかなり減少した。これは、SFの形状が球形であることにより生じるボールベアリング作用、更には多量の高性能減水剤を使用しSFの分散が良好である時には、SFの充填作用により見かけ上の単位水量が増加することが原因と考えられる<sup>3)</sup>。

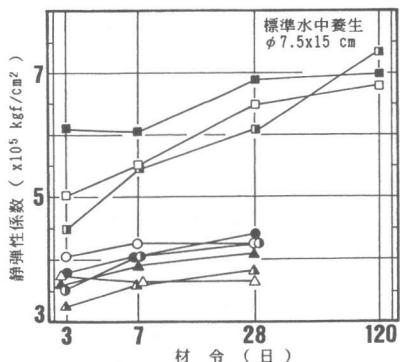
細孔径分布の経時変化の一例を図1に、細孔径分布へのSFの影響の一例を図2に示す。材

令とともに累積細孔容積は減少し、最大細孔容積に対応する細孔半径は小さくなり、内部組織は緻密になる(図 1)。水結合材比の大きいモルタルでは SF の混入による内部組織の緻密化が細孔径分布に顯著にあらわれる<sup>5)</sup>が、水結合材比が 20% 前後とかなり小さいと材令 3 日ではか焼ボーキサイト内割 20% を除き SF の充填作用がうかがえるが(図 2-a, b)、長期材令になると SF の混入効果が細孔径分布にあらわれていない(図 2-c)。

圧縮強度および弾性係数の経時変化を図 3 に示す。コンクリートの圧縮強度は各材令とも、粗骨材にか焼ボーキサイト、段戸硅石、高橈碎石を使用した順に大きい。SF を混入するとモルタル母材強度が増加するので、コンクリートの圧縮強度は骨材強度および骨材とモルタル母材間の付着特性の影響を大きく受ける。細・粗骨材にか焼ボーキサイトを使用したシリーズは骨材が高強度であること、最大寸法が他の粗骨材に比較して幾分小さいために付着特性が良好であること、および細骨材にか焼ボーキサイトを使用しているのでモルタル母材強度が大きいために、他のシリーズに比較して圧縮強度はかなり大きく、材令 4 ヶ月 SF=0% で 890 kgf/cm<sup>2</sup>、SF=20% の内割で 1600

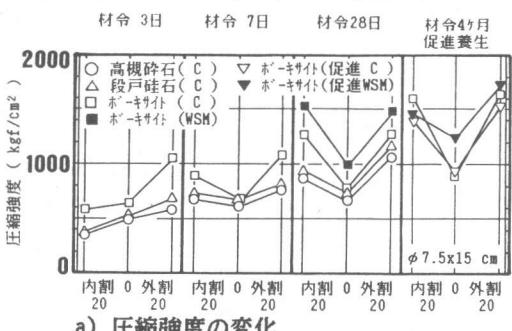


a) 圧縮強度の経時変化

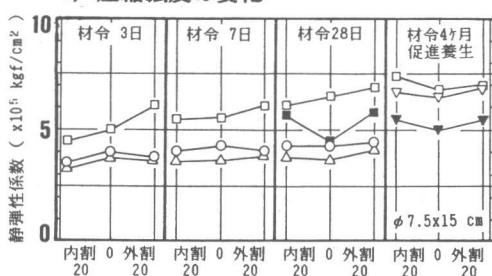


b) 静弾性係数の経時変化

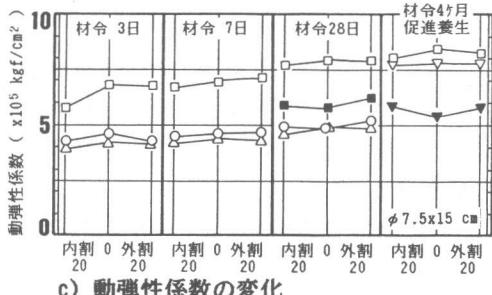
図 3 圧縮強度および弾性係数の経時変化



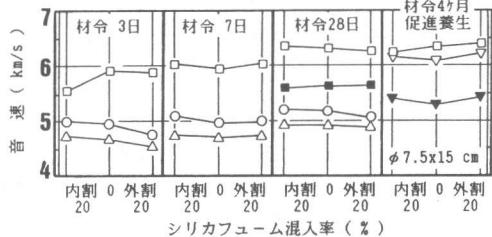
a) 圧縮強度の変化



b) 静弾性係数の変化



c) 動弾性係数の変化



d) 音速の変化

図 4 圧縮強度、弾性係数および音速の変化  
注) C: コンクリート WSM: ウエットスクリーニングモルタル

$\text{kgf/cm}^2$ 、外割で  $1640 \text{ kgf/cm}^2$  と SF の混入による強度増加が著しい。

静弾性係数は、か焼ボーキサイトシリーズの材令 4ヶ月において SF=0% で  $6.82 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、SF=20% の内割で  $7.34 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、外割で  $6.98 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  と大きいが、圧縮強度に比較して SF の混入による増加は少ない。高槻碎石と段戸珪石シリーズは SF の混入により材令 28 日で圧縮強度が約  $1000 \text{ kgf/cm}^2$  であるにもかかわらず、静弾性係数はか焼ボーキサイトに比較してかなり小さい。

圧縮強度、静・動弾性係数および音速の変化を図 4 に示す。材令 7 日で内割 20% の圧縮強度は SF=0% より幾分大きくなるので、SF のポゾラン反応は比較的早い材令(材令 3 日以降)からはじまっていると考えられる。SF の混入による圧縮強度の顕著な増加に比較して、静・動弾性係数および音速は、SF=0% 時と同程度か幾分小さい傾向にあり、SF がこれらに及ぼす影響が小さい。

か焼ボーキサイトのシリーズを温水促進養生すると、コンクリートの圧縮強度は材令 4ヶ月より幾分小さいが SF=20% の内割で  $1390 \text{ kgf/cm}^2$ 、外割で  $1540 \text{ kgf/cm}^2$ 、ウエットスクリーニングモルタルでは SF=20% の内割で  $1460 \text{ kgf/cm}^2$ 、外割で  $1720 \text{ kgf/cm}^2$  の強度を示した。

静弾性係数と圧縮強度の関係を図 5 に示す。静弾性係数は SF の混入による圧縮強度の増加ほど大きくならない。同一強度では、SF コンクリートの弾性係数は SF=0% 時より小さい。

#### 4. 結論

- 1) 水結合材比が 20% 前後と非常に小さいコンクリートでは、SF の混入により同一ワーカビリチーを得るのに必要な高性能減水剤量はかなり減少した。これは、SF のポールベアリング作用と充填作用によるものと考えられる。
- 2) 圧縮強度  $1000 \text{ kgf/cm}^2$  以上の超高強度コンクリートは、骨材の影響を大きく受ける。細・粗骨材にか焼ボーキサイトを使用した外割 20% のシリカフュームコンクリートは、材令 4ヶ月において  $1640 \text{ kgf/cm}^2$ 、また温水促進養生したウエットスクリーニングモルタルは  $1720 \text{ kgf/cm}^2$  の圧縮強度を示した。

最後に、本講演会申込後に明石外世樹先生が急逝されました。謹んでご冥福をお祈り致します。  
参考文献

- 1) H.H.Bache : Densified Cement/Ultra Fine Particle-Based Materials, Presented at the Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, 1983
- 2) T.A.Burge : 14,000psi in 24hours, Concrete International, Vol.5 No.9, pp.36~41, 1983
- 3) E.J.Sellevold : Condensed Silica Fume in Concrete : A World Review, International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, pp.1~77, 1987
- 4) 高木宣章, 明石外世樹 : シリカフュームを混入したコンクリートの特性について, コンクリート工学年次講演会論文集 No.6, pp.117~120, 1984
- 5) 明石外世樹, 高木宣章, 崔義秀 : シリカフュームコンクリートの緻密性に関する一実験, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, V-20-1~2, 1986

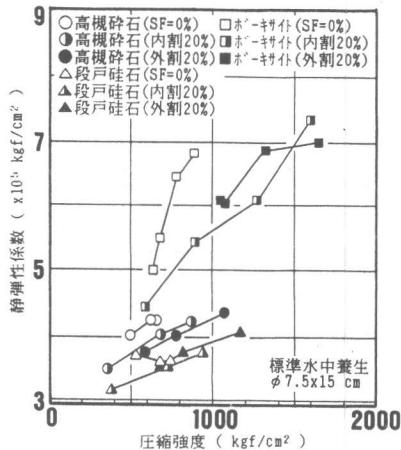


図 5 静弾性係数と圧縮強度の関係