

[30] シリカフェームを混入した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)

正会員 明石外世樹 (立命館大学理工学部)

1. まえがき

硅酸第一鉄の副産物であるシリカフェームをコンクリート用材料として使用する研究は、スカンジナビア諸国(特に、ノルウェー、デンマーク)および北米を中心として1970年代から行なわれている。シリカフェームは、平均粒径が約0.1 μ mと非常に小さく、高性能減水剤と同時使用することにより、コンクリート中の微細な空隙、あるいは、セメントと水和生成物間の不連続粒子径の領域を十分に充填することができる。また、比表面積が約205000 cm^2/g と非常に大きいために、ポゾラン作用が期待できるなどの注目すべき特性がある。シリカフェームをコンクリートに混入使用することにより、非常に緻密なコンクリートをつくることことができる。その結果、諸強度が著しく増加すると同時に、透水性の低下により耐久性が増加する。一定量以上のシリカフェームを混入使用する場合、アルカリ骨材反応を抑制することも知られている。日本においても年間約7万tのシリカフェームが生産されている¹⁾。

シリカフェームを外割20%混入したモルタルの圧縮強度は、標準水中養生(材令91日)の場合、約1100 Kg/cm^2 、オートクレーブ養生すると約1300 Kg/cm^2 であった²⁾。本研究は、実際構造物への適用を考えて、コンクリートにシリカフェームを混入した場合の強度発現について、また、シリカフェームの混入によるコンクリートの緻密さを、反発硬度、超音波伝播速度および動弾性係数を測定することにより、実験検討したものである。

2. 実験概要

実験要因を表-1に、実験に使用したコンクリートの示方配合を表-2に示す。使用材料の性質を表-3に示す。Aシリーズは、普通強度を対象とし、Bシリーズは、高強度を対象とした。シリカフェームは、国内産のものを使用し、混入率は、セメント重量に対して内割と外割でともに20%と30%とした。また、シリカフェームは、粉体のまま練り混ぜた。A・Bシリーズとも標準水中養生とオートクレーブ養生の2種類の養生を行なった。オートクレーブ養生供試体は、材令3日~7日まで標準水中養生を行なった後、オートクレーブ養生を行なった。オートクレーブ養生工程を図-1に示す。

実験要因を表-1に、実験に使用したコンクリートの示方配合を表-2に示す。使用材料の性質を表-3に示す。Aシリーズは、普通強度を対象とし、Bシリーズは、高強度を対象とした。シリカフェームは、国内産のものを使用し、混入率は、セメント重量に対して内割と外割でともに20%と30%とした。また、シリカフェームは、粉体のまま練り混ぜた。A・Bシリーズとも標準水中養生とオートクレーブ養生の2種類の養生を行なった。オートクレーブ養生供試体は、材令3日~7日まで標準水中養生を行なった後、オートクレーブ養生を行なった。オートクレーブ養生工程を図-1に示す。

Aシリーズは、A E減水剤を使用し、目標スランプ7.5±

表-1 実験要因

強 度	普通強度 (Aシリーズ), 高強度 (Bシリーズ)
養生方法	標準水中養生, オートクレーブ養生
シリカフェーム混入率	0%, 内割 (20%, 30%), 外割 (20%, 30%)

表-2 コンクリートの示方配合

シリーズ名	W/(C+S _i) (%)	S/A (%)	単位量 (KG/M ³)						A E減水剤 助剤		高性能減水剤		SL (CM)	AIR (%)
			W	C	S _i	S	G	(CC/M ³)	(%)	(CC/M ³)				
A	A-0	50	42	170	340	0	731	1060	3400	3400	—	—	7.3	4.1
	AI-20	50	42	170	272	68	721	1046	3400	3400	1.25	4250	8.4	3.8
	AI-30	50	42	170	238	102	717	1040	3400	3400	1.75	5950	8.1	4.1
	AO-20	41.7	40	170	340	68	664	1047	4080	4080	1.25	5100	7.7	3.6
	AO-30	38.5	40	170	340	102	649	1022	4420	4420	1.50	6630	7.9	3.7
B	B-0	27.5	33	165	600	0	534	1140	—	—	2.00	12000	7.5	1.5
	BI-20	27.5	33	165	480	100	521	1111	—	—	2.25	13500	7.7	1.4
	BI-30	27.5	33	165	420	180	514	1096	—	—	2.75	16500	7.7	1.6
	BO-20	22.9	30	165	600	120	444	1089	—	—	2.71	19512	9.1	1.6
	BO-30	21.2	30	165	600	180	423	1038	—	—	3.25	25350	7.9	1.8

注) Siはシリカフェームの単位量, AE減水剤は (C+Si) 重量あたり10cc使用
AE助剤は1%溶液

表-3 使用材料の性質

シリカフェーム	比重 2.22, 比表面積 207000 cm^2/g , SiO ₂ = 85.36%
セメント	普通ポルトランドセメント, 比重 3.16, 比表面積 3150 cm^2/g
粗骨材	野洲川産川砂, 比重 2.56, 吸水率 1.96%, F. M. = 2.66
細骨材	高純度硬質砂岩砂石, 比重 2.69, 吸水率 0.70%, M. S. = 2.0mm
A E減水剤	リグニンスルホン酸カルシウム塩, 2.5%溶液
高性能減水剤	β -ナフタリンスルホン酸ホルマリン絡合物のナトリウム塩, 4.2%溶液

1 cm、目標空気量 $4.5 \pm 1\%$ 、シリカフェュームの混入によるスランブ低下は、高性能減水剤（同時添加）で調整した。Bシリーズは、高性能減水剤（同時添加）を使用し、目標スランブは、 $7.5 \pm 1\text{ cm}$ である。

反発硬度は、シュミットハンマーNR-10により20 cm立方供試体で測定した。コンクリート中の超音波伝播速度は、受信波

の波頭での波形観察により測定した。振動子周波数は、54 Kcである。動弾性係数は、ソニック法により測定した。

3. 実験結果および考察

圧縮強度とシリカフェューム混入率の関係を図-2に示す。標準水中養生材令91日（Aシリーズ内割30%、Bシリーズ外割30%）を除くと、シリカフェューム混入率の増加につれて、各シリーズとも圧縮強度は増加する。Bシリーズ・オートクレー

プ養生の外割30%での圧縮強度は、 1110 kg/cm^2 であった。シリカフェュームの混入による強度増加率は、A・Bシリーズとも内割より外割の方が大きい。また、BシリーズよりAシリーズの強度増加率が大きい。例えば、外割30%時の0%時に対する強度増加率は、標準水中養生（材令28日）とオートクレープ養生で各々、Bシリーズの場合、24%と28%であるのに対して、Aシリーズの場合、89%と74%であった。Bシリーズ供試体破断面での粗骨材は、全て破断しており、モルタル母材強度に比較して骨材強度が低いことが予想される。また、シリカフェュームの混入により圧縮強度の変動係数が大きくなった。特に、A・Bシリーズとも、内割20%と外割30%での圧縮強度の変動係数が大きい。これは、シリカフェュームを粉体のまま練り混ぜたため、コンクリート中へのシリカフェュームの分散が不十分であったためと考えられる。故に、シリカフェュームを高性能減水剤と水でスラリー状にして十分に分散させた後、セメントと骨材を投入して練り混ぜることが望ましいと考えられる。

引張強度とシリカフェューム混入率の関係を図-3に示す。Aシリーズの場合、シリカフェュームの混入により、混入率0%時より引張強度は増加するが、内割30%の引張強度は、内割20%のそれより低下した。標準水中養生（材令84日）・外割30%においても同様に低下した。Bシリーズの場合、オートクレープ養生したものは、シリカフェュームの混入による引張強度の増加は、ほとんどないが、標準水中養生したものは、シリカフェューム混入率の

引張強度とシリカフェューム混入率の関係を図-3に示す。Aシリーズの場合、シリカフェュームの混入により、混入率0%時より引張強度は増加するが、内割30%の引張強度は、内割20%のそれより低下した。標準水中養生（材令84日）・外割30%においても同様に低下した。Bシリーズの場合、オートクレープ養生したものは、シリカフェュームの混入による引張強度の増加は、ほとんどないが、標準水中養生したものは、シリカフェューム混入率の

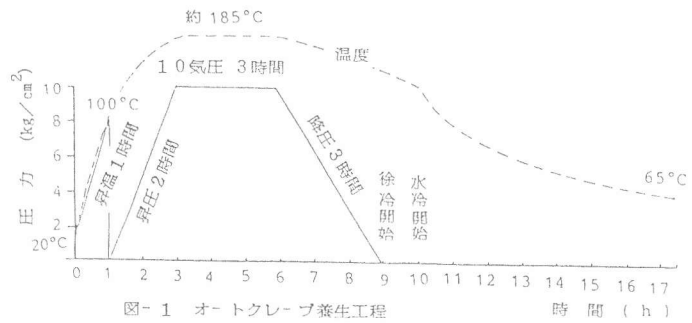


図-1 オートクレープ養生工程

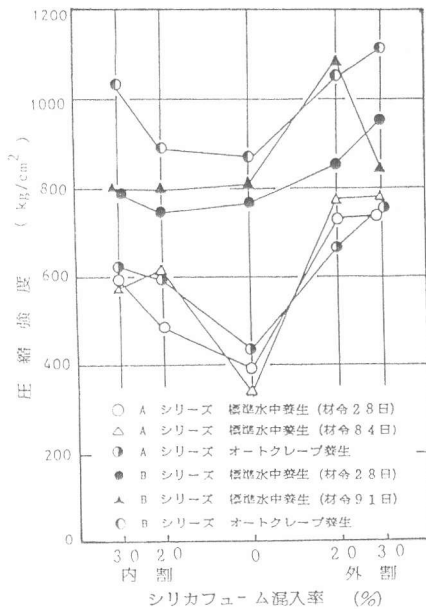


図-2 圧縮強度とシリカフェューム混入率の関係

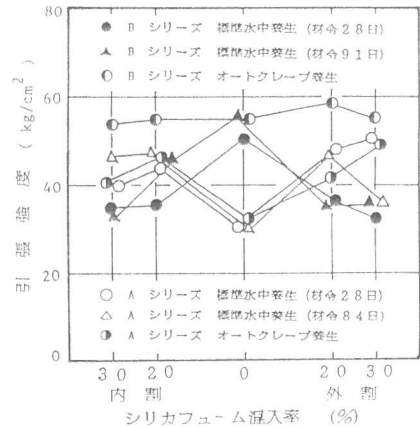


図-3 引張強度とシリカフェューム混入率の関係

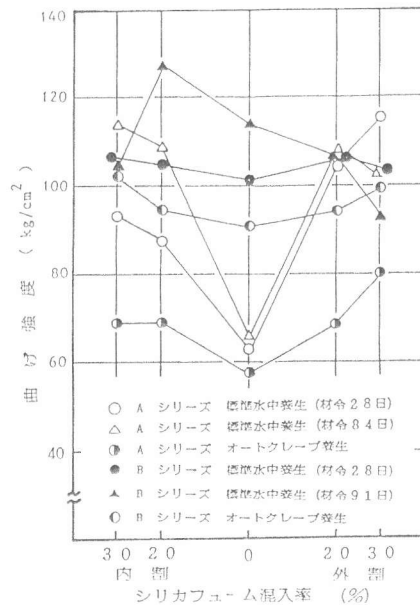


図-4 曲げ強度とシリカフェューム混入率の関係

増加につれて、内割・外割とも引張強度は低下した。この原因については、検討中である。

曲げ強度とシリカフェーム混入率の関係を図-4に示す。Aシリーズの場合、シリカフェーム混入率の増加につれて、混入率0%に対する強度増加率は、オートクレーブ養生したもので20~40%、標準水中養生の材令28日で40~80%、材令84日で55~70%であった。標準水中養生したものの強度増加が著しい。Bシリーズの場合、シリカフェーム混入率の増加につれて、混入率0%に対する強度増加率は、オートクレーブ養生したもので4~12%、標準水中養生の材令28日で2~5%、材令91日では、内割20%を除き強度低下した。Bシリーズは、Aシリーズに比較して強度増加率が小さい。

反発硬度とシリカフェーム混入率の関係を図-5に示す。Aシリーズの場合、シリカフェームの混入により反発硬度は増加するが、シリカフェーム混入率間の差は少ない。また、圧縮強度の増加率に比較すると、反発硬度の増加は小さく圧縮強度との明瞭な相関関係はない。例えば、標準水中養生の材令28日での反発硬度は、シリカフェームの混入により $R=38.3\sim40.0$ （混入率0%に対する増加率20%）であるのに対して、圧縮強度の増加率は、25~90%である。材令84日での反発硬度は、シリカフェームの混入により $R=41.5\sim45.5$ （混入率0%に対する増加率27%）であるのに対して、圧縮強度の増加率は、70~130%である。Bシリーズの場合、オートクレーブ養生を除き、シリカフェームの混入により、圧縮強度が増加するにもかかわらず、反発硬度は、混入率0%時のそれより幾分減少した。

超音波伝播速度とシリカフェーム混入率の関係を図-6に示す。Aシリーズの場合、標準水中養生時の超音波伝播速度は、オートクレーブ養生時のそれより大きい。これは、供試体の含水率が超音波伝播速度に影響を与えているものと考えられる。シリカフェームの混入により、超音波伝播速度は、混入率0%時のそれと同程度か幾分増加する傾向にある。内割・外割とも、シリカフェーム混入率間の差は少ない。Bシリーズの場合、混入率0%時を除くと、養生方法による超音波伝播速度の差は、Aシリーズに比較して小さい。そして、標準水中養生とオートクレーブ養生の内割・外割とも、シリカフェーム混入率の増加につれて、圧縮強度が増加するにもかかわらず、超音波伝

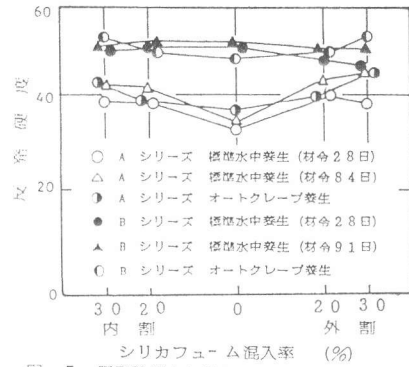


図-5 反発硬度とシリカフェーム混入率の関係

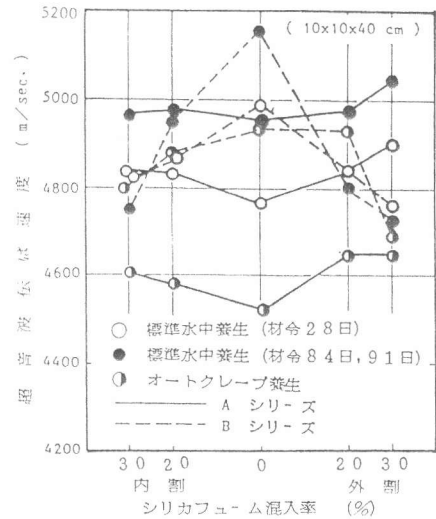


図-6 超音波伝播速度とシリカフェーム混入率の関係

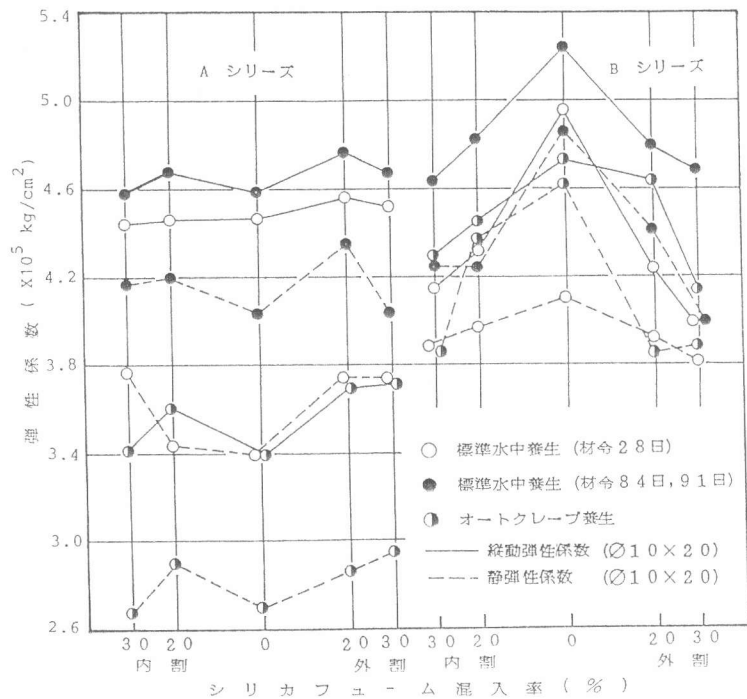


図-7 弾性係数とシリカフェーム混入率の関係

播速度は減少した。

弾性係数とシリカフェーム混入率の関係を図-7に示す。Aシリーズの場合、標準水中養生時の弾性係数は、オートクレープ養生のそれより大きい。また、内割・外割とも、混入率20%での弾性係数は、混入率0%時のそれより増加するが、混入率30%で幾分減少する傾向にある。Bシリーズの場合、内割・外割とも、シリカフェーム混入率の増加につれて、圧縮強度が増加するにもかかわらず、弾性係数は減少した。

AシリーズとBシリーズの圧縮応力～ひずみ曲線を各々、図-8、9に示す。両シリーズとも、シリカフェームの混入により、靱性がかなり大きくなると同時に、応力～ひずみ曲線は、より直線に近づき脆性的となる。

Aシリーズの場合、シリカフェ

ームの混入により、応力～ひずみ曲線の原点における立ち上りは急になる。また、標準水中養生の材令が進むと、応力～ひずみ曲線の初期形状が類似してくる。Bシリーズの場合、シリカフェームの混入により、応力～ひずみ曲線の原点における立ち上りが緩くなる。

4. 結論

- 1) 圧縮強度は、シリカフェーム混入率の増加につれて増加する。強度増加率は、高強度より普通強度を対象としたコンクリートが、かなり大きい。また、内割より外割の強度増加率が大きい。本実験では、シリカフェームを粉体のまま練り混ぜたため、圧縮強度の変動係数が大きくなった。故に、練り混ぜに際しては、シリカフェームは、スラリーとして使用した方が、シリカフェームの分散が十分に行なえと考えられる。
- 2) 引張強度と曲げ強度は、シリカフェームの混入により、普通強度を対象とした場合は、かなり増加するが、高強度を対象とした場合は、圧縮強度の増加率に比較してかなり低く、却って強度が低下するものもある。
- 3) 反発硬度は、シリカフェーム混入率間の差が少ない。故に、シリカフェームの混入によるコンクリート内部の緻密さの程度を反発硬度で評価することはできない。
- 4) コンクリート中の超音波伝播速度、静弾性係数および動弾性係数は、シリカフェームの混入により、高強度を対象としたコンクリートの場合、減少する傾向にある。
- 5) 圧縮応力～ひずみ曲線は、シリカフェームの混入により、より直線に近づき脆性的となる。また、靱性が、かなり大きくなる。

5. 参考文献

- 1) V.M. Malhotra and G.G. Carrette, "Silica Fume Concrete Properties, Application and Limitation" Concrete, international may1983
- 2) 高木、明石、角田, "超微粉末ボラン材料(シリカフェーム)を混入したモルタルの基礎的特性について"セメント技術年報37 昭和58年

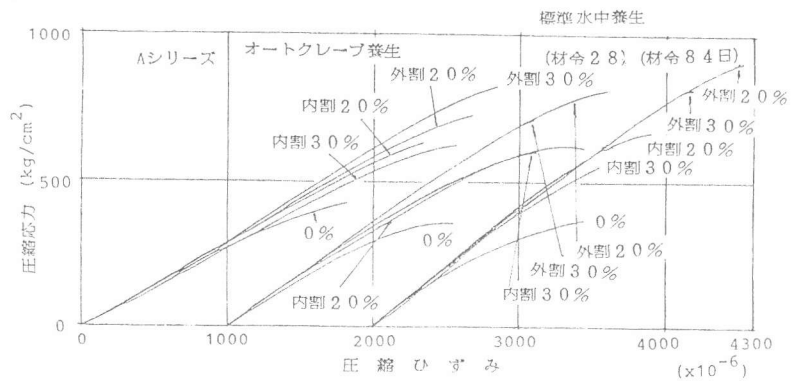


図-8 圧縮応力～ひずみ曲線 (Aシリーズ)

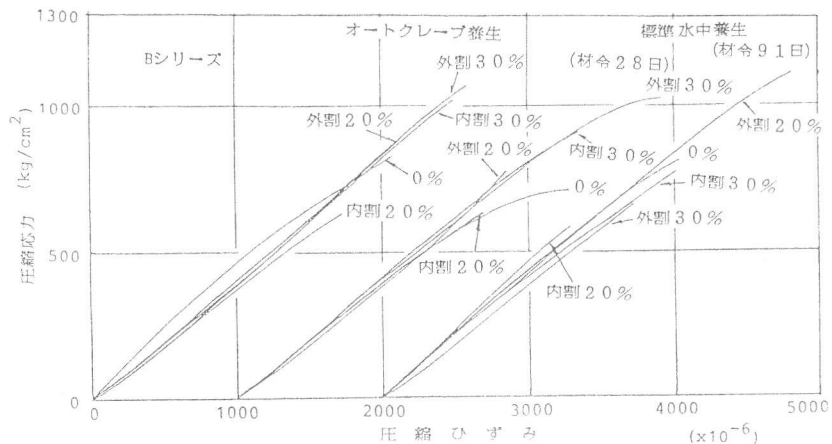


図-9 圧縮応力～ひずみ曲線 (Bシリーズ)