

[52] コンクリートの諸性質に及ぼすシリカフェームの影響

正会員 ○添田 政司 (福岡大学工学部)
 正会員 江本 幸雄 (福岡大学工学部)
 辰本 朋子 (福岡大学工学部)
 正会員 大和 竹史 (福岡大学工学部)

1. まえがき

近年、省資源・省エネルギーのため産業副産物をコンクリートへ積極的に利用する研究が数多く行なわれている。1983年カナダのモンテペロで産業副産物のコンクリートへの利用に関する第1回の国際会議が開催され筆者らの1人もそれに参加した。その中で特に注目されたのは、わが国でまだ研究例のきわめて少ないシリカフェームである。このシリカフェームはフェロシリコンや金属珪素を製造する際に副生されるもので、他の産業副産物と同様に球形の粒子であるが、比表面積はそれらの数十倍から数百倍の超微粉末でSiO₂含有量も80%以上ときわめて高いものである。これをコンクリートへ利用すると、コンクリートの強度、水密性、凍結融解抵抗性が改善されると報告されている。(1)(2)(3) そこで、本研究では産業副産物である国内産シリカフェームを用いてコンクリートの品質向上あるいは経済的配合の選定が可能かを検討するために、シリカフェームの混入率がまだ固まらないコンクリートの諸性状や硬化コンクリートの強度、水密性および凍結融解抵抗性に及ぼす影響を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

(1) 使用材料

セメントはM社製普通ポルトランドセメント(比重3.16)である。骨材には、細骨材として福岡県粕屋産海砂、粗骨材として福岡県久山産角閃岩碎石を使用した。骨材の諸性質を表-1に示す。混和剤としてはシリカフェームを混入したものと低水セメント比の場合にはβナフタリンスルホン酸系の高性能減水剤を使用し、その他の実験ではリグニンスルホン酸塩とポリオール複合体を主成分とする標準型のAE減水剤及び空気量調節のためAE助剤を使用した。シリカフェームは、国内産のものを使用し、その化学成分及び物理的性質を表-2に示す。

表-1 骨材の諸性質

Type of Aggregate		Grading (mm)	Fineness Modulus	Specific Gravity	Water Absorption (%)
Fine Aggregate	Kasuya Sea Sand	< 2.5	2.65	2.50	1.5
Coarse Aggregate	Hisayama Crushed Amphibole	5~20	6.93	2.89	1.1

表-2 シリカフェームの化学成分及び物理的性質

Chemical Compositions (%)							pH	
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Total C	ig. loss		
88.0~91.0	0.2~1.5	0.1~0.6	0.1~0.3	1.0~2.0	0.5~2.0	2.0~3.0	8.1~8.6	
Physical Properties								
Specific Gravity	Blaine's Specific Surface Area (cm ² /g)	Particle Shape	Moisture Content (%)	Particle Size Distribution (%)				
				10μm>	1~10μm	0.5~1μm	0.1~0.5μm	0.1μm<
2.24	26.550	Sphere	0.2 0.6	4.7	4.9	15.5	53.7	21.2

(2) コンクリートの配合および練り混ぜ方法

シリーズIは普通コンクリートを対象とし、シリーズIIは高強度コンクリートを対象とした。又シリーズIIIはAEコンクリートである。目標スランプは各シリーズとも10cm程度で、シリーズIIIの目標空気量は4%である。(表-3参照)シリカフェームの混入率はセメント重量に対して内割で0、20及び30%の3種とした。シリカフェームは練り混ぜ水にあらかじめ溶解し、スラリー状になるまで攪拌し、空練り(60秒、セメント+骨材)→加水(水+シリカフェーム+高性能減水剤)→練り混ぜ(90秒)とした。使用したミキサーは、強制攪拌型(容量50ℓ)である。なお、コンクリートの練り混ぜは1バッチ当たり45ℓとし、2バッチを連続してそれぞれの供試体を作製した。

(3) 供試体の作製および実験方法

圧縮強度試験; 供試体はφ10×20cmの円柱で、JIS A 1108に準じて作製した。養生は、水中養生(10℃、20℃、30℃)と蒸気養生の4種類について行い、水中養生は脱型後、所定の材令(7日、28日、91日)まで10℃、20℃、および30℃のそれぞれの水中で行った。蒸気養生は前養生時間1時間、上昇速度20℃/h、最高温度65℃3時間、下降速度5℃/hで行い、その後、所定の材令まで標準

養生を行った。

細孔径分布測定；試験に用いた試料は養生温度20℃の材令91日における圧縮強度試験終了後の供試体を粉碎し2.5～5mmのモルタル部分を10g程度用いて水銀圧入ポロシメータで行った。

乾燥収縮試験；供試体は10×10×40cmの角柱で、脱型後材令7日まで水中養生を行った後に、恒温恒湿槽内（20℃，RH60%）に設置してコンタクトゲージ法により乾燥収縮量を測定した。

透水試験；供試体はΦ15×30cmの円柱供試体で材令91日まで水中養生し、その後20℃の乾燥炉内で7日間乾燥した後10kg/cm²の水圧を48時間加えて、コンクリートの中への平均浸透深さを求める村田氏⁽⁴⁾の方法にしたがった。

凍結融解試験；供試体は10×10×40cmの角柱で、脱型後材令28日まで水中養生を行った後に、ASTM C-666のA法に準じ1日7～8サイクルの水中凍結融解試験を行った。

硬化コンクリートの空気泡分布；10×10×40cmの角柱の中央部分を切断して、ASTM C-457に準じリニヤトラバース法により測定を行った。

3. 実験結果とその考察

(1) フレッシュコンクリートの諸性状

本実験で得られたフレッシュコンクリートにおける各試験結果を表-3に示す。シリカフェームは比表面積が非常に大きいため、単位水量を増すことなく、目標のスランプを得るためには、高性能減水剤の使用が必要であった。

(2) 圧縮強度および静弾性係数

図-1は水セメント比55%と水セメント比25%のコンクリートについて養生温度と圧縮強度との関係を示したものである。図から明らかなようにシリカフェームを混入すると無混入に比べて強度の増加が認められる。たとえば混入率20%、30%の無混入に対する強度比は標準養生の材令91日においてW/C55%ではそれぞれ1.49倍、1.60倍であり、W/C25%ではそれぞれ1.41倍、1.40倍である。なお、20%から30%の混入率増加に伴う強度の増加はW/C55%およびW/C25%（材令7日と28日の一部を除く）で認められるが、その割合は1.05倍程度であった。又、水セメント比55%の標準養生の材令7日と材令91日を比較すると初期材令における強度増加率は長期材令に比べてかなり小さかった。これは、フライアッシュや高炉スラグと同

表-3 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの試験結果

Mix No.	W/(C+Si) (%)	Silica-Fume Content (%)	S/a (%)	Mix Proportion (kg/m ³)					Water-Reducing Agent Content (C×%)	Slump (cm)	Air (%)	Temp. (°C)
				Water	Cement	Silica-Fume	Fine Aggregate	Coarse Aggregate				
I	55	0 20 30	45	187	340	0	796	1082	0.25	11.0	1.5	27
					272	68	785	1075	0.95*	8.5	1.8	28
					238	102	780	1068	1.60*	8.5	1.8	28
II	25	0 20 30	38	125	500	0	694	1248	4.00*	9.0	2.0	28
					400	100	681	1225	1.80*	9.0	2.0	29
					350	150	674	1214	2.80*	10.0	1.7	29
III	55	0 20 30	45	181.5	330	0	795	1071	0.25	12.0	4.2	29
					264	66	785	1047	1.00*	12.5	4.3	29
					231	99	780	1040	1.30*	11.5	4.9	29

*: Superplasticizer

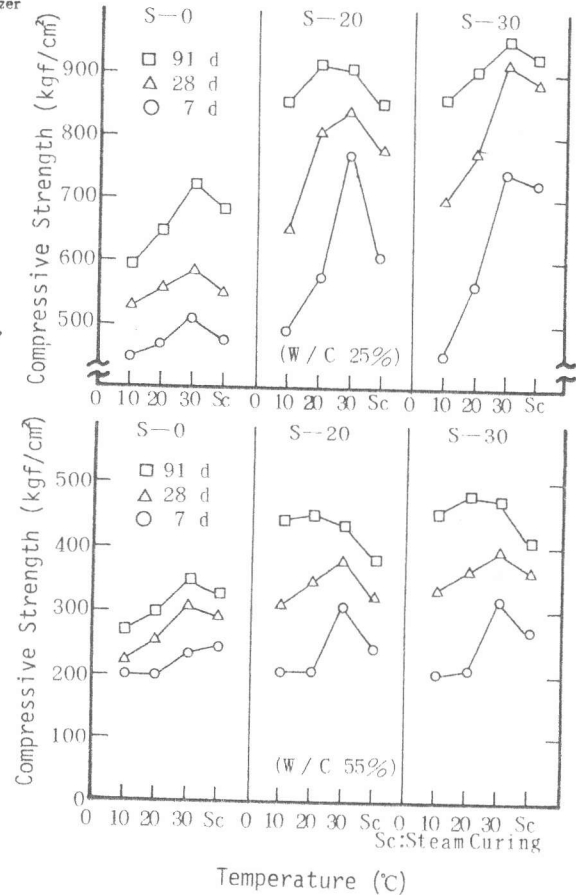


図-1 養生温度と圧縮強度の関係

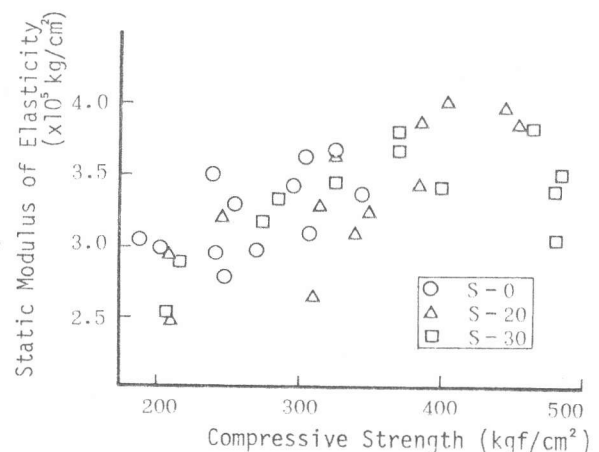


図-2 圧縮強度と静弾性係数の関係

様にポズラン反応によるものと考えられる。養生温度がシリカフュームを用いたコンクリートの強度におよぼす影響は、初期材令では高温養生になるに従い強度の増加は大きい、長期材令では養生温度が高くなるにつれて強度増加は小さくなる傾向にある。特に蒸気養生を行った場合の強度（材令91日）は標準養生に比べて小さかった。これは前養生時間を1時間としたため、コンクリート内部に微細なひびわれが生じ強度の伸びが小さかったものと思われる。図-2は、水セメント比55%の各養生温度及び各材令におけるそれぞれの混入率ごとの圧縮強度と静弾性係数の関係を示したものである。シリカフューム混入率の増加に従い圧縮強度は増加するが、静弾性係数はむしろ低下する傾向にあった。

(3) 細孔構造

図-3はW/C25%とW/C55%のAEコンクリートの細孔径分布を示したものである。総細孔容積(T.P.V)は水セメント比が小さい方が少ない。W/C25%ではシリカフューム混入による総細孔容積の顕著な差は認められないが、W/C55%ではシリカフューム混入率が増すにつれて総細孔容積は少なくなる傾向にあった。また、シリカフュームを混入した場合は無混入に比べて140 Å付近の細孔容積が増加した。これらのことよりシリカフュームを用いたコンクリートは内部構造が緻密になり強度の増加につながったものと思われる。

(4) 乾燥収縮

図-4に乾燥収縮試験の結果を示す。測定は材令91日までであるが、シリカフューム混入による顕著な差は認められなかった。これは各配合ともワーカビリティ改善のために、高性能減水剤を添加して単位水量を一定にしたことにより乾燥収縮量はほぼ同程度になったものと考えられる。

(5) 水密性

$\beta_1^2 = \alpha \cdot \frac{Dm^2}{4t\xi^2}$ から求めたコンクリートの拡散係数 β_1^2 はシリーズIのシリカフューム無混入が $18.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、混入率20%、30%がそれぞれ 10.5×10^{-4} 、 $11.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の値を得た。これらよりシリカフュームを混入すると、水密性が改善されることがわかった。しかしながら混入率が20%と30%の差は認められなかった。

(6) 凍結融解抵抗性

図-5は、凍結融解試験における相対動弾性係数比および重量百分率と凍結融解サイクル数の関係を示したものである。試験の結果より、W/C 55%ではシリカフュームの混入率が20%、30%と増

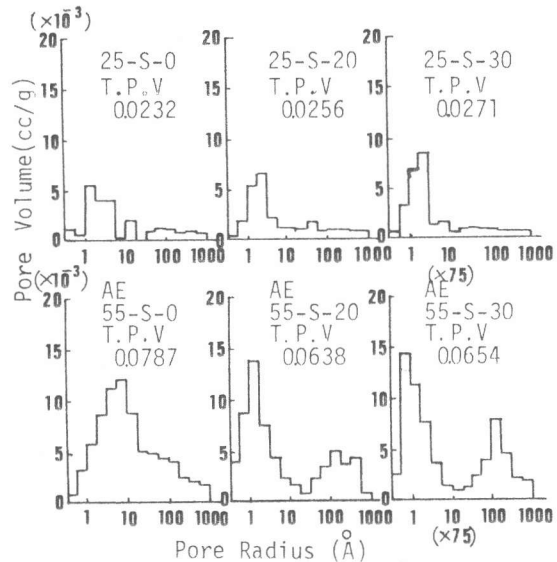


図-3 細孔径分布

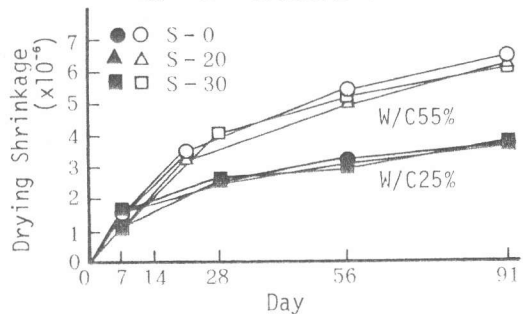


図-4 乾燥収縮試験結果

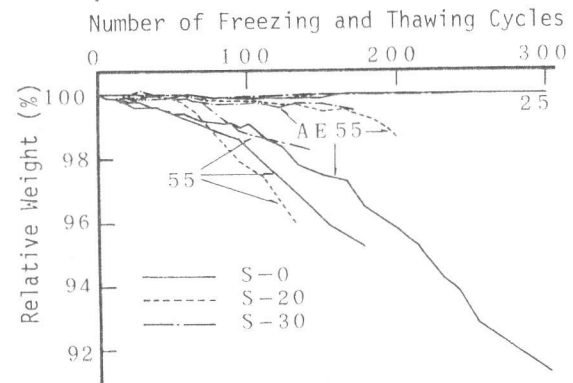
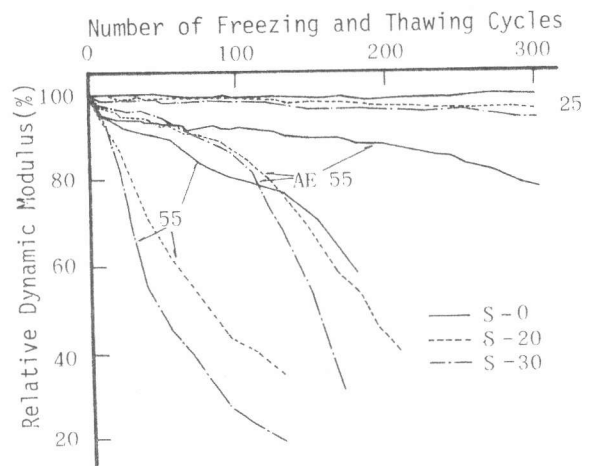


図-5 凍結融解試験結果

すにつれて凍結融解抵抗性が劣る結果となった。W/C 55%のAEコンクリートとした場合でもシリカフェーム混入率20%で耐久性指数は33%であり、凍結融解抵抗性に優れた結果とはならなかった。しかしながら、W/C 25%ではシリカフェーム混入による影響はほとんどなく、耐久性指数も全て90%以上であり、凍結融解抵抗性に優れた結果となった。一方、重量変化率において、W/C 25%では混入率による差もほとんどないが、W/C 55%ではシリカフェームの混入に伴って相対動弾性係数が低下しているにもかかわらずその形状を保ち、供試体表面のスケーリングによる重量損失が無混入に比べて少ないという特徴があった。図-6は気泡間隔係数と耐久性指数の関係を表したものである。

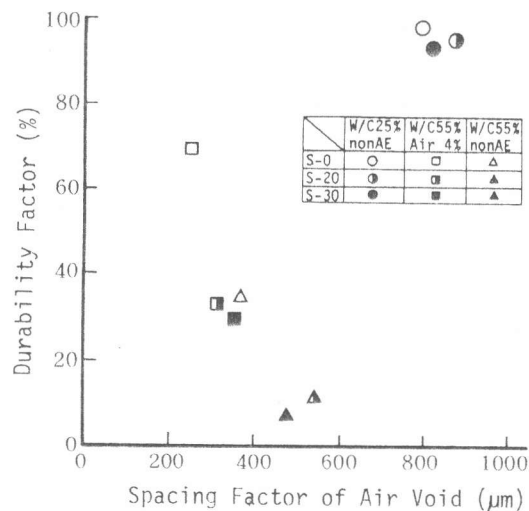


図-6 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

W/C 55%では気泡間隔係数がシリカフェームの増加とともに増加している。このため空気量4%でもシリカフェーム混入率20%、30%の供試体の凍結融解抵抗性は小さくなったものと考えられる。W/C 25%のNon AEコンクリートでは、気泡間隔係数が大きいにもかかわらず優れた凍結融解抵抗性を示した。高強度コンクリートが、凍結融解抵抗性に優れている理由としては、エントレインドエアーが存在しなくても、水セメント比が非常に小さいため、氷圧に抵抗できるだけの高強度が得られていること、さらに普通コンクリートよりも細孔径分布がより微小径側にあるために凍結する水量が少ないことに起因するものと考えられる。(5)(6)(7) また、Gjølv⁽¹⁾、Sorensen⁽²⁾ Malhotra⁽³⁾ らによるシリカフェームを用いた凍結融解抵抗性に関する研究の報告で、Gjølvはシリカフェームを10%加えた場合の耐久性指数は添加しない場合と比較して向上すると報告し、Sorensenは、水セメント比が大きくなるとスケーリングは大きくなり、W/C40%でマイクロシリカ混入率20%では凍結融解抵抗性が向上すると報告しているが、Malhotraは、W/C40%でシリカフェーム混入率が20%以上になると凍結融解抵抗性は顕著に低下すると報告している。本研究においても、Malhotra とほぼ同様な結果を得た。これらのことより、シリカフェームを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、水セメント比が小さい場合は優れているが、水セメント比が大きくなりシリカフェームの混入率が20%以上になると、凍結融解抵抗性が低下するのでシリカフェームの使用にあたっては、注意が必要と思われる。

4. まとめ

本実験の範囲内で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) シリカフェームは超微粉末のため、単位水量を増すことなく目標のスランプを得るためには高性能減水剤の使用が必要であった。
- (2) 圧縮強度は、シリカフェーム混入率の増加につれて増加し、その強度増加率は、初期材令においては小さいが、長期材令になる程大きかった。また、養生温度による影響は、養生温度が高くなるにつれて強度が大きくなる傾向にあった。
- (3) 細孔径分布は、シリカフェームの混入によって細孔半径が微小径側へ移行した。
- (4) 凍結融解抵抗性は、水セメント比が小さい場合は優れているが、水セメント比が高くなりシリカフェーム混入率が多くなると低下し、気泡間隔係数はシリカフェーム混入率の増加に伴い大きくなる傾向にあった。

参考文献

- (1) Odd E. Gjørv, Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume; Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, Vol. 2 ACI Publication SP-79, 1983 pp695~709
- (2) Eigil V. Sorensen, Freezing and Thawing Resistance of Condensed Silica Fume Concrete Exposed to Deicing Chemicals; Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, Vol. 2 ACI Publication SP-79, 1983 pp709~718
- (3) V. M. Malhotra and G. G. Carrette, Silica Fume Concrete - Properties, Applications, and Limitations; Concrete International, Vol. 5, No. 5, May 1983 pp40~46
- (4) 村田; コンクリート・ライブラリー 第7号, 土木学会, 1983
- (5) 後藤, 三浦, 鈴木; 高性能減水剤を用いたコンクリートの耐久性について, セメント技術年報 34, 1980 pp326
- (6) 服部, 岡田, 飛坂, 柳; 高性能減水剤を使用した高強度コンクリートの耐凍結融解性, セメント技術年報 34, 1980 p329
- (7) 田畑, 井, 鎌田ら; プレストレスト用高強度コンクリートの耐凍害性に関する実験, セメント技術年報 36, 1982 p432