

論文

[1050] シリカフュームの品質がコンクリートの流動性および強度に及ぼす影響

久田 真*¹・長滝重義*²・大即信明*³・北出啓一郎*⁴

1. はじめに

近年、コンクリート構造物を施工するにあたっては、施工性がよく、高強度でしかもよりすぐれた耐久性を備えたコンクリートを用いることが切望されている。このような要求を満足するために、わが国においては、各種のセメント系混和材料や減水効果のすぐれた高性能(AE)減水剤が用いられている。シリカフュームも、前述のようなコンクリートの高性能化を実現するために大いに期待されている混和材料であるが、その品質や適用方法については不明確な点が多く、高炉スラグ微粉末やフライアッシュのような規格もないのが現状である。

このような観点から、本研究においては、現在わが国で入手可能なシリカフューム13種類について、これらの物理化学的性質、すなわちシリカフュームのキャラクターの把握を試みると同時に、シリカフュームを用いたコンクリートの流動特性ならびに強度特性についての比較検討を行い、コンクリートの流動性および強度に影響をあたえるシリカフュームの品質指標を明らかにすることを実験的に試みた。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本研究で用いたシリカフュームの一覧を表-1に示す。これらはいずれも品質の変動を避けるため、一度に入手したものを冷暗所に保管し、計量する度に適宜搬出した。また、本研究において用いたセメント、粗骨材、細骨材および高性能AE減水剤の材料の特性を表-2に示す。

2. 2 配合ならびに練混ぜ

コンクリートの示方配合を表-3に示す。なお、コンクリートの配合ならびに練混ぜにあたっては、以下の点に留意した。すなわち、①一般的に用いられるコンクリートのほか、低水結合材比の高強度コンクリートを想定し、水結合材比を5.0および3.0%とした、②高性能AE減水剤を用い単位水量をできるだけ少なくした、③既往の研究[1]により、シリカフュームを含んだセメント硬化体の諸特性には練混ぜ時間が大きく影響を及ぼすことが予想されるため、練混ぜ時間については所定の時間を特に厳守した。なお、練混ぜは、パン型強制練りミキサを用い、最初の1分間でモルタルを練混ぜ、一旦停止させ、パンに付着したモルタルをかき落とした後、

表-1 シリカフューム銘柄一覧

No.	産地	形態	発生源
①	ノルウェー	粉末	Si-Met(*)
②	ノルウェー	粉末	Fe-Si(*)
③	ノルウェー	顆粒	Fe-Si
④	ノルウェー	顆粒	Fe-Si
⑤	ノルウェー	粉末	Fe-Si
⑥	ノルウェー	顆粒	Fe-Si
⑦	ノルウェー	顆粒	Fe-Si
⑧	ノルウェー	粉末	(*)(*)
⑨	ノルウェー	粉末	Si-Met
⑩	エジプト	粉末	Fe-Si
⑪	日本	粉末	Si-Met
⑫	日本	粉末	Fe-Si
⑬	カナダ	粉末	Fe-Si

(*) Si-Met: シリコメタル Fe-Si: フェロシリコン

(*)(*) Si-MetとFe-Siの混合系

最初の1分間でモルタルを練混ぜ、一旦停止させ、パンに付着したモルタルをかき落とした後、

*1 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (正会員)

*2 東京工業大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 東京工業大学助教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

粗骨材を投入してさらに2分間練混ぜた。

表-2 使用材料一覧

セメント	普通ポルトランドセメント (比重) 3.15 (比表面積) 3460 cm ² /g
細骨材	千葉県小櫃産川砂 (比重) 2.55 (吸水率) 2.12% (粗粒率) 2.64
粗骨材	東京都青梅産砕石 (寸法) 20-5mm (比重) 2.64 (粗粒率)
混和剤	ナフタレン系高性能AE減水剤

2. 3 検討項目

シリカフェームの物理化学的性質の検討にあたっては、表-4に示す内容についての計測および分析を行った。また、シリカフェームを用いたコンクリートの流動特性の検討については、目標スランプ得るために必要な高性能AE減水剤の添加量の違いに基づいた。コンクリートの圧縮強度についてはJIS A 1108に準じて試験を行った。

3. 結果および考察

3. 1 シリカフェームの品質について

表-5に本研究で使用したシリカフェームのおもな物理化学的性質の測定結果を示す。また、各成分毎の相関係数の計算結果を表-6に示す。

表-3 コンクリートの示方配合

配合 No.	W/C %	s/a %	スランプ cm	空気量 %	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	シリカフェーム SF	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤
A-0	5.0	4.0	18±1	4±1	150	300	0	664	1032	1.7~2.3
A-5						285	15			
A-10						270	30			
B-0	3.0	4.4	18±1	4±1	150	500	0	802	1057	1.9~2.9
B-5						475	25			
B-10						450	50			
C-0	3.0	4.4	18±1	2±1	150	500	0			
C-10						450	50			

*)セメント重量当りのパーセントで、原液のまま使用した。

これらの結果から、各成分間で最も相関係数の高いもの(すなわち、表中の数値で、注目成分に対して最も大きな相関係数となるもの：網掛け部分)に着目すると、本研究で用いたシリカフェームの物理化学的性質は、おおよそ以下の4つのグループに分類することが可能であると考えられる。すなわち、従来よりシリカフェームの品質の一つの目安とされているSiO₂含有率と等価アルカリ量およびMgOに相関の認められるグループ(表-6中の①)、強熱減量、炭素量グループ(同②)、湿分、比重グループ(同③)、およびいずれのグループ

表-4 物理化学的性質についての測定概要

項目	試験方法
比重	ヘリウムガスを利用したオートピクノメーターによって測定した。
比表面積	窒素吸着法(BET)にて測定した。
湿分	一定量の試料を乾燥させ、乾燥前重量との差から求めた。
lg. loss	電気炉を用いて750℃にて重量減少量を測定した。
SiO ₂	JIS M 8852「脱水重量吸光度併用法」に準じた。
Na ₂ O	〃
K ₂ O	〃
Al ₂ O ₃	SiO ₂ ろ過溶液を誘導結合プラズマ発光分析法にて測定した。
Fe ₂ O ₃	〃
CaO	〃
MgO	〃
SO ₃	試料をMgO焼結剤と混合加熱し、BaSO ₄ として定量した。
C	燃焼-赤外線吸収法による(850℃)。

にも相関性が認められないか、または全体に占める量がごく微小なため、有為な影響がないと予想されるグループ(同④)に大きく分けることができる。したがって、シリカフェームの品質は、これらの各グループの組成によって把握することが可能であると考えられる。また、表-5によれば、物理化学的性質において、海外のシリカフェームに関する品質規格を満足しない銘柄もあ

る(たとえば[2]によれば、等価アルカリ量において銘柄④、⑤、⑥、⑧および⑫が規準を満足しないことが認められ、シリカフュームの品質を評価するにあたっては、これらの成分が耐久性等のコンクリートの諸性状に及ぼす影響についてのさらに充分な検討が必要であるものと考えられる。

表-5 シリカフュームのおもな物理化学的性質

No.	物理的性質			化学成分%							
	比重	比表面積	湿分%	lg. loss	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C	Na ₂ Oeq.
①	2.42	20.55(*)	0.63	1.38	97.5	0.06	0.19	0.29	0.15	0.78	0.53
②	2.56	19.55	1.25	2.36	93.6	0.36	0.23	0.85	0.26	1.47	1.49
③	2.50	17.55	1.29	1.98	93.3	1.21	0.16	0.49	0.31	1.00	1.39
④	2.46	17.73	1.14	2.24	92.7	0.26	0.21	0.71	0.39	1.27	2.04
⑤	2.31	20.92	0.23	2.76	90.7	0.75	0.26	1.71	0.53	2.06	2.36
⑥	2.29	19.28	0.26	2.62	90.8	0.60	0.23	1.87	0.38	1.63	2.40
⑦	2.49	21.77	0.96	1.60	92.7	1.31	0.69	1.55	0.35	0.80	0.86
⑧	2.43	17.21	1.02	2.42	90.0	1.37	0.47	1.91	0.41	1.31	2.06
⑨	2.40	18.05	0.66	1.96	96.0	0.07	0.22	0.28	0.31	1.58	1.07
⑩	2.42	17.85	1.12	2.28	92.1	1.17	0.37	1.60	0.35	1.19	1.48
⑪	2.69	17.74	1.03	1.34	91.8	3.13	0.21	0.38	0.78	0.60	1.35
⑫	2.66	15.95	1.76	2.62	85.8	1.03	0.61	1.97	0.52	1.58	4.02
⑬	2.49	17.64	0.75	2.84	93.6	0.26	0.28	0.29	0.29	3.56	0.67

(*)単位: m²/g

表-6 各要素間の単相関係数一覧

物	物理的性質			化学成分%							
	比重	比表面積	湿分	lg. loss	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C	Na ₂ Oeq.
比重	1.00	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
比表面積	0.40	1.00	----	----	----	----	----	----	----	----	----
湿分	0.63	0.50	1.00	----	----	----	----	----	----	----	----
lg. loss	0.28	0.42	0.24	1.00	----	----	----	----	----	----	----
SiO ₂	0.25	0.24	0.00	0.52	1.00	----	----	----	----	----	----
Fe ₂ O ₃	0.52	0.02	0.28	0.38	0.39	1.00	----	----	----	----	----
CaO	0.23	0.05	0.18	0.08	0.56	0.21	1.00	----	----	----	----
MgO	0.26	0.21	0.23	0.48	0.77	0.14	0.65	1.00	----	----	----
SO ₃	0.41	0.10	0.09	0.04	0.61	0.80	0.13	0.24	1.00	----	----
C	0.70	0.09	0.50	0.89	0.31	0.51	0.19	0.44	0.06	1.00	----
Na ₂ Oeq.	0.06	0.10	0.33	0.87	0.88	0.08	0.33	0.71	0.43	0.71	1.00
グループNo.	③	④	③	②	①	④	④	①	④	②	①

3. 2コンクリートの流動特性
 図-1、2に、シリカフュームの置換率を変化させた場合の、スランプ18cmを得るために必要な高性能AE

減水剤の添加量の変化を示す。これらによれば、水結合材比50%でシリカフュームを用いた場合には、シリカフュームを添加することによってフレッシュコンクリートの流動性はむしろ低下するものと考えられるが、水結合材比30%の場合においては、シリカフュームを添加することにより流動性の改善がみられ、シリカフューム置換率5%においてフレッシュコンクリートの流動性が向上することが確認できる。また、銘柄⑫(Fe-Si系、粉末)については、いずれの水結合材比においても、他の銘柄とは異なり、流動性を比較的良好に改善する効果があることがわかる。図-3にシリカフューム置換率10%の各配合における高性能AE減水剤の添加量を示す。これによれば、水結合材比による傾向は前述の考察とほぼ同様であるが、銘柄⑦(Fe-Si系、顆粒)については、所定のスランプを得るのに最も多く高性能AE減水剤を要した。このことは、顆粒状のシリカフュームは、練混ぜによって充分なせん断エネルギーが与えられず、コンクリート中において団粒部分が残っており、これが練混ぜ水を吸収して流動性を低下させているものと考えられる。しかし、他の顆粒状の銘柄③、④および⑥(いずれもFe-Si系)については、粉末の銘柄よりも少ない高性能AE減水剤使用量となり、このことから、顆粒であることが流動性に好ましくない影響を

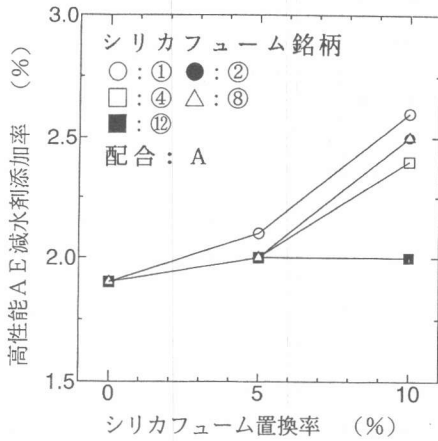


図-1 高性能AE減水剤添加率(W/C=50%)

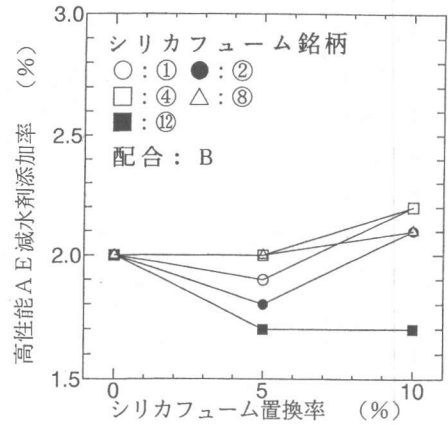


図-2 高性能AE減水剤添加率(W/C=30%)

及ぼす顆粒と、そうでない顆粒があることがわかる。したがって、本研究の範囲では、シリカフェームの初期形態が、コンクリートの流動特性に及ぼす要因であると判断するのは困難であり、初期形態よりもむしろ練り上がり後のコンクリート中におけるシリカフェームの存在状態、すなわち分散状態が、コンクリートの流動特性に影響を及ぼしているものと考えられる。

3. 3 コンクリートの強度特性

図-4、5にシリカフェームを用いたコンクリートの圧縮強度を示す。これらによれば、シリカフェームを含まないコンクリートに対する圧縮強度の増加は、一般のコンクリートに用いるような水結合材比の配合条件においてはあまり期待できないものと考えられる。

また、高強度コンクリートに用いられるような水結合材比30%の場合でも、銘柄⑫においては無混和のものに比べて圧縮強度が低くなっている。このような結果は、海外のシリカフェーム産地国における研究報告等にはあまりみられないものであり、シリカフェームを混和すれば強度の増加が得られるということは断定できないものと考えられる。また、前項の結果より、銘柄⑫はフレッシュコンクリートの流動性を改善する効果のある銘柄であるため、本研究の結果からは、シリカフェームの中には、銘柄⑫のように流動性を改善するが強度の増加に寄与しないものと、流動性にはあまり影響を及ぼさないものの、強度的には増加傾向に作用するものがあると考えられる。図-6、7、8にシリカフェームの物理化学的性質として分類した各グループの代表的な要素と圧縮強度との関係を示す。これによれば、圧縮強度との間に比較的相関関係がみられるのは図-8であり、表-6における比重や湿分等の③グループのものであることがわかる。このことは、シリカフェームが運搬中あるいは保管中に空気中の水分を吸収し、

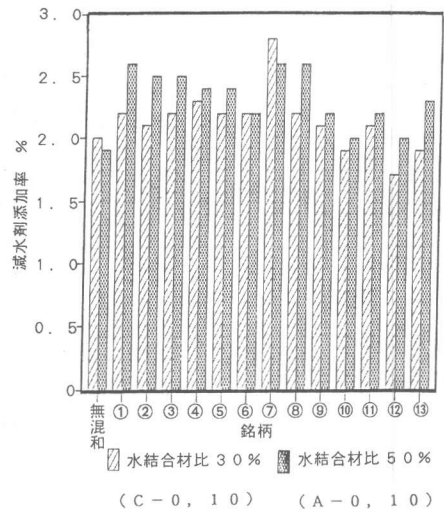


図-3 高性能AE減水剤添加量(全銘柄)

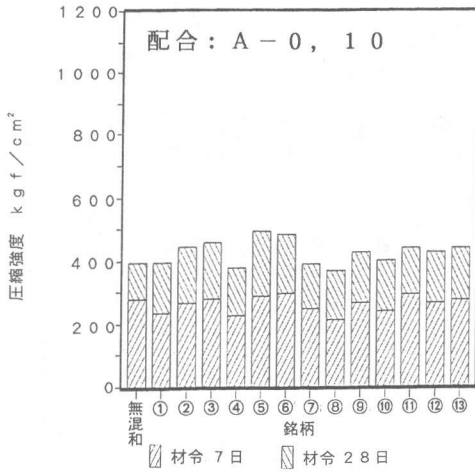


図-4 圧縮強度の経時変化(W/C=50%)

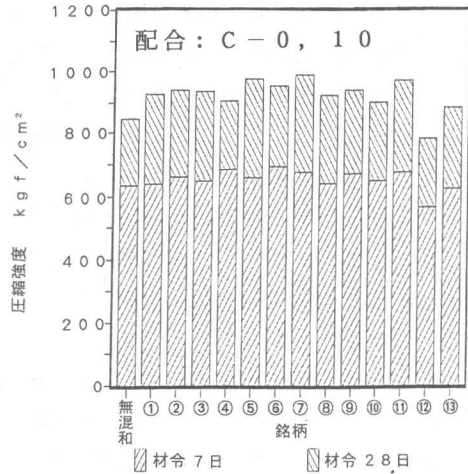


図-5 圧縮強度の経時変化(W/C=30%)

シリカフェームの活性が低下して圧縮強度の減少につながったものと考えられるが、比表面積等の影響も併せて、この件に関しては現在検討中である。以上より、コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼすシリカフェームの品質指標としては、湿分や比重等の③グループの要素群であると考えられる。

4. 結論

本研究を通じて得られた主な結論を以下に示す。

- (1) シリカフェームの物理化学的性質は、比較的よい相関関係にあるいくつかのグループに分けることができると考えられる。本研究の範囲では、このグループは4つに分けることができ、①SiO₂、Na₂Oeq.、MgOグループ、②強熱減量、炭素グループ、③比重、湿分グループ、そして④いずれにも相関性のないグループに分類することができる。
- (2) シリカフェームを用いたフレッシュコンクリートの流動性は、水結合材比50%の場合には改善されず、高強度コンクリートに用いる程度の水結合材比30%の場合には、若

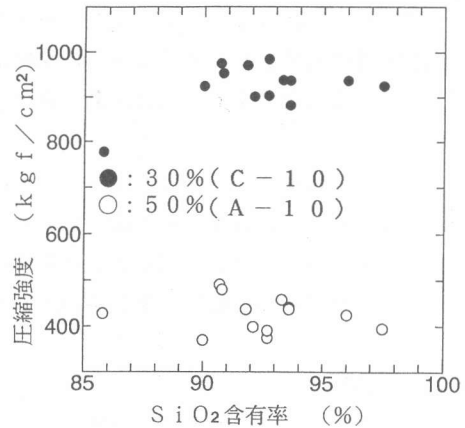


図-6 SiO₂含有率と圧縮強度の関係

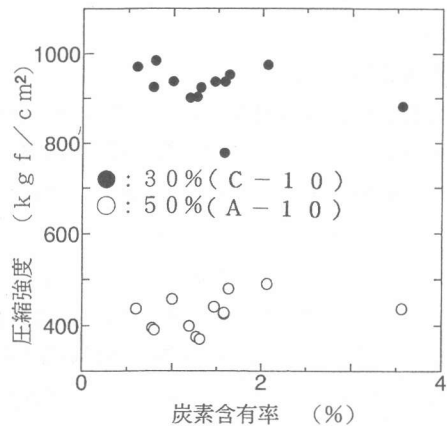


図-7 炭素量と圧縮強度の関係

干ではあるが改善される傾向にある。また、本研究の範囲では、顆粒状のシリカフェームは粉末状のものに比べてコンクリートの流動特性が低下すると判断するのは困難であり、むしろ練り上がり後のコンクリート中におけるシリカフェームの分散状態が、コンクリートの流動特性に影響を及ぼしているものと考えられる。

- (3) シリカフェームを用いたコンクリートの圧縮強度は、水結合材比50%よりも水結合材比30%における方が強度の増加程度が大きい。また、シリカフェームの湿分や比重等がコンクリートの圧縮強度と比較的相関性があり、これらの成分がコンクリートの強度特性に及ぼすシリカフェームの品質指標の一つの目安になる可能性があるものと考えられる。

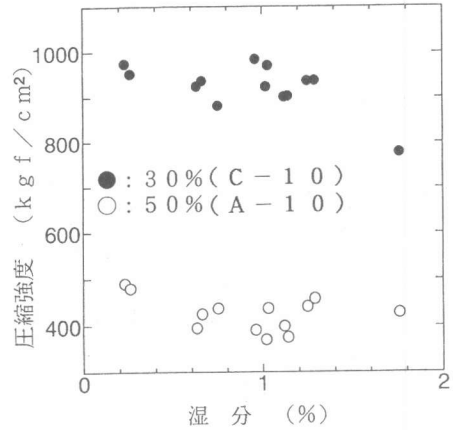


図-8 湿分と圧縮強度の関係

- (4) 本研究の結果は、海外のシリカフェーム産地国での試験結果と異なったものとなっている。すなわち、わが国で入手可能なシリカフェームは、その化学成分、粒度、形態等の影響以外に、湿分等の影響が卓越している可能性がある。この原因としては、輸送中あるいは保管中に、なんらかの経緯で空気中の水分等の作用があったものと考えられる。

【謝 辞】

本研究を実施するにあたり、日本セメント(株)増本二巳一氏、三菱マテリアル(株)村田浩三氏、およびシリカフェーム技術研究会の皆様の多大なる御助力を頂きました。この場を借りて深く感謝致します。なお、本研究は、平成4年度科学研究費補助金、試験研究(B)の研究助成に基づいて実施されたものです。

【参考文献】

- 1) 大賀宏行、魚本健人：シリカフェームを混和したモルタルの諸特性に及ぼす練混ぜの影響：土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.680-680、1992.9
- 2) F. Lopez - Flores : ASTM Destination D1411 #13, Standard Specification for Silica Fume for Use in Concrete and Mortar : CANMET / ACI International Workshop on the Use of Silica Fume in Concrete, pp.67-82, 1991.4
- 3) 中込 昭、岸谷孝一、江口 清、梶田秀幸：シリカフェームの品質評価に関する研究：コンクリート工学年次論文報告集、第13巻第1号、pp.285-290、1991.6
- 4) F. Larrard, J. F. Gorse, and C. Puch : Comparative Study of Various Silica Fumes as Additives in High-Performance Cementitious Materials : Materials and Structures, Vol.25, No.149, pp.265-272, 1992.6