

論文

[1008] シリカフェームの物理化学的性質と高強度コンクリートの特性の関係に関する研究

三井健郎*1・米澤敏男*2・中島誠*3・杉本貢*4

1. はじめに

シリカフェームは高強度コンクリートに適用した場合、強度の向上と施工性の改善に大きな効果がある。またコンクリートの耐久性を向上させるうえで優れた作用を示す。しかし、商品化されているシリカフェームは、製造方法や形態の違い、さらには工場間や同一工場での品質変動などにより物理化学的性質の差異が生じることが知られている。シリカフェームを実際のコンクリート工事に適用する場合は、こうしたシリカフェームの品質の差異がコンクリートの品質に与える影響を把握し、シリカフェーム自身の品質を管理する必要がある。現在、シリカフェームコンクリートを実用化しているノルウェー、カナダおよび米国等ではコンクリート用シリカフェームの品質規準が制定されてはいるが、シリカフェームの物性の差異が高強度コンクリートの特性に及ぼす影響を定量的に検討している例は少ない。

本研究は以上の点を踏まえ、高強度コンクリートを対象として銘柄、工場及び品質形態の異なる14種類のシリカフェームの化学成分や物理的性質の違いを検討し、シリカフェームの品質の違いと、シリカフェームを使用した高強度コンクリートの流動性や圧縮強度との関係について検討したものである。

2. シリカフェームの物理化学的性質に関する試験

2.1 試験方法

実験に使用したシリカフェームは、北欧産の銘柄、製造工場、および形態（粉末または顆粒状）が異なる14種類のものである。シリカフェームの性質として、化学成分はSiO₂含有量、炭素含有量、強熱減量、含水率また物理的性質では比重、かさ密度、比表面積及び超音波

(200W)を12.5分負荷した時の1μm以下の粒子量で示されるシリカフェーム粒子の分散性¹⁾の計8項目について測定を行った。各項目の試験方法を表-1に示す。

2.2 試験結果

シリカフェームの物理化学的性質の試験結果を表-2に示す。これらの試料はいずれも化学成分についてはカナダ、ノルウェーの規格値^{2) 3)}を満足するものであった。しかしSiO₂含有量と比重を除いては試料の各性質の変動係数は10%以上あり試料間に品質のばらつきがみられる。

表-1 試験方法

試験項目	試験方法
比重	ヘリウムガスを使ったオートピクノメーターにより測定。
かさ密度	100ccのプラスチックびんに入れたシリカフェームを5回手で振った後、500ccのメスシリンダーの上部から自然落下させ、シリカフェームのかさ容積がちょうど500ccとなるまでこれを繰り返して重量測定を行ってかさ密度を求める。
比表面積	窒素吸着法により測定する。
SiO ₂ 量	けい石の化学分析方法 (JIS M8852) による
炭素含有量	炭素を1250℃の酸素気流中で燃焼させ、赤外線検出器により炭素量を測定する炭素分析装置により測定
含水率	試料10gを105℃で24時間乾燥し、乾燥前後の重量を電子化学天秤で測定して求める。
強熱減量	セメントの化学分析方法 (JIS R5202) による
粒子の超音波分散特性 ¹⁾	レーザー回折式粒度分析装置を用いてシリカフェーム (0.2g)を蒸留水 (250ml) 中で超音波分散し、粒度分布の経時変化を測定する。負荷する超音波の出力は、150~200wである。

*1 (株) 竹中工務店技術研究所研究員、工修 (正会員) *3 (株) 竹中工務店技術研究所研究員
 *2 (株) 竹中工務店技術研究所主任研究員、Ph. D. (正会員) *4 竹本油脂 (株) 東京営業所

表-2 シリカフェームの諸性質の測定値

No.	加工形態	成分				物理特性			
		SiO ₂ 量 %	炭素量 %	強熱減量 %	含水率 %	比重	かさ密度 kg/m ³	比表面積 m ² /g	1 μm以下粒子量 %
1	粉末 (U)	93.06	1.04	1.90	0.400	2.37	323.4	20.8	45.0
2		94.19	1.25	1.87	0.472	2.35	333.6	19.5	58.0
3		96.82	0.20	1.10	0.473	2.39	260.1	16.8	58.0
4		91.26	0.55	1.39	0.573	2.39	256.6	15.3	50.0
5		94.41	1.40	2.37	0.495	2.36	275.0	18.4	72.0
6		94.23	1.47	2.34	0.479	2.48	167.0	19.7	55.0
7		93.38	1.55	2.51	0.458	2.45	246.8	18.1	69.0
8		90.44	1.57	3.14	0.810	2.44	370.2	-	62.0
9	顆粒 (D)	94.82	0.94	2.04	0.657	2.36	677.8	15.1	10.1
10		85.23	1.55	4.90	1.341	2.39	560.7	14.3	4.9
11		90.26	0.94	2.86	0.815	2.36	594.8	14.5	15.0
12		88.96	0.86	1.84	0.561	2.39	605.2	16.6	13.0
13		86.30	1.32	4.14	1.281	2.45	591.4	14.0	6.7
14		94.00	1.33	2.03	0.391	2.37	538.4	17.7	5.2
平均値		91.95	1.14	2.46	0.658	2.40	414.4	17.0	37.4
変動係数(%)		4	37	44	49	2	43	13	74

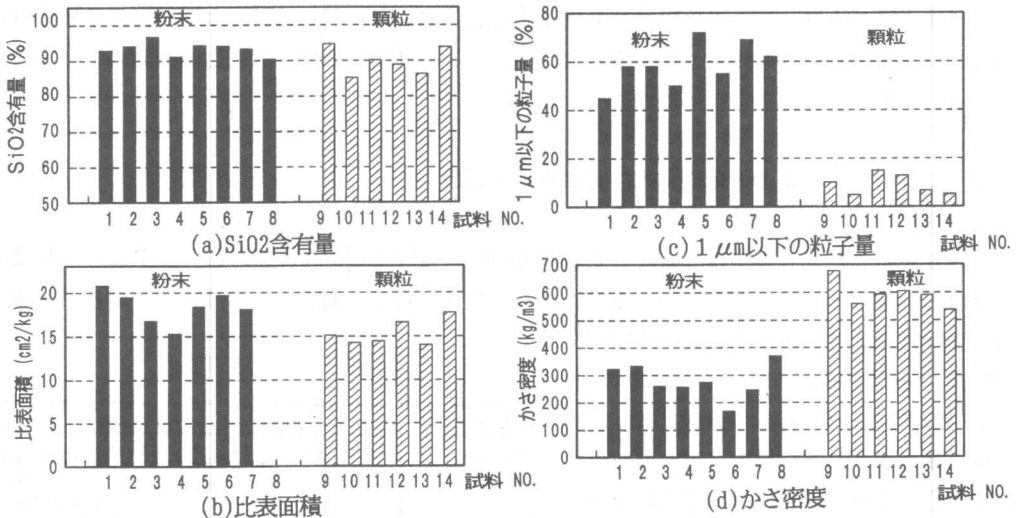


図-1 シリカフェームの諸性質

図-1にはシリカフェームの反応性に関与すると考えられるSiO₂含有量、比表面積及びシリカフェーム自身の凝集の度合いを表す超音波負荷後の1μm以下の粒子量、かさ密度の分布を示す。SiO₂含有量、比表面積は形態による違いは小さいが、1μm以下の粒子量およびかさ密度では形態により明確な違いが認められる。

3. シリカフェームを用いた高強度コンクリートの品質試験

3.1 実験の概要

表-2に示した14種類のシリカフェームを用いて、シリカフェーム置換率を10%とした水結合材比28%高強度コンクリートを製造し、フレッシュコンクリートの性質及び硬化後のコンクリートの圧縮強度を検討した。

3.2 使用材料および配(調)合

セメントはフライアッシュB種を使用した。細骨材は大井川産川砂(比重2.61, 吸水率1.53, 粗粒率2.99), 粗骨材は鳥形山産石灰岩碎石(比重2.70, 吸水率0.38, 粗粒率6.42)を使用した。

表-3 コンクリートの配(調)合

水結材比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位重量 (kg/m ³)			
				水	結材	細骨材	粗骨材
28	40.0	23±2	1.5	150	535	683	1059

高性能AE減水剤はポリカルボン酸を主成分とするものを使用した。コンクリートの配(調)合を表-3に示す。スランプは高性能AE減水剤の使用量を調整し一定となるように定めた。

3.4 実験方法

コンクリートはパン型強制練りミキサーにセメント, シリカフェーム, 碎石, 砂を投入し15秒間空練りした後, 水, 高性能AE減水剤を投入し3分間練り混ぜた。練り混ぜ後ただちにフレッシュコンクリートの試験(スランプ, 空気量, L型フロー初速度)を実施した。L型フロー初速度とは, L型フロー試験で計測されるコンクリートの流動速度の初期の値⁴⁾で, コンクリートの粘性を表し, この値が大きいもの程, 粘性が低いことを示す。硬化コンクリートの特性としてはφ10×20cmの円柱供試体を用いてJIS A1108により, 標準養生材令7日, 28日で圧縮強度試験を行った。

4. 実験結果

表-4にフレッシュコンクリートの性質及び圧縮強度の試験結果を示す。

表-4 コンクリートの試験結果

NO.	加工形態	スランプ (cm)	空気量 (%)	混和剤 使用量 (C*%)	L型フロー 初速度 (cm/s)	圧縮強度 (kg/cm ²)		
						(7日)	(28日)	
1	粉末 (U)	24.0	1.4	2.05	5.22	781	967	
2		23.7	1.7	2.00	7.97	751	1019	
3		24.3	1.4	2.00	5.69	778	1046	
4		24.4	1.2	2.00	6.39	786	992	
5		22.7	1.5	2.00	8.50	753	997	
6		23.0	2.0	2.20	7.82	754	969	
7		23.2	2.0	2.00	8.47	758	975	
8		22.8	1.7	2.20	5.62	772	1020	
9		23.0	1.7	2.60	4.44	760	987	
10		顆粒 (D)	22.0	1.9	2.70	3.90	705	856
11			23.3	1.4	2.50	6.62	761	951
12			23.8	1.3	2.50	5.46	775	1003
13			23.0	1.5	2.90	3.14	745	925
14			23.0	1.3	2.80	3.51	722	914

5. 実験結果の考察

5.1 重回帰分析によるシリカフェームの性質の影響の評価

表-2に示したシリカフェームの物理化学的性質は互いにある程度の内部相関や組み合わせの影響を持つ。このためこれらの要因の影響を解析するには単回帰分析では誤差変動が大きくなる。そこでこれらの性質とコンクリートの関係を総合的に評価

するために重回帰分析により複数の要因について検討を行ない影響の強い要因の抽出を行った。重回帰分析の目的変数(y)は同一のスランプを得るための高性能AE減水剤使用量、コンクリートの粘性を示す指標であるL型フロー初速度及び材令7, 28日の圧縮強度とし, シリカフェームの性質を説明変数(x)とした。説明変数のうち, 1μm以下の粒子量とかさ密度, また強熱減量と含水率は内部相関が高いため(表-2, 図-1参照)これらのうち目的変数との単相関係数の小さいかさ密度と含水率は説明変数から除外した。その他の目的変数については変数減増法により, 相関関係の高い変数を選択する手法をとった。表-5に重回帰分析の結果を示す。高性能AE減水剤使用量及びコンクリートの粘性を示す指標であるL型フロー初速度に対しては1μm以下の粒子量

表-5 重回帰分析結果

目的変数		説明変数						定数項	自由度 調整済 寄与率
		1	2	3	4	5	6		
		SiO2 %	炭素量 %	強熱減量 %	比重	比表面積 cm ² /g	1μm以下 粒子量%		
高性能AE減水剤使用量	β	0.019	0.219	-	1.203	-0.028	-0.012	-1.61	0.940
	t 値	1.675 *	2.893	-	1.802	-1.601 **	-9.088		
L型フロー初速度	β	-	-	-	-	-	0.060	3.79	0.697
	t 値	-	-	-	-	-	** 5.348		
7日強度	β	-3.630	-21.090	-16.010	-	-	0.354	1489	0.647
	t 値	-1.630	-1.460	-1.840	-	-	1.830		
28日強度	β	-	-35.390	-21.560	-	-	0.740	1035	0.745
	t 値	-	-1.435	-1.986	-	-	* 2.239		

β: 偏回帰係数 ** : 1%有意 * : 5%有意 (-): 選択されなかった変数

が1%有意となった。即ち、コンクリートの流動性に関してはシリカフューム自身の分散し易さの影響が大きく他の要因の影響は小さいことが認められる。圧縮強度に関しては、1%有意な特に大きな影響をもつ要因はない。材令28日では1μm以下の粒子量が5%有意となっている。

5.2 シリカフュームの品質とフレッシュコンクリートの品質の関係

重回帰分析において有意となったシリカフュームの分散性とフレッシュコンクリートの品質の関係について検討した。図-2にはシリカフュームの1μm以下の粒子量と高性能AE減水剤使用量の関係を示す。1μm以下の粒子量が45%以上を示した粉末状では1μm以下の粒子量が変化しても高性能AE減水剤の使用量の変化は小さいが、1μm以下の粒子量が15%以下の顆粒状の場合、1μm以下の粒子量の低下に対して高性能AE減水剤の増加量が大きい。シリカフュームの形態の違いによる分散性の違いが大きな影響を持つことがわかる。図-3に1μm以下の粒子量とL型フロー初速度との関係を示す。1μm以下の粒子量とL型フロー初速度の相関性は高く、1μm以下の粒子量が多いシリカフュームを用いたコンクリート程、L型フロー初速度が速い傾向がある。即ち分散性の良いシリカフューム程、コンクリートの粘性を低減する効果が大きいといえる。また顆粒状のシリカフュームでも1μm以下の粒子量が比較的多いものは粉末状と同等のL型フロー初速度であるが分散性の低下によりL型フロー初速度は急激に低下する傾向をみせている。図-4にかさ密度とL型フロー初速度の関係を示す。かさ密度は粒子の凝集の度合いを表す指標であり、分散性と関連があるが、1μm以下の粒子量と相関関係が強いため重回帰分析では選択しなかった。図-4のように、かさ密度は形態により明確な差を示すが同じ形態の中

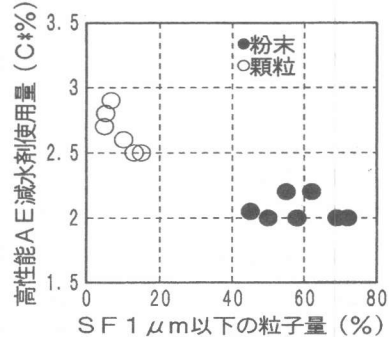


図-2 1μm以下の粒子量と高性能AE減水剤使用量の関係

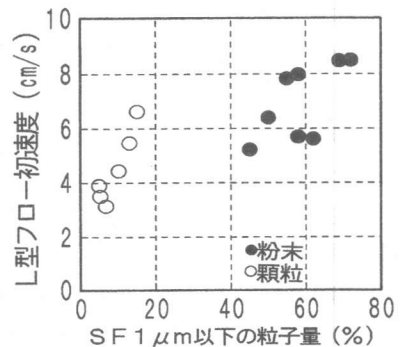


図-3 1μm以下の粒子量とL型フロー初速度の関係

ではL型フロー初速度との相関性は小さい。

5.3 シリカフュームの品質とコンクリートの圧縮強度の関係

圧縮強度は重回帰分析では材令7日ではシリカフュームの品質と有意な相関は認められなかった。また材令28日では $1\mu\text{m}$ 以下の粒子量が5%有意となり、 SiO_2 含有量及び強熱減量についてやや相関関係がみられる。図-5はシリカフュームの $1\mu\text{m}$ 以下の粒子量と圧縮強度の関係を示す。材令7日強度は試料間の強度差は小さくシリカフュームの品質の影響はみられない。材令28日強度では顆粒状シリカフュームのうち分散性の比較的良いものは粉末に近い強度発現を示しているのに対し、 $1\mu\text{m}$ 以下の粒子量の低下とともに圧縮強度も低下する傾向を示している。図-6にはシリカフューム反応性に関与すると考えられる主成分である SiO_2 含有量と、図-7には強熱減量と圧縮強度の関係を示す。材令7日強度についてはいずれの物性についても強い相関関係は見られない。材令28日強度では SiO_2 含有量の少ないもの、強熱減量の多いものが強度が低い傾向を示すが同程度の特性値でも圧縮強度にはかなりばらつきがみられる。Batrakovら⁵⁾は SiO_2 含有量が66%と小さいシリカフュームを用いたコンクリートの強度は SiO_2 含有量90%を用いたコンクリートよりも低いことを示しているが、今回の試料のように規格値を満足するある範囲の品質を有するシリカフュームの場合は、これらの性質の差異はコンクリートの品質に大きな影響を及ぼさないといえる。

5.4 シリカフュームの品質と高強度コンクリートの品質管理に関する考察

現在、シリカフュームのコンクリート用混和材としての品質規格を規定しているのはカナダ、ノルウェー、デンマーク及びノルウェーの4カ国であり、アメリカ、ドイツでは他の混和材料の規格を準用している。こうした規格は化学成分に関する規定が中心となっており、粉末、顆粒といった形態の差や比表面積、かさ密度といった物理性質についてはほとんど考慮されていない。今回の実験的検討の結果、こうした化学成分が規定値範囲内の品質のシリカフュームを用いた場合でも、シリカフュームの物理的

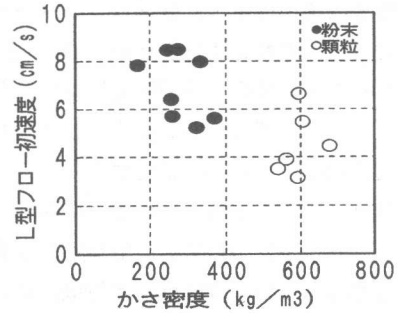


図-4 かさ密度とL型フロー初速度の関係

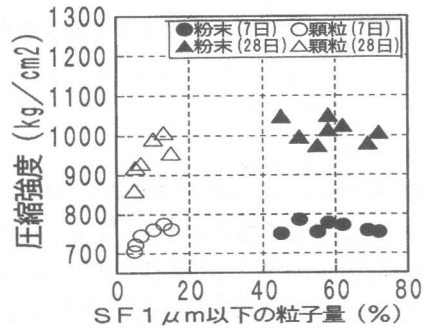


図-5 $1\mu\text{m}$ 以下の粒子量と圧縮強度の関係

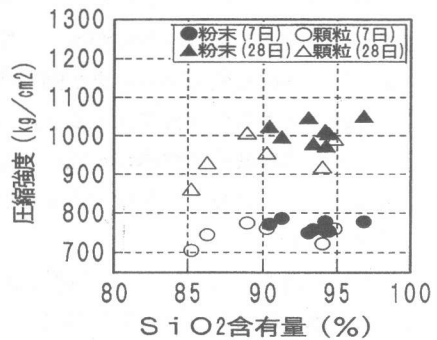


図-6 SiO_2 含有量と圧縮強度の関係

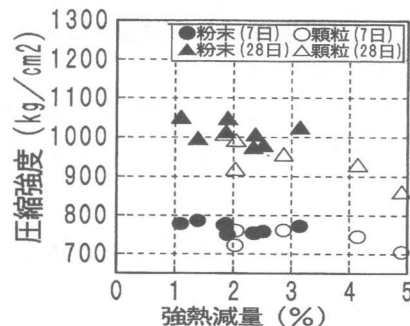


図-7 強熱減量と圧縮強度の関係

性質の違いにより高強度コンクリートの流動性や強度発現が異なることがわかった。特に超音波による外力を加えたときの $1\mu\text{m}$ 以下の粒子量で表されるシリカフュームの分散性の違いがコンクリートの流動性や圧縮強度に与える影響が大きいことがわかった。分散性の良い粉末状シリカフュームでは高性能AE減水剤の使用量とL型フロー初速度の変化は小さく流動性に与える銘柄間の性能差が小さい。顆粒状シリカフュームは一部に流動性の良いものも認められるが全般的には流動性が悪く、分散性の低下に伴いコンクリートの流動性は大きく低下する。また、硬化後のコンクリートについても、顆粒状シリカフュームを用いたコンクリートでは分散性の低下にともなって材令28日強度は低下する傾向がみられた。今回の実験結果では、顆粒状シリカフュームの場合に分散性の低下とともに流動性や強度の低下がみられたが、粉末状シリカフュームでも通常の状態では一次粒子が凝集した状態で存在していることや、運搬、貯蔵、圧送といった過程で粒子が更に凝集し形態が変化する可能性が考えられることから、こうした分散性を示す指標をシリカフュームの品質管理において考慮する必要があると考えられる。

7. 結論

(1) シリカフュームの諸物性のうち化学成分である SiO_2 含有量や炭素量等は、今回の実験で扱ったような欧米の規格に定められたような範囲の品質を有する場合、高強度コンクリートの性質との間には特に有意な相関関係は認められなかった。

(2) シリカフュームに超音波による外力を加えたときの $1\mu\text{m}$ 以下の粒子量の割合を指標として表わされた分散性はフレッシュコンクリートの性質や圧縮強度と密接に関係づけることができる。

(3) 顆粒状シリカフュームの場合、分散性の良いものは粉末状シリカフュームと同程度の流動性を有するが、全般的には流動性が悪く、同一スランプを得るための高性能AE減水剤使用量も多く、コンクリートの粘性も高い。また強度発現もやや低い傾向がある。

以上のことからシリカフュームを用いたコンクリートのワーカビリティや強度発現の管理を行う上で、化学成分等が規定範囲内の品質を有することだけでは不十分であり、これに加えて、シリカフュームの分散性を管理することが有効な方法であるといえる。

[参考文献]

- 1) 米澤敏男他:シリカフュームの物性が高強度コンクリートの性質に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13-1、1991
- 2) Canadian Standard for Supplementary Cementing Materials, 1986
- 3) Norwegian Standard NS 3045, 1992
- 4) 谷川恭雄他:高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価試験方法に関する基礎的研究、建築学会大会、1990
- 5) Batrakov, V. G. :Influence of Different Types of Silica Fume Having Varying Silica Content on the Microstructure and Properties of Concrete, ACI SP132-51, 1992