

論文 微粒珪砂副産物の高流動コンクリートへの活用に関する研究

桐山和也*¹・山口昇三*²・森嶋和博*³・梅原秀哲*⁴

要旨：微粒珪砂とはガラスの主原料である製品珪砂の製造の際に発生する産業副産物であり、愛知県では年間 20 万トン廃棄されている。本研究では微粒珪砂の有効利用を目的に、粉体として設計基準強度 30N/mm² の工場製品の高流動コンクリートに用いた場合のフレッシュ及び硬化後の性状について実験より検討を行った。実験結果より、粉体として微粒珪砂が適用可能であることが認められた。また、水セメント比 50%，単位セメント量 380kg/m³ の場合、スランプフロー700mm 程度の自己充てん性を有する高流動コンクリートを得るには、単位微粒珪砂量を 106～193kg/m³ 程度で選定すれば良いとの結果を得た。

キーワード：産業副産物、微粒珪砂、高流動コンクリート、蒸気養生

1. はじめに

愛知県瀬戸地区は、ガラスの主原料である製品珪砂の国内供給量の 31% を占める国内最大の供給地である。製品珪砂は、水洗分級により製造されているが、この製造工程においてガラスの製造に適していない 5 μ m～100 μ m の微粒珪砂が年間約 20 万トン取り除かれる。この微粒珪砂は、インターロッキングブロックへ活用するための研究¹⁾が行われ一部利用されている。しかし、現状では汚泥として産業廃棄物指定を受け、大半が採掘跡地にセメント処理を施し埋立て処分され大きく活用されるには至っていない。また、廃棄物に対する問題は近年大きくクローズアップされており、廃棄物を資源として有効利用することが重要な課題となっている。

そこで、産業副産物である微粒珪砂のさらなる有効活用を図るため、設計基準強度 30N/mm² である工場製品の粉体系高流動コンクリートへ利用することを目的に、微粒珪砂を混入したコ

ンクリートの配合、フレッシュ及び硬化後の性状について実験により検討を行った。

2. 使用材料

使用した微粒珪砂の材料特性値を表-1 に示す。密度は 2.65g/cm³、平均粒径は 70 μ m 程度、粉末度は 1000cm²/g である。化学組成は SiO₂ が 93.2% を占めているが、常温では不活性な材料である。また、製品珪砂は湿式により製造されているため、微粒珪砂は含水状態で排出されている。廃棄される微粒珪砂は自然放置、真空脱水等の脱水方法が取られ、その含水率は自然放置では排出直後 30～33%、放置後 23～27%、真空脱水では 24～26% 程度である。

表-1 微粒珪砂の材料特性値

化学組成								
成分名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
(%)	93.20	3.25	0.10	0.06	0.00	0.02	0.16	2.69
粒度分布								
ふるい目(μm)	300	150	106	75	53	32	Pan	
残留率(%)	0.1	1.2	8.3	20.5	28.6	39.3	2.0	
物性値								
密度	平均粒径		比表面積			強熱減量		
2.65g/cm ³	70μm		1000cm ² /g			0.26%		

* 1 矢作建設工業(株) 技術企画部 技術開発課 (正会員)

* 2 竹本油脂(株) 第三事業部 (正会員)

* 3 日本コンクリート(株) 技術部 次長 (正会員)

* 4 名古屋工業大学大学院教授 都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

表-2 使用材料

使用材料	種 類	記号	物性または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度:3.15g/cm ³ , 比表面積:3290cm ² /g
細骨材*1	山砂(豊田産)	S1	密度:2.56g/cm ³ , 吸水率:1.8%, 粗粒率:2.78
	山砂(木曽川水系)	S2	密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.8%, 粗粒率:2.85
粗骨材	碎石(外ノ原産)	G	密度:2.70g/cm ³ , 吸水率:0.5%, 粗粒率:6.80, 最大寸法:20mm
混和材	微粒珪砂(瀬戸産)	K	密度:2.65g/cm ³ , 比表面積:1000cm ² /g
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	主成分:ポリカルボン酸系

*1: 記号 S1 はモルタルによる予備実験で使用、記号 S2 はコンクリートの検討で使用

表-3 モルタルの配合

表-2 に使用材料を示す。
セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材及び粗骨材は製品工場で使用されている材料を用いた。高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸系を用いた。

3. 実験概要

実験は、微粒珪砂を細骨材容積内割で置換したモルタルによる実験 1, 含水状態の異なる微粒珪砂を用いたコンクリートによる実験 2 ならびに高流動コンクリートへの適用を検討した実験 3 である。

3.1 モルタルによる検討 (実験 1)

(1) 配合及び試験項目

配合は JSCE-F505 に準拠し、水セメント比 50%とし、試験練りを行いフロー値 195mm 程度となる細骨材量を求め基本配合とした。配合を表-3 に示す。実験は 2 つの検討項目別に行った。シリーズ 1 は含水状態で微粒珪砂を用いた場合の性状検討、シリーズ 2 は高性能 AE 減水剤使用時の性状検討である。なお、微粒珪砂は絶乾での単位量を基本とし、含水量は単位水量の一部として扱い水セメント比を計算した。微粒珪砂の使用方法は以下のとおりである。シリーズ 1 では含水率 14%の状態では細骨材と置換して用いた。置換率は、細骨材容積内割で 0.0, 5.1, 9.4, 14.3, 18.8%の 5 水準である。シリーズ 2 では炉乾燥を行った微粒珪砂を用いた。置換率は、細骨材容積内割で 0.0, 4.9, 9.7, 14.6,

シリーズ	No	置換率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (%)
				W*1	C	S1	K*2	
1	基本	0.0	50.0	283	568	1371	0	-
	基本'		55.0	312		1299		
	基本''		60.0	341		1226		
	1	5.1	51.5	283(293)		1279	81(71)	
	2	9.4	53.0	283(301)		1203	147(129)	
	3	14.3	54.5	283(310)		1118	220(193)	
	4	18.8	56.0	283(318)		1043	285(250)	
	基本	0.0	50.0	227	454	1610	0	1.0
2	1	4.9				1532	81	
	2	9.7				1454	162	
	3	14.6				1375	243	
	4	19.5				1296	325	

*1: ()内は微粒珪砂を含む水分を考慮した値

*2: ()内は微粒珪砂を含む水分を差し引いた値

19.5%の 5 水準である。なお、シリーズ 1 では微粒珪砂の置換率の増加により単位水量が大きくなるため、基本配合 (置換率 0.0%) の単位水量を 3 水準変化させ、水セメント比を 50, 55, 60%とし比較した。シリーズ 2 は、高性能 AE 減水剤をセメント質量の 1.0%または 1.7%添加した。

試験項目は、フロー試験及び材齢 7 日、28 日での圧縮強度試験である。ただし、ここで示すフロー値は、フローテーブルにより 15 回落下運動を与えたものである。

(2) 実験結果及び考察

シリーズ 1 の水セメント比とフロー値の関係を図-1 に示す。図より基本となる無置換のものは、単位水量の増加に伴いフロー値がほぼ直線的に増加する。一方、微粒珪砂で置換したものは、置換率の増加に伴い単位水量が増加するにもかかわらずフロー値の増加が見られない。このことより、微粒珪砂の含水量は流動性に寄与していないと考えられる。

シリーズ1の水セメント比と圧縮強度の関係を図-2 に示す。図より材齢 7 日における強度を見ると、微粒珪砂で置換したものと無置換の差は見られなかった。材齢 28 日では、置換率 9.4, 14.3, 18.8% で 5% 程度の強度低下が見られた。また、強度低下が 5% 程度であることより、微粒珪砂の含水量は単位水量の一部として考慮する必要があると考えられる。

シリーズ2の試験結果である微粒珪砂置換率とフロー値の関係を図-3 に示す。図より微粒珪砂の置換率の増加に伴いフロー値が低下するのが分かる。フロー値の低下の要因としては、微粒珪砂が練混ぜ水の一部を拘束することにより、流動性に係わる水量が減少したためと考えられる。また、置換率 19.5% では SP 添加率を 1.7% に増加したところ、フロー値の回復が見られた。よって、SP 添加率の調整により目標とするフロー値を得ることができる可能性が確認できた。

シリーズ2の置換率と圧縮強度の関係を図-4 に示す。材齢 28 日の圧縮強度より、置換率 9.7% が最も大きい値を示し、その他の水準も無置換より大きい値を示した。この強度増加の要因は、SP の添加によりセメント粒子の分散性が高まり、微粒珪砂粒子がセメント粒子のフロックの中に入り込み、セメントが水和しやすい状態になったためと考えられる。

3.2 微粒珪砂の含水率の相違がコンクリートに及ぼす影響の検討 (実験 2)

微粒珪砂は含水状態で排出されているが、経済性、環境等を考えると排出された状態で使用することが望ましい。また、含水状態で使用する場合、配合設計を考える上で含水量の変動が及ぼす影響を考慮する必要がある。そこで、含水率調整を施した微粒珪砂を用い、含水率の相違がフレッシュ及び硬化後のコンクリートに及ぼす影響について検討を行った。

(1) 配合及び試験項目

コンクリートによる検討は、スランプ試験がコンシステンシーを満足に示し得るといわれて

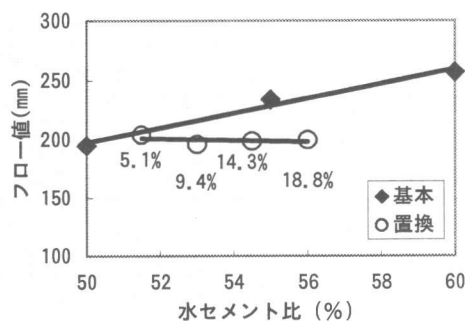


図-1 水セメント比とフロー値の関係

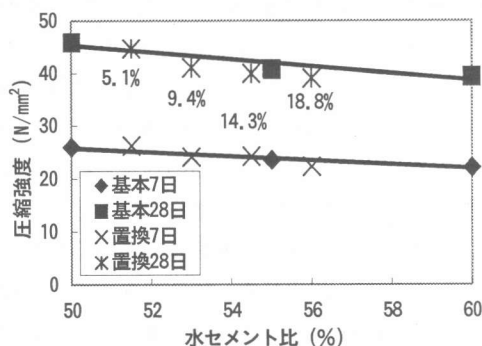


図-2 水セメント比と圧縮強度の関係

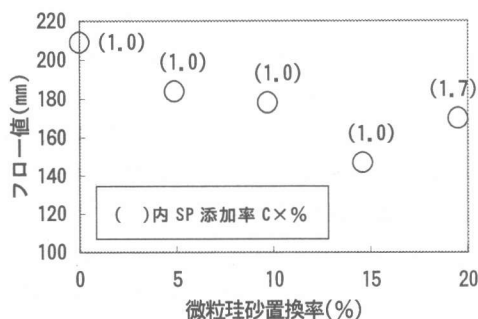


図-3 微粒珪砂置換率とフロー値の関係

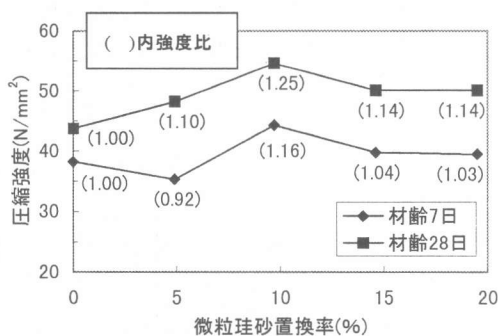


図-4 微粒珪砂置換率と圧縮強度の関係

表-4 配合及び実験結果

シ -ズ	含水率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						スラン プ [*] (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)	
				W* ¹	C	K* ²	S2	G	SP			7 日	28 日
1	0.0	62.3	34.7	207	332	142	551	1083	—	5.0	3.3	22.0	27.1
	12.7			189(207)		160(142)				4.0	2.4	25.6	30.4
	21.8			176(207)		173(142)				5.0	1.8	24.6	33.9
	30.3			164(207)		185(142)				5.0	1.5	25.5	32.0
	0.0			204		145				13.0	1.5	39.1	53.8
2	15.2	49.8	49.1	182(204)	410	167(145)	748	813	5.535	11.0	1.6	41.8	50.6
	30.3			160(204)		189(145)				13.0	1.4	41.5	54.2
	0.0			204		145				13.0	1.4	41.5	54.2

* 1 : ()内は微粒珪砂に含む水分を考慮した値

* 2 : ()内は微粒珪砂に含む水分を差し引いた値

いるスランプ値 2.5~15cm の範囲で行った。配合及び実験結果を表-4 に示す。実験は2つのシリーズについて行った。同一シリーズでの単位セメント量, 単位細骨材量, 単位粗骨材量は一定である。また, 微粒珪砂は絶乾状態での単位量を一定とし, 微粒珪砂の含水量は, 単位水量の一部として扱い単位水量一定とした。各シリーズの詳細は以下のとおりである。シリーズ1は混和剤を使用せず, 絶乾状態での単位微粒珪砂量 142kg/m³一定とし, 含水率を0.0, 12.7, 21.8, 30.3%の4水準とした。シリーズ2は高性能 AE 減水剤の添加率をセメント量に対し1.35%一定, 単位微粒珪砂量 145kg/m³一定とし, 含水率を0.0, 15.2, 30.3%の3水準とした。

試験項目は, スランプ試験, 空気量試験, 材齢7日及び28日における圧縮強度試験である。

(2) 実験結果及び考察

表-4 に示すシリーズ1の実験結果より, プレーンの場合, 含水率の低いものほど空気量が大きくなる傾向が見られた。スランプに関してはほぼ同様の値を示した。また, この空気はエントラップドエアであるため, 空気量の相違がスランプに大きく影響を及ぼしていないと考

えられることより, 含水率が変化しても含水量を含めた単位水量を一定とすれば, ほぼ同様のコンシステンシーが得られると考えられる。圧縮強度に関しては, 空気量の影響を反映し空気量の大きいものが低い値を示す結果となった。

シリーズ2では含水率が15.2%でスランプが小さい値を示したが, 空気量, スランプ, 圧縮強度とも明確な差は認められなかった。よって, 含水状態の異なる微粒珪砂を用いても, 含水量を単位水量に含め考慮することにより, フレッシュ及び硬化後の性状が同様となるコンクリートの製造が可能であると考えられる。

3.3 高流動コンクリートへの適用(実験3)

(1) 配合及び練混ぜ・養生方法

高流動コンクリートの配合を表-5 に示す。今回設計基準強度が30N/mm²の製品を対象とし, 製品工場における割増し係数1.3を採用し, 配合強度を39N/mm²とした。水セメント比は50%一定とし, 単位セメント量を370, 380kg/m³の2水準, 単位微粒珪砂量を73, 106, 145, 193kg/m³の4水準とし, それらを組み合わせ2つのシリーズについて実験を行った。高性能 AE 減水剤の添加量は, 目標スランプフローを650±50mmとして適宜決定した。なお,

表-5 高流動コンクリートの配合

シ -ズ	配合 No	W/C (%)	s/a (%)	W/V _c +V _k	単位量(kg/m ³)					
					W	C	K	S2	G	SP(C×%)
1	1	50.0	49.0	1.27	185	370	73	822	895	7.03(1.90)
	2		48.0	1.17			106	789		8.14(2.20)
	3		46.8	1.07			145	752		9.99(2.70)
2	4	50.0	49.0	1.28	190	380	73	812	884	6.46(1.70)
	5		48.0	1.18			106	779		7.60(2.00)
	6		46.7	1.08			145	741		8.55(2.25)
	7		45.1	0.98			193	694		9.31(2.45)

表-6 高流動コンクリートの実験結果

*1 種別	スランブフロー			間げき通過性試験		空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)		状態*2
	(mm×mm)	500mm 到達 時間(s)	停止時間 (s)	充てん 高さ(mm)	充てん 時間(s)		1 日	14 日	
1-1	615×580	8.2	40.2	—	—	1.2	18.2	43.8	やや分離
1-2	615×590	9.3	49.3	—	—	0.9	20.9	46.0	良好
1-3	690×660	8.1	70.4	—	—	0.8	13.9	44.3	やや分離
2-4	655×640	6.4	45.4	210	46.0	0.7	15.3	45.2	やや分離
2-5	700×680	6.7	51.7	325	78.1	0.9	22.4	53.1	良好
2-6	685×670	7.4	57.2	200	100.4	0.5	17.0	43.2	良好
2-7	730×680	6.7	79.3	320	121.0	1.8	20.8	47.3	良好

*1：種別はシリーズ-配合 No で表示

*2：スランブフローでの目視判断による材料分離の程度を示した

微粒珪砂は絶乾状態で使用した。各シリーズでの配合の詳細は以下のとおりである。シリーズ1は、単位セメント量 370kg/m³ 一定、単位粗骨材量 895kg/m³ 一定とし、単位微粒珪砂量を 73, 106, 145kg/m³ の3水準とした。シリーズ2は、単位セメント量 380kg/m³ 一定、単位粗骨材量 884kg/m³ 一定とし、単位微粒珪砂量を 73, 106, 145, 193kg/m³ の4水準とした。

練混ぜは容量 0.1m³ の二軸強制練りミキサを使用し、練混ぜ量は 0.05m³ とした。骨材、セメント、微粒珪砂を投入し 30 秒空練りした後、混和剤を溶解させた練混ぜ水を加え、150 秒練り混ぜた。

養生は常圧の蒸気養生を行い、蒸気養生は前養生 3 時間、昇温速度 15℃/hr、最高温度 65℃ で 3 時間保持した後、自然冷却とした。その後は、試験材齢まで屋内で気中養生を行った。

(2) 試験項目

試験項目は、フレッシュではスランブフロー試験、空気量試験、単位容積質量試験である。なお、シリーズ2は、U 形充てん装置による間げき通過性試験（障害 R2）²⁾ を実施した。硬化後は、材齢 1 日（脱型強度目標値 12N/mm²）及び 14 日での圧縮強度試験である。

(3) 実験結果及び考察

実験結果一覧を表-6 に示す。単位微粒珪砂量とスランブフローの関係を図-5 に示す。図より単位セメント量に着目すると 370kg/m³ であるシリーズ1と 380kg/m³ であるシリーズ2では、SP 添加量が低いシリーズ2のスランブフローが大きく現れた。単位微粒珪砂量に着目

すると、シリーズ1では単位微粒珪砂量が 73kg/m³ の時スランブフロー600mm 程度で材料分離の性状を呈したが、単位微粒珪砂量 106kg/m³ で材料分離せずスランブフロー600mm 程度が得られた。シリーズ2では単位微粒珪砂量 73kg/m³ の時スランブフロー650mm 程度で材料分離の傾向が見られたが、単位微粒珪砂量の増加に伴い SP 添加量を増加しても材料分離を生じずスランブフローが大きく現れた。このことより、微粒珪砂を用いることにより材料分離抵抗性が増し、流動性が改善されることがわかる。

U 形充てん装置による間げき通過性試験の結果を図-6 に示す。図より単位微粒珪砂量 106, 193kg/m³ で充てん高さが 300mm 以上となり、自己充てん性を有しているものと判定される。また、単位微粒珪砂量 145kg/m³ では充てん高さ 300mm を下回り不合格となっているが、SP

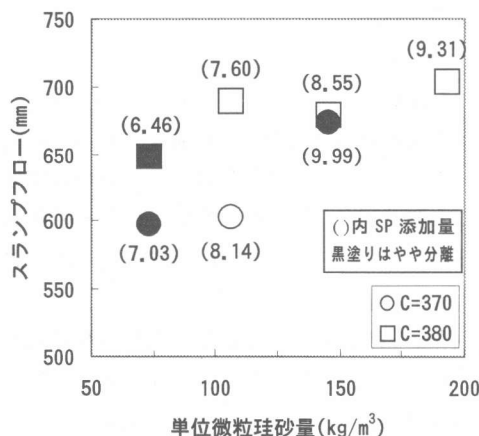


図-5 単位微粒珪砂量とスランブフローの関係

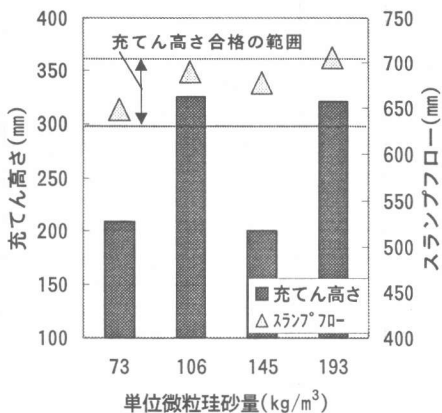


図-6 単位微粒珪砂量と充てん高さ、スランプフローの関係

添加量の調整により自己充てん性を得ることができると考えられる。よって、水セメント比 50%，単位セメント量 380kg/m^3 の時、スランプフロー700mm 程度の自己充てん性を有する高流動コンクリートを得るには、単位微粒珪砂量を $106\sim 193\text{kg/m}^3$ 程度で選定すれば良いと考えられる。

単位微粒珪砂量と圧縮強度の関係を図-7 に示す。図より単位セメント量 380kg/m^3 ，単位微粒珪砂量 106kg/m^3 のものが材齢 14 日で大きい値を示したが、材齢 1 日及び 14 日とも微粒珪砂混入量の相違による強度の明確な差は確認できなかった。また、いずれの配合においても目標強度を満足しており、設計基準強度 30N/mm^2 の工場製品に適用可能であることが認められた。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- (1) 微粒珪砂の含水量を単位水量に含め考慮することにより、フレッシュ及び硬化後の性状が同様となるコンクリートの製造が可能であることが示唆された。
- (2) 微粒珪砂を用いることにより材料分離抵抗性が増し、流動性が改善されることより粉体系高流動コンクリートへの適用が可能である。
- (3) 水セメント比 50%，単位セメント量 380

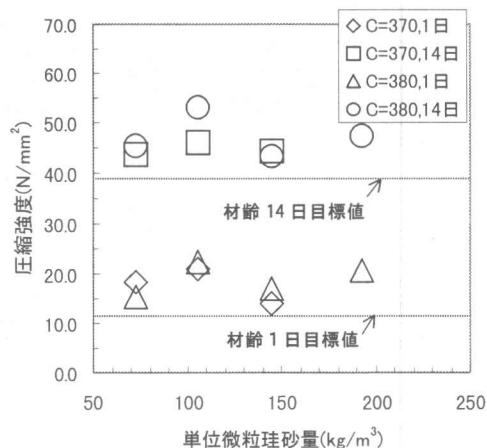


図-7 単位微粒珪砂量と圧縮強度の関係

kg/m^3 の場合、スランプフロー700mm 程度の自己充てん性を有する高流動コンクリートを得るには、単位微粒珪砂量を $106\sim 193\text{kg/m}^3$ 程度で選定すれば良いとの結果を得た。

(4) 水セメント比 50%，単位セメント量 380kg/m^3 の場合、単位微粒珪砂量を $106\sim 193\text{kg/m}^3$ 程度で選定すれば設計基準強度 30N/mm^2 の工場製品に適用可能であることが認められた。

謝辞

本研究は微粒珪砂活用研究会の活動の一環として実施したものであり、研究を遂行するに当たって、愛知県珪砂鉱業協同組合 三浦明氏、住友大阪セメント(株)滝瀬直登氏、日本コンクリート(株)井上勝利氏、丸栄コンクリート工業(株)森信夫氏、エフ・ピー・ケー(株)花田安弘氏、地建興業(株)西尾王孝氏に多大なご助力を頂いた。ここに記し深く感謝致します。

参考文献

- 1) 桐山和也・服部啓二・森嶋和博・梅原秀哲：微粒珪砂副産物のインターロッキングブロックへの活用に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp.187～192，1999
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー93 高流動コンクリート施工指針，1998