

# 論文 微粒珪砂の含水率がコンクリートの物性に及ぼす影響に関する研究

平原 英樹<sup>\*1</sup>・上原 匠<sup>\*2</sup>・佐藤 貢<sup>\*3</sup>・梅原 秀哲<sup>\*4</sup>

**要旨**：産業副産物である微粒珪砂が湿潤状態で排出されることを考慮して、微粒珪砂の含水率の違いがコンクリートの物性に及ぼす影響について、実験を基に検討した。実験から、異なる含水率の微粒珪砂を用いても、水セメント比 50%、単位水量 185kg/m<sup>3</sup>の配合に対して、スランプフロー750mm程度、圧縮強度 57N/mm<sup>2</sup>程度の高流動コンクリートの製造が可能であるとの結果を得た。したがって、排出時の湿潤状態での含水量を単位水量に含めて考慮することで、フレッシュおよび硬化後の物性が均一なコンクリートの製造が可能である。

**キーワード**：産業副産物、微粒珪砂、高流動コンクリート、高性能AE減水剤、含水率

## 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シェアが約1/3を占める国内最大の製品珪砂供給地である。年間の原鉱珪砂採掘量は約230万トンもあり、これを原料に精製工場での選鉱工程を得てガラス用製品珪砂が生産されている<sup>1)</sup>。この選鉱工程の際には約50万トンもの珪砂廃棄物が産業副産物として排出され、このうちの約20万トンが微粒珪砂(5~100 $\mu$ m)である。セメントやタイル原料等で一部は再利用されているものの、約80%は埋戻し処分されており、資源としての有効利用が重要な課題となっている。現在は、インターロッキングブロックへの利用も進められている<sup>2)</sup>が、本研究室では微粒珪砂の利用拡大、すなわち、多量利用を目的に、高流動コンクリート用材料としての適用に関する研究を進めている。これまでの研究では、微粒珪砂を粉体として使用することにより、材料分離抵抗性が付与され、高性能AE減水剤を併用することにより、スランプフロー500mm程度、圧

縮強度約33N/mm<sup>2</sup>程度の準高流動コンクリートの製造が可能であることを実験より明らかにした<sup>3)</sup>。ところで、珪砂製品が湿式方式で生産されることから、微粒珪砂も湿潤状態で排出されている。省エネルギーの観点からも、排出された状態での幅広い活用を促す上では、湿潤状態の違いがフレッシュおよび硬化後のコンクリートの物性に及ぼす影響について把握する必要がある。そこで本研究では、含水率の違いがフレッシュおよび硬化後のコンクリートの物性に及ぼす影響について実験を基に検討した。

## 2. 使用材料

表-1に微粒珪砂の化学組成、粒度分布お

表-1 微粒珪砂の化学組成、粒度分布および物性値

微粒珪砂の主な化学組成								
成分名	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
(%)	93.20	3.25	0.10	0.60	0.00	0.02	0.16	2.69
微粒珪砂の粒度分布								
ふるい目( $\mu$ m)	300	150	106	75	53	32	Pan	
残留率(%)	0.1	1.2	8.3	21.0	26.6	39.3	2.0	
微粒珪砂の物性値								
密度	平均粒径			比表面積	強熱減量			
2.65g/cm <sup>3</sup>	70 $\mu$ m			1000cm <sup>2</sup> /g	0.26%			

\*1 名古屋工業大学文部技官

工学部社会開発工学科 (正会員)

\*2 名古屋工業大学助教授

工学部社会開発工学科 工博 (正会員)

\*3 名古屋工業大学大学院

工学研究科都市循環システム工学専攻

\*4 名古屋工業大学大学院教授

工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

よび物性値を示す。原石に含まれる鉱物は、石英が 80～85%、長石が 10～15%を占める。化学組成をみるとシリカ成分が 93.2%を占めているが、常温では不活性な材料である<sup>4)</sup>。微粒珪砂の密度は 2.65g/cm<sup>3</sup>、Ig-Loss は 0.26%、平均粒径は 70 μm 程度である。また、粉末度は 1000cm<sup>2</sup>/g と高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末、フライアッシュ等よりも小さい粉体である。ところで、湿潤状態の微粒珪砂は、個々の粒子の表面水に加えて、粒子間の隙間にも水を取り込むことから、本研究では配合設計に用いる単位微粒珪砂量に含まれる水を拘束水と定義した。なお、拘束水量は含水率より求められる。コンクリート用材料として用いるには、取り扱いの容易さや品質管理の上でも気乾または絶乾状態が望ましいが、利用の拡大を含め、経済性や環境への配慮から、実用化の段階では排出された湿潤状態での利用が想定される。微粒珪砂の脱水方法は自然放置の場合が多く、この場合排出直後の自然放置された状態で 30～33%程度の含水率を示す。その後堆積して時間が経過するにしたがい含水率も 20%程度へと小さくなっていく。今回実験用として搬入した微粒珪砂の含水率は約 16%であった。ところで本実験では、異なる含水率の微粒珪砂を用意する必要がある。一般に、湿潤状態の粉体を絶乾状態にすると、凝集して固まりが生じ、容易には粉体には戻らない場合があり、コンクリート用材料として用いると初期欠陥となる。しかし、写真 1 に示すように、微粒珪砂は炉乾燥後も凝集せず、均一な粉体のままである。そこで、微粒珪砂を一度乾燥炉で絶乾状態にした後、必要な水量を加えてよく練り混ぜ、所定の含水率に調整して実験に用いた。

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、

細骨材および粗骨材は名古屋近郊の生コン工場で使用されている材料を用いた。高性能 AE 減水剤にはポリカルボン酸系を用いた。

### 3. 実験概要

微粒珪砂には化学的な強度発現効果は期待できないことから、本研究では、微粒珪砂を細骨材との置換材料として取り扱う。材料分離抵抗性の付与が既に確認されていることから、検討すべき項目は、湿潤状態で使用する際の微粒珪砂の置換率および含水率の変動による拘束水量の違いがコンクリートのフレッシュおよび硬化後の物性へ及ぼす影響である。

#### 3. 1 湿潤状態での利用に関する検討

拘束水の影響の把握を目的に、微粒珪砂の置換率を変えて実験を行った。配合は、単位セメント量および単位粗骨材量一定のもと、土木学会の「高流動コンクリート施工指針」を参考にした<sup>5)</sup>。微粒珪砂を湿潤状態で使用するため、拘束水量は単位水量の一部と考えた。高性能 AE 減水剤の添加量は、微粒珪砂無混入の場合に材料分離が生じない範囲でスランプが最大とな

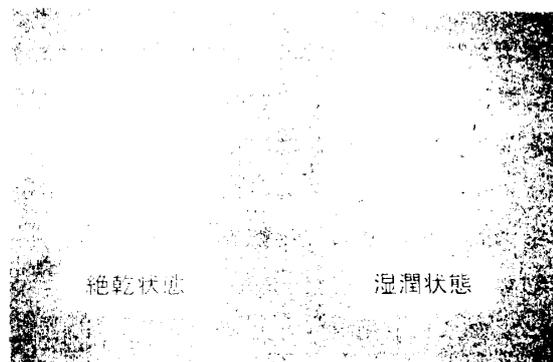


写真 1 微粒珪砂

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 <sup>3</sup> , 比表面積:3340cm <sup>2</sup> /g
細骨材	山砂(豊田産)	S	密度:2.55g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.32%, 粗粒率:2.82
粗骨材	碎石(春日井産)	G	密度:2.69g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.79%, 粗粒率:6.78, 最大寸法:20mm
混和材	微粒珪砂(瀬戸産)	K	密度:2.65g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:1000cm <sup>2</sup> /g
混和剤	高性能AE減水剤	SP	主成分:ポリカルボン酸系, 空気連行型

表-3 配合および試験結果

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		W *1	C	K *2	S	G			
50	53.9	170	340	0	941	846	15	2.2	46.2
	51.3	157(170)		113(97)	847		8.5	3.4	45.1
	48.3	138(170)		227(195)	753		0.5	3.5	42.9

\* 1:( )内は微粒珪砂の拘束水を考慮した値

\* 2:( )内は絶乾での値

る値 (C×0.7%) を採用した。この場合のスランプフロー値は300mm程度であった。表-3に実験での配合および試験結果を示す。表より、微粒珪砂の混入量が増すにしたがって、スランプが小さくなるのがわかる。すなわち、含水率16%程度の微粒珪砂の拘束水は、練混ぜ時には排出されず、逆に投入水の一部を新たに拘束し、コンシステンシーが小さくなる可能性が考

えられる。ただし、圧縮強度は微粒珪砂の拘束水を考慮した水セメント比にほぼ比例する結果となった。したがって、湿潤状態で利用する場合、細骨材との置換率や練混ぜ時の微粒珪砂の含水率から算出される拘束水量を単位水量に含める必要がある。そこで、湿潤状態の微粒珪砂の自由水の拘束能力の把握を目的に、微粒珪砂の最大拘束水量ならびに自由水の拘束能力について実験より検討した。

### 3. 2 微粒珪砂による自由水の拘束に関する検討

#### (1) 微粒珪砂の最大拘束水量

実験はメスシリンダー内の絶乾状態の試料に、排出時の含水率を想定して含水率で35%から50%となるように所定の水量を加え、約30秒間攪拌した後、静置し、堆積量の経時変化より微粒珪砂の最大拘束水量の把握を試みた。表-4に実験結果を示す。絶乾試料200gに対して投入水量が70.0gの場合は余剰水は見られなかった。投入水量が80.0gの場合、余剰水の水位と微粒珪砂の堆積量の差は、10.0mlとなった。24

表-4 微粒珪砂の拘束水量

試料名	A-0	A-1	A-2	A-3
想定含水率 (%)	35	40	45	50
微粒珪砂質量(g)	200.0	200.0	200.0	200.0
投入水量(g)	70.0	80.0	90.0	100.0

※実験に用いた微粒珪砂の含水率は0%である

経過時間	A	B	C	D	
0分	W. L.	-	165	175	185
	K. L.	160	160	160	160
5分	W. L.	-	165	173	185
	K. L.	160	160	160	160
24時間	W. L.	-	165	173	185
	K. L.	160	155	155	160

※W. L. : 余剰水の水位(ml)

K. L. : 微粒珪砂の堆積量(ml)

時間後の微粒珪砂の堆積量に5mlのバラツキが見られるが、実験結果からは最大拘束水量は含水率表示で35%程度と推測される。

#### (2) 含水率の違いによる自由水の拘束速さ

含水率と最大拘束水量に達するまでの早さとの関係を把握する目的で、メスシリンダー内の各含水率の試料に対して、拘束水を含む合計が200mlとなる水を加え、約30秒間攪拌した後、静置し、堆積量の経時変化を観察した。図-1に実験結果を示す。攪拌直後のスラリーの状態での容積に差は見られなかったが、時間の経過にしたがい、余剰水と微粒珪砂に分離した。24時間後に、直径2.4mm、長さ50cm、質量27.8gの針金を堆積した試料に静かに載せ、自重により貫入させて堆積状態を観察した。D、E試料はメスシリンダー目盛の160ml程度までは、貫入による抵抗はなく、粒子は浮遊した状態であった。160ml以下では針金が試料に貫入される際に抵抗を受けるが、D、Eに比べA、B、Cの抵抗は大きく、また、D、Eでは自重により針金の先端がシリンダーの底に達するが、A、

B, Cでは次第に貫入抵抗が大きくなり底に到達しなかった。攪拌後の容積に差が見られないことから、多くの自由水が存在する場合、自由水の拘束速さへの含水率の違いによる差は見られないが、堆積の状況に差が生じ、特に含水率で30%を境にその差が大きくなる結果となった。

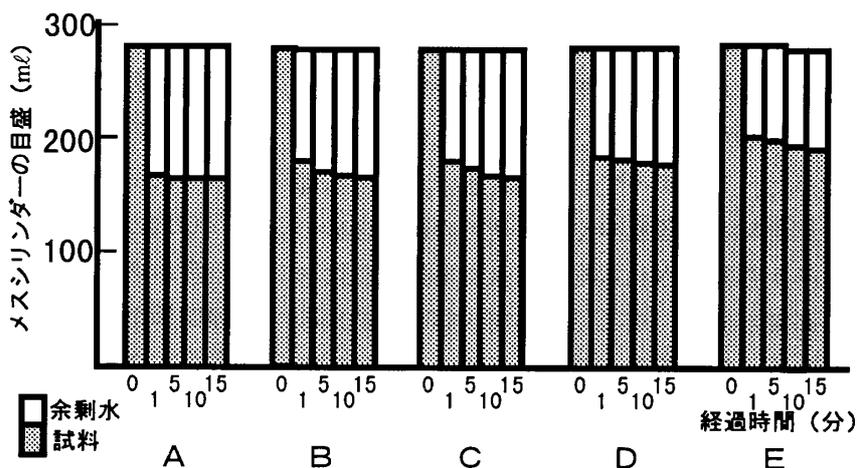
### 3. 3 高流動コンクリートへの適用

#### (1) 配合設計および練混ぜ・養生方法

湿潤状態の違いによる影響を確認するため、実際に排出されている状態での含水率が10~30%程度であることを考慮して、微粒珪砂の含水率は0, 10, 20, 30%の4水準設定した。練混ぜ時の投入水量と拘束水量の和が単位水量となるように含水率によって投入水量を調整した。表-5に配合表を示す。目標強度は設定せず、水セメント比を50%とし、微粒珪砂は細骨材と置換して用いた。これまでの研究から、微粒珪砂を絶乾状態で用いる場合、単位水量185kg/m<sup>3</sup>、水セメント比50%の条件の下では、微粒珪砂の置換率を10%、高性能AE減水剤の添加率をセメント質量の1%に設定することで、材料分離が生じないスランプフロー500mm程度の準高流動コンクリートが製造可能であるとの結果を得ている<sup>3)</sup>。そこで、スランプフロー700mm程度の高流動コンクリートへの適用を目的に、置換率を絶乾状態の微粒珪砂の容積で20%に設定した。すなわち、微粒珪砂の置換率を増やし材料分離抵抗性を高めることで、高性能AE

減水剤の添加率も高く設定することが可能となり、高スランプフローを得ることが可能と推測した。微粒珪砂の単位量は絶乾状態で187kg/m<sup>3</sup>となる。高性能AE減水剤については、空気連行型を使用し、高性能AE減水剤の添加率は、微粒珪砂の置換率20%に対する予備実験から、セメント質量に対して2.0%とした。目標空気量は4.5%である。

練混ぜは容量0.1m<sup>3</sup>のパン型強制練りミキサを使用し、練混ぜ容量は0.05m<sup>3</sup>とした。セメント、微粒珪砂、細骨材を投入し30秒間空練りし、高性能AE減水剤を溶解した練混ぜ水を加え、さらに30秒間モルタルの状態では練り混ぜた後、粗骨材を投入し120秒間練り混ぜた。排出後3分間静置した後、コンクリートを切り返して均一にしてフレッシュ試験に用いた。硬化コンクリート用供試体は、試験材齢まで標準養生を行



試料名	A	B	C	D	E
珪砂含水率 (%)	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
微粒珪砂質量 (g)	200.0	220.0	240.0	260.0	280.0
投入水量 (g)	200.0	180.0	160.0	140.0	120.0

図-1 含水率の違いによる攪拌後の微粒珪砂の堆積変化

表-5 配合

配合 No.	W/C (%)	微粒珪砂 含水率 (%)	SP添加率 C× (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W <sup>*1</sup>	C	S	G	K <sup>*2</sup>
No.0	50	0	2.00	48.5	185 (185)	370	719	807	187 (187)
No.1		10			166 (185)				206 (187)
No.2		20			148 (185)				224 (187)
No.3		30			129 (185)				243 (187)

\*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

の容積で20%に設定した。すなわち、微粒珪砂の置換率を増やし材料分離抵抗性を高めることで、高性能AE

表-6 試験結果

配合 No.	スランブ (cm)	スランブフロー (mm×mm)	空気量 (%)	単位体積質量 (t/m <sup>3</sup> )	SI値 (%)	状態	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			弾性係数*1 × 10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度*1 (N/mm <sup>2</sup> )
							3日	7日	28日		
No.0	27.5	765×730	1.9	2.34	77.6	良好	32.6	45.2	56.7	3.68	3.50
No.1	27.5	750×720	2.0	2.33	80.5	良好	32.2	43.9	55.9	3.66	4.20
No.2	27.5	725×715	1.0	2.36	74.4	良好	33.0	46.4	60.4	3.69	3.67
No.3	28.0	775×760	1.7	2.34	76.2	良好	31.8	44.4	54.3	3.54	3.21

※1: 材齢28日での値

った。

(2) 試験項目

試験項目は、スランブフロー試験、空気量試験、単位容積質量試験、および圧縮強度試験、弾性係数試験、引張強度試験である。

(3) 実験結果および考察

表-6 に実験結果を示す。表よりスランブフローの値は、各配合とも目標とする700mmを満たしていることがわかる。配合No.3でのスランブフローの値は770mmとなったが、フローの端部まで粗骨材が達しており、また、ミキサから排出された後の切り返しの状態においても、骨材の沈降が見られなかったことから、材料分離は生じていないと判定した。目視によるスランブフロー試験結果の状態は、いずれの配合でも良好であり、材料分離は生じていないと判定した。空気量はいずれの配合とも目標値を下回る結果となったが、これまでの研究成果から、高性能AE減水剤の添加率を下げ、AE助剤を添加することで、同程度のコンシステンシーを維持し、所定の空気量を得ることは可能であると考えられる。

図-2 に示す含水率とスランブフローの関係から、微粒珪砂の含水率が20%まではスランブフローが低減していることがわかる。このことは微粒珪砂による自由水の拘束早さに差が生じたことを示し、先のメスシリンダーを用いた結果と異なる。これは、攪拌能力の差によるものと考えられる。したがって、練混ぜ時間およ

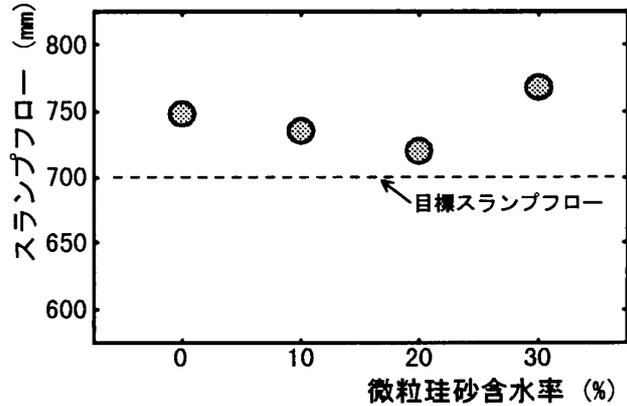


図-2 微粒珪砂含水率とスランブフローの関係

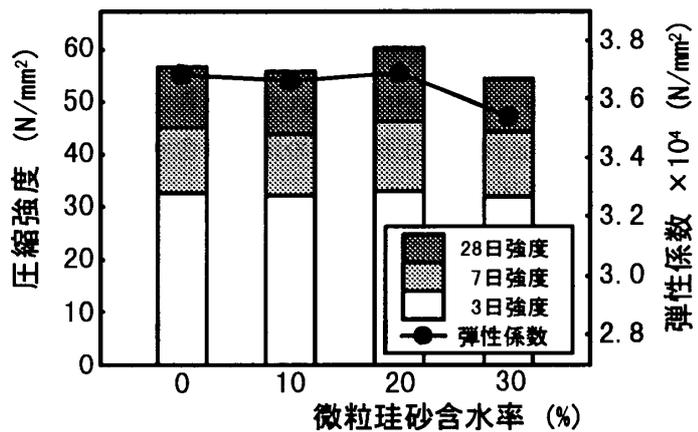


図-3 微粒珪砂含水率と圧縮強度および弾性係数の関係

びスランブフロー値はミキサの攪拌能力と含水率により影響を受ける場合もあると言えよう。また図に示すように、含水率30%ではスランブフロー値が逆に増大していることから、微粒珪砂が外力に対して拘束可能な最大拘束水量は含水率表示で30%未満であると推測される。したがって、実用上適切な含水率は20%程度と考えられる。

図-3 に示す含水率と圧縮強度の関係から、含水率の違いによる圧縮強度の差は生じていないことがわかる。圧縮強度の値は供試体3本の

平均値であるが、各供試体ごとのバラツキも見られなかった。材齢3日目での圧縮強度が $32\text{N/mm}^2$ 程度、7日目では $45\text{N/mm}^2$ 程度、28日目での圧縮強度が $57\text{N/mm}^2$ 程度確保されていることから、微粒珪砂を有効利用することで、粉体としてのセメントの使用量を少なくした配合においても、スランプフロー750mmで、材料分離が生じない高流動コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。また、材齢28日での圧縮強度が $57\text{N/mm}^2$ 程度でバラツキが小さいことから、弾性係数も $3.64 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 程度で安定しており、土木学会で示す弾性係数と圧縮強度の関係に比べ、 $0.2 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 程度の差であり、一般のコンクリートと同等であると言えよう。

図-4に引張強度試験結果を示す。含水率10%の場合に $4.2\text{N/mm}^2$ と他に比べ大きな値となったが、含水率の差に起因するとは考えられず、今回の結果からは特に差は見られないと判定した。なお、引張強度と圧縮強度の比率は含水率10%を除き約1/16.5程度であった。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1)本研究で使用した微粒珪砂の最大拘束水量は、含水率換算で35%程度であり、練混ぜ等で外力を受けると拘束水量は小さくなる。
- (2)水セメント比50%、単位水量 $185\text{kg/m}^3$ の場合、微粒珪砂を置換率20%で細骨材と置換した配合では、高性能AE減水剤を適量用いることで、スランプフローが750mm程度、圧縮強度が $57\text{N/mm}^2$ 程度の良好な高流動コンクリートが製造可能である。
- (3)含水率がフレッシュ性状に及ぼす影響は特に確認されなかったが、含水率が0%から20%と大きくなるにしたがってコンクリートのスランプフローは低減し、30%になると逆に拘束水を排出して、スランプフローは大きくなった。

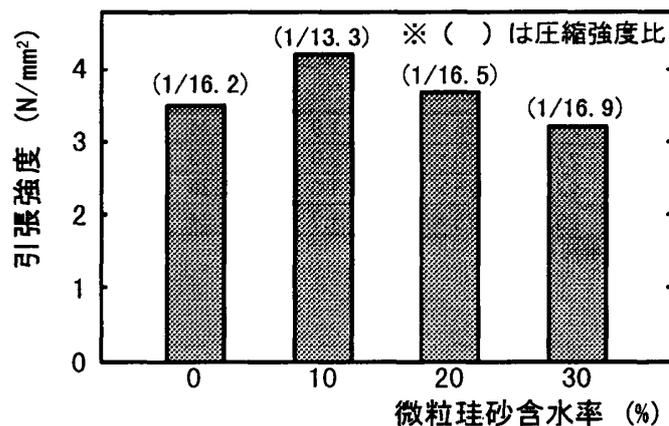


図-4 微粒珪砂含水率と引張強度の関係

実用上適切な含水率は20%程度と考えられる。

(4)圧縮強度への含水率の影響は特に確認されなかった。引張強度、および弾性係数に関しては、実験値にバラツキは見られるが、含水率に起因する影響は特に確認されなかった。

(5)微粒珪砂を湿潤状態で使用する場合、その含水率の違いが高流動コンクリートのフレッシュおよび硬化後の物性に及ぼす影響は、特に確認されないことから、微粒珪砂を混入したコンクリートの配合設計を行う際に、その含水量を単位水量に含めて設計することで、フレッシュおよび硬化後の物性が均一なコンクリートの製造が可能であると考えられる。

#### 参考文献

- 1)愛知県瀬戸窯業技術センター・愛知県珪砂鉱業協同組合：微粒珪砂等の実態調査報告書，1993
- 2)桐山和也他：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.21-1, pp.187~192,1999
- 3)上原匠他：微粒珪砂を混入した高流動コンクリートの物性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.21-2, pp.469~474,1999
- 4)森野奎二：珪酸質汚泥のオートクレイブ養生製品への活用化について，応用地学の進歩（岩波潤教授記念論文集），pp.179~195,1974
- 5)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