

論文 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

上原 匠^{*1}・平原英樹^{*2}・梅原秀哲^{*3}・服部啓二^{*4}

要旨：産業副産物である微粒珪砂（主成分は SiO_2 ，粉末度は約 $1000\text{ cm}^2/\text{g}$ ）の有効利用を目的に，粉体として高流動コンクリートに用いた場合のフレッシュ性状および硬化物性について実験的検討を行った。実験結果から，微粒珪砂を粉体として使用することにより流動性が改善され，微粒珪砂の粉体系高流動コンクリートへの利用が可能であることが認められた。なお，水セメント比 50%，単位水量 $170\text{ kg}/\text{m}^3$ の場合に安定して得られるスランプフローは 500 mm 程度であり，材齢 28 日における圧縮強度は約 $33.0\text{ N}/\text{mm}^2$ 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 A E 減水剤

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の約1/3を占め，島根地区と並ぶ国内最大の供給地である¹⁾。現在，原鉱珪砂の年間採掘量は約230万トンであり，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。ところで，この選鉱工程の際に，約50万トンもの微粒珪砂廃棄物が産業副産物として排出される。このうちの約20万トンは産業廃棄物（汚泥）指定を受ける微粒珪砂（ $5\sim 100\mu\text{m}$ ）である。微粒珪砂の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。そこで，産業副産物である微粒珪砂を粉体系高流動コンクリートに有効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，フレッシュ性状および硬化後の物性について実験的検討を行った。

2. 使用材料

表-1 に使用した微粒珪砂の化学組成，粒度分布および物性値を示す。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²⁾。微粒珪砂の比重は 2.65，Ig-Loss は 0.26%，平均粒径は $70\mu\text{m}$ 程度である。また，粉末度は $1000\text{ cm}^2/\text{g}$ 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低い粉体である。ところで，現在珪砂製品が湿式方式で生産されることから，副産物も湿潤状態で排出されている。混和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，経済性や環境への配慮から，排出された状態のままで用いることとした。微粒珪砂の脱水方法は自然放置の場合が多く，この場合排出直後に自然放置されている状態で 30～33%程度の含

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 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	0.6	0.00	0.02	0.16	2.69
微粒珪砂の粒度分布								
ふるい目(μm)	300	150	106	75	53	32	Pan	
残留率(%)	0.1	1.2	8.3	21	28.6	39.3	2.0	
微粒珪砂の物性値								
比重		平均粒径		比表面積		強熱減量		
2.65		70 μm		1000cm ² /g		0.26%		

*1 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）

*2 名古屋工業大学技官

工学部社会開発工学科（正会員）

*3 名古屋工業大学教授

大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D.（正会員）

*4 矢作建設工業㈱ 技術企画部

技術開発課 課長（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	比重:3.15,比表面積:3340cm ² /g
細骨材	山砂(豊田産)	S	比重:2.56,吸水率:1.76%,粗粒率:2.78
粗骨材	碎石(春日井産)	G	比重:2.69,吸水率:0.79%,粗粒率:6.78,最大寸法:20mm
混和材	微粒珪砂	K	表-1参照
混和剤	高性能AE減水剤	SP	主成分:ポリカルボン酸系
	AE剤(AE助剤)	AE	主成分:樹脂塩酸系陰イオン界面活性剤

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小さくなっていく。今回用いた微粒珪砂の含水率は約14%であった。

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(略号SP)にはポリカルボン酸系を用いた。

3. 実験概要

3.1 検討項目および予備実験

本研究では、流動性および分離抵抗性の付与を目的に、微粒珪砂を粉体として取り扱う。検討項目は、微粒珪砂の混入率、および高性能AE減水剤の添加率がフレッシュ時および硬化後の物性に与える影響である。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、本研究では微粒珪砂に含まれる水を吸着水と定義した。

そこで事前に、微粒珪砂の吸着水の影響と適切な高性能AE減水剤の添加率の把握を目的に予備実験を行った。予備実験の配合は、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

にして決めた³⁾。まず、微粒珪砂の吸着水に着目し、表-3に示す配合において試験を行った。微粒珪砂は細骨材と置換して用いた。この場合、微粒珪砂を湿潤状態で使用するため、吸着水を単位水量の一部と考えて検討した。高性能

AE減水剤の添加率は、微粒珪砂無混入の場合に材料分離が生じない範囲で最大となる値を、試し練りの結果を基にして採用した。この場合の高性能AE減水剤の添加率はC×0.7%であり、スランプフローは300mm程度が得られた。表より、微粒珪砂の混入量が増えるにしたがって、スランプが小さくなることがわかる。したがって、微粒珪砂の吸着水は、練混ぜに影響しないことが明らかとなった。また、混入量が増えるにしたがってワーカビリティが悪くなり、結果として強度も低くあらわれたと考えられる。

次に、微粒珪砂の置換率10%の配合において、材料分離を目安に適切なSPの使用量の範囲について検討した。図-1にSP添加率とスランプフローの関係を示す。図より、添加率1.3%

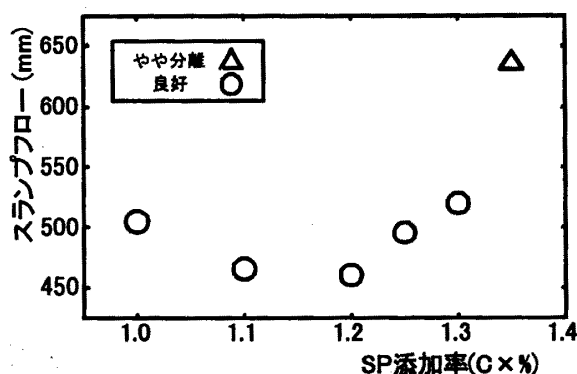


図-1 SP添加率とスランプフローの関係

表-3 微粒珪砂の吸着水に関する予備実験結果

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	S	G			
50	53.9	170	340	0	941	846	15	2.2	46.2
	51.3	154(170)		113(97)	847		8.5	3.4	45.1
	48.3	138(170)		227(195)	753		0.5	3.5	42.9

*1:()内は微粒珪砂の吸着水を考慮した値

*2:()内は絶乾での値

表-4 配合表

配合名 ^{*1}	W/C ^{*2} (%)	水粉体 容積比	微粒珪砂 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP添加率 C×(%)
					W ^{*2}	C	K ^{*3}	S	G	
0-0.7	50.0 (50.0)	1.58	0	53.9	170	340	0	941	846	0.70
10-1.00										1.00
10-1.10	50.0 (54.4)	1.29	10	50.2	170 (185)	340	108 (83)	812	846	1.10
10-1.30										1.30
10-1.50										1.50
20-1.00										1.00
20-1.10	50.0 (58.5)	1.13	20	46.3	170 (199)	340	208 (179)	693	846	1.10
20-1.30										1.30
20-1.50										1.50
30-1.00										1.00
30-1.10	50.0 (62.4)	1.03	30	42.0	170 (212)	340	301 (259)	583	846	1.10
30-1.30										1.30
30-1.50										1.50

*1: 配合名は置換率-SP添加率で表示
 *2: ()内は微粒珪砂の吸着水を考慮した値
 *3: ()内は絶乾での値

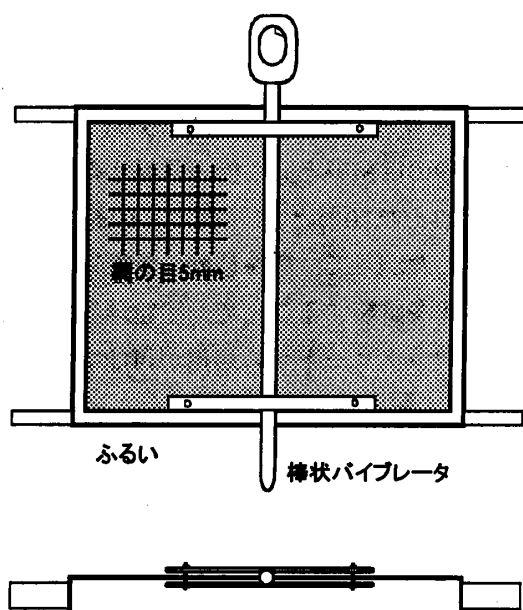


図-2 S I 試験装置

までは、バラツキが見られるものの添加率の増加に対するスランプフローの差は50mm程度で小さいことがわかる。しかし、添加率が1.35%では、やや分離の状態を示し、スランプフローの値が約640mmと大きく現れた。

3.2 配合設計および試験項目

予備実験の結果を考慮して配合を決定した。表-4に配合を示す。今回目標強度は設定せず、水セメント比を50%とし、単位水量、単位粗骨材量を一定として、微粒珪砂は細骨材と置換して用いた。置換率は容積で0、10、20、30%である。粉体量はそれぞれ、340、433、519、599

kg/m³となる。目標とするスランプフローは600mmとした。予備実験より微粒珪砂の吸着水が、練混ぜに関与しないことが確認されたことから、単位水量に対する微粒珪砂の吸着水の補正は行わないこととした。配合表での単位微粒珪砂量は湿潤状態での値を示す。高性能A E減水剤の添加率は、微粒珪砂の置換率10%に対する予備実験から、セメント質量に対して1.0、1.1、1.3、1.5%とし、目標空

気量は4.0%としてA E助剤を適宜使用した。練混ぜは強制練りミキサを使用し、練混ぜ時間は3分間とした。

試験項目は、スランプフロー試験、空気量試験、単位容積質量試験、S I試験、圧縮強度試験、引張強度試験およびヤング係数試験である。S I試験とは、5mmのふるいによる粗骨材とモルタルとの分離抵抗性評価試験をさし、普通コンクリートでの材料分離抵抗性の評価に有効であることが明らかにされている。図-2にS I試験装置を示す。SI値はパイププレートによって60秒間振動を与えた場合、SI₀値は無振動で5分間静置した場合の（落下したモルタル質量）／（全モルタル質量）の百分率である。今回は対象とするコンクリートが高流動コンクリートであることから、SI値から材料分離を判定するのではなく、材料分離抵抗性の程度と指標としての有効性の検討を目的として行った。

4. 実験結果および考察

表-5に実験結果を示す。微粒珪砂の置換率0%の場合は高性能A E減水剤の添加率が0.7%のとき、材料分離が見られず最大スランプ値16cmが得られた。微粒珪砂で置換することにより、スランプフローが大きくなり、流動性が改善されていることがわかる。なお、材料分離の有無はスランプフローの状態を目視より判断した。高性能A E減水剤の添加率が増えるにし

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果および強度試験結果

配合名 ^{*1}	W/C ^{*2} (%)	水粉体 容積比	スランブ (cm)	スランブフロー (mm×mm)	空気量 (%)	SI値	SI ₀ 値	状態	圧縮強度(N/mm ²)			ヤング係数 ^{*3} ×10 ⁴ (N/mm ²)	引張強度 ^{*3} (N/mm ²)
									3日	7日	28日		
0-0.7	50.0 (50.0)	1.58	16.0	310×300	3.5	—	—	良好	25.9	35.3	45.3	3.74	3.18
10-1.00	50.0 (54.4)	1.29	23.0	505×500	5.1	76.9	4.4	良好	20.4	26.2	34.4	3.02	2.23
10-1.10			23.5	480×450	5.3	70.8	6.5	良好	21.8	29.9	35.6	3.09	2.78
10-1.30			25.0	670×660	6.5	69.2	23.3	やや分離	16.3	25.4	34.1	3.20	2.63
10-1.50			23.5	690×675	2.1	—	—	分離	—	—	—	—	—
20-1.00	50.0 (58.5)	1.13	22.5	465×445	3.9	76.3	11.7	良好	18.9	25.4	31.6	2.90	2.57
20-1.10			23.5	490×515	4.8	78.3	13.7	良好	21.0	28.4	36.5	3.17	2.57
20-1.30			24.5	705×645	5.0	71.2	29.2	やや分離	16.6	25.7	33.9	3.09	2.68
20-1.50			23.0	760×675	2.2	—	—	分離	—	—	—	—	—
30-1.00	50.0 (62.4)	1.03	21.0	390×390	4.3	71.7	10.1	良好	16.6	23.8	30.1	2.92	2.02
30-1.10			21.5	385×365	3.4	77.7	2.9	良好	18.9	26.5	33.3	2.95	2.24
30-1.30			25.5	705×690	5.6	80.4	37.8	やや分離	13.3	21.1	28.7	2.85	2.48
30-1.50			23.0	705×710	1.8	—	—	分離	—	—	—	—	—

*1: 配合名は置換率-SP添加率で表示

*2: ()内は微粒珪砂の吸着水を考慮した値

*3: 材齢28日での値

たがって、スランブフローは大きくなるが、しだいに材料分離の性状を示した。このことは、モルタルの粘性が低くなり空気量が極端に小さくなることでも確認された。なお、単位容積質量試験結果は、2.22 t/m³(空気量5.6%)から2.36 t/m³(空気量2.2%)を示し、ほぼ空気量の増減に一致した。高性能AE減水剤の添加率が1.5%では目視により明らかに材料分離が生じていることから、添加率が1.5%の配合についてはSI試験ならびに強度試験を除外した。

図-3に微粒珪砂の置換率とスランブフローの関係を示す。置換率が同じ場合、高性能AE減水剤の添加率が1.3%のスランブフローの値と添加率が1.1%の値とを比べると、150mm以上の差が生じていることがわかる。また、高性能AE減水剤の添加率の違いにより、微粒珪砂の置換率の増加に伴うスランブフローの現れ方が大きく異なることがわかる。すなわち、高性能AE減水剤の添加率が低い領域では、微粒珪砂の置換率が大きくなるにしたがって、スランブフローが小さくなる傾向を示し、逆に高性能AE減水剤の添加率が大きい領域では、微粒珪砂の置換率が大きくなるにしたがって、スランブフローが大きくなり、かつ、材料分離の傾向が現れる。これよりセメントの分散状態の違いにより、微粒珪砂の働きが異なることが考えられる。今回の配合からは、水セメント比50%で

単位水量170kg/m³の場合に安定して得られるスランブフローは500mm程度であり、その時の微粒珪砂の置換率と高性能AE減水剤の添加率は、それぞれ20%と1.1%程度との結果が得られた。したがって、微粒珪砂の置換率と混和剤の添加率を調整することで、微粒珪砂の粉体系高流動コンクリートへの適用が可能であると言えよう。

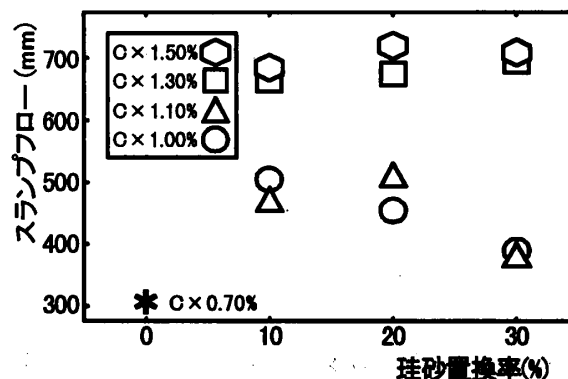


図-3 珪砂置換率とスランブフローの関係

図-4にSI試験結果を示す。図より微粒珪砂の置換率による差はあまり見られず、高性能AE減水剤の添加率1.3%の場合に他との差が見られる。SI値とSI₀値の比較から、高流動コンクリートを対象とした場合のSI試験による分離抵抗性の評価はSI₀値で検討するほうがよいと判断される。今回の試験結果からは、静置した場合のSI₀値が20%を越えると材料分離の可能性があるとえよう。

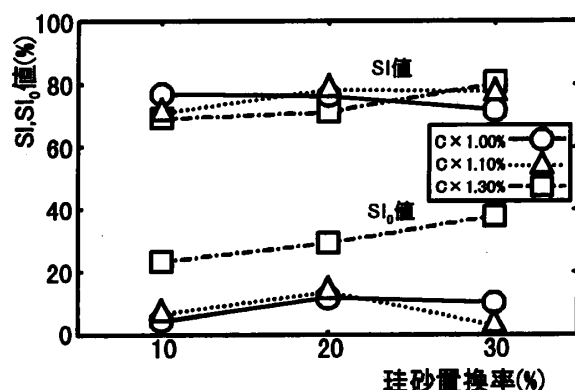


図-4 珪砂置換率とSI, SI₀値の関係

図-5に置換率と圧縮強度の関係を示す。微粒珪砂無混入の場合の圧縮強度が 45.3N/mm^2 であるのに対して、微粒珪砂を混入したコンクリートは約 33.0N/mm^2 と 12N/mm^2 程度低い値を示した。この原因としては、微粒珪砂の吸着水の影響が考えられる。微粒珪砂の置換率の違いに着目すると、置換率が大きくなるにしたがって圧縮強度が小さくなる傾向を示すことがわかる。しかし、置換率10%と30%との差は、高性能AE減水剤の添加率が同じ場合も最大で 6N/mm^2 程度であり、微粒珪砂の吸着水を考慮した水セメント比の差から推測される程の差は見られなかった。これは空気量の違いによるものと判断される。SP添加率の違いに着目すると、添加率が1.10%のときいずれの配合でも圧縮強度が最も大きくなることから、フレッシュ時の状態を含め、微粒珪砂がコンクリートの充填性に効果的に作用する適切なSP添加率があると考えられる。

今回、微粒珪砂を湿潤状態で使用していることから、微粒珪砂の吸着水を考慮した水セメント比、および水粉体比と圧縮強度との関係について検討を行った。図-6に水セメント比と圧縮強度の関係を示す。図-7に水粉体比と圧縮強度の関係を示す。図-6の結果に対して、空気量を考慮すると微粒珪砂無混入の値を含め、水セメント比が大きくなるにしたがって強度は低下することが推測される。図-6の結果を基にした圧縮強度とセメント水比の関係は、 $r = -40.0$

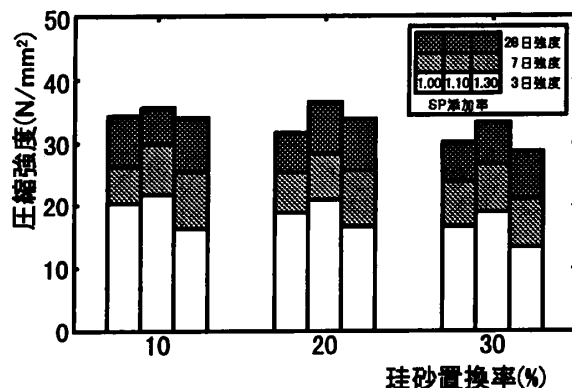


図-5 珪砂置換率と圧縮強度の関係

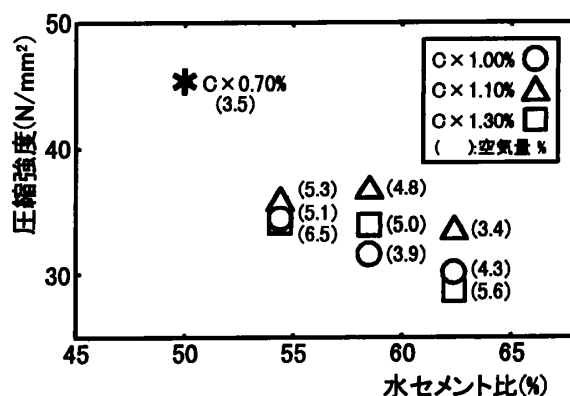


図-6 水セメント比と圧縮強度の関係

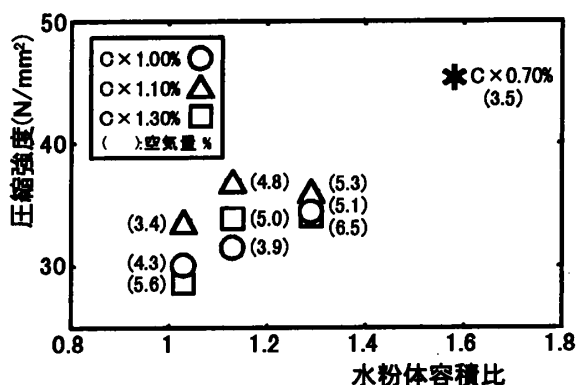


図-7 水粉体容積比と圧縮強度の関係

+42.0C/Wの直線となる。今回の実験結果より、産業副産物である微粒珪砂を粉体系高流動コンクリート用材料として用いる場合、フレッシュ時のワーカビリティの確保と硬化後の強度の確保については、含水率を基に配合設計を行う必要があることが明らかとなった。次に図-7の結果を見ると、図-6と縦軸を対称にして、同じ傾向を示していることがわかる。これは、水粉体比が小さくなるにしたがって粉体量が増

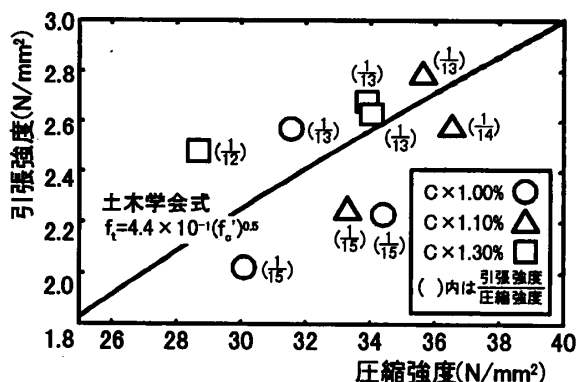


図-8 圧縮強度と引張強度の関係

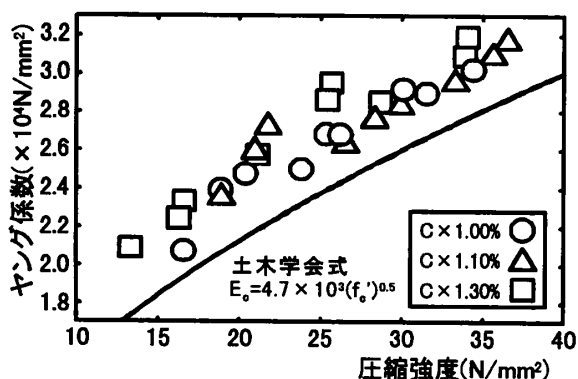


図-9 圧縮強度とヤング係数の関係

えるが、微粒珪砂を湿潤状態で使用しているため、単位水量も多くなり、粉体量の影響よりも単位セメント量一定のもと、単位水量が増えることによる強度への影響が大きく反映したためと考えられる。したがって、今回の試験から、微粒珪砂がペーストを希釈することによる、流動性および強度発現過程での物理的な充填性・密実性への影響については、明確な結果が得られなかった。

図-8に圧縮強度と引張強度の関係を、図-9に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図-8より、圧縮強度と引張強度の関係はバラツキは見られるものの、引張強度と圧縮強度の比率は1/12～1/15であり、土木学会の「高流動コンクリート研究小委員会」で示されるように圧縮強度が大きくなるにしたがって大きくなることが確認された。図-9より、圧縮強度とヤング係数の関係も、土木学会式と同じ傾向を示すものの、 $0.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度大きな値を示す結

果が得られた。

5. 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) 微粒珪砂の吸着水は、練混ぜには関与しないが、強度発現には影響を与える。
- (2) 微粒珪砂を粉体として使用することにより、流動性が改善されることから、微粒珪砂の粉体系高流動コンクリートへの利用が可能である。ただし、高性能AE減水剤の添加率の違いにより、微粒珪砂の置換率の増加に伴うスランプフローの現れ方が異なる。
- (3) 水セメント比50%，単位水量 170 kg/m^3 の場合に安定して得られるスランプフローは500mm程度である。この場合、最適となった微粒珪砂の置換率および高性能AE減水剤の添加率は、20.0%および1.1%である。
- (4) 圧縮強度については、微粒珪砂無混入の場合と比べると 12.0 N/mm^2 程度低い約 33.0 N/mm^2 の値となった。また、圧縮強度は微粒珪砂の吸着水を含めて換算した水セメント比と直線関係にある。
- (5) 圧縮強度と引張強度の関係は土木学会で示す関係と同じような傾向を示す。また、圧縮強度とヤング係数の関係は、土木学会で示す関係と同じ傾向を示すものの、 $0.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度大きな値を示す結果が得られた。

参考文献

- 1) 愛知県産業技術センター・愛知県建設業協同組合：微粒珪砂等の実態調査報告書 1998年9月
- 2) 森野重二：珪砂質土のオートクレイ養生製品への活用について、応用地学の進歩（岩波開校記念論文集），pp.179～195, 1974年
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー98 高流動コンクリート施工指針 1998年
- 4) 木村昌博也：プレーンコンクリートの材料粉砕の定量化に関する基礎研究 セメント・コンクリート論文集No.43, 1999年
- 5) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題 1996年