

## 論文 コンクリートに及ぼす微粒珪砂の含水率の影響

佐藤 貢\*1・平原英樹\*2・上原 匠\*3・梅原秀哲\*4

**要旨:**産業副産物である微粒珪砂の高流動コンクリート用材料としての有効活用を目的に、微粒珪砂が湿潤状態で排出されることから、その含水率がコンクリートの物性に及ぼす影響の把握を行うと共に、水セメント比と硬化後の物性について実験を基に検討した。実験結果から、単位水量 175~185kg/m<sup>3</sup>、置換率 20~30%の範囲では、含水量を単位水量に含めて配合設計を行うことで、含水率がコンクリートの物性に及ぼす影響はなく、セメント水比と強度は比例関係を示すことを明らかにした。微粒珪砂を用いることで、スランブフロー700mm程度、圧縮強度 33~44N/mm<sup>2</sup>程度(水セメント比 45~55%)の高流動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。現在、原鉱珪砂の年間採掘量は約230万トンもあり、これを原料に精製工場での選鉱工程を経てガラス用製品珪砂が生産されている<sup>1)</sup>。ところで、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20万トンが産業廃棄物(汚泥)指定を受ける微粒珪砂である。セメントやタイル原料等での再利用や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が大部分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<sup>2)</sup>。本研究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。珪砂製品は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。排出された状態での幅広い活

用を促すには、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り、これまでに、水セメント比50%、単位水量185kg/m<sup>3</sup>の配合に対し検討を行った<sup>3)</sup>。今回はこれまでの研究を継続し、水セメント比50%、単位水量175~185kg/m<sup>3</sup>、置換率20~30%の配合を対象に、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に及ぼす影響について実験を基に検討した。さらに、この結果を考慮に入れ、水セメント比45~55%の範囲を対象に、微粒珪砂を利用する際の単位水量の影響についての検討を行った。

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	0.06	0.00	0.02	0.16	2.69
微粒珪砂の粒度分布								
ふるい目(μm)	Pan	32	53	75	106	150	300	
残留率(%)	5.1	22.2	31.1	25.7	12.5	2.8	0.6	
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>	80μm		940cm <sup>2</sup> /g		0.26%			

\*1 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(正会員)

\*2 名古屋工業大学 工学部 社会開発工学科(正会員)

\*3 名古屋工業大学 工学部 社会開発工学科 工博(正会員)

\*4 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 Ph.D.(正会員)

## 2. 使用材料

実験では高流動コンクリート用材料としての利用を考慮して、排出量が多く平均粒径が小さい種類の微粒珪砂を対象とした。表-1に微粒珪砂の化学組成、粒度分布および物性値を示す。原石に含まれる鉱物は、石英が75~85%、長石が10~20%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>。密度は2.65g/cm<sup>3</sup>、Ig-Lossは0.26%、平均粒径は80μm程度である。粉末度は940cm<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。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、実用化の段階では湿潤状態での利用が想定される。対象とした微粒珪砂は排出直後で通常24~26%の含水率を有し、真空脱水された後、屋内保存されているものである。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、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

微粒珪砂には強度発現効果が期待できないことから、細骨材との置換材料として取り扱う。検討すべき項目は、湿潤状態の影響と適用可能な置換率、単位水量、水セメント比の把握である。

### 3.1 含水率の違いによる影響

#### (1) 配合設計および試験項目

微粒珪砂の湿潤状態の違いによる影響の把握を目的とする。微粒珪砂の適用可能な含水率の範囲は、排出直後の含水率が10~30%程度であり、保存状態での安定性を考慮すると、0~20%程度が望ましいと判断し、今回実験には、0、10、20%の3水準の含水率を設定した。また、練混ぜ

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	表乾密度:2.55g/cm <sup>3</sup> 、吸水率:1.71%、粗粒率:2.83
粗骨材	砕石(春日井産)	G	表乾密度:2.69g/cm <sup>3</sup> 、吸水率:0.61%、粗粒率:6.80、最大寸法:20mm
混和材	微粒珪砂	K	絶乾密度:2.65g/cm <sup>3</sup> 、平均粒径:約80μm
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

表-3 配合表1

配合名 <sup>※1</sup>	W/C (%)	微粒珪砂置換率(%)	微粒珪砂含水率(%)	SP添加率 C×(%)	AE添加率 C×(%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
							W <sup>※2</sup>	C	K <sup>※3</sup>	S	G
175-20-0	50	20	0	2.7	0.004	49.6	175	350	196	753	807
175-20-10			10				216(196)				
175-20-20			20				235(196)				
180-20-0	50	20	0	2.0	0.003	49.0	180	360	191	736	807
180-20-10			10				210(191)				
180-20-20			20				229(191)				
185-20-0	50	20	0	2.0	0.003	48.5	185	370	187	719	807
185-20-10			10				206(187)				
185-20-20			20				224(187)				
175-30-0	50	30	0	8.0	0.050	46.2	175	350	293	658	807
175-30-10			10				322(293)				
175-30-20			20				352(293)				
180-30-0	50	30	0	3.0	0.030	45.7	180	360	287	644	807
180-30-10			10				316(287)				
180-30-20			20				344(287)				
185-30-0	50	30	0	2.8	0.030	45.1	185	370	280	629	807
185-30-10			10				308(280)				
185-30-20			20				336(280)				

※1:配合名は単位水量-置換率-含水率で表示

※2:( )内は微粒珪砂に含まれる水を考慮した値

※3:( )内は微粒珪砂に含まれる水を差し引いた値

表-4 実験結果1

配合名	スランブ (cm)	スランブ フロー (mm×mm)	50cm フロー到達 時間(s)	最終 フロー停止 時間(s)	空気量 (%)	単位容 積質量 (t/m <sup>3</sup> )	SI値 (%)	SI <sub>0</sub> 値 (%)	状態	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			弾性係数 <sup>※1</sup> ×10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 <sup>※1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
										3日	7日	28日		
175-20-0	27.0	720×670	9	60	4.7	2.28	79.5	15.3	良好	22.2	29.1	36.3	3.46	2.9
175-20-10	27.5	725×690	10	78	5.1	2.27	80.6	11.4	良好	21.3	28.6	36.2	3.53	2.7
175-20-20	27.5	720×700	10	77	5.0	2.28	82.2	18.9	良好	19.4	26.7	32.6	3.43	3.1
180-20-0	27.0	690×690	5	51	5.3	2.26	84.1	21.9	良好	21.5	30.0	36.0	3.36	3.1
180-20-10	27.0	710×625	4	54	4.9	2.26	83.7	12.6	良好	22.5	31.2	37.7	3.41	2.6
180-20-20	27.5	685×690	4	50	5.5	2.25	83.6	18.1	良好	20.6	28.5	35.7	3.32	2.8
185-20-0	27.0	675×670	7	46	5.5	2.25	84.3	4.9	良好	23.7	30.0	37.0	3.22	2.9
185-20-10	27.5	695×715	7	47	4.5	2.29	82.5	16.6	良好	22.0	29.3	36.8	3.35	2.6
185-20-20	27.0	700×700	6	45	5.0	2.27	80.4	13.0	良好	24.3	31.0	39.8	3.12	3.4
175-30-0	27.5	690×670	80	246	3.0	2.31	76.43	6.49	良好	20.2	27.6	35.8	2.45	3.5
175-30-10	27.5	665×660	113	282	4.2	2.29	64.98	5.83	良好	16.9	23.2	29.4	2.34	3.2
175-30-20	27.5	700×665	67	226	4.7	2.28	74.25	7.91	良好	16.0	22.5	28.2	2.30	3.5
180-30-0	27.5	710×675	19	107	4.3	2.27	73.12	1.91	良好	19.9	27.5	33.7	2.56	3.4
180-30-10	27.5	725×710	20	109	5.8	2.24	80.12	11.60	良好	17.5	24.9	31.7	2.57	3.3
180-30-20	27.0	715×670	32	147	5.4	2.25	80.30	6.34	良好	19.9	26.7	32.8	2.76	3.3
185-30-0	27.5	720×685	14	95	5.1	2.25	82.12	13.74	良好	22.5	28.5	34.9	2.93	3.5
185-30-10	28.5	755×730	12	85	5.7	2.24	79.78	16.41	良好	20.1	26.8	34.1	2.81	3.4
185-30-20	27.5	700×695	18	90	6.1	2.23	84.07	14.16	良好	21.0	27.2	33.8	2.87	3.3

※1:材齢28日での値

時の投入水量と微粒珪砂の含水量の和が単位水量となるように含水率により投入水量の調整を行った。表-3に配合表を示す。各含水率の配合に対して置換率を20, 30%の2水準, 単位水量を175, 180, 185kg/m<sup>3</sup>の3水準設定し計18配合とした。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使用した。高流動コンクリートを対象としていることから, 目標スランブフローは700mmとした。なお, 目標スランブフローに達した際に材料分離に対する抵抗性が十分に保持されている必要があることから, 置換率についてはこれまでの研究結果を考慮して絶乾状態の微粒珪砂の容積で20%および30%とした<sup>5)</sup>。目標空気量は4.5%とし, 高性能AE減水剤およびAE助剤については, 目標スランブフローおよび目標空気量を得るように, 適宜使用した。練混ぜは強制練りミキサを使用し, 練混ぜ容量は0.05m<sup>3</sup>, 練混ぜ時間は3分間とした。

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, SI試験, 圧縮強度試験, 引張強度試験および弾性係数試験である。各試験方法は, SI試験を除き, 土木学会コンクリート

標準示方書に準拠した。SI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言い, 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<sup>6)</sup>。SI値はパイプレータによって60秒間振動を与えた場合, SI<sub>0</sub>値は無振動で1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。今回は高流動コンクリートを対象としたことから, 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。

(2) 実験結果および考察

表-4に実験結果を示す。表よりスランブフローは, 各配合ともほぼ目標とする700mmに達していることがわかる。ただし, 目標値を得るために要した高性能AE減水剤(以下, SPと省略)およびAE助剤(以下, AEと省略)の添加率には大きな差が見られ, 表-3に示すように単位水量に対しては少なくなるにしたがい, また, 微粒珪砂置換率については大きくなるにしたがい, SP添加率およびAE添加率は増大する傾向が見られた。ただし, 同一配合(単位水量, 置換率)にお

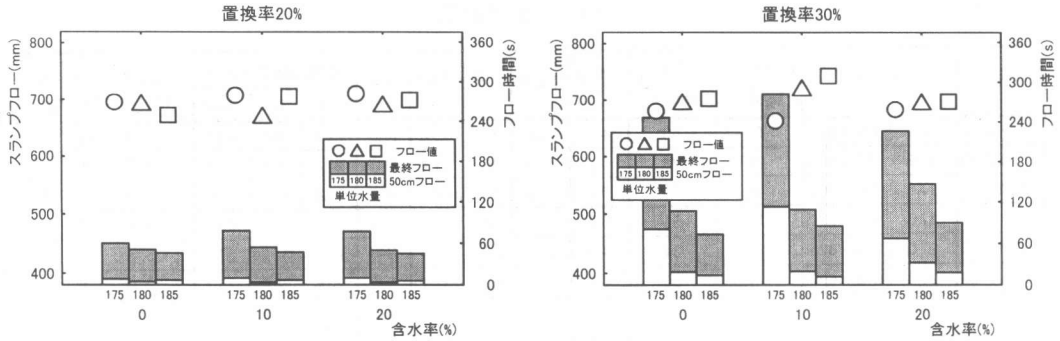


図-1 含水率とスランプフローおよびフロー時間の関係

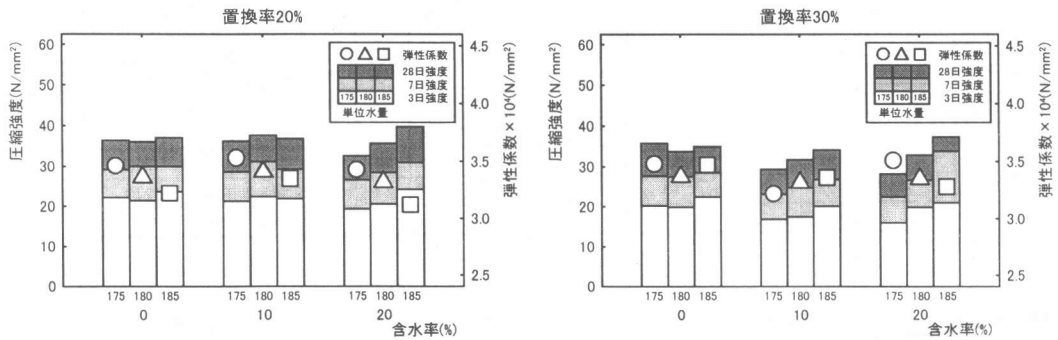


図-2 含水率と圧縮強度と弾性係数の関係

いては、含水率による差は見られなかった。目視によるスランプ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。空気量については、3.0% (単位容積質量  $2.31 \text{ t/m}^3$ ) から 6.1% (単位容積質量  $2.23 \text{ t/m}^3$ ) を示し、ほぼ単位容積質量の増減に一致した。SI 試験結果については、 $SI_0$  値が一部、他の値と比べ小さな値となるものが見られた。しかし、置換率、フロー時間および目視による状態等を考慮すると、全体的に  $SI$  値および  $SI_0$  値は置換率、フロー時間に対応した結果となり、SI 試験は材料分離抵抗性の程度の評価に対して有効であると考えられる。また、結果より、含水率の違いが材料分離抵抗性に及ぼす影響はないことが得られた。

図-1に含水率とスランプフローおよびフロー時間の関係を示す。図より、スランプフロー700 mm を得た場合では、単位水量および置換率の違いによりフロー時間が異なる結果となった。特

に、置換率が30%の場合は20%の場合に比べ、フロー時間が增大していることがわかる。また、単位水量が小さくなるにしたがって同様な傾向が見られた。ただし、同じ置換率における同一単位水量の結果に着目すると、含水率の違いがスランプフローおよびフロー時間へ及ぼす影響に大きな差は生じないことが確認された。したがって、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、フレッシュ状態の均一なコンクリートを製造することが可能である。

図-2に含水率と圧縮強度および弾性係数の関係を示す。置換率が30%の場合、単位水量が  $175 \text{ kg/m}^3$  の配合においては、圧縮強度が一部、他の強度に比べ小さい値となった。しかし、これを除きほぼ置換率にかかわらず安定した圧縮強度および弾性係数が得られ、材齢28日での圧縮強度は  $35 \text{ N/mm}^2$  程度、弾性係数は  $3.36 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  程度となった。このことより、通常の単位

水量の範囲では含水率の違いに対して圧縮強度および弾性係数は影響を受けないと考えられる。さらに、引張強度についても表-4に示すとおり、含水率の違いによる差は特に見られず、引張強度と圧縮強度の比率は置換率が20%、30%の場合共に1/12.5となった。

### 3.2 異なる水セメント比に対する検討

#### (1) 配合設計および試験項目

水セメント比が50%の配合において、微粒珪砂の湿潤状態の違いによる影響が特に確認されなかったことを考慮し、また、微粒珪砂の粉体系高流動コンクリートへの適用範囲の拡大から、ここでは水セメント比を変化させた配合を対象に検討を行った。表-5に配合表を示す。水セメント比については、45、50、55%の3水準、単位水量についても175、180、185kg/m<sup>3</sup>の3水準設定し、計9配合とした。微粒珪砂については絶乾状態のものを使用し、置換率は絶乾状態の容積で20%とした。混和剤は、空気連行型の高性能AE減水剤のみを使用した。その他、目標値および練混ぜ方法については、前節と同様とした。

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、圧縮強度試験、引張強度試験および弾性係数試験である。

#### (2) 実験結果および考察

表-6に実験結果を示す。175-55の配合は、フレッシュ試験の結果から高性能AE減水剤の添加率が適切ではないと判断し、スランブフロー、フロー時間に関しては考察から除外した。

図-3に水セメント比とスランブフローおよびフ

ロー時間の関係を示す。いずれの水セメント比でも単位水量が増大するしたが、フロー時間は小さくなる傾向が見られた。スランブフローはSP添加率に対応する結果となった。今回の実験結果から175-55を含み、いずれの配合結果でも材料分離は認められず、均一なコンクリートが得られたことから、適切な微粒珪砂の置換率とSP添加率を用いることで、所要の単位水量、水セメント比に対して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考えられる。空気量については、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を考慮すると、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、所定の空気量を得ることが可能である。

図-4に水セメント比と圧縮強度および弾性係数の関係を示す。図より、同一の水セメント比の場合において単位水量の減少に伴い、圧縮強度は若干増大する傾向が見られるものの、材齢28日強度は水セメント比が45%の場合では44N/mm<sup>2</sup>程度、50%では39N/mm<sup>2</sup>程度、55%で

表-5 配合表2

配合名 <sup>※1</sup>	W/C (%)	微粒珪砂 置換率(%)	SP添加率 C×(%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	K	S	G
175-45	45	20	2.4	48.7	175	389	189	727	807
175-50	50		2.4			350	196	753	
175-55	55		2.0			318	201	773	
180-45	45	20	1.9	48.1	180	400	184	710	807
180-50	50		2.0			360	191	736	
180-55	55		1.7			327	197	757	
185-45	45	20	1.8	47.5	185	411	180	693	807
185-50	50		1.6			370	187	719	
185-55	55		2.0			336	193	741	

※1: 配合名は単位水量-水セメント比で表示

表-6 実験結果2

配合名	スランブ (cm)	スランブフロー (mm×mm)	50cmフロー 到達時間 (s)	最終フロー 停止時間 (s)	空気量 (%)	単位容積 質量 (t/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			弾性係数 <sup>※1</sup> × 10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 <sup>※1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
							3日	7日	28日		
175-45	27.5	715×745	6	77	3.7	2.32	32.9	35.4	45.0	3.65	3.7
175-50	27.5	700×670	8	72	3.4	2.33	29.3	31.1	39.2	3.82	3.6
175-55	25.0	530×525	24	45	4.4	2.29	25.5	27.3	33.4	3.59	3.1
180-45	27.5	725×710	7	69	2.5	2.34	34.0	36.3	44.8	3.93	3.4
180-50	26.5	660×635	7	53	4.2	2.29	29.3	31.3	39.1	3.23	3.5
180-55	25.5	600×620	6	42	3.6	2.31	24.1	26.3	32.1	3.28	2.9
185-45	27.5	730×720	5	48	3.1	2.33	31.7	34.1	43.1	3.88	3.5
185-50	27.5	675×695	6	49	3.6	2.30	27.7	29.7	37.1	3.58	3.2
185-55	26.5	665×670	6	45	3.0	2.29	24.4	26.2	33.5	3.49	3.0

※1: 材齢28日での値

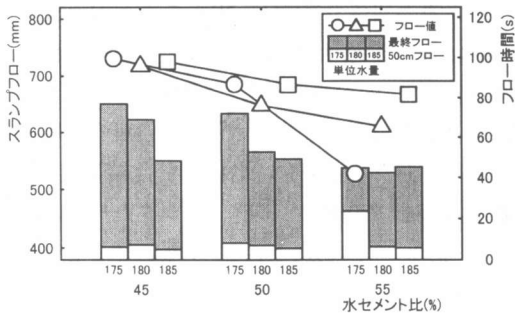


図-3 水セメント比とスランプフロー  
およびフロー時間の関係

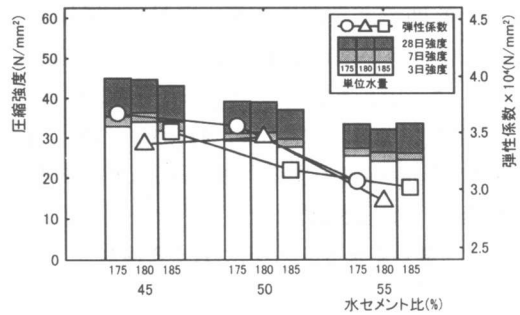


図-4 水セメント比と圧縮強度  
および弾性係数の関係

は33N/mm<sup>2</sup>程度と、概ね安定して確保されていることがわかる。この結果を基にした圧縮強度とセメント水比の関係は、 $f' = -18 + 28C/W$ の直線となる。このことから、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た場合においても、一般的なコンクリートと同様に、圧縮強度を任意に設定することが可能であると言える。なお、本節の水セメント比50%の配合と、前節の置換率20%の配合は同一のものであるが、圧縮強度の差は3N/mm<sup>2</sup>程度であった。弾性係数についても、水セメント比ごとに安定した結果が得られ、圧縮強度との関係も0.1~0.3×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>程度大きな値となるが土木学会コンクリート標準示方書に示される関係と同じ傾向を示した。引張強度についても、それぞれの圧縮強度と比較した圧縮強度比は、水セメント比が45%の場合では1/12、50%では1/11、55%では1/10程度であり、一般のコンクリートと同様に、圧縮強度が大きくなるに伴い引張強度も大きくなることが確認された。

#### 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) 単位水量175~185kg/m<sup>3</sup>の範囲では、微粒珪砂を湿潤状態で使用しても、その含水量を単位水量に含めて配合設計を行うことで、均一なコンクリートが得られる。したがって、高流動コンクリート用材料として微粒珪砂を排出時の状態で細骨

材の一部と置換しての適用が可能である。

(2) 水セメント比45~55%、単位水量175~185kg/m<sup>3</sup>の場合、微粒珪砂を置換率20~30%で細骨材と置換した配合では、スランプフローが700mm程度、圧縮強度が33~44N/mm<sup>2</sup>程度の良好な高流動コンクリートの製造が可能である。

(3) 同一のスランプフローを得るために必要となる高性能AE減水剤の添加率は、微粒珪砂の置換率により変化する。一般に、置換率が大きいほど高性能AE減水剤の添加率も高くなる。ただし、同一配合において含水率による影響は見られなかった。

(4) 圧縮強度については、置換率による影響は認められず、微粒珪砂に含まれる水を含めて換算したセメント水比と直線関係にある。

#### 参考文献

- 1) 愛知県瀬戸窯業技術センター・愛知県珪砂産業者協同組合：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) 森野至二：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（岩波開校記念論文集）、pp.179-195, 1974
- 5) 平原英樹他：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、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.22-2, pp.1195-2000, 2000
- 6) 木村昌博他：プレーンコンクリートの材料分離の定量化に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集 No.43, 1989