

論文 微粒珪砂の物性がコンクリートに及ぼす影響

上原 匠^{*1}・平原 英樹^{*2}・梅原 秀哲^{*3}・桐山 和也^{*4}

要旨: ガラス用製品珪砂の製造過程で発生する微粒珪砂は、各精製工場での設備の相違により粒度分布が異なり、その平均粒径は80~210 μ m程度と差が見られる。粉体の粒度分布や形状等は、コンクリートの性状に大きな影響を及ぼす。そこで本研究では、産業副産物である微粒珪砂のコンクリート用材料としての有効利用を目的に、微粒珪砂の粒度分布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、粒度分布がフレッシュ性状に及ぼす影響は大きい、混和剤の添加率の調整等により、フレッシュおよび硬化後の物性が所要の範囲を満たすコンクリートの製造が可能であることを明らかにした。

キーワード: 産業副産物, 微粒珪砂, 粒度分布, 高性能AE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原鉱珪砂年間採掘量が約230万トンとなる、国内最大の製品珪砂供給地である。現在瀬戸地区では、22の企業が製品珪砂の製造を行っており、各精製工場ごとにガラス用製品珪砂を生産している¹⁾。ただし、精製工場での選鉱工程の際には約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、このうち約20万トンが産業廃棄物に指定される微粒珪砂である。セメント、タイル原料としての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²⁾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。本研究室では微粒珪砂の利用拡大、すなわち、大量利用を目的に、コンクリート用材料としての適用性について研究を進めている。これまでの研究結果から、微粒珪砂の排出状態での利用の検討を含め、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高流動コンクリートの製造が可能であることを提示した^{3),4)}。

ところで、微粒珪砂は、各精製工場の設備の相違により粒度分布が異なり、その平均粒径は80~210 μ m程度と差が見られる。粉体の粒度分布や粒子形状等の特性が、コンクリートの性状に影響を及ぼすことは良く知られている。利用拡大を考えると用途別に微粒珪砂を選別する必要も考えられる。そこで本研究では、微粒珪砂を混入したコンクリートの配合設計を実情に合うように合理的なものにし、産業副産物である微粒珪砂のコンクリート用材料としての有効利用を目的に、粒度分布が異なる3種類の微粒珪砂を対象に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に対象とした微粒珪砂の排出状況を、表-2に微粒珪砂の化学組成、粒度分布および

表-1 微粒珪砂の排出状況

種類	排出形態 ^{※1}	月間排出量	脱水方法	保管方法	含水率 ^{※2}
A	分別	1,000~2,000t	真空	屋内	24~26%
J	分別	500~1,000t	自然放置	屋外	30~33%
K	分別	1,000~2,000t	遠心	屋内	12~15%

※1 分別: 微粒珪砂と低級水産粘土に分けて排出

※2 排出直後の湿潤状態

- *1 名古屋工業大学助教 工学部社会開発工学科 工博(正会員)
- *2 名古屋工業大学文部技官 工学部社会開発工学科(正会員)
- *3 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)
- *4 矢作建設工業(株) 技術企画部 調査設計課(正会員)

表-2 微粒珪砂の化学組成, 粒度分布および物性値

A	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
	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	
物性値	絶対乾密度	平均粒径		比表面積		強熱減量			
	2.65g/cm ³	80 μm		940cm ² /g		0.26%			
J	成分名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
	(%)	89.50	5.87	0.26	0.22	0.22	0.07	0.15	2.55
	ふるい目 (μm)	Pan	32	53	75	106	150	300	
	残留率 (%)	5.0	14.0	16.1	18.3	25.6	19.0	2.0	
物性値	絶対乾密度	平均粒径		比表面積		強熱減量			
	2.61g/cm ³	120 μm		770cm ² /g		0.33%			
K	成分名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
	(%)	91.70	4.60	0.24	0.26	0.02	0.09	0.10	1.77
	ふるい目 (μm)	Pan	32	53	75	106	150	300	
	残留率 (%)	0	2.2	7.2	17.8	26.4	25.9	20.5	
物性値	絶対乾密度	平均粒径		比表面積		強熱減量			
	2.65g/cm ³	210 μm		390cm ² /g		0.39%			

物性値を示す。今回対象とした微粒珪砂の平均粒径は 80, 120, 210 μm であり, それぞれ排出時の含水率, 脱水方法が異なる。ところで, 微粒珪砂は湿潤状態で排出され, 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。一般に, 湿潤状態の粉体を絶対乾燥状態にすると, 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対乾燥状態にして実験に用いた。今回搬入した微粒珪砂 A, J, K の含水率は, それぞれ 16%, 10%, 16% 程度であった。

原鉱珪砂に含まれる鉱物は, 石英が 75~85%, 長石が 10~20% を占め, 微粒珪砂の形状は楕円や立方体である。化学組成をみるとシリカ成分が約 90% を占めているが, 常温では不活性な材料である⁵⁾。対象とした微粒珪砂 A, J, K の密度は 2.65, 2.61, 2.65g/cm³, 比表面積は 940, 770, 390cm²/g, Ig-Loss は 0.26, 0.33, 0.39% である。

図-1 に微粒珪砂の粒度曲線を, 図-2 に各粒度の頻度を示す。細骨材と粉体の境界については, 90 μm が目安との報告⁹⁾と図-2 の頻度分布から, 珪砂 A および珪砂 J は粉体として, 珪砂 K は細骨材としての性能を有すると推察される。したがって, 粒度分布により, 目的とするコンクリートごとに選別する必要も考えられ

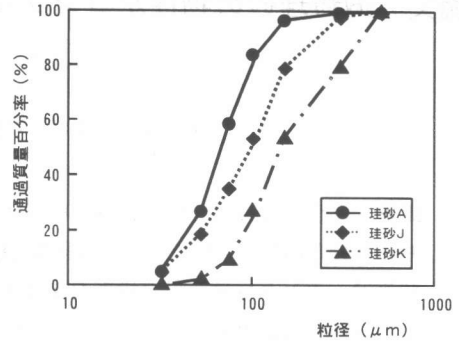


図-1 微粒珪砂の粒度曲線

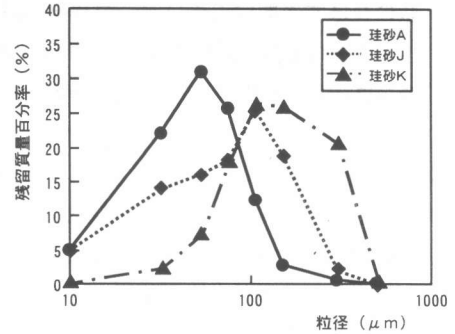


図-2 各粒径の頻度

表-3 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: 3340cm ² /g
細骨材	山砂(豊田産)	S	表乾密度: 2.56g/cm ³ , 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 ³ , 吸水率: 0.61%, 粗粒率: 6.80, 最大寸法: 20mm
混和材	微粒珪砂(瀬戸産)	K	珪砂A: 絶対乾密度: 2.65g/cm ³ , 平均粒径: 約80 μm 珪砂J: 絶対乾密度: 2.61g/cm ³ , 平均粒径: 約120 μm 珪砂K: 絶対乾密度: 2.65g/cm ³ , 平均粒径: 約210 μm
混和剤	高性能AE減水剤	SP	主成分: ポリカルボン酸系, 空気運型

る。ただし, 今回は粒度分布の影響の把握を目的とすることから, 何れも粉体として取り扱った。

表-3 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

微粒珪砂は, 粉体系高流動コンクリート用材料としての有効利用の可能性は得られているが, 化学的な強度発現効果は期待出来ないことから, 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や湿潤状態での利用の検討が既になされていることから、検討すべき項目は、微粒珪砂の種類に起因する粒度分布の差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。本研究では、まず高性能AE減水剤の添加率を一定にした配合で実験を行い、粒度分布の影響を検討した(実験1)。さらに、粒度分布の違いにより、フレッシュ性状に大きな差が見られる配合に対しては、高性能AE減水剤の添加率を調整して適用性を検討した(実験2)。

3.1 配合設計

産業副産物である微粒珪砂の粉体としての特性を有効活用することを考慮して、配合設計は水セメント比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⁷⁾。

表-4に配合を示す。今回目標強度は設定せず、一般的に使用されているコンクリート強度を想定して水セメント比を50%とした。これまでの研究から、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であるとの知見を得ている。そこで、粒度分布の違いに関わらず高流動コンクリートへの適用を視野にいれ、置換率は絶対乾燥状態の微粒珪砂の容積で20%と設定した。すなわち、種類毎に異なる微粒珪砂の粒度分布は特に考慮せず、細骨材との置換率は容積比20%の1水準とした。微粒珪砂の単位量は絶対乾燥状態で190kg/m³程度となる。

表-4 配合

配合No.	W/C (%)	珪砂置換率 (%)	水粉体容積比 (%)	単位粉体容積 (m ³ /m ³)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						W	C	K ^{※1}	S	G	SP Cx (%)
A 175-J K	50	20	94.7	0.185	49.6	175	350	196	753	807	1.50
A 180-J K	50	20	96.6	0.186	49.0	180	360	191	736	807	1.50
A 185-J K	50	20	98.4	0.188	48.5	185	370	187	719	807	1.50

※1: 密度の違いにより、珪砂Jでは193, 188, 184の値をとる

単位水量は高流動コンクリートを想定し、175を含む180, 185kg/m³の3水準とした。単位粗骨材量は807kg/m³一定とした。

高性能AE減水剤については空気連行型を使用した。高性能AE減水剤の添加率は、平均粒径が大きい微粒珪砂Kの材料分離抵抗性が低いと判断されることから、微粒珪砂Kを用いた単位水量185kg/m³の場合に材料分離が生じない添加率で最大となる値、単位セメント質量に対して1.5%を採用した。したがって、基準となる配合は185-Kとなる。平均粒径の小さな微粒珪砂Aを混入したコンクリートのスランプフローは小さくなると推定されることから、実験1では目標スランプフローは特に設定しなかった。実験2では実験1の結果を考慮して、微粒珪砂Aを対象に表-4に示す配合に対して、スランプフローを600~700mmと設定し、高性能AE減水剤の添加率を調整して実験を行った。

目標空気量は4.5%に設定した。微粒珪砂の粒度分布より微粒珪砂Aは空気量の調整を必要とすると判断されたが、AE助剤を用いての調整は行わなかった。

3.2 練混ぜ・養生方法および試験項目

練混ぜは容量0.1m³のパン型強制練りミキサーを使用し、練混ぜ容量は0.05m³とした。全材料投入後の練混ぜ時間を2分間とし、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った。

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、および圧縮強度試験、弾性係数試験、引張強度試験である。各試験方法は、土木学会コンクリート標準示方書に準拠した。

3.3 実験結果および考察

(1) 実験1

表-5に高性能AE減水剤の添加率1.5%一律で実施した実験結果(1)を示す。いずれの配合も、目視によるスランプフロー試験結果の状態は良好であり、フレッシュコンクリートの材

料分離は見られず、均一なコンクリートが得られた。ただし、フレッシュ試験結果には、微粒珪砂の粒度分布の差による影響が明確に現れた。実験1では、微粒珪砂Kの配合が適切となるように高性能AE減水剤の添加率を設定したため、微粒珪砂AおよびJにおいては、スランプフローが小さく、中流動コンクリートとなった（水セメント比50~60%でスランプフロー値45cm程度⁸⁾）。また、単位水量が小さくなるにしたがって、いずれの微粒珪砂でもスランプフローは小さく現れた。なお、微粒珪砂Kについては平均粒径が大きいことから材料分離抵抗性の付与能力が低く、置換率20%ではスランプフロー700mm程度の高流動コンクリートへの適用は困難と考えられる。

図-3に微粒珪砂の種類とスランプフローおよびフロー時間の関係を示す。各種類とも単位水量が増加するにしたがいスランプフローは増加した。平均粒径が小さく粉体の比表面積が大きい場合は単位水量がスランプフローへ及ぼす影響が大きく、微粒珪砂Aは単位水量が10kg/m³大きくなるとスランプフローは265mm、微粒珪砂Jは185mm、微粒珪砂Kは87mm大きくなった。ところで、各単位水量毎の平均粒径とスランプフローの関係はほぼ比例しており、単位水量が小さいほどその傾きは大きい。したがって、粒度分布の異なる微粒珪砂の種類別に目標スランプフローに対応する単位水量の目安が推察できると考えられる。

フロー時間は単位水量が大きくなるにしたがって、各微粒珪砂とも長くなる傾向が見られる

が、その傾向は微粒珪砂の種類により異なる結果となった。平均粒径が最も大きい微粒珪砂Kは単位水量による差は小さく、他と比べフロー時間が最も大きな値を示した。

図-4に微粒珪砂の種類と空気量および単位容積質量の関係を示す。175-Jの配合を除き、各種類とも空気量は単位容積質量の増減にほぼ一致した。微粒珪砂Aは、0.15~0.6mmの部分で他と比べ少ないことから空気量は低くなると予測していたが、試験結果では目標とする値よりも大きな値を示した。原因に関しては今回のデータからは推測できなかった。ただし、これ

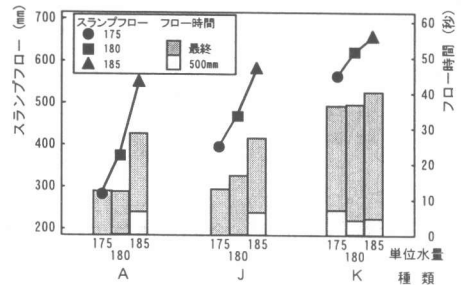


図-3 微粒珪砂の種類とスランプフローおよびフロー時間の関係

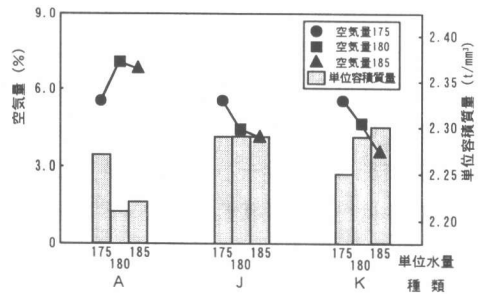


図-4 微粒珪砂の種類と空気量および単位容積質量の関係

表-5 実験結果(1)

配合No.	スランプ(cm)	スランプフロー		空気量(%)	単位容積質量(t/m³)	圧縮強度(N/mm²)			弾性係数 ^{*1} (×10⁴(N/mm²))	引張強度 ^{*1} (N/mm²)	
		(mm×mm)	500mm到達時間(秒)			停止時間(秒)	3日	7日			28日
175-A	17.5	290×275	—	12.4	5.5	2.27	26.2	28.5	35.1	2.87	3.46
175-J	23.5	400×390	—	12.9	4.3	2.29	26.7	29.1	36.6	3.42	3.01
175-K	26.0	580×550	7.1	36.5	6.0	2.25	23.5	26.7	31.2	3.38	2.95
180-A	22.0	350×390	—	12.0	8.0	2.21	24.2	26.2	33.5	3.23	3.46
180-J	24.5	460×470	—	16.5	4.4	2.29	26.4	29.1	36.3	3.02	3.32
180-K	26.0	640×600	4.0	36.7	4.6	2.29	24.9	26.8	33.5	3.35	2.89
185-A	26.0	555×540	6.5	28.4	7.8	2.22	23.9	26.5	32.4	3.10	3.04
185-J	26.5	590×570	6.3	27.2	4.1	2.29	25.7	28.6	35.3	3.14	3.46
185-K	28.0	655×650	4.6	40.3	3.5	2.30	25.6	28.3	34.5	3.53	3.21

備考：高性能AE減水剤の使用量は、単位セメント量の1.5%である

※1：材齢28日での値

までの研究成果を考慮すると、微粒珪砂を混入したコンクリートの空気量の調整は混和剤により可能であり問題は無いと判断した。

図-5に微粒珪砂の種類と圧縮強度および弾性係数の関係を示す。微粒珪砂の種類による圧縮強度の差は特に見られない結果となった。各材齢ごとの値は、空気量による影響は見られるが、材齢3日目の圧縮強度が25N/mm²程度、7日目は28N/mm²程度、28日目は34N/mm²程度を示しており、材齢が進むにしたがって強度が増進していることがわかる。

弾性係数は、微粒珪砂の種類により差が見られ、微粒珪砂K, J, Aの順で大きな値を示した。ただし、同じ種類の配合でも単位水量の違いにより値に0.4×10⁴N/mm²程度の差が生じており、バラツキが見られる。土木学会で提示されている値を考慮すると、材齢28日の圧縮強度から推定される弾性係数は約3.0×10⁴N/mm²となるが、いずれの配合も大きな値を示した。

図-6に微粒珪砂の種類と引張強度の関係を示す。引張強度も微粒珪砂の種類による差は見られず、引張強度と圧縮強度の比率は約1/10~1/12となり、一般的なコンクリートと同様な強度比を示した。

(2) 実験2

実験1では微粒珪砂Aに対する高性能A E減水剤の添加率が小さく、スランプフローも小さくなったと考えられることから、微粒珪砂Aを対象に目標スランプフローを600~700mmに設定して高性能A E減水剤の添加率を調整して実験を行った。高性能A E減水剤の添加率は、試し練りの結果を基に単位水量が5kg/m³大きくなるごとに0.4%づつ減らした値を採用した。

表-6に実験結果(2)を、図-7に単位水量とスランプフローおよびフロー時間の関係を示

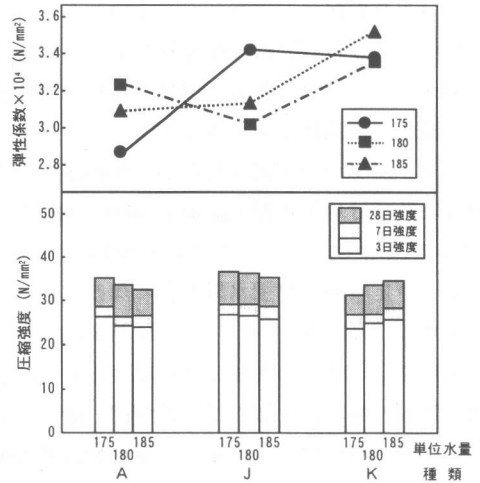


図-5 微粒珪砂の種類と圧縮強度および弾性係数の関係

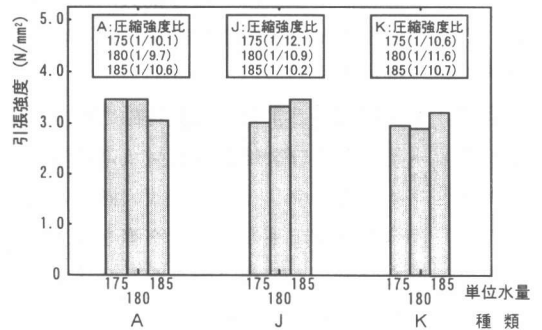


図-6 微粒珪砂の種類と引張強度の関係

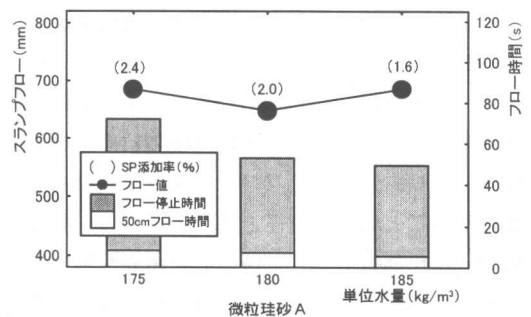


図-7 単位水量とスランプフローおよびフロー時間の関係

表-6 実験結果(2)

配合 No.	SP添加率 (C%)	スランプ (cm)	スランプフロー			空気量 (%)	密度 (t/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 × 10 ⁴ (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
			(mm × mm)	500mm到達時間(秒)	停止時間(秒)					
175-A-2.4	2.4	27.5	700 × 670	8.2	72.0	3.4	2.33	39.2	3.56	3.82
180-A-2.0	2.0	26.5	660 × 635	7.1	52.7	4.2	2.29	39.1	3.46	3.23
185-A-1.6	1.6	27.5	675 × 695	5.6	49.3	3.6	2.30	37.1	3.17	3.58

※配合Noは、単位水量-種類-高性能A E減水剤の添加率で表す。強度試験結果等は材齢28日の値

す。いずれの配合でもフレッシュコンクリートは均一であり材料分離は見られなかった。

図-7より、単位水量の増加に対して高性能AE減水剤の添加率を小さくすることで、所定のスランブフローが得られることがわかる。今回の実験では単位水量 $5\text{kg}/\text{m}^3$ の増減に対して、0.4%の減増で対応可能との結果が得られた。フロー停止時間は単位水量が多くなるにしたがって短くなり、表-5に示す実験結果(1)と逆の傾向を示したが、実験1では高性能AE減水剤の添加率を一定としたことが要因と考えられる。フロー時間は、高性能AE減水剤の添加率が大きくなるにしたがって長くなった。空気量は目標値より小さな値を示したが、配合の違いによる差は見られなかった。圧縮強度、弾性係数、および引張強度は実験1の結果に比べ若干大きな値となった。

実験1および実験2より、微粒珪砂の粒度分布、単位水量、および高性能AE減水剤の添加率を調整することでフレッシュ性状の制御は可能であり、微粒珪砂の種類と置換率等を考慮して配合設計を行うことで種々のコンクリートへの適用が可能であると言えよう。

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)同一単位水量のもと高性能AE減水剤の添加率を一定にした場合、微粒珪砂の粒度分布の違いにより、スランブフローは大きく異なる。単位水量ごとの平均粒径とスランブフローの関係はほぼ比例しており、粒度分布の異なる微粒珪砂の種類別に目標スランブフローを確保する単位水量の推定が可能である。
- (2)単位水量と高性能AE減水剤を調整して、所定のスランブフローを得る場合、高性能AE減水剤の添加率が大きくなるにしたがってフロー時間は長くなる。微粒珪砂A(平均粒径 $80\mu\text{m}$)の場合、単位水量 $5\text{kg}/\text{m}^3$ の増減に対して、高性能AE減水剤の添加率を0.4%減増す

ることで、所定のスランブフローが確保される。
(3)微粒珪砂K(平均粒径 $210\mu\text{m}$)は材料分離抵抗性の付与能力が低く、置換率20%ではスランブフロー700mm程度の高流動コンクリートへの適用は困難であると考えられる。

(4)圧縮強度、引張強度に関しては、微粒珪砂の種類の違いによる影響は特に確認されなかった。したがって、粒度分布の異なる微粒珪砂を用いても、水セメント比50%、単位水量 $175\sim 185\text{kg}/\text{m}^3$ の配合に対して、圧縮強度 $35\text{N}/\text{mm}^2$ 程度のコンクリートの製造が可能である。

(5)微粒珪砂の粒度分布、単位水量、および高性能AE減水剤の添加率を調整することでフレッシュ性状の制御は可能であり、微粒珪砂の種類と置換率等を考慮して配合設計を行うことで種々のコンクリートへの適用が可能である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、愛知県珪砂鉱業共同組合、ならびに微粒珪砂活用研究会に多大なご助力を頂いたことをここに記し、深く感謝致します。

参考文献

- 1)愛知県瀬戸窯業技術センター・愛知県珪砂鉱業共同組合：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)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.1195~1200, 2000
- 5)森野圭二：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(岩波開校授記記念論文集), pp.179~195, 1974
- 6)松枝良展他：モルタルフローにおける粉体と細骨材の役割の境界、土木学会論文集, No.571, V-36, pp.131~195, 1997
- 7)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
- 8)中技研：技術センターだよりNo.29, 中技研ホームページ、1999