

論文 粒度分布の異なる微粒珪砂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・井上勝利*³・梅原秀哲*⁴

要旨：微粒珪砂はガラス用製品珪砂の製造過程で発生する産業副産物で、その平均粒径は80～210 μm 程度である。本研究では平均粒径約80 μm と210 μm の微粒珪砂を選定し、粉体系高流動コンクリートへの適用を検討した。その結果、微粒珪砂の平均粒径が異なっても高性能 AE 減水剤添加量の調整により、スランブフロー680mm 程度の高流動コンクリートが製造可能であることが明らかとなった。なお、水セメント比 50%，単位セメント量 380kg/m³の場合、適用可能な単位微粒珪砂量の範囲は、80 μm で100～250kg/m³，210 μm で200～300kg/m³であり、材齢4週の圧縮強度は40～50N/mm²であった。

キーワード：産業副産物，微粒珪砂，高流動コンクリート，粒度分布

1. はじめに

愛知県瀬戸地区は、ガラス用製品珪砂の国内供給量の約30%を占める国内最大の供給地である。現在、瀬戸地区では22企業が水洗分級により製品珪砂の製造を行っており、その生産活動に伴い年間約50万トンの廃珪砂が排出されている。この廃珪砂の内、粘土分を取除いたものが微粒珪砂と呼ばれ、年間約20万トン排出されている。この微粒珪砂は、資源材料として有効利用するための研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が行われ、一部はインターロッキングブロックへ活用されている。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ている。

本研究では、産業副産物である微粒珪砂のさ

表－1 調査結果

No	排出量(t/月)	脱水方法	保管方法
1	1000～2000	真空	屋内
2	1000～2000	遠心	屋内
3	1000～2000	真空	屋内
4	500～1000	真空	屋内
5	500～1000	自然放置	屋外
6	500～1000	自然放置	屋外
7	500～1000	自然放置	屋外

らなる有効活用を図ることを目的に、微粒珪砂の材料調査を実施し、その結果をもとに粒度分布の異なる代表的な2種類の微粒珪砂を選定し、粒度分布の相違が高流動コンクリートに及ぼす影響、ならびに微粒珪砂を用いたコンクリートの耐久性について実験により検討を行った。

2. 微粒珪砂の材料調査

調査は、排出量の多い上位7社を選定し実施した。調査項目は月間排出量、脱水方法、保管方法である。調査結果を表－1に示す。実施した材料試験は粒度試験、密度試験であり、材料試験結果を表－2に、粒度曲線を図－1に示す。

表－2 材料試験結果

No	平均粒径* (μm)	比表面積 (m^2/ml)	密度 (g/cm^3)	含水率 (%)
1	79	0.094	2.65	24～26
2	206	0.039	2.65	12～15
3	196	0.042	2.64	24～26
4	112	0.081	2.63	24～26
5	119	0.077	2.61	30～33
6	203	0.039	2.65	30～33
7	124	0.120	2.59	30～33

*：平均粒径 $=\sum f \cdot m/100$ （ここに、f：連続したふるい目の平均値、m：連続したふるい間の試料の質量百分率）

*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) 生産本部 技術課

*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）

微粒珪砂の平均粒径をみると、80～210 μm の範囲であり、幅広い活用を図るには粒度分布の相違が及ぼす影響について検討する必要があると考えられる。密度をみると 2.60～2.65 g/cm^3 程度の値であった。微粒珪砂の主要鉱物は、75～85%を占める石英[SiO_2 、密度 2.65 g/cm^3]と 10～20%を占める正長石[KAlSi_3O_8 、密度 2.55 g/cm^3]ならびに斜長石[$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 、密度 2.60～2.80 g/cm^3]であり、これらの鉱物の比率により密度は異なった値を示している。微粒珪砂の化学組成の一例を表-3に示す。

一般的な製品珪砂の製造工程図を図-2に示す。珪砂産業では原砂を水洗ふるい分けて砂利を除き、次いで珪砂部分を粗粒子と細粒子に分離する。分離された粗粒子をミルにより粉碎し、再びふるい分けて細粒子と合流し、ガラス原料、鋳物材料等に適する粒径(0.1～5mm)の珪砂を採取する。この工程では過粉碎の珪砂が廃棄される。一方、水洗に使用した水には粘土と微砂が含まれるが、これを沈殿槽に送り微砂を沈降させる。次に浮遊している粘土を調合タンクに水流で運び、そこで凝集剤を加え粘土を沈降させ、フィルタープレスで締め固めて水分を除き粘土を排出する。この工程では、

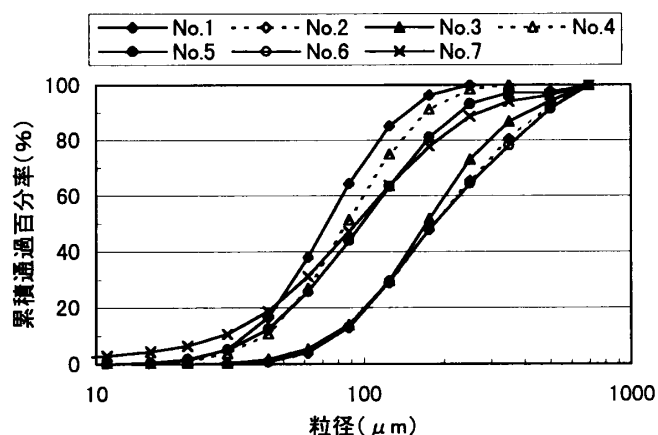


図-1 微粒珪砂の粒度曲線

表-3 微粒珪砂の化学組成の一例

化学組成 (%)							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
93.20	3.25	0.10	0.06	0.00	0.02	0.16	2.69
91.70	4.60	0.24	0.26	0.02	0.09	0.10	1.77

沈降した珪砂が廃棄される。以上の工程により、過粉碎の珪砂と泥水に含まれる珪砂が微粒珪砂として廃棄されている。

3. 実験概要

3.1 使用材料

使用材料を表-4に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、微粒珪砂は最も細かい平均粒径約 80 μm の K1(表-2の No.1)、ならびに最も粗い平均粒径約 210 μm の K2(表-2の No.2)を使用した。高性能 AE 減水剤はポリ

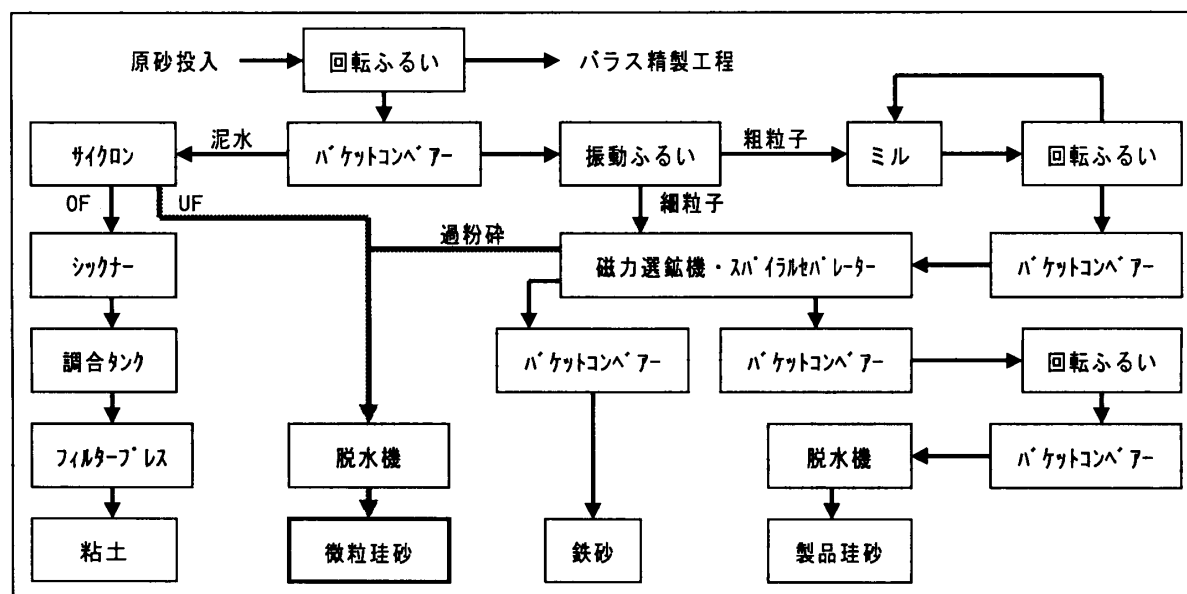


図-2 製品珪砂の製造工程図

表-4 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	山砂(木曽川水系)	S	密度: 2.58g/cm ³ , 吸水率: 1.80%, 粗粒率: 2.85
粗骨材	碎石(外ノ原産)	G	密度: 2.68g/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)	K1	密度: 2.65g/cm ³ , 平均粒径: 80μm, 表-2のNo.1
		K2	密度: 2.65g/cm ³ , 平均粒径: 210μm, 表-2のNo.2
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	主成分: ポリカルボン酸系

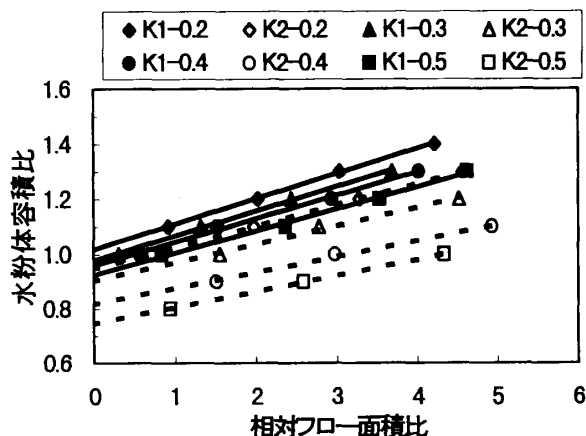


図-3 相対フロー面積比と水粉体容積比の関係

カルボン酸系を用いた。

3.2 微粒珪砂モルタルの性状(予備実験)

予備実験では、K1 ならびに K2 を用いたフレッシュモルタルの変形性の相違を確認することを目的とした。実験に用いた2種類の微粒珪砂が含有する0.15mm以上の粒子の割合は、K1で4%、K2で53%である。配合は、微粒珪砂とセメントの容積比を $V_K/(V_K+V_C)=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ の4水準とし、水粉体容積比の範囲を $W/(V_K+V_C)=0.7\sim1.4$ で変化させた。モルタルのフロー値から得られる相対フロー面積比⁵⁾と水粉体容積比の関係を図-3に示す。

図より平均粒径の大きい微粒珪砂の方が、同一の相対フロー面積比を得る水粉体容積比が小さくなった。このことより、使用する微粒珪砂の平均粒径が大きいほど、同一のフローを得るために必要となる単位水量が小さくなることが分かった。

3.3 配合および試験項目

高流動コンクリートの配合を表-5に示す。実験は3つのシリーズについて行った。シリーズ1はK1(平均粒径約80μm)の適用範囲の検討、シリーズ2はK2(平均粒径約210μm)の適用範囲の検討、シリーズ3は耐久性能の確認である。なお、シリーズ3ではK1を使用した。各シリーズとも、水セメント比50%一定、単位セメント量380kg/m³一定、単位粗骨材絶対容積0.314m³/m³一定とした。微粒珪砂は絶乾状態で使用し、単位量をシリーズ1では100, 150, 200, 250kg/m³の4水準、シリーズ2では150, 200, 250, 300kg/m³の4水準、シリーズ3では106, 193kg/m³の2水準とした。目標スランプフローを680±50mmとし、予備実験の結果を考慮してシリーズ2の高性能AE減水剤添加量をシリーズ1より少なく設定した。

表-5 高流動コンクリートの配合

シリーズ	配合 No	W/C (%)	s/a (%)	W/V _K +V _C	V _K /V _K +V _C	単位量 (kg/m ³)					
						W	C	K	S	G	SP (C×%)
1 (K1)	1	50.0	48.2	1.20	0.238	190	380	100	755	841	6.46 (1.70)
	2		46.6	1.07	0.319			150	706		6.84 (1.80)
	3		44.8	0.97	0.385			200	658		7.79 (2.05)
	4		42.9	0.88	0.439			250	609		9.88 (2.60)
2 (K2)	1	50.0	46.6	1.07	0.319	190	380	150	706	841	5.51 (1.45)
	2		44.8	0.97	0.385			200	658		6.27 (1.65)
	3		42.9	0.88	0.439			250	609		6.84 (1.80)
	4		40.3	0.81	0.484			300	561		7.60 (2.00)
3 (K1)	1	50.0	48.0	1.18	0.249	190	380	106	748	841	6.27 (1.65)
	2		45.0	0.98	0.376			193	663		7.60 (2.00)

シリーズ1, 2の配合要因として細骨材と微粒珪砂混合後の150 μ m通過量, 90 μ m通過量, 粗粒率ならびに微粒珪砂の90 μ m通過量を粉体として取り扱った場合⁶⁾の単位粉体容積を表-6に示す。

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秒空練り後, 混和剤と練混ぜ水を加え210秒練り混ぜた。

試験項目は, スランプフロー試験, 空気量試験, U形充てん装置による間げき通過性試験(障害R2), 圧縮強度試験である。なお, シリーズ3については, 凍結融解試験(JIS A 6204 附属書2, 7.5サイクル/日), 乾燥収縮試験(JIS A 1129, 温度20 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C, 湿度60 $\pm$ 5%), 促進中性化試験(温度20 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C, 湿度60 $\pm$ 5%, 炭酸ガス濃度5 $\pm$ 0.2%)を実施した。

4. 実験結果および考察

実験結果を表-7に示す。単位微粒珪砂量とスランプフローの関係を図-4に, 単位微粒珪砂量と間げき通過性試験による充てん高さの関係を図-5に示す。図より, 平均粒径約80 μ mであるK1は単位微粒珪砂量100~250kg/m³の範囲で, また, 平均粒径約210 μ mであるK2は単位微粒珪砂量200~300kg/m³の範囲で目標スランプフローを満たし, 充てん高さ300mm以上となった。よって, 微粒珪砂の粒度分布が異なると, 適用可能となる単位微粒珪砂量の範

表-6 細骨材と微粒珪砂混合後の配合要因

シリーズ	配合No	通過量(%)		混合後F. M.	粉体容積*(m ³ /m ³)
		150 μ m	90 μ m		
1 (K1)	1	15	10	2.51	0.153
	2	20	14	2.35	0.166
	3	26	18	2.19	0.179
	4	31	22	2.03	0.192
2 (K2)	1	13	4	2.46	0.134
	2	16	5	2.33	0.137
	3	18	6	2.21	0.140
	4	21	7	2.08	0.143

*: 微粒珪砂90 μ m通過量+セメント

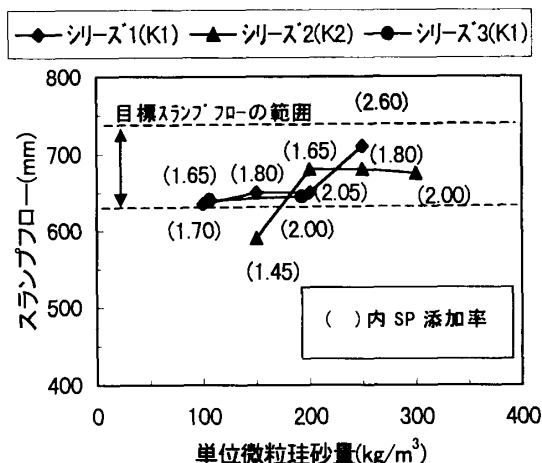


図-4 単位微粒珪砂量とスランプフローの関係

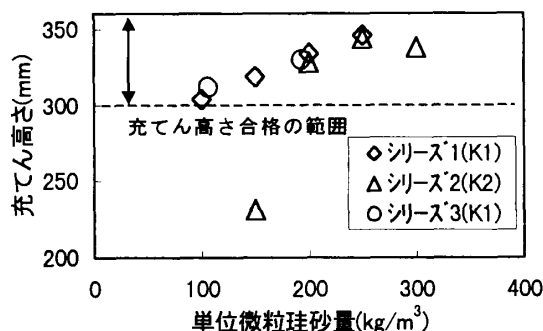


図-5 単位微粒珪砂量と充てん高さの関係

表-7 フレッシュコンクリート試験結果および強度試験結果

シリーズ	配合No	スランプフロー			間げき通過性試験		空気量(%)	圧縮強度(N/mm ²)	
		(mm $\times$ mm)	500mm到達時間(s)	停止時間(s)	充てん高さ(mm)	充てん時間(s)		7日	28日
1 (K1)	1	635 $\times$ 630	4.6	42.0	304	46.0	5.3	41.2	45.1
	2	650 $\times$ 650	4.6	43.0	319	49.0	4.3	38.2	47.4
	3	660 $\times$ 635	4.7	56.0	334	50.0	5.6	39.6	48.3
	4	710 $\times$ 705	6.9	71.0	346	43.0	3.6	42.0	47.6
2 (K2)	1	610 $\times$ 565	4.7	29.0	231	18.0	1.5	44.7	53.9
	2	680 $\times$ 680	4.5	57.0	328	48.0	5.7	36.5	41.9
	3	705 $\times$ 650	5.9	49.0	344	37.0	1.5	38.4	45.7
	4	680 $\times$ 665	7.8	68.0	338	54.0	1.8	37.7	45.0
3 (K1)	1	640 $\times$ 640	4.5	44.0	312	47.0	4.8	41.2	49.9
	2	655 $\times$ 630	6.7	59.0	330	49.0	4.5	38.9	45.2

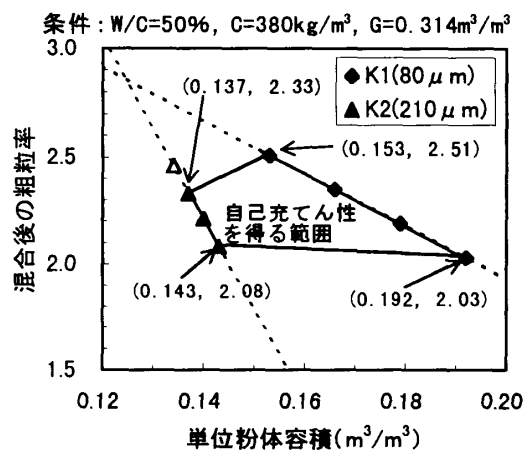


図-6 細骨材と微粒珪砂混合後の単位粉体容積と粗粒率の推奨範囲

図は異なるが、SP 添加率を調整することにより、スランプフロー680mm 程度の自己充てん性を有する高流動コンクリートが製造可能となることが分かった。

実験結果より得られた自己充てん性を有する範囲を、細骨材と微粒珪砂混合後の粗粒率ならびに単位粉体容積(約 90 μm 以下の微粒珪砂を粉体として扱う)により示したものが図-6 である。粒度分布が異なる微粒珪砂を使用する場合、図-6 を参考に混入量を決定するのが有効であると考えられる。平均粒径約 120 μm (表-2 の No.5)の微粒珪砂を用い、図-6 の適用性を確認したところ、良好な性状の高流動コンクリートを得ることができた(表-8)。

単位微粒珪砂量と圧縮強度の関係を図-7 に示す。図より、材齢 28 日の圧縮強度は 40~50N/mm² 程度の値であった。空気量の差を考慮し、微粒珪砂種類で圧縮強度を比較すると、同一混入量において K1 が K2 より大きい値を示した。空気量の範囲を選定し混入量に着目し圧縮強度を比較すると、K1(空気量 4.5±1.5% の範囲で比較)は 45~50N/mm² 程度の値を示し、混入量の相違による影響は小さい。一方、K2(空気量 2.0%以下で比較)は混入量の増加に伴い、圧縮強度が小さくなる傾向が見られた。

シリーズ3の結果である凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図-8 に示す。結果より、No.1, No.2 とともに耐久性指数 90%を上

表-8 平均粒径 120 μm の微粒珪砂の試験結果

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	K	S	G1	SP
50.0	190	380	246	609	841	9.50
K 平均粒径 (μm)	混合後通過量 (%)			混合後 F. M.	粉体容積 (m ³ /m ³)	
	150 μm	90 μm				
120	26	17		2.09	0.176	
スランプフロー (mm×mm)		充てん高さ (mm)		空気量 (%)	σ ₂₈ (N/mm ²)	
500mm 到達		345		3.2	45.2	
710×700		6.3 (s)				

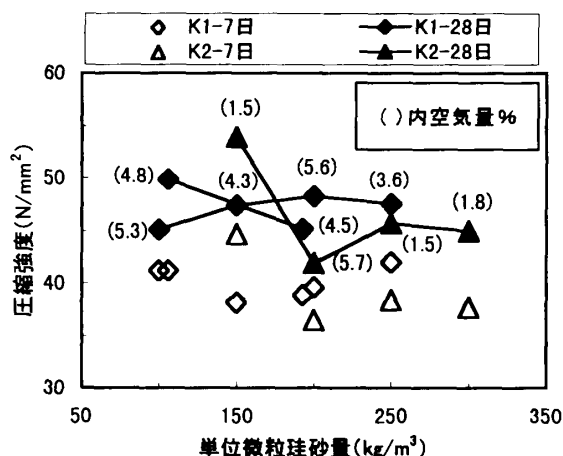


図-7 単位微粒珪砂量と圧縮強度の関係

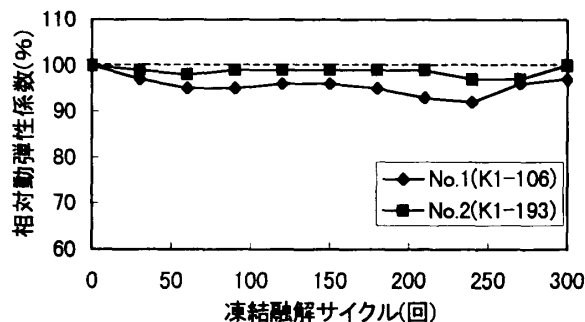


図-8 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

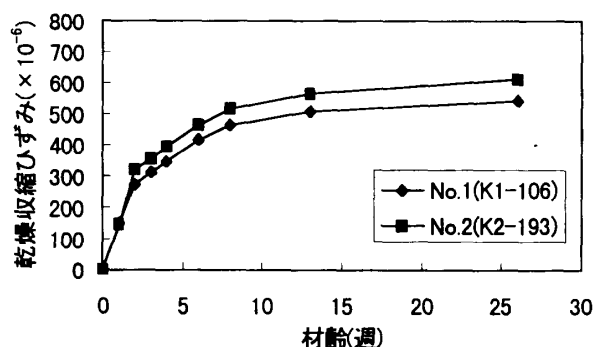


図-9 乾燥材齢と乾燥収縮ひずみの関係

回り良好な性状を示した。

乾燥材齢と乾燥収縮ひずみの関係を図-9 に示す。乾燥材齢 26 週における乾燥収縮ひず

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
50.0	42.2	190	380	702	1105	0.945
スランプ 18.0cm		空気量 4.9%			$\sigma_{28}=42.2\text{N/mm}^2$	

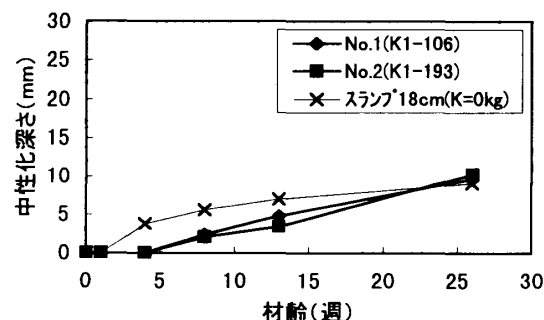


図-10 中性化促進材齢と中性化深さの関係

みは、No.1 で 545×10^{-6} 、No.2 で 611×10^{-6} となり、一般的な高流動コンクリートの値⁷⁾である $600 \sim 800 \times 10^{-6}$ と比較してもそんな値を示した。

中性化促進材齢と中性化深さの関係を図-10に示す。促進材齢 26 週における中性化深さは、No.1 で 9.6mm、No.2 で 10.2mm となり、水セメント比 50% 程度の普通コンクリートと同程度の値が得られた。

5. まとめ

粒度分布の異なる微粒珪砂の高流動コンクリートへの適用を検討した結果、本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- (1) 微粒珪砂の平均粒径は $80 \sim 210 \mu\text{m}$ 程度、密度は $2.60 \sim 2.65\text{g/cm}^3$ 程度の値であった。
- (2) 粒度分布が異なる微粒珪砂を用いても、SP 添加率を調整することにより、スランプフロー 680mm 程度の自己充てん性を有する高流動コンクリートが製造可能となる。ただし、適用可能となる単位微粒珪砂量の範囲は異なる。
- (3) 水セメント比 50%、単位セメント量 380kg/m^3 の場合、適用可能となる微粒珪砂の単位量は、平均粒径約 $80 \mu\text{m}$ の場合 $100 \sim 250\text{kg/m}^3$ 、 $210 \mu\text{m}$ の場合 $200 \sim 300\text{kg/m}^3$ であった。また、この時の材齢 4 週における圧縮強度は $40 \sim 50\text{N/mm}^2$ 程度であった。
- (4) 自己充てん性を有するために必要となる粗

粒率(微粒珪砂と細骨材混合後)と単位粉体容積(約 $90 \mu\text{m}$ 以下の微粒珪砂を粉体として扱う)の奨励範囲を得ることができた。

(5) 微粒珪砂を用いた高流動コンクリートは、耐凍害性、乾燥収縮性状、中性化に係わる耐久性能について、問題ないことが確認された。

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り名古屋工業大学 上原匠助教授に終始有益なご助言を賜り、また、愛知県珪砂鉱業協同組合 三浦明氏、矢作建設工業(株)服部啓二氏、住友大阪セメント(株)滝瀬直登氏・吉原正博氏、日本コンクリート(株)青山敬氏、丸栄コンクリート工業(株)森信夫氏、エフ・ピー・ケー(株)小林至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.187～192，1999.6
- 2) 上原匠・平原英樹・梅原秀哲・服部啓二：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，No.2，pp.469～474，1999.6
- 3) 桐山和也・山口昇三・森嶋和博・梅原秀哲：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.871～876，2000.6
- 4) 平原英樹・上原匠・佐藤貢・梅原秀哲：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集，Vol.22，No.2，pp.1195～1200，2000.6
- 5) 枝松良展・山口昇三・岡村甫：モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化，土木学会論文集，No.538，V-31，pp.37～46，1996.5
- 6) 枝松良展・山口昇三・岡村甫：モルタルフローにおける粉体と細骨材の役割と境界，土木学会論文集，No.571，V-36，pp.131～147，1997.8
- 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，1998.7