

論文 湿式にて捕集した碎石スラッジの混和材としての特性

佐藤道生^{*1}・佐伯竜彦^{*2}・井下一郎^{*3}

要旨： 骨材製造過程では、原石の 10%程度の微粉末（碎石スラッジ）が発生し、濁水処理プラントで脱水ケーキという形で捕集される。脱水ケーキは、水分を内包すること、不純物が混入するなどの理由により有効利用が難しく、大半は廃棄処分されている。本報告では碎石スラッジのうち骨材製造設備から発生する脱水ケーキを有効利用することを目的とし、試験を通じて碎石スラッジの混和材としての可能性について検討した。その結果、凝集剤等の影響で単位水量が増加するものの、単位セメント量に応じた強度が期待できることが明らかとなった。

キーワード： 碎石スラッジ、微粉末、混和材、コンクリート

1. はじめに

碎石砕砂の製造過程では、原石の約 10%程度が損失し、その多くは濁水処理プラントで脱水ケーキという形で捕集され、大半は産業廃棄物として廃棄処分されている。

本論文では、骨材の生産時に発生する微粉末（以下、碎石スラッジと呼ぶ）の混和材としての可能性を評価することを目的として、実施したモルタル・コンクリート試験の結果を報告する。

2. 碎石スラッジの特徴

2.1 プラントの構成

一般的な濁水処理は表—1に示す5工程よりなる。この様な濁水処理工程（機械処理脱水方式）は濁水処理方式の約8割¹⁾を占める。湿式で捕集した碎石スラッジの特徴の一つに、凝集剤の含有が挙げられる。濁水の凝集沈降過程で添加される凝集剤は、無機凝集剤としてPAC（ポリ塩化アルミニウム）を、高分子凝集剤としてアニオン系を採用する場合が多く、一般には両者を併用する。凝集沈降過程の後に碎石スラッジを含む沈殿物は加圧脱水され、「脱水ケーキ」と称されるブロック状の固形物となる。

表—1 基本的な濁水処理フロー

項 目	説 明
① 濁水流入	骨材プラントからの流入水
② 前処理(土砂分離)	沈砂池にて粗大な砂の除去
③ 凝集沈降	凝集剤の添加により、粒子を凝集させ、沈降を促進。
④ 汚泥処理	汚泥加圧脱水→脱水ケーキ
⑤ 排水	pH 確認後、排水する。

2.2 碎石スラッジの物性

試験対象とした碎石スラッジ（以下図表中では Sd と略記）は、骨材製造プラントの濁水処理設備より発生する脱水ケーキである。同プラントの濁水処理設備は、一般的な機械処理脱水方式であり、凝集剤として PAC 及びアニオン系高分子凝集剤を併用している。濁質流入量と凝集剤添加量から推定した碎石スラッジ内の凝集剤濃度は、PAC が 3.3%、高分子凝集剤が 0.1%であった。碎石スラッジの物性値を表—2に、粒度分布図を図—1に示す。平均粒径は $9\mu\text{m}$ 程度であり、石灰石微粉末(325 メッシュ)とほぼ等しい粒度分布を持つ。ただし、粒度分布は凝集沈降速度、凝集沈降槽（シックナー）の構造等に、密度は原石の密度に依存する。

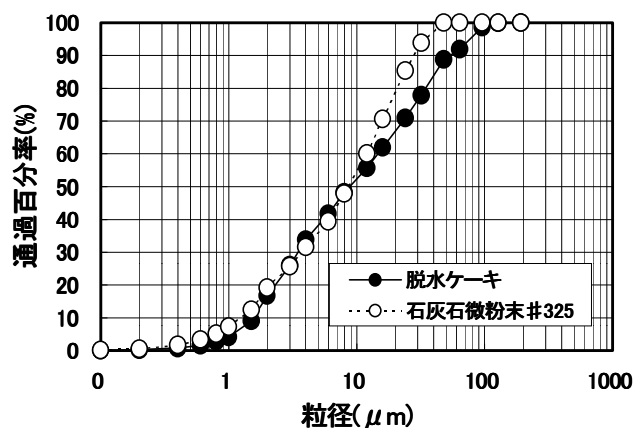
*1 電源開発(株) 新エネルギー・技術開発部 茅ヶ崎研究センター 工修（正会員）

*2 新潟大学助教授 工学部建設学科 工博（正会員）

*3 電源開発(株) 新エネルギー・技術開発部 茅ヶ崎研究センター 工修（正会員）

表—2 スラッジの物性（試験値）

項 目	碎石スラッジ	石灰石微粉末
密度 (g/cm ³)	2.73	2.71
比表面積 (cm ² /g)	5,430	4,570
平均粒径 (μm)	8.97	8.72
含有量分析 (%)	SiO ₂	48.6
	Al ₂ O ₃	12.9
	Fe ₂ O ₃	5.35
	CaO	12.2
	MgO	3.13
	SO ₃	0.47
	Na ₂ O	2.25
	K ₂ O	1.82
		0.12



図—1 碎石スラッジの粒度分布

脱水ケーキとして得られる碎石スラッジは、フィルタープレスにより脱水するものの、ある程度の水分を内包する。試験対象とした脱水ケーキの実測では、平均 27.9%、標準偏差 1.5%（試料数 14）の含水比であった。

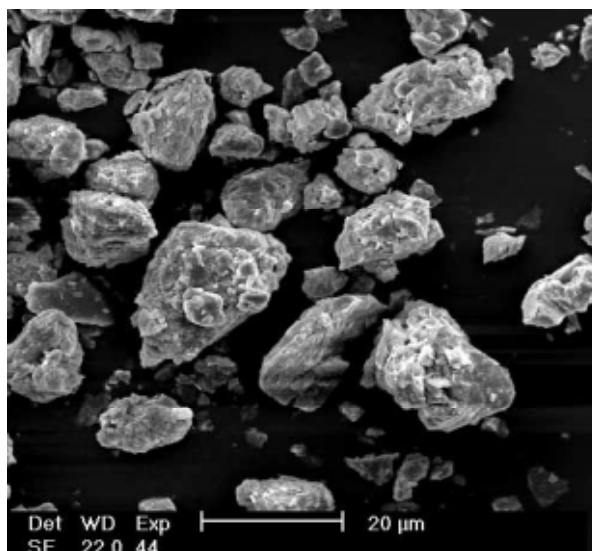
碎石スラッジ及び石灰石微粉末の走査電子顕微鏡写真を写真—1、2に示す。いずれも鉱物質微粒子であるが、碎石スラッジは微細粒子が凝集していることがわかる。

3. 碎石スラッジ中に含まれる凝集剤が

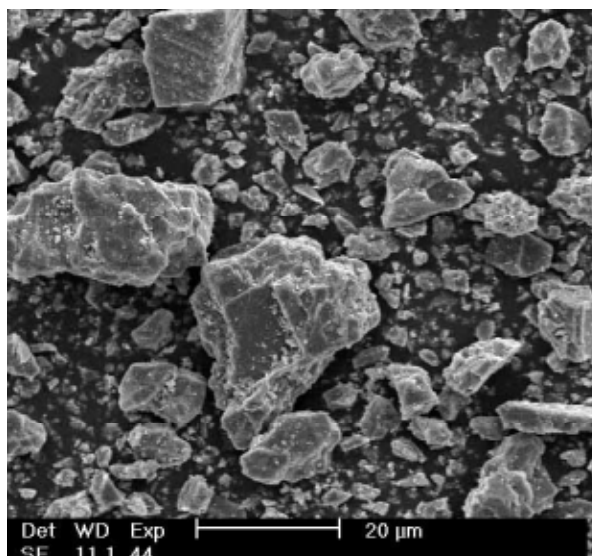
モルタルの諸性質に及ぼす影響

3.1 試験方針

碎石スラッジは凝集剤により濁質分を凝集させた微粉末のため、碎石微粉末の他に凝集剤を不純物として含有する。凝集剤の影響を評価



写真—1 電子顕微鏡写真(碎石スラッジ)



写真—2 電子顕微鏡写真(石灰石微粉末)

するため、碎石スラッジと粒度分布の類似した石灰石微粉末に凝集剤を添加したものを「模擬碎石スラッジ」とし、これを混和したモルタル試験により初期性状、強度の確認を実施した。

3.2 使用材料

模擬碎石スラッジの母材としての微粉末には前述のとおり粒度分布の類似していた石灰石微粉末（325 メッシュ）を用いた。凝集剤は無機凝集剤として PAC、高分子凝集剤としてアニオン系を用いた。その他使用材料は表—3 に示すとおりである。

表—3 使用材料

材料	密度	説明
セメント	3.15	普通ポルトランドセメント
細骨材	2.60	大井川産川砂
微粉末	2.71	石灰石微粉末(325 メッシュ)
無機凝集剤		T社製, PAC (ポリ塩化アルミニウム), JIS K1475 適合品
高分子凝集剤		D社製, アニオン系 主成分アクリルアミド

3.3 試験方法及び配合

モルタルの練混ぜは JSCE-F505「試験室におけるモルタルの作り方」に準拠した。模擬碎石スラッジは予め混ぜ合わせた後、水と共に添加した。供試体作製及び圧縮強度試験は JSCE-F506, JSCE-G505 に準拠した。模擬碎石スラッジの細骨材に対する置換率 ($S_d/S+S_d$) は、体積%で 0, 5, 10, 15%とした。凝集剤添加量は石灰石微粉末に対して重量比で 0.0%, 0.1%, 0.2% (高分子凝集剤), 0, 3, 6%(PAC)とした。

3.4 凝集剤のフレッシュ性状への影響

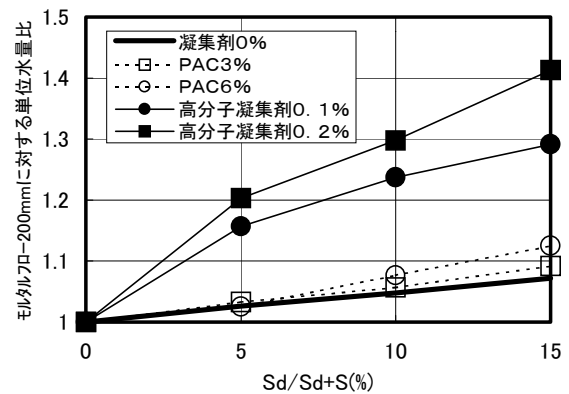
モルタルフロー200mm に対する単位水量比 (碎石スラッジ 0%, 凝集剤 0%を 1) と碎石スラッジ置換率、凝集剤添加量の関係を図—2 に示す。凝集剤無混入でも微粉末の増加に応じ単位水量が増加するが、凝集剤の影響が顕著である。特に高分子凝集剤は少量での影響が著しく、凝集剤添加量と単位水量の増加量が比例する PAC とは傾向が異なる。単位粉体 (セメント+碎石スラッジ) 量当りの凝集剤添加量とモルタルフロー値の比を比較したのが図—3 である。PAC と比べ高分子凝集剤による影響が著しい。

凝集剤の凝集作用には、表面電位を低下させる電荷中和作用と、粒子間の架橋吸着作用があり、PAC は前者、高分子凝集剤は後者に属する。両者を比較した場合、モルタルの初期性状に大きな影響を与えるのは架橋吸着作用による高分子凝集剤であり、少量でも影響が大きいため、碎石スラッジを使用する場合には予め碎石スラ

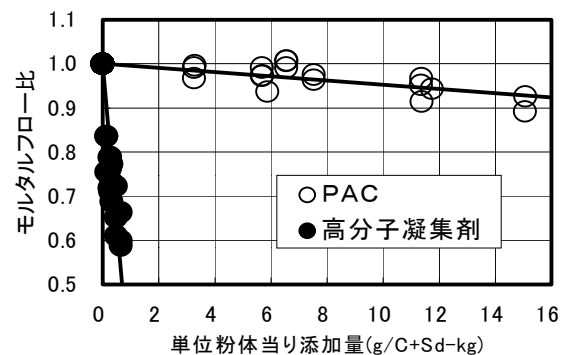
ッジ内の高分子凝集剤量を推定する必要がある。

3.5 凝集剤の圧縮強度への影響

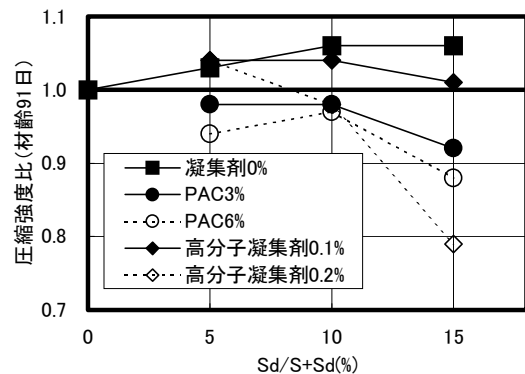
材齢 91 日、水セメント比 55%の場合について圧縮強度比 (碎石スラッジ 0%を 1) により凝集剤の圧縮強度への影響を比較したのが図—4 である。碎石スラッジ 15%の場合では強度低下の傾向が見られ、高分子凝集剤 0.2%添加及び PAC6%添加の場合では特に顕著であった。碎石スラッジ量が多く、凝集剤濃度が高い場合には、硬化体強度に影響することを示すものである。



図—2 凝集剤と単位水量比の関係



図—3 凝集剤添加量とモルタルフロー比



図—4 凝集剤と圧縮強度の関係 (W/C55%)

4. 砕石スラッジを用いたコンクリート試験

実際の砕石スラッジを混和したコンクリートの基本特性を把握する為、単位水量試験及び強度試験等のコンクリート試験を実施した。

4.1 試験方法・使用材料

各種コンクリート試験は、表—4の基準に準拠した。練混ぜは、100 リットルパン型ミキサーを使用し練混ぜ時間は3分間とした。なお、砕石スラッジは予め乾燥させた後、水と共に添加した。使用材料は表—5の通りである。

表—4 試験方法

試験内容	基準他
コンクリート練混ぜ	JIS A1138
スランプ試験	JIS A1101
空気量	JIS A1128
供試体作製	JIS A1132
圧縮試験	JIS A1108

表—5 使用材料

材料	密度	説明
セメント	2.95	フライアッシュセメント(B種)
細骨材	2.67	石灰石砕砂
粗骨材	2.71	石灰石砕石 G2005
砕石スラッジ	2.73	骨材製造プラント脱水ケーキ
AE 減水剤		P 社製、リグニンスルホン酸化合物及びポリオール複合体
高性能 AE 減水剤		F社製、マレイン酸エステル共重合物を主成分とするポリカルボン酸系化合物
AE 剤		P 社製、高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤

4.2 コンクリートのフレッシュ性状

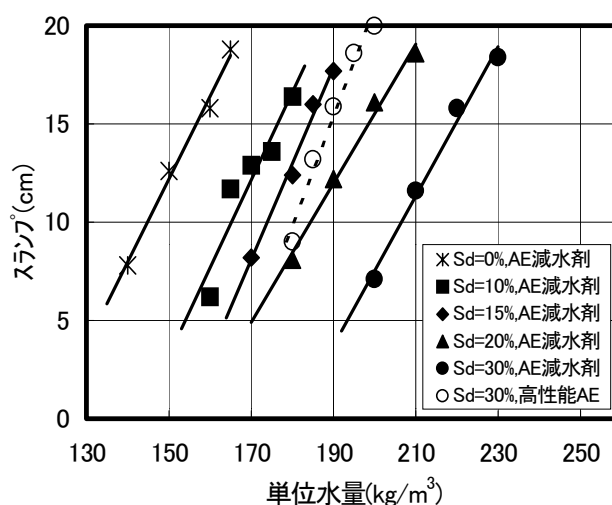
単位水量とスランプの関係把握するため単位水量試験を実施した。試験に用いた配合及びスランプ、空気量の試験値を表—6、図—5に示す。単位セメント量は320kg/m³とし、粗骨材最大寸法は20mmとし、砕石スラッジは細骨材に対して容積比で30%まで置換した。減水剤はAE減水剤を主とし、砕石スラッジ置換率30%のみ高性能AE減水剤を用いたケースも検討した。AE減水剤はセメント量に対して0.25%添加、高性能AE減水剤は1.0%添加し、空気量は4.5%となるようにAE剤にて調整した。

表—6 単位水量試験 配合表

混和剤	Sd/S+Sd (v%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			初期性状	
				W	C	Sd	SL (cm)	Air (%)
AE 減水剤	0	43.8	45	140	320	0	7.8	4.3
	0	46.9	46	150	320	0	12.6	4.3
	0	50.0	46	160	320	0	15.8	4.2
	0	51.6	46	165	320	0	18.8	4.2
	10	50.0	45	160	320	84	6.2	4.2
	10	51.6	45	165	320	84	11.7	4.7
	10	53.1	45	170	320	83	12.9	4.4
	10	54.7	45	175	320	82	13.6	4.3
	10	56.3	46	180	320	84	16.4	4.3
	15	53.1	44	170	320	122	8.2	4.1
	15	56.3	45	180	320	123	12.4	5.1
	15	57.8	45	185	320	122	16.0	4.9
	15	59.4	45	190	320	121	17.7	4.7
	20	56.3	44	180	320	160	8.1	4.0
	20	59.4	44	190	320	158	12.2	5.1
	20	62.5	45	200	320	159	16.1	5.1
	20	65.6	45	210	320	156	18.6	4.0
	30	62.5	45	200	320	238	7.1	3.9
	30	65.6	45	210	320	235	11.6	4.6
	30	68.8	46	220	320	236	15.8	5.2
	30	71.9	47	230	320	237	18.4	4.4
高性能 AE	30	56.3	44	180	320	240	9.0	4.0
	30	57.8	44	185	320	238	13.2	5.2
	30	59.4	44	190	320	237	15.9	5.3
	30	60.9	44	195	320	235	18.6	5.5
	30	62.5	45	200	320	238	20.0	4.9

C:2.95(フライアッシュセメントB種), S:2.67(石灰石砕砂)

G:2.71(石灰石砕石), Sd:2.73(脱水ケーキ)



図—5 単位水量と初期性状の関係

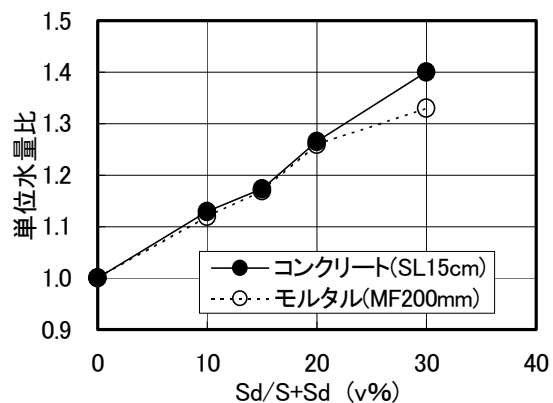
コンクリートの初期性状は、碎石スラッジ置換率を高めるに従って、粘性が高まり、分離が小さくなる傾向を示した。スランプの形状の一例を写真—3に示す。



写真—3 スランプ形状の一例
(Sd30%, AE 減水剤, SL15cm 程度)

高性能 AE 減水剤を用いた場合には、AE 減水剤と比較して、 30kg/m^3 程度の減水効果が見られた。高性能 AE 減水剤の添加量を増加させることにより、更なる単位水量の減少が可能であり、碎石スラッジ混和量の増加も可能である。しかしながら、碎石スラッジより供給される水分と骨材の表面水の総和が、単位水量の大半を占めることに留意する必要がある。本検討では、碎石スラッジ混入による影響を評価することが主眼のため、以後の検討では AE 減水剤を対象とした。

スランプ 15cm のコンクリートの単位水量比（碎石スラッジ置換率 0%の値を 1）を図—6 に示す。単位水量は、碎石スラッジ置換率に比例して増加し、碎石スラッジ置換率 30%では碎石スラッジ無混入の場合と比較し単位水量が 1.4 倍となる。別途試験²⁾したモルタル配合でのモルタルフロー200mm の単位水量比と比べると、骨材のサイズに関わらず、単位水量の比はほぼ一定となることから、初期性状はモルタル部分の粘性によって決まるものと考えられる。



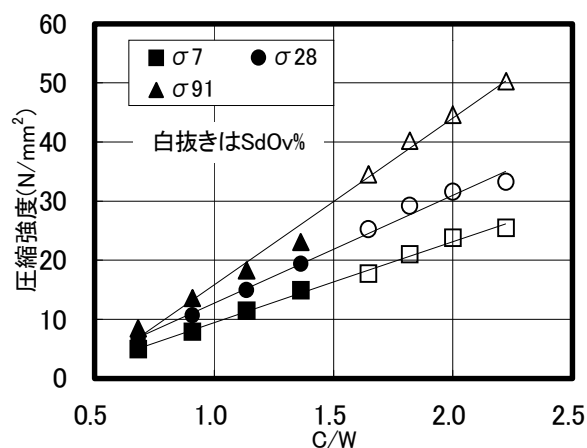
図—6 単位水量比の比較

4.3 コンクリートの強度特性

AE 減水剤を使用した碎石スラッジ置換率 0% と 30%の 2 ケースについて、材齢 91 日までの圧縮強度試験を行った。それぞれスランプ 18cm に対応する単位水量を採用し、水セメント比は 4 ケースとした。強度試験の配合及び試験結果を表—7、図—7 に示す。

表—7 試験の配合表・強度試験結果

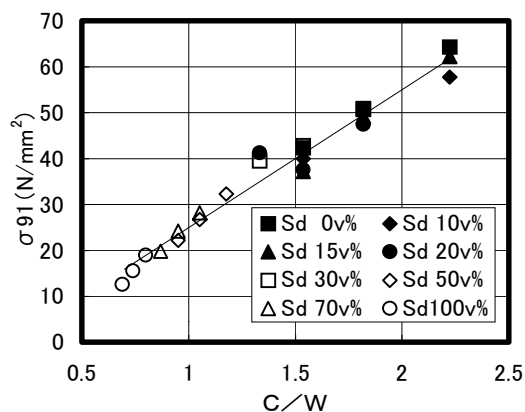
Sd/S+Sd (v%)	W/C (%)	単位量(kg/m³)			圧縮強度(N/mm²)		
		W	C	Sd	7d	28d	91d
30	147	220	150	269	4.9	6.8	8.5
	110	220	200	257	7.9	10.6	13.6
	88	220	250	245	11.4	14.9	18.3
	73	220	300	228	14.9	19.4	23.1
0	61	164	270	0	17.7	25.2	34.5
	55	164	298	0	21.0	29.2	40.2
	50	164	328	0	23.8	31.6	44.6
	45	165	367	0	25.5	33.2	50.3



図—7 圧縮強度試験結果

初期性状を同一にした場合碎石スラッジを混入することにより単位水量が増加するため、セメント水比の領域が異なるものの、セメント水比～強度の関係は碎石スラッジ混入によらずほぼ同一の直線関係を示す。脱水ケーキに由来する碎石スラッジを用いて別途実施したモルタル試験の一例²⁾を図—8に示す。碎石スラッジ置換率を0～100%としたモルタル試験でも、碎石スラッジ置換率によらずセメント水比と圧縮強度は直線関係を示した。また、碎石スラッジの混和により強度が若干増加するケースもあり、微粉末の混和による微粉末効果⁴⁾によるものと考えられる。

前章のモルタル試験では凝集剤の濃度が過度に高い場合に強度が低下する例も見られたが、通常の凝集剤濃度においては、顕著な強度低下は見られなかった。以上を勘案すると、碎石スラッジを混和してもセメント自体の水和を阻害せず、セメント自体の硬化は碎石スラッジを添加しない場合と同等であるものと考えられる。



図—8 モルタル試験結果の一例

5. まとめ

検討の結果、下記が明らかとなった。

①碎石スラッジの物性

碎石スラッジは平均粒径 10 μm 程度の微粉末であり、粒度分布はシックナーの構造に、密度は原石の密度に依存する。

②凝集剤の影響

凝集剤はモルタルの初期性状に及ぼす影響が

大きく、特に粒子間の架橋吸着作用がある高分子凝集剤の影響が大きい。また、碎石スラッジ量が多い場合や凝集剤濃度が多い場合には強度への影響も懸念される。

③碎石スラッジを混和したコンクリートの性状

碎石スラッジの混和により単位水量の増加が見られた。これは微粉末及び凝集剤の混入によるペーストの粘性増加によるものと思われる。一方、碎石スラッジの混和量に因らずセメント水比と強度の関係は変化しないことから、セメント自体の水和を阻害していないと考えられる。

湿式により捕集した碎石スラッジでは凝集剤の他、粘土鉱物や有機不純物を含む可能性がある。碎石スラッジを混和材として用いる際には、不純物量を予め推定・評価する必要がある。

また、コンクリートの十分な品質管理を行うためには、碎石スラッジに由来する水分量を正確に把握する手法の開発が必須であり、今後の検討課題と言える。更に、碎石スラッジ混入の影響をより明確にするためには、碎石スラッジの硬化体組織への影響を評価する必要がある。

今後は碎石スラッジを混和したコンクリートを製造する際の諸課題を整理し、実構造物への適用にむけた取り組みを行う予定である。

6. 参考文献

- 1)財団法人日本ダム協会施工技術研究会編：ダム建設工事における濁水処理,財団法人日本ダム協会,pp.90,2000.7
- 2)井下, 佐伯, 佐藤：碎石スラッジを混入したコンクリートに関する基本特性,土木学会第 56 回年次学術講演会,pp.362～363,2001.10
- 3)社団法人日本コンクリート工学協会：石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム委員会報告書,pp.58,1998.5
- 4)山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートのウォーカビリティおよび強度におよぼす効果に関する基礎研究, 土木学会コンクリートライブラリーNo.8,pp.34,1963.7