

論文 モルタル・コンクリートのワーカビリティに及ぼす 砕石スラッジの影響

土田 克美^{*1}・河野 広隆^{*2}・森濱 和正^{*3}

要旨：砕石製造時に発生するスラッジは、産業廃棄物として処分されているのが現状である。このスラッジの有効利用を目的として、ダム用RCD・ELCM・外部・高流動コンクリートおよびそのモルタルのワーカビリティに関する試験を行った。スラッジの混入率のみを変化させた場合、その増加にともないワーカビリティが低下することを確認した。

キーワード：砕石スラッジ，比表面積，ワーカビリティ，ダム用コンクリート，リサイクル

1. まえがき

これまでも、ダム建設技術の確立とともに「設計の合理化」から「施工の合理化」へと経済性の追求が進められてきた。さらに今日では新たに「材料の合理化」、なかでも骨材の有効利用技術が求められている。材料の合理化とは原石山ならびにダムサイト近傍で採取される材料を極力有効に利用することである¹⁾。

近年、原石山から採取される骨材の歩留まりが低下しているため、骨材の有効利用を図ることが資源面、環境面、経済性からも重要な課題となってきた。

前報²⁾では省資源、省エネルギー、環境保全の観点から砕石粉の有効利用について検討し、利用の見通しを得たが、コンクリートのワーカビリティに対して砕石粉の比表面積の影響が大きいと指摘されている。

ここではダム建設現場において発生するスラッジの処分法を見直し、資源としての再利用の可能性を探ることとした。すなわち大量に発生する砕石スラッジの処理法の一環として、ダム用コンクリート材料の一部として有効利用の可能性について検討しようとするものである。

ダム建設工事の現場によっては、骨材プラント用濁水処理設備において、全骨材の供給量に

対しておよそ15%の砕石スラッジが発生しているものもある。さらにダムサイト用濁水処理設備においても、打設面の打ち継ぎ処理にともなうコンクリートスラッジがコンクリート打設量に対して2%程度発生している。スラッジ発生量の比率は、コンクリートスラッジ1に対して砕石スラッジ約16である。また、これらのスラッジは産業廃棄物として取り扱われ、処理費用と手間をかけて処分しているのが実状である。

本報告では、ダム用コンクリートに対して、スラッジを細骨材に置換した場合のモルタル、コンクリートのワーカビリティに及ぼす影響、モルタルとコンクリートの性質の相関性を求めることを目的として実験を行った。

2. 実験概要

2.1 材料の分類

材料はコンクリートダム建設現場から採取したスラッジ2種類と細骨材（以下略記「S」）、粗骨材（粒度範囲4005、「G」）、ほかに中庸熱セメント（「C」）、フライアッシュ（「F」）である。

ここでいうスラッジとは、ダム建設現場の骨材製造プラント用濁水処理設備から採取した脱

*1 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 交流研究員 工修（正会員）

*2 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室長 工修（正会員）

*3 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 主任研究員（正会員）

水ケーキ(以下スラッジ a, 「Sa」)と, ダムサイト濁水用処理設備から採取した脱水ケーキ(以下スラッジ b, 「Sb」)をいう。

2.2 粉体

スラッジ a, b, セメント, フライアッシュを粉体の対象とした。

粉体試験は組成分析, 粒度分布, かさ密度, 比表面積, 密度, メチレンブルー吸着量, ゼータ電位, 砂当量試験を実施した。

2.3 モルタルおよびコンクリート

対象とするコンクリートは, 以下の4種類である。

- ①RCD用コンクリート
- ②ELCM用コンクリート
- ③外部用コンクリート
- ④高流動コンクリート

コンクリートに用いられる粒子材料には, 通常セメント, 粗骨材, 細骨材, 混和材がある。これに本報告で対象としているスラッジが加わることになる。

コンクリートの粗骨材最大寸法 150mm フルミックス配合に対して, 40mm 以上の粗骨材を取り除いたときの基本配合を決定した。コンクリートの基本配合を表-2に示す。

モルタル試験は, コンクリートの基本配合から粗骨材を取り除いたものとする。スラッジは, ①スラッジ a, ②スラッジ b それぞれ単独の場合と, ③スラッジ a とスラッジ b を 1:1 混合したもの(「Sc」), の3種類を用い, スラッジ混入率を変化させ細骨材に置換して用いてコンシステンシー試験を実施した。

コンクリート試験は, スラッジ a のみを対象とし, スラッジ混入率を3水準変化させコンシステンシー試験を実施した。

材料に用いる細骨材には, もともと 0.15mm 以下の微粒分がおおよそ 9% 含まれているため, ここではこの粉体を考慮して, スラッジ混入率について次のように定める。

「0.0%」…細骨材中の微粒分を取り除いたもの(スラッジなし)。

「9.0%」…細骨材をそのまま配合したもの(スラッジなし)。

「9.0%以上」…スラッジを配合に加えたもの。数値から 9.0% 差し引いた値が, 細骨材に対するスラッジ混入率となる。

3. 粉体試験

粉体試験結果を表-1に示す。

表-1 粉体試験結果一覧

種別	組成分析 (wt%)													
	湿分 (%)	ig.loss (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	Na ₂ Oeq (%) ^{*1}
Sa	(0.75)	8.34	51.5	18.9	6.93	2.52	2.39	1.48	1.56	5.04	0.96	0.22	0.14	4.88
Sb	(1.47)	15.1	40.8	15.5	5.20	15.9	2.03	0.60	0.98	2.34	0.65	0.21	0.17	2.52

※1:アルカリ評価指数 $Na_2Oeq = Na_2O + 0.658 * K_2O$

種別	粒度分布	嵩(かさ)密度			比表面積		密度 (g/cm ³)	メチレンブルー吸着量 (mg/g)	ゼータ電位 (mV)	砂当量
	メッシュ径 (μm)	緩め嵩密度 (g/cc)	固め嵩密度 (g/cc)	圧縮度 (%) ^{*2}	空気透過法 (cm ² /g)	BET法 (m ² /g)				
Sa	9.12	0.714	1.275	44	9,050	7.36	2.70	9.68	11	測定不可
Sb	5.88	0.538	0.912	41	13,750	29.01	2.53	8.94	3	
C	10.71	0.963	1.757	45	3,210	0.85	3.21	—	14	
F	12.46	0.970	1.383	30	2,950	0.55	2.10	0.07	9	

※2:圧縮度 = ((固め) - (緩み)) / (固め) * 100(%)

(1) 組成分析

組成分析はスラッジ a, b を対象とし, JIS M8853 セラミックス用アルミノけい酸塩質原料の化学分析方法に準拠した。

スラッジ a は, 二酸化けい素 (SiO_2) と酸化アルミニウム (Al_2O_3) が大部分を占める (約 70%)。一方スラッジ b は, これら 2 つの成分と酸化カルシウム (CaO) の割合が大きい (約 72%)。堤体のグリーンカットによるセメント成分が混入しているものと思われる。

(2) 粒度分布

粒度分析はレーザー回折によって測定した。

粒度分布測定結果を図-1に示す。

粉体の粒径は $1\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の間にある。50%平均粒度は, スラッジ a はセメント, フライアッシュとほぼ同じで約 $10\mu\text{m}$ であるが, スラッジ b は $5.9\mu\text{m}$ とやや小さい。

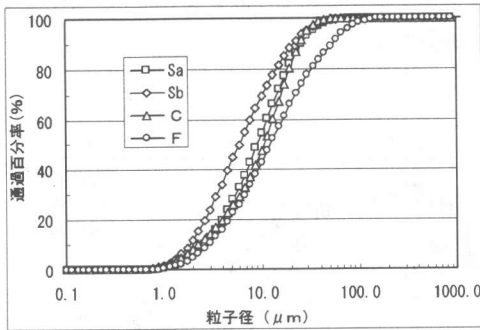


図-1 粉体の粒度分布

(3) 比表面積

空気透過法は JIS R 5201 セメントの物理試験方法に準拠した。

空気透過法によるスラッジの比表面積は, スラッジ a $=9,050\text{cm}^2/\text{g}$, スラッジ b $=13,750\text{cm}^2/\text{g}$ であり, セメントやフライアッシュのそれと比べてかなり大きい。

(4) メチレンブルー吸着量

フライアッシュに比べ 2 桁大きい値を示すことから, 混和剤の効果が低下することが懸念される。

(5) ゼータ電位

スラッジ b の値が小さく, コンクリートに混入させたときの流動性能に大きく影響する恐れがある。

4. モルタル試験

4.1 試験方法

モルタルのフロー値は JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に準拠して測定した。

また, 練混ぜ直後 (0 時間) と 1 時間ごとに 5 時間までフロー値の経時変化を測定した。さらに, 打撃回数 0 回 (0 打) と 5 回ごとにフロー値を測定した。

4.2 モルタルの試験結果

フロー試験結果のうち微粒分率と練混ぜ直後のフロー値の測定結果を図-2に示す。

表-2 コンクリートの基本配合

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	コンクリートの目標	空気量の目標 (%)	水結合材比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ比 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
							水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材		混和剤 AD1	AE剤 AD2
											40mm > 20mm	20mm > 5mm		
RCD	40	20 ^{*1}	—	94.0	30.0	47.4	133.0	99.0	42.4	1005.4	564.9	564.9	0.35 ^{*4}	
ELCM	40	5 ^{*2}	4.5	73.6	30.0	40.0	154.0	146.5	62.8	769.0	584.2	584.2	0.52 ^{*4}	0.031 ^{*6}
外部	40	5 ^{*2}	4.5	50.0	30.0	37.4	146.0	204.4	87.6	698.5	590.9	590.9	0.73 ^{*4}	0.029 ^{*6}
高流動	20	62.5 ^{*3}	4.5	33.1	60.0	49.1	155.0	187.2	280.8	834.0	0.0	875.0	8.66 ^{*5}	

*1:VC値(秒), *2:スランブ(cm), *3:スランブフロー(cm)

*4:AE減水剤・遅延形(I種), *5:高性能AE減水剤・標準形(I種), *6:AE剤

4つの配合とも、微粒分率が増加するにともないフロー値が低減している。

スラッジの種類による区分では、スラッジa混入によるフロー値の低減割合よりも、スラッジb混入による低減割合が大きい。また、スラッジaとスラッジbを1:1混合した場合 (Sc) のフロー値は、スラッジ混入率が高くなるに従い、Sbの値に近づく傾向がみられる。スラッジa, bを同一割合で混入しても、比表面積の大きいスラッジbの方が表面に水を拘束しやすく、ゼータ電位も小さいので分散しにくく、フロー値への影響が大きいものと考えられる。

つぎに配合別フロー値の変化では、RCD配合では、スラッジを加えていない微粒分9.0%において、すでにフロー値の広がり小さかった。また、スラッジを混入した場合の経時変化のフロー値測定では、モルタルはペースト状態よりも砂状のバサバサ状態であり、打撃によりモルタルが崩れたりしたケースもある。そのためフロー値での評価が難しい。

ELCM配合と外部配合では、微粒分率増加によるフロー値低下の傾向がよく似ている。スラッジを混入した場合の影響を比較してみると、外部配合の方がわずかではあるがフロー値低下の割合が小さい。これは細骨材率が小さい分、同一微粒分率でも細骨材に置換されるスラッジ量が少ないことから、その比表面積増大量も少ないことが要因と考えられる。

高流動配合は細骨材率が49.1%と最も大きいだけに、スラッジ混入率の増大に対してフロー値の低減割合が大きくなっている。

これら、微粒分率とスラッジの種類を変動因子とした4配合のモルタルフロー試験より、微粒分率が増加することによって、モルタルフロー値が低下すること。低下の割合は細骨材率が小さい方が少ないこと。さらに平均粒径が大きく、かつ比表面積の小さなスラッジaを置換した方がフロー値低下の影響度合いが小さいことを確認した。

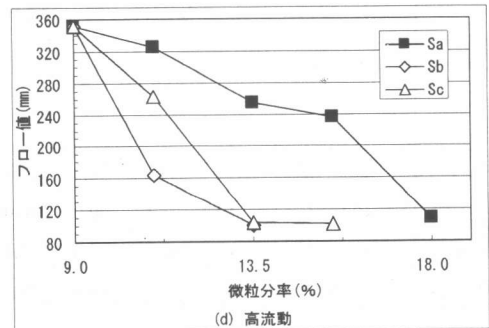
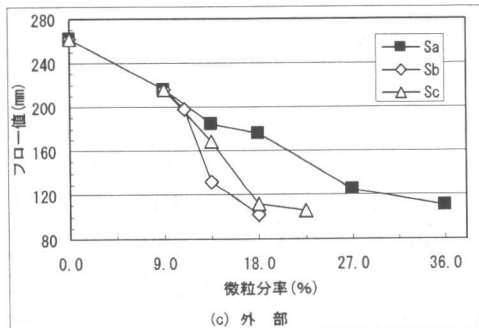
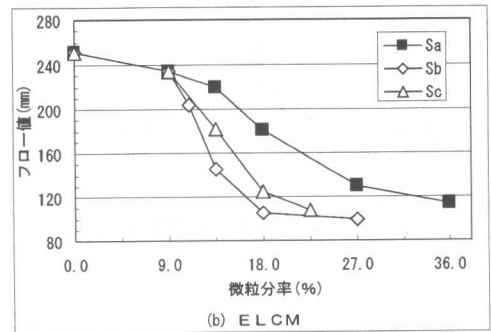
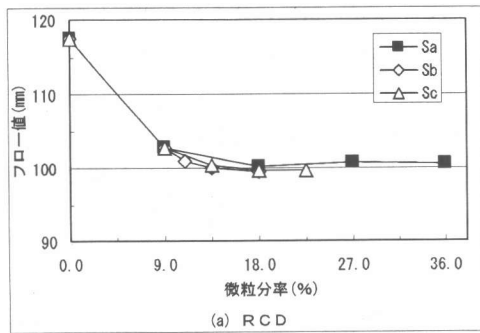


図-2 微粒分率とモルタルフローの関係

5. コンクリート試験

(1) 練混ぜ方法

100%の2軸強制練りミキサーを用い、細骨材、結合材、スラッジを投入して60秒練混ぜた後、水と混和剤を投入し120秒（高流動の場合のみ180秒）練混ぜた。細骨材と置換するスラッジはスラッジaのみを対象とした。

(2) コンシステンシー試験

コンクリートのスランプ試験はJIS A 1101、RCD用コンクリートのコンシステンシー試験（VC値測定）はJSCE-F507、スランプフロー試験はJSCE-F503に準拠してそれぞれ測定した。

5.2 コンクリートの試験結果

今回用いたスラッジと前報²⁾の石粉との粒度比較を図-3、コンクリートのコンシステンシー測定結果、および石粉での結果を併せて図-4に示す。

(1) RCD用コンクリート

微粒分率は9.0、18.0、27.0%とした。微粒分が増加すると、右上がりに単調にVC値

が高くなる結果となった。

石粉を用いた場合には、VC値が最小となる微粒分率が存在した。しかし石粉に比べて比表面積の大きいスラッジ用いた今回の実験では、VC値が最小となる微粒分率がやや左にシフトしているようである。

(2) ELCM用コンクリート

微粒分割合は9.0、13.5、18.0%とした。

微粒分を増加させると直線的にスランプが低

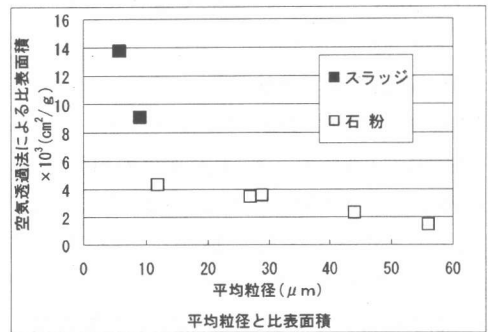


図-3 スラッジと石粉の平均粒径と比表面積の比較

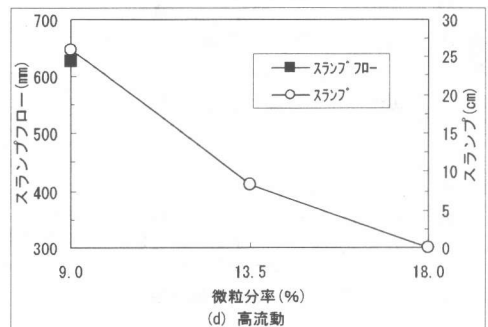
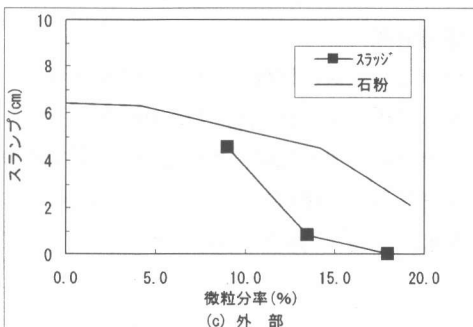
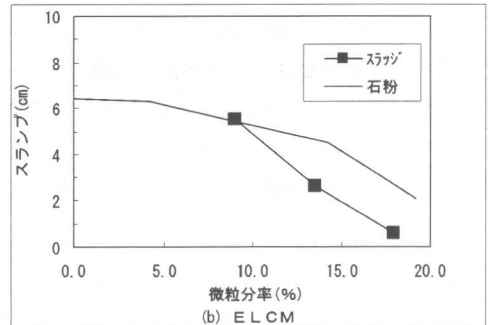
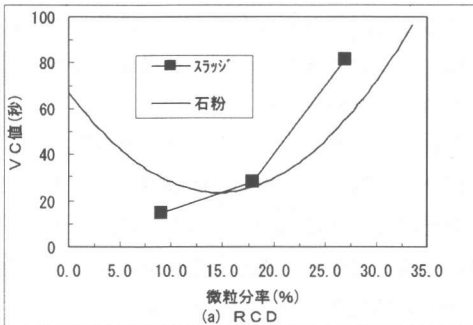


図-4 微粒分率とコンシステンシーの関係

下している。この要因は、スラッジが混入することで比表面積が増加し、拘束される水量が多くなったためであり、有スランプコンクリートの一般的な傾向である。ただし、微粒分率が大きくなると石粉の場合との差が大きくなっている。

(3) 外部用コンクリート

微粒分率は9.0, 13.5, 18.0%とした。

ELCMコンクリートと同様、微粒分増加にともないスランプが低下している。なお微粒分率18%にいたっては、練混ぜ直後においてもスランプ0cmである。

(4) 高流動コンクリート

微粒分率は9.0, 13.5, 18.0%とした。

微粒分率9.0%のとき、経時変化の測定では、3時間後まで直線的に低下(約1/2)していた。

なお、微粒分13.5%と18%については、スランプフロー状態とならなかったためにスランプの測定を併せて実施した。細骨材に置き換えたスラッジは、平均径が小さく比表面積が大きいことから増粘効果が大きいこと、さらにメチレンブルー吸着量が大きいことから混和剤が吸収されその効果が低減されたと考えられる。

5.3 モルタルとコンクリートの関係

4種類のコンクリートのうち、有スランプコンクリートのELCM, 外部コンクリートのスランプとモルタル試験のフロー値の関係を示し

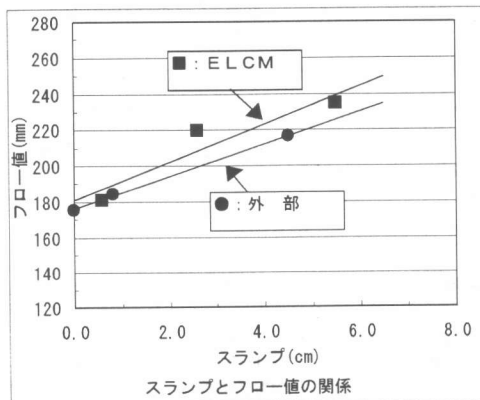


図-5 スランプとフロー値の関係

たのが図-5である。

図より、スラッジを練混ぜた配合においてもスランプとフロー値の間には、よい相関関係があることから、コンクリートのワーカビリティをモルタル試験により代替できる可能性がある。

6. まとめ

砕石スラッジの資源としての再利用の可能性を検討する上で、性質の異なるRCD, ELCM, 外部, 高流動コンクリートを対象としてコンシステンシーへの影響を調査した。

モルタル試験では砕石スラッジとコンクリートスラッジを配合に加えたが、スラッジ混入率だけではなく、スラッジの種類(粒度, 比表面積などの違い)によっても、コンシステンシーへの影響度に差があることがわかった。

さらにモルタル試験でコンシステンシーへの影響度が小さく、かつ発生量の多い砕石スラッジを対象としてコンクリートのコンシステンシーを測定した結果、単位水量一定の条件ではスラッジ混入率増加によるコンシステンシーが低下すること、またモルタルとコンクリートの間には、スランプとフロー値の結果から相関関係があることがわかった。

なおモルタル, コンクリートの強度試験ほかを併せて実施しているが、圧縮強度の増大が見られた配合もあるので、それらの結果と配合条件の見直しを併せてさらなる砕石スラッジの有効利用の可能性の検討を進めたい。

参考文献

- 1) 藤澤侃彦：ダム材料の合理化の現状と今後、ダム技術, No.126, pp.3-18, 1997.3
- 2) 森濱和正・河野広隆：微粒分の品質評価試験方法に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.2, pp.205-210, 2000.7