論文　砕石スラッジのダム外部コンクリートへの適用

松浦　誠司[*1]・河野　広隆[*2]・森濱　和正[*3]

要旨：コンクリートダム建設工事の骨材製造にともない大量に発生し，産業廃棄物として処理されている砕石スラッジをダムの外部コンクリートに適用することを目的とし，乾燥・解砕した砕石スラッジを細骨材に置換したコンクリートについて，施工性や強度特性等諸性状の改善を試みた。その結果，スラッジを添加したコンクリートは適切な混和剤を組み合わせることで所要のフレッシュ性状を確保でき，圧縮強度も大きくなることが確認できた。

キーワード：砕石スラッジ，リサイクル，コンシステンシー，圧縮強度

1.　はじめに

コンクリートダムの建設工事において，原石山から骨材を製造する場合，岩石を運搬，破砕する際に微粒分が発生する。一般に微粒分は，骨材製造プラントの濁水処理設備に集められ凝集沈降させて脱水ケーキとして排出され，産業廃棄物として処理されている。

砕石スラッジの発生量は，近年の原石山の岩質の低下にともない増加する傾向にあり，骨材製造量の 2 割にも及ぶことも少なくない。このため，スラッジを使用したコンクリートをダムコンクリート全般に適用することでスラッジの使用量を十分に確保することが重要である。

筆者らは建設コストの縮減および資源の有効利用の観点からこれら砕石スラッジ（以下スラッジ）の有効利用法としてダム用コンクリートの細骨材の一部として使用することの適用性の検討を行ってきた[1),2),3)]。それによると，ダムコンクリートにスラッジを使用すると圧縮強度や中性化，乾燥収縮については改善がみられるものの，スランプや空気量が低下し施工性および凍結融解抵抗性が低下するため，ダムの外部コンクリートに使用するには課題が残った。

このような状況をふまえスラッジをダムの外部コンクリートに適用することを目的とし，混和剤の種類および添加量を調整することによりスラッジを添加したコンクリートの施工性および耐凍害性の改善を試みるとともに，強度への影響を検討した。本報では配合試験，強度試験について報告する。

2.　試験方法

2.1　使用材料

骨材およびスラッジはダム原石山骨材製造プラントから採取したものを用いた。また，セメントおよびフライアッシュについても，同じダム建設現場で使用しているものをメーカーから取り寄せて使用した。

(1)　砕石スラッジ

スラッジは，骨材プラントで発生した濁水を PAC（ポリ塩化アルミニウム）および高分子凝集剤を添加し，シックナで凝集沈降させ，濃縮した後フィルタープレスにて圧入脱水したケーキ状のものを現場濁水設備より回収したものである。試験には，濁水処理施設から排出されたままのケーキ状のもの（以下含水スラッジ，含水率 28.0%）と，含水量のバラつきによるコンクリートの品質の変動を少なくし，コンクリート中への分散性を高める目的で，含水スラッジを乾燥炉において 105℃で乾燥させた後，ロサンゼルス試験機にて 30 分間解砕を行い粉末状にしたもの（以下乾燥スラッジ）の 2 種類を使

*1(独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム交流研究員　工修　(正会員)
*2(独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主席研究員　工修　(正会員)
*3(独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主任研究員　(正会員)

用した。

(2)　結合材

結合材は中庸熱ポルトランドセメントおよび，Ⅱ種のフライアッシュを使用した。フライアッシュの置換率は結合材量の 40%である。

(3)　骨材

細骨材，粗骨材ともにダム骨材原石山で採取され，骨材プラントで破砕，ふるい分けされたもので，主な岩質は砂岩および粘板岩である。対象としたダムのコンクリートの粗骨材は，G1(150～80mm), G2(80～40mm), G3(40～20mm), G4(20～5mm)の 4 分級で使用されているが，本研究では 40mm 以下の骨材（G3，G4）を使用した。

(4)　混和剤

使用した混和剤は, AE 減水剤および AE 剤それぞれ 2 種類と，遅延剤である。混和剤の一覧を**表－１**に示す。

2.2　基本配合

重力式ダムの外部コンクリートの配合（粗骨材最大寸法 150mm，単位結合材量 210kg/m^3）から G1，G2 を除いた配合を基本配合とした。スランプは 5cm を目標としたが，スラッジの置換によるスランプの減少が大きく，混和剤の種類によっては所要のスランプが確保できない場合も想定されたため，スラッジを置換しない基本配合のスランプが 8cm となるように単位水量を 155kg/m^3 に定めた。基本配合を**表－２**に示す。

2.3　粉体試験

乾燥スラッジ，セメント，フライアッシュの密度，粒度分布，比表面積（空気透過法，BET 法），メチレンブルー吸着量の測定を行うとともに，電子顕微鏡写真により粒子形状を観察した。

2.4　配合・強度試験

スラッジは AE 剤や減水剤を吸着するため，スラッジの置換率の増加にともない，コンクリートのコンシステンシーは低下する[1),2)]。そこで，スラッジを置換した配合について試験練りを行い, AE 減水剤および AE 剤の種類と添加量がスランプおよび空気量へ与える影響を検討した。

所要のコンシステンシーおよび空気量が得られた配合については圧縮強度試験を行い，スラッジの種類や添加率，材齢の強度への影響について検討した。

(1)　配合条件

配合条件を**表－３**に示す。

スラッジは細骨材に対して体積換算で置換し，他の材料の単位量は原則として一定とした。スラッジの置換率は 0，5，10，15，20%の 5 水準である。

空気量は 4.5%を基準とし，スラッジ置換率 10%については凍結融解抵抗性の向上を目的として，空気量の水準を 6，7.5，10%とした配合についても検討した。これら空気量を増やした配合における各材料は，空気量増加分だけ各単位量を同じ割合で減じて算出した。

乾燥スラッジについては表乾状態とみなし，含水スラッジについては，含まれる水分は表面水として配合を計算した。

AE 減水剤 A を添加した配合については，含水スラッジと乾燥スラッジをそれぞれ使用し，AE 減水剤 B を添加した配合は乾燥スラッジのみについて試験を行った。また，遅延剤は AE

表－1　使用した混和剤

	種別	成分	標準使用量
AE減水剤A	AE減水剤遅延型Ⅰ種 (A社製)	リグニンスルホン酸と オキシカルボン酸塩	C×0.8～2.0%
AE減水剤B	AE減水剤遅延型Ⅰ種 (B社製)	リグニンスルホン酸化合物	C×0.2～0.5%
AE剤a	AE剤Ⅰ種 (A社製)	ロジン系界面活性剤	－
AE剤b	AE剤Ⅰ種 (B社製)	変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤	－
遅延剤	減水剤遅延型Ⅰ種 (A社製)	オキシカルボン酸塩	－

表－2　基本配合

空気量	W/C	s/a	単位量(kg/m^3)					
			水	ｾﾒﾝﾄ	ﾌﾗｲｱｯｼｭ	ｽﾗｯｼﾞ	細骨材	粗骨材
(%)	(%)	(%)	W	C	F	Sld	S	G
4.5	50.5	46.4	155	215	92	0	830	969

減水剤Aを添加した配合で使用したが，凝結・硬化が極端に遅延したため，AE減水剤Bを添加した場合には使用しなかった。

(2)　練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには容量 100 ﾘｯﾄﾙの 2 軸式強制練りミキサを使用した。練混ぜ時間は乾燥スラッジを使用する場合，骨材および結合材投入後空練り 30 秒，水を投入して本練り 90 秒としたが，含水スラッジを添加した配合は，コンクリート中にスラッジの粒子を十分に分散させるために練混ぜ時間を長くし，空練り 60 秒，本練り 120 秒とした。

(3)　試験方法

コンクリートのフレッシュ性状は，スランプおよび空気量試験により評価した。

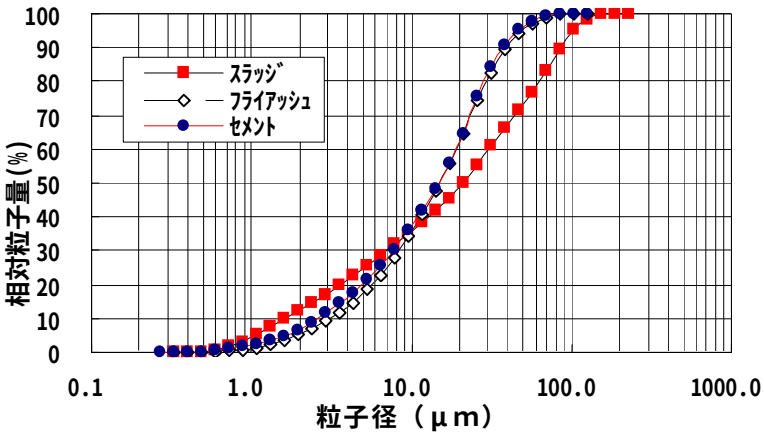
圧縮強度は，**表－3** に示す配合について材齢 3，7，28，91 日に圧縮強度試験を行った。なお，AE減水剤Aおよび遅延剤を使用した配合は初期の強度発現が十分ではなかったため，材齢 3 日に代わり材齢 14 日に試験を行った。

表－3　配合条件

No.	AE減水剤種類	AE剤種類	遅延剤添加量((C+F)×%)	ｽﾗｯｼﾞ含水状態	ｽﾗｯｼﾞ置換率(%)	目標ｽﾗﾝﾌﾟ(cm)	空気量(%)
1	AE減水剤A	AE剤a	0.3	－	0	5	4.5±1
2				乾燥	5		4.5±1
3					10		4.5±1
4							6±1
5							7.5±1
6							10±1
7				含水	5		4.5±1
8					10		4.5±1
9							6±1
10							7.5±1
11							10±1
12	AE減水剤B	AE剤a または AE剤b	－	－	0		4.5±1
13				乾燥	5		4.5±1
14					10		4.5±1
15							6±1
16							7.5±1
17					15		4.5±1
18					20		4.5±1

表－4　粉体試験結果

種別	粒度分布(μm)		比表面積(×10^3cm^2/g)		メチレンブルー吸着量(mg/g)
	平均径	メディアン径	空気透過法	BET法	
乾燥スラッジ	15.47	21.04	4.84	84.7	2.00
セメント	12.40	15.18	3.76	10.7	－
フライアッシュ	12.68	14.95	4.14	19.1	0.39



図－1　粉体の粒度分布

3　試験結果

3.1　粉体試験

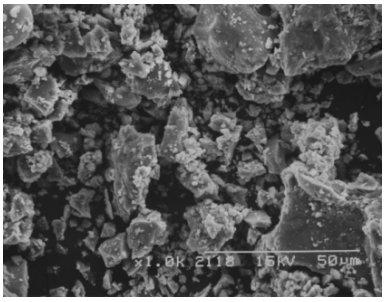
粉体試験結果を**表－4**，粒度分布を**図－5** に示す。

スラッジはセメントおよびフライアッシュに比べて空気透過法による比表面積は大きく，粒度分析における平均径，メディアン径ともに大きい。また，スラッジは粒度分布曲線の勾配が緩く，粒度が分散している傾向にあった。

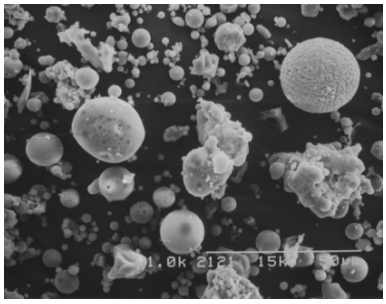
一方，BET 法による比表面積について，スラッジはセメントの約 8 倍，フライアッシュの約 4.5 倍であった。

スラッジ，セメント，フライアッシュの電子顕微鏡写真を**写真－1～3** に示す。スラッジおよびセメントの粒子は角の多い形状をしているが，比較的大きな粒子表面に付着する微粒分の粒径はセメントよりもスラッジの方が細かい。このことが，セメントよりもスラッジの方が BET 法による比表面積が大きい理由であると考えられる。フライアッシュは球形の粒子が多

写真－1　スラッジ



写真－2　セメント



写真－3　フライアッシュ

いものの，複雑な形状の粒子も目立つ。

3.2　配合・強度試験

圧縮強度試験を行った配合の混和剤添加量，フレッシュ性状，圧縮強度の結果を**表－5**に示す。

(1)　配合試験

AE 減水剤 A を使用したケースのスラッジを 5%置換した配合は，AE 減水剤の添加量をスラッジ無置換の配合よりも 1%増やして 2%にしたところ，スランプが 5.4cm となり，所要のワーカビリティーを得ることができた。

スラッジ置換率 10%における AE 減水剤添加率とスランプおよび空気量の関係を**図－2**に示す。乾燥スラッジと含水スラッジの比較では，乾燥スラッジを置換した配合の方が，含水スラッジを置換した配合よりもスランプおよび空気量がやや大きくなった。空気量は AE 減水剤 A 添加率 1.0%の増加に対して 1%程度大きくなったものの，スランプは AE 減水剤 A の標準使用量の上限量である 2%より添加率を増やしてもほとんど変化しなかった。

以上の結果から AE 減水剤 A を使用した場合，スラッジ置換率が 10%以上の場合には AE 減水剤添加率を大きくしても所要のスランプを得ることはできず，AE 減水剤 A はワーカビリティーの改善効果が少ないことがわかった。この結果をふまえ，スラッジ置換率 15 および 20%以上の配合については AE 減水剤 A を使用した試験を行わないこととした。

AE 減水剤 B を使用したケースのスラッジ置換率 10%の配合における AE 減水剤添加率とフレッシュ性状の関係を**図－3**に示す。

表－5　各配合の混和剤添加量，フレッシュ性状，圧縮強度

スラッジ含水状態	スラッジ置換率 (%)	目標空気量 (%)	混和剤添加量((C+F)×%) AE減水剤A	AE減水剤B	遅延剤	AE剤a	フレッシュ性状 スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm^2) 材齢 3日	7日	14日	28日	91日
－	0	4.5	1.0	－	0.30	0.030	7.9	5.0	5.1	6.8	9.1	16.9	35.5
乾燥	5	4.5	2.0	－	0.30	0.036	5.4	4.7	－	7.5	12.2	20.0	37.2
	10	4.5	3.0	－	0.30	0.051	2.6	5.3	－	4.7	10.7	20.6	42.0
		6.0	3.0	－	0.30	0.075	2.7	6.6	－	4.1	10.4	20.1	40.6
		7.5	3.0	－	0.30	0.096	3.1	7.9	－	6.8	11.9	19.9	33.8
		10.0	3.0	－	0.30	0.138	3.7	9.8	－	6.3	10.0	17.5	31.2
含水	5	4.5	2.0	－	0.30	0.036	3.5	5.1	－	7.0	12.5	22.5	40.9
	10	4.5	3.0	－	0.30	0.054	1.3	5.3	－	5.9	13.1	22.6	42.0
		6.0	3.0	－	0.30	0.078	1.5	6.5	－	5.4	11.8	22.1	38.0
		7.5	3.0	－	0.30	0.099	2.0	8.0	－	5.1	11.3	19.1	37.1
		10.0	3.0	－	0.30	0.138	1.5	9.5	－	4.4	10.7	18.6	32.1
－	0	4.5	－	0.25	－	0.018	7.1	5.3	5.1	6.9	－	17.8	34.9
乾燥	5	4.5	－	0.25	－	0.021	4.0	4.0	5.6	8.6	－	21.9	39.1
	10	4.5	－	0.50	－	0.024	4.2	4.6	5.9	9.7	－	24.5	37.2
		6.0	－	0.50	－	0.036	4.3	5.9	5.7	9.0	－	22.7	36.4
		7.5	－	0.50	－	0.051	4.4	7.0	5.2	8.3	－	21.9	34.3
	15	4.5	－	0.75	－	0.033	3.3	4.7	6.2	10.9	－	26.4	42.3
	20	4.5	－	1.00	－	0.042	1.6	5.0	6.0	11.0	－	26.6	39.9

AE 減水剤 A を使用した場合と異なり，AE 減水剤添加率の増加に対してスランプが大きくなる傾向を示した。スランプの増加率は AE 減水剤添加率 0.25%の増加に対して 3cm 程度であった。一方，空気量は AE 減水剤添加率が変化しても変動せず，ほぼ一定となった。

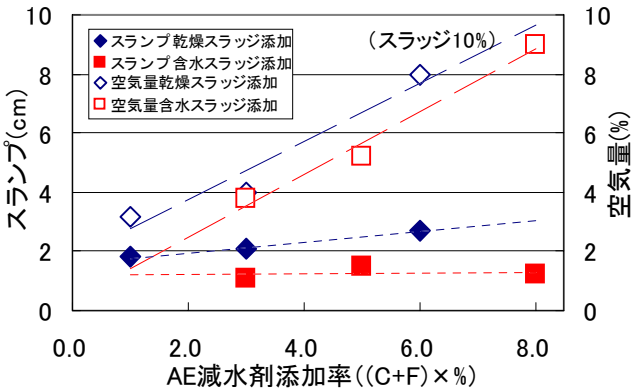
このように， AE 減水剤 B は，AE 減水剤 A を用いた場合とは異なり，添加率を変化させることでスランプの調整が可能であった。このため，スラッジの置換率 15%および 20%についても AE 減水剤 B の添加率をそれぞれ 0.75%および 1.0%とすることで所要のワーカビリティーを得ることができた。

図－4 に AE 剤 a および b の添加率と空気量の関係を示す。AE 剤 b は添加率 0.001%当たりの連行空気量の増加が 0.016%程度であり，空気量 4.5%にするためには通常の使用量と比較して大量の AE 剤を必要とした。一方，AE 剤 a は添加率 0.001%当たりの連行空気量が 0.11%であり，AE 剤 b に対して約 7 倍の連行空気量を示した。AE 剤 b と AE 減水剤 B は，同じメーカーの製品であるが，本研究の範囲ではこれらの組合せで十分な空気連行性を得ることができなかった。

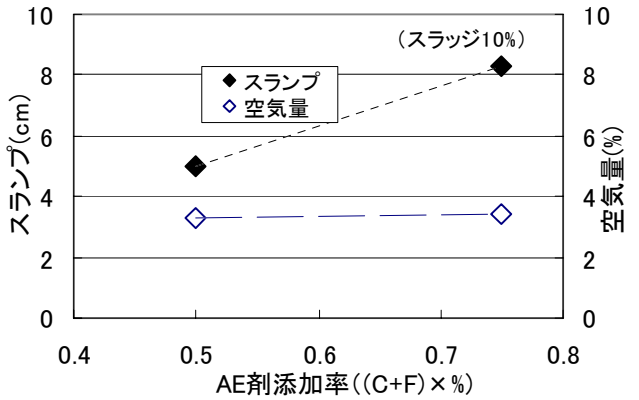
以上の結果より，スラッジを置換したコンクリートについて所要のフレッシュ性状を確保するためには，混和剤の組み合わせを適切に行う必要があると言える。

(2) 強度試験

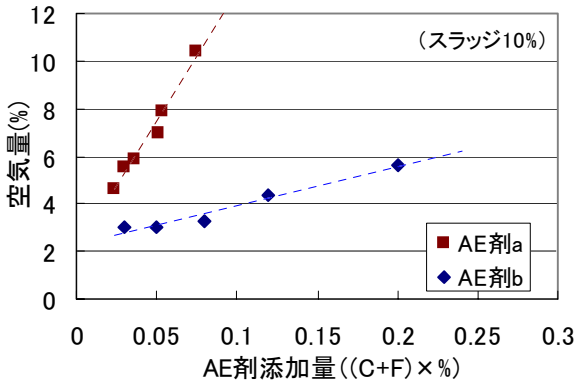
AE 減水剤 A を使用したケースの空気量 4.5%の配合におけるスラッジ無置換の配合の強度に対するスラッジを置換した配合の強度の割合（以下強度比と呼ぶ）について，材齢との関係を**図－5** に示す。スラッジの置換率が大きくなると強度比が大きくなる傾向がみられる。ただし，スラッジ置換率 10%の配合は材齢初期において無置換より圧縮強度が小さい。これは遅延型の AE 減水剤添加量が他の配合よりも多いため，材齢初期の硬化の遅延が顕著であったことが影響していると考えられる。このように硬化



図－2 AE減水剤Aの添加率とフレッシュ性状



図－3 AE減水剤Bの添加率とフレッシュ性状



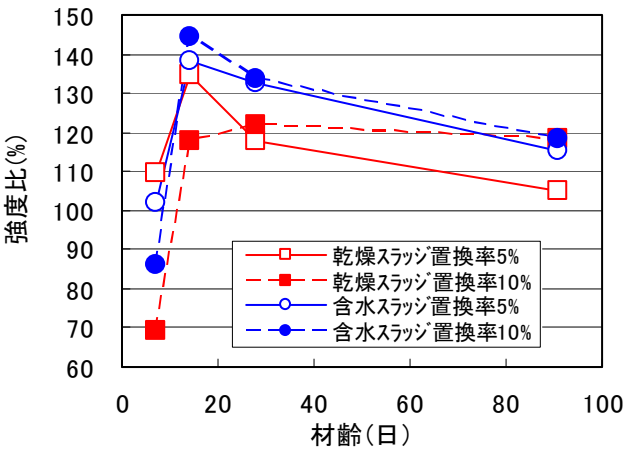
図－4 AE剤の種類，添加率と空気量の関係

遅延の影響が見られるものの，強度比は材齢 28 日までの比較的早い材齢において急激に増加した後，ゆるやかに減少する傾向にあり，材齢 91 日には 105～120%程度となった。既往の研究[2)]での材齢 1 年までの長期強度測定結果では，材齢 91 日以降の強度比はほとんど一定であったことから，本研究においても最終的な強度比は 105～120%となることが予想される。

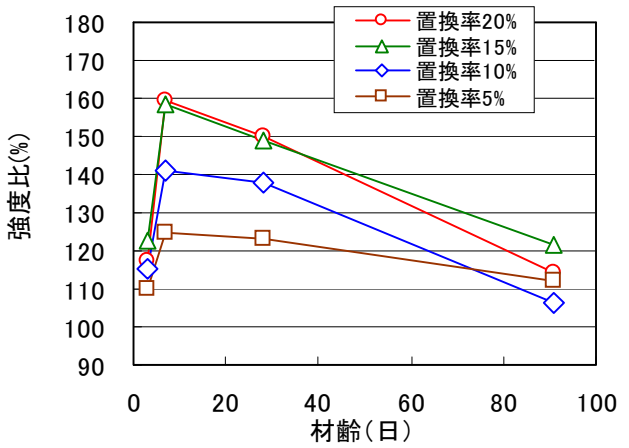
乾燥スラッジと含水スラッジの比較では，遅

延剤の影響が少ない長期材齢において含水スラッジの方が圧縮強度が大きい傾向にある。また，フレッシュ性状においては，含水スラッジに対して乾燥スラッジの方がスランプが大きい傾向にあった（**図－２**）。これらのことから，スラッジの含水率のばらつきにより配合計算で設定した含水率と実際に使用した材料含水率に差が生じたため，含水スラッジを使用したコンクリートは，乾燥スラッジを使用したコンクリートよりも単位水量が小さくなっていたことが考えられる。

AE 減水剤 B を使用したケースの空気量4.5%の配合についての材齢と強度比の関係を**図－６**に示す。強度比はいずれも 100%以上であり，スラッジ置換率が大きいほど強度比が大きくなる傾向がみられるが，置換率20% と15% の差は小さく，15%以上置換しても強度増加は少なかった。また，AE 減水剤 A を使用した場合と同様に，強度比は比較的早い材齢において急激に増加した後，ゆるやかに減少する傾向にあり，材齢 91 日には 105～125%程度となった。AE 減水剤 B を使用した場合にも最終的な強度比は 105～120%となることが予想される。



図－５　材齢と強度比の関係
（AE減水剤A使用配合）



図－６　材齢と強度比の関係
（AE減水剤B使用配合）

4.　まとめ

細骨材の一部に砕石スラッジを用いたダムの外部コンクリートについて，AE 減水剤および AE 剤の適切な組み合わせと添加量を選定することにより，所要のワーカビリティーおよび空気量を確保でき，強度もスラッジ置換率の増加にしたがい大きくなることがわかった。

以上のようにワーカビリティーおよび強度については，十分な品質を確保できることが確認できた。今後は耐凍害性や，砕石スラッジの品質のばらつき，使用する凝集剤の影響の確認を行い，実用化に向けて検討する予定である。

参考文献

1)　土田克美，河野広隆，森濱和正：モルタル・コンクリートのワーカビリティーに及ぼす砕石スラッジの影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.193-198，2001

2)　土田克美，河野広隆，森濱和正：砕石スラッジを用いたダムコンクリートのワーカビリティー，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.1329-1334，2002

3)　河野広隆，森濱和正，松浦誠司：ダム建設工事で発生するスラッジのコンクリートへの有効利用に関する調査報告書(3)外部コンクリートのワーカビリティー・耐久性の改善，土木研究所資料，2003.3