

IV-4 ダムコンクリートにおけるスラッジの有効利用に関する調査

研究予算：運営費交付金(治水勘定)

研究期間：平 12～平 14

担当チーム：技術推進本部(構造物マネジメント技術チーム)

研究担当者：河野 広隆、森濱 和正、片平 博

【要旨】

ダム現場では、骨材製造時やダム堤体のグリーンカット時に大量のスラッジが発生する。スラッジは、産業廃棄物として多額の費用をかけて処分されているのが現状である。このため、環境保全およびコスト縮減の観点から、スラッジの有効利用が求められている。本研究は、スラッジをコンクリートに混入して有効利用を図るために、①スラッジの品質評価方法、②スラッジを混入したコンクリートの配合設計方法の確立、を目標に実施した。

キーワード：砕石スラッジ、品質評価、配合設計、環境保全

1. はじめに

12年度は、スラッジの各種品質を把握した。また、ダムの内部用コンクリートである RCD 用コンクリート、ELCM 用コンクリート、外部用従来コンクリート、高流動コンクリートの4種類の、粗骨材を取り除いた配合のモルタルを用いてスラッジの置換率を変化させたときのワーカビリティに及ぼす影響を確認した。

13年度は、前年度の4種類のコンクリートを用いて、単位水量、混和剤量一定のもとでスラッジの置換率を変化させたときのワーカビリティ、強度、体積変化について検討した。その結果、スラッジ置換率が増加するとワーカビリティは低下し、連行空気量も減少するが、硬化コンクリートは緻密になるため、強度は増加し、体積変化(乾燥収縮)と中性化深さは小さくなる傾向があることがわかった。

最終年度である14年度は、RCD用コンクリートと外部用従来コンクリートについて、硬化コンクリートの品質を低下させることなく所要のワーカビリティを確保するため、混和剤の種類と添加率を変化させた実験を行なった。また、圧縮強度試験も行

い、混和剤の多量添加が強度に及ぼす影響について検討した。さらに、外部用従来コンクリートについては、所要の空気量も確保するため、AE剤の種類、添加率の検討も行い、耐凍害性が確保されるか否かを確認するため凍結融解試験を行なった。

また、スラッジを混入した場合の配合設計方法を検討するため、骨材の空隙とペースト量の関係についても検討した。

2. 研究概要

2.1 使用材料の品質

使用した骨材とスラッジは、ダム建設現場から採取した。スラッジは骨材製造プラント用濁水処理設備から採取した脱水ケーキである。RCD用コンクリートにはKダム、外部用従来コンクリートにはTダムの現場から採取した脱水ケーキを用いた。

スラッジの組成分析と、粒度分布、かさ密度、比表面積、密度など物理的試験、メチレンブルー吸着量、ゼータ電位の化学的試験の結果は、表-1のとおりである。表-1には、比較のため、中庸熟ポルトランドセメントとフライアッシュの結果も示した。

スラッジは、平均粒径が小さく比表面積が大きいこと、メチレンブルー吸着量が大きいことがわかる。

2.2 基本配合

スラッジを混入していないときのコンクリートを基本配合として設定した(表-2)。基本配合は、ダム現場の粗骨材最大寸法 150mm のフルミッ

表-1 粉体の試験結果

コンクリートの種類	材料の種類	密度 g/cm ³	かさ密度 g/cm ³	実積率 %	平均粒径 μm	比表面積 cm ² /g	メチレンブルー吸着量 mg/g	ゼータ電位 mV
RCD用	スラッジ	2.70	1.275	47.2	9.1	9050	9.68	11
	セメント	3.21	1.757	54.7	10.7	3210	—	14
	フライアッシュ	2.10	1.838	65.9	12.5	2950	0.07	9
外部用	スラッジ	2.63	1.30	49.4	15.5	4840	2.00	12
	セメント	3.20	1.45	45.3	12.4	3760	—	11
	フライアッシュ	2.26	1.13	50.0	12.7	4140	0.39	15

表-2 基本配合

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	コンシステンシー		空気量 目標値 (%)	水結合 材比 (%)	FA 置換率 (%)	細骨材 率 (%)	単位量(kg/m ³)							
		試験方法	目標値					水 W	セメント C	フライッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (C+F) × %		
													AE減水	AE剤	遅延剤
RCD用	40	VC	20秒	—	94.0	30	47.4	133	99.0	42.4	1005.4	1129.9	0.25	—	—
外部用	40	スランプ	5cm	4.5	50.5	30	46.4	155	215.0	92.0	830.0	969.0	1.00	0.30	0.03

クス配合から、40mm以上の粗骨材を取り除き、目標のコンシステンシー、空気量が得られるように試験練りを行なって決定した。

2.3 実験手順

RCD用コンクリート、外部用コンクリートとも、はじめに細骨材の一部をスラッジに置換し、単位水量一定のもとでスラッジ置換率、混和剤の種類と添加率を変化させ、スラッジ置換率に応じて所要のワーカビリティ、空気量が得られる混和剤添加率を選定した。

次に、スラッジ置換率ごとに選定された混和剤添加率で、圧縮強度、凍結融解試験を行なった。

スラッジは、ケーキ状のまま(含水スラッジ)または乾燥してロサンゼルス試験機によって粉碎したもの(乾燥スラッジ)を投入した。含水スラッジは、にぎりこぶし程度の大きさにした。

3. RCD用コンクリートの実験結果

3.1 使用した混和剤

使用した混和剤は表-3の3種類である。

Aは、通常ダムコンクリートによく使用されているAE減水剤である。Bは、RCDの施工時間を確保するために開発された混和剤である。Cは高性能AE減水剤であり、微粉に対する強力な分散効果を期待して使用した。

3.2 VC試験結果

スラッジ置換率と混和剤の種類、添加率を表-4のような組み合わせで変化させたコンクリートのVC

表-3 RCD用コンクリートに使用した混和

記号	混和剤の種類	製造メーカー	主成分	標準添加率 (F+C) × %
A	AE減水剤(遅延型I種)	N社	リグニンスルホン酸化合物	0.25
B	超硬練り用	N社	変性リグニンスルホン酸カルシウムとアルキエーテルポリマーの複合物	1.0
C	高性能AE減水剤(遅延型・FA対応)	N社	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合物	1.1

表-4 試験条件

スラッジ置換率 (%)	混和剤A添加率 (C+F) × %				混和剤B添加率 (C+F) × %			
	0.25	0.5	1.0	1.5	1.0	2.0	3.0	4.0
0.0	○							
4.5	○	○			○	○		
9.0	○	○	○		○	○		
13.5		○	○			○	○	
18.0			○	○		○	○	○

試験を行なった。スラッジ置換率とVC値の試験結果を図-1に示す。

混和剤の添加率一定の場合、スラッジ置換率が増加するとスラッジ置換率0%(無置換)の場合よりVC値が大きくなっている。しかし、混和剤添加率を増加させるとVC値は小さくなった。

混和剤の種類を比較すると、混和剤A、BがVC値を低下させる効果は大きく、特にBはスラッジ置換率18%でもVC値が20秒以下である。混和剤Cの効果は小さく、標準添加率の2倍で収束傾向にあり、しかも20秒以上であった。Cの効果がいけない原因には、スラッジ中の凝集剤の影響も考えられるため、今後の検討が必要である。

この結果より、混和剤の種類を適切に選定するこ

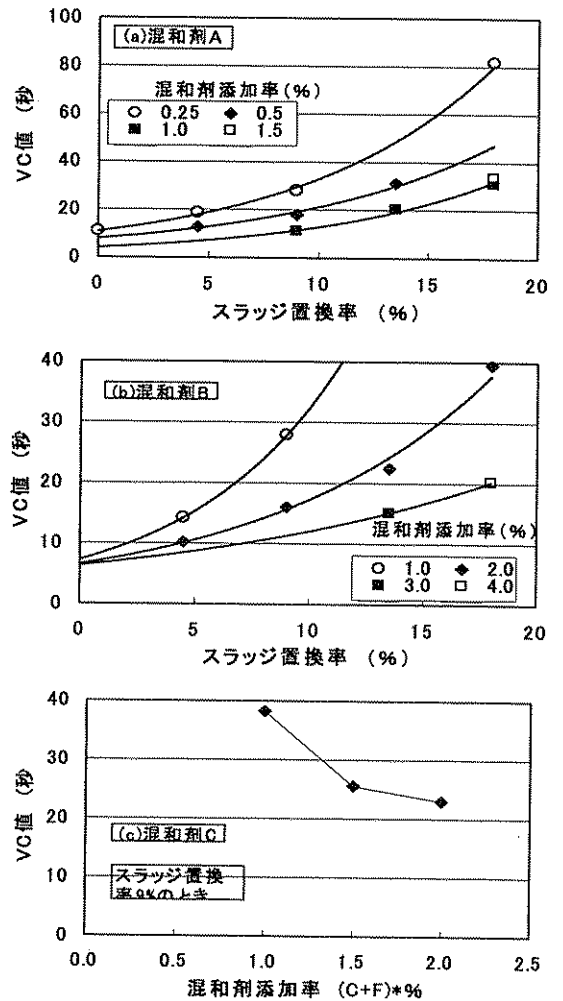


図-1 混和剤の種類・添加率とVC値の関係

表-5 スラッジ置換率と混和剤添加率の組合せ

スラッジ置換率 (%)	混和剤種類・添加率 (G+F) × %			
	混和剤 A		混和剤 B	
	添加率	記号	添加率	記号
0.0	0.25	A0		
4.5	0.50	A1	1.00	B1
9.0	0.75	A2	2.00	B2
13.5	1.00	A3	3.00	B3
16.0			4.00	B4

とによりスラッジ置換率に応じて VC 値を制御することができることが確認できた。

また試験結果より、VC 値 15 秒程度になる混和剤添加率は表-5のとおりとなった。そこでそのときの VC 値の経時変化、圧縮強度試験を行なった。

3.3 VC 値の経時変化

表-5 の組合せによる VC 値の経時変化測定結果(指数関数で近似)を図-2に示す。

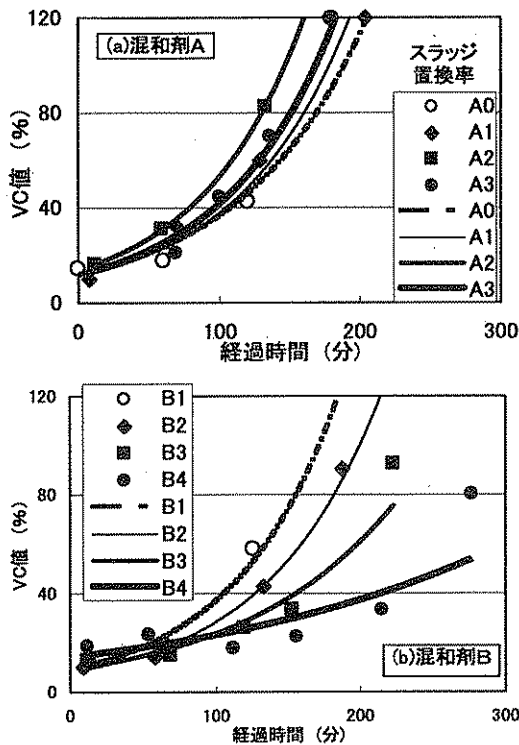


図-2 VC 値の経時変化

練混ぜ直後の VC 値はいずれも 15 秒前後に収まっている。混和剤 A を用いた場合の経時変化については、無置換 (A0) とほぼ同様に時間経過とともに VC 値は大きくなった。ところが混和剤 B の場合は、添加率が大きくなるほど VC 値の変化率は小さくなっている。これは、長時間にわたり締固め可能な性状を維持できることを意味する。

3.4 圧縮強度試験結果

材齢と圧縮強度の関係を、スラッジ無置換に対する各置換率の強度比で示したのが図-3である。

混和剤を多量添加した場合の圧縮強度は、混和剤

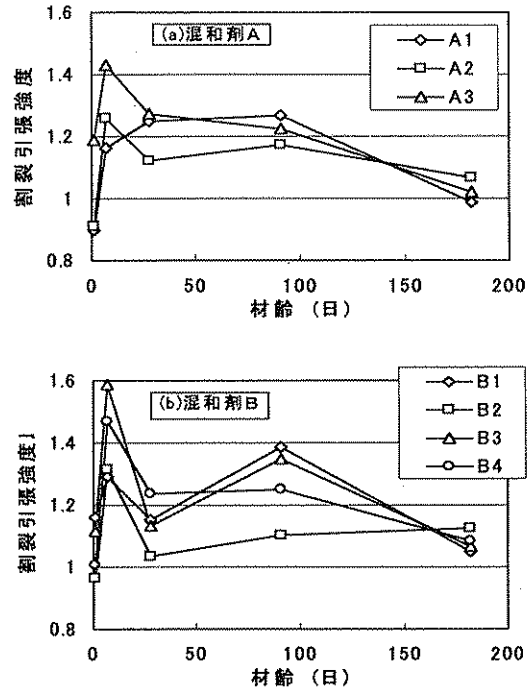


図-3 材齢、置換率と強度比の関係

A、B とも、材齢初期は無置換 (A0) とほぼ同じ強度比であるが、28 日以降は A0 を上回り、強度比 1.1 ~ 1.3 になっており、強度増進効果があることがわかる。この傾向は、混和剤を標準量添加した場合と標準添加量以上を添加した場合とで、初期において性状が異なっている。標準添加の場合、初期の強度比が 1.4 程度と最も高く、次第に低下し、長期になると約 1.1 ~ 1.2 に収束する傾向があった。初期材齢において傾向が異なるのは、スラッジを置換すると微粉末効果によって初期の強度は大きくなるが、遅延型の混和剤を多量添加することにより強度発現が遅延するため、スラッジ置換による強度増進効果を打ち消しているためと考えられる。

4. 外部用従来コンクリートの実験結果

4.1 使用した混和剤

使用した混和剤は表-6のとおり AE 減水剤 2 種類、AE 剤 2 種類と遅延剤である。

AE 減水剤 D、AE 剤 d、遅延剤 R は、骨材およびスラッジを採取した現場で実際に使用していたものである。遅延剤は、骨材にモンモリロナイトが含有されており過早凝結を生じるため、使用されている。AE 減水剤 A は、RCD 用に使ったものと同じであり、AE 剤 a と合わせ通常ダムコンクリートに頻繁に使用されているものである。

表-6 外部用コンクリートの使用した混和剤

記号	混和剤の種類	製造メーカー	主成分	標準添加率 (F+C) × %
D	AE減水剤(遅延型 I 種)	P社	リグニルスルホン酸とオキカルボン酸塩	1.0
A	AE減水剤(遅延型 I 種)	N社	リグニルスルホン酸化合物	0.25
d	AE剤	P社	ロジン系界面活性剤	—
a	AE剤	N社	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	—
R	遅延剤	P社	オキカルボン酸塩	—

4.2 配合条件

配合条件を表-7に示す。

スラッジは、ケーキ状のまま(含水スラッジ)と乾燥・粉砕した状態のもの(乾燥スラッジ)の2種類の場合について実験した。

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、耐凍害性の向上を目的として空気量の水準を 6、7.5、10%とした。また、AE 減水剤 D 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 A を添加した配合は乾燥スラッジのみについて試験した。AE 剤は、D に対して d、A に対しては a と d とした。また、遅延剤は AE 減水剤 D を添加した配合で (C+F) × 0.03 % 使用したが、凝結・硬化が極端に遅延したため、AE 減水剤 A を添加した場合には使用しなかった。

4.3 スランプ、空気量試験結果

スラッジ置換率 10%における AE 減水剤 D および A の添加率とスランプ、空気量の関係を図-4に示す。混和剤 D は添加率を増やしてもスランプはほとんど変化していないが、空気量はほぼ直線的に増加しているのに対し、混和剤 A は逆にスランプは増加するが、空気量はほとんど変化がない。このように混和剤によってスランプ、空気量に及ぼす影響は異なることがわかる。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。

次に AE 剤 d と a の添加率と空気量の関係を図-5に示す。この場合も混和剤の空気連行性は異なり、d は少量の添加率で空気量は増加するが、a の効果は小さかった。いずれも添加率と空気量の関係

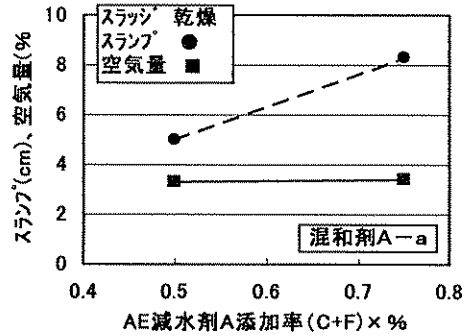
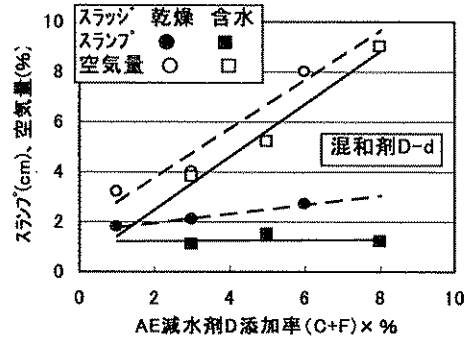


図-4 AE減水剤添加率とスランプ、空気量の関係

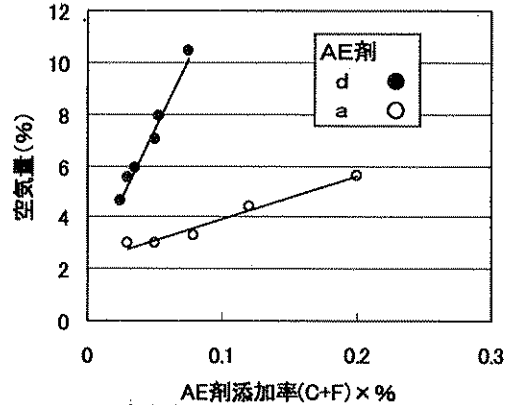


図-5 AE減水剤添加率と空気量の関係

表-7 配合条件、混和剤添加率とフレッシュ性

記号	配合条件				決定した混和剤添加率とフレッシュ性				
	AE減水剤	AE剤	スラッジの置換率 (%)	目標空気量 (%)	目標スランプ (cm)	添加率(C+F) × %		スランプ (cm)	空気量 (%)
D0			—	0	4.5	1.00	0.030	7.9	5.0
DD5			乾燥 (D)	10	5	2.00	0.036	5.4	4.7
DD10-4		3.00				0.051	2.6	5.3	
DD10-6		3.00				0.075	2.7	6.6	
DD10-7		3.00				0.096	3.1	7.9	
DD10-10		3.00				0.138	3.7	9.8	
DW5			含水 (W)	10	5	2.00	0.036	3.5	5.1
DW10-4		3.00				0.054	1.3	5.3	
DW10-6		3.00				0.078	1.5	6.5	
DW10-7		3.00				0.099	2.0	8.0	
DW10-10		3.00				0.138	1.5	9.5	
A0			乾燥 (D)	10	5	0.25	0.018	7.1	5.3
AD5		0.25				0.021	4.0	4.0	
AD10-4		0.50				0.024	4.2	4.6	
AD10-6		0.50				0.036	4.3	5.9	
AD10-7		0.50				0.051	4.4	7.0	
AD15		0.75				0.033	3.3	4.7	
AD20		1.00				0.042	1.6	5.0	

は直線的であり、添加率によって空気量を制御することができる。

以上の結果から求めた混和剤添加率とフレッシュ性状は表-7 のとおりである。AE 減水剤と AE 剤の組合せは、D-d と A-d とした。この配合で圧縮強度および凍結融解試験を行なった。

4.4 圧縮強度試験結果

材齢と無置換に対する強度比を図-6に示す。

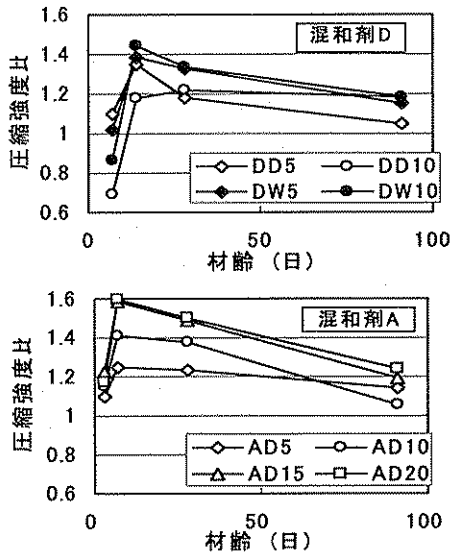


図-6 強度比

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、初期材齢の強度比は小さく、特に混和剤 D は無置換より小さい。これは遅延型の AE 減水剤添加率が多いのに加えて遅延剤も添加しているため、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。

4.5 凍結融解試験結果

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-7に示す。

混和剤 D のスラッジ置換率 10%、空気量 4.5% のとき (DD10-4、DW10-4)、ほかのケースに比べて動弾性係数の低下がやや大きい。詳細に見ると、スラッジ置換率が大きくなるほど相対動弾性係数は低下する傾向があること、また空気量が少ないほど低下する傾向があること、AE 剤の種類によって効果は異なるなどの傾向はあるものの、上記の 2 ケース以外は 300 サイクルでも 90% 程度の相対動弾性係数を保持しているなどの傾向がある。いずれにして

も結果は非常に良好であり、空気量を確保すれば耐凍害性も確保できる。

5. 配合設計に関する検討

従来の配合設計方法は、所要のワーカビリティが得られる単位水量を設定し、強度、耐久性から水セメント比を設定し、単位水量が最小になるように細骨材率を決めている。ところが、セメント程度の粒径の粉体であるスラッジをコンクリートに混入する場合、スラッジをどのように取り扱うかを明確にしなければ配合設計を行うことができない。

そこで、本研究では、スラッジは粉体の性状を有しているため、フレッシュ性状の評価には粉体として取り扱うが、直接強度発現に寄与することはないので硬化コンクリートの品質評価には細骨材の一部として取り扱ってきた。ここで問題になるのが、ス

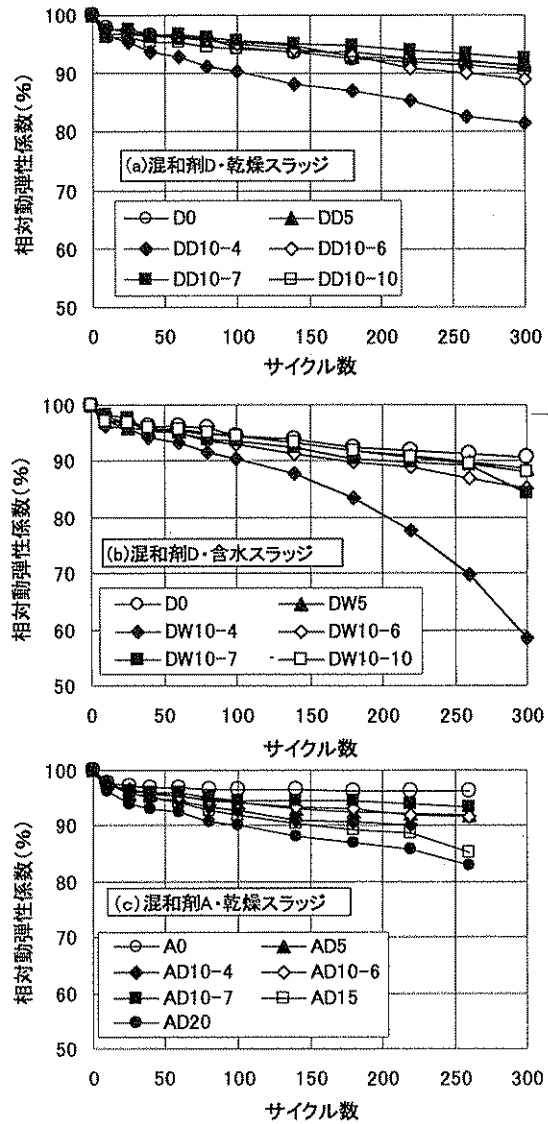


図-7 凍結融解試験結果

スラッジを含めたペーストのフレッシュ性状への影響である。

コンクリートのフレッシュ性状(ここでは主にワーカビリティ)に影響を及ぼすペーストの役割は、骨材の空隙を充填するために必要な量(空隙充填ペースト)と、所要のワーカビリティを確保するために骨材の周りに付着して流動性を付与するために必要な量(余剰ペースト)である。空隙充填ペーストは、骨材の実積率によって決まるので、最終的には余剰ペーストが問題になる。

余剰ペーストは、細骨材と粗骨材を混合したものを細粗混合骨材と呼ぶことにすると、結論的には、余剰ペースト = (1 - 細粗混合骨材かさ容積) となる(図-8)。また、骨材量が一定の場合、細粗混合骨材の実積率が最大になるとき余剰ペーストも最大になり、一般にはそのときワーカビリティが最良になり、スランプは最大、VC 値は最小になる。

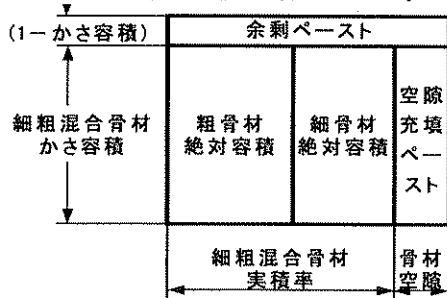


図-8 骨材とペーストの構成

このことから、スラッジ混入量は(1 - 細粗混合骨材かさ容積)になるようにすればよいと考えられる。あるいは逆に、スラッジを混入したい量が決まっている場合は、その量に適したかさ容積の選定や、混和剤添加率を決めればよいと考えられる。

6. 14年度のまとめ

RCD 用コンクリート、外部用コンクリートにスラッジ置換率を変化させ、混和剤の種類、添加率を変化させることによるワーカビリティの改善効果、強度への影響、耐凍害性の改善効果について検討した。また、配合設計におけるスラッジの取り扱いについても検討した。それらの結果、以下のことが明らかになった。

- ① 混和剤の種類と添加率を適切に選定することにより、スラッジ置換率に応じた所要のワーカビリティ、空気量を得ることができる。
- ② 遅延型の混和剤を多量添加することにより、初期の圧縮強度は微粉末効果による強度増加を相殺するが、長期的には強度増加が期待できる。

③ 所要の空気量を確保すれば、耐凍害性も問題ない。

④ スラッジを混入したコンクリートの配合設計は、スラッジの混入量に応じた細粗混合骨材かさ容積と混和剤添加率の選定が必要である。

7. 3年間の成果と今後の問題点

骨材製造時に発生するスラッジをコンクリートに混入して有効利用を図るために、①スラッジの品質評価方法、②スラッジを混入したコンクリートの配合設計方法の確立を目標に3年間研究した。その結果、得られた成果、今後の問題点は以下のとおりである。

①スラッジの評価すべき品質は、第1に比表面積であり、ワーカビリティに及ぼす影響は極めて大きい。また、ゼータ電位、メチレンブルー吸着量も重要と考えられるが、今回、2現場3種類のスラッジしか実験できなかったため、定量化できるまでには至らなかった。さらには、当初文献調査などから、凝集剤の影響は小さいと考えられたが、混和剤の種類によっては大きな影響が考えられる。今後これらの影響について検討する必要がある。

②スラッジを混入したコンクリートの配合設計では、ワーカビリティの低下に対して混和剤の種類と添加率を適切に選定すること、スラッジをセメント、混和材と同様に粉体として扱い、細粗混合骨材かさ容積によって適切なペースト量が得られる可能性を示した。これらの結果をふまえて試験練りを行うことにより配合は決定できる。今後、混和剤の種類、添加率の決め方、適切なかさ容積の決め方を検討することにより、試験練りの回数を減らし、容易にスラッジを取り扱えるようになるものと考えられる。

【主な発表論文】

- 1) 土研資料 「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」(シリーズ)
 - (1) 各種コンクリートのワーカビリティ、強度 第3855号
 - (2) RCD用コンクリートのワーカビリティの改革、第3850号
 - (3) 外部用コンクリートのワーカビリティ、耐久性の改善第3891号
- 2) コンクリート工学年次論文集
 - (1) モルタル・コンクリートのワーカビリティに及ぼす碎石スラッジの影響、Vol.23
 - (2) 碎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、Vol.24
 - (3) 碎石スラッジのダム外部コンクリートへの適用、Vol.25