

論文 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

土田 克美^{*1}・河野 広隆^{*2}・森濱 和正^{*3}

要旨：ダム建設工事において骨材製造に伴い大量に発生する砕石スラッジは産業廃棄物として処分されていることから、砕石スラッジ有効利用を目的としてダム用コンクリートに混入する実験を行った。単位水量一定条件では、砕石スラッジ混入量を多くすることでワーカビリティが低下するが、この対応策として混和剤の使用量を多くすることによりワーカビリティが改善されること、さらに砕石スラッジを混入したコンクリートは、砕石スラッジなしのコンクリートと同程度以上の強度を有し、中性化などが小さくなることを確認した。

キーワード：砕石スラッジ，リサイクル，ワーカビリティ

1. まえがき

ダム建設工事では骨材製造に伴って大量に発生する砕石スラッジは産業廃棄物として廃棄処分されることが多い。この砕石スラッジを有効利用することは廃棄物量を削減することになり、省資源、省エネルギー、環境保全の観点からも望ましいとされる。これまでに砕石スラッジをコンクリート材料として細骨材の一部に置換した利用法の可能性を探ってきたが、単位水量を一定とした場合、砕石スラッジの置換率を多くさせることによりモルタル、コンクリートともにワーカビリティが低下することを確認している¹⁾。

そこで所要のワーカビリティを確保することを目的として、砕石スラッジ置換率を多くさせた場合でも、混和剤使用量を変えることによってワーカビリティの改善効果がどの程度あるのか、強度への影響があるのか確認する試験を行った。

また単位水量、混和剤使用量とも一定の条件下で砕石スラッジを置換した場合の、長期材齢におけるコンクリート強度試験、乾燥収縮試験、中性化深さ測定、細孔径分布試験の結果を合わ

せて報告する。

2. 基本配合

ダム建設現場のコンクリートは粗骨材最大寸法150mmの配合（フルミックス配合）であるが、実験室では40mm以上の粗骨材を取り除いた場合の試験練りを行い、砕石スラッジなしの配合（基本配合）を決定した（表-1）¹⁾。

3. ワーカビリティ改善試験

3.1 試験方法

(1) 試験手順

単位水量を一定としスラッジを置換した場合に、混和剤の種類と使用量を変えることによりワーカビリティを改善することを検討した。

ここでは細骨材質量に対する砕石スラッジ質量の割合を「スラッジ置換率」として定義する。また対象とする配合はRCD用コンクリート、混和剤はA、Bの2種類とした。

混和剤使用量の選定とワーカビリティ（RCD用コンクリートではVC値）改善の確認はつぎの手順1)～3)に従い、混和剤を多く使用することの影響については強度試験により確認す

*1 独立行政法人土木研究所 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 独立行政法人土木研究所 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 独立行政法人土木研究所 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）

表-1 コンクリートの基本配合

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	コンス テンシー の目標	空気量 の目標 (%)	水結合 材比 W/ (C+F) (%)	フライ アッシュ 置換率 F/ (C+F) (%)	細骨材 率 s/a (%)	単体量(kg/m ³)					混和剤 (kg)	AE剤 (kg)	
							水 W	セメント C	フライ アッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G			
											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:スランプ(cm), *3:スランプフロー(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

ることとした。

- 1) スラッジ置換率毎に混和剤使用量を変化させて、練混ぜ直後のVC値を測定。
- 2) RCD用コンクリートの目標VC値を満足する混和剤使用量を選定。
- 3) 選定された混和剤使用量により練混ぜを行い、強度試験用供試体を作製するとともにVC値の経時変化を測定。

(2) 使用材料

材料の砕石スラッジと骨材はダム建設現場から採取し、中庸熱ポルトランドセメント、フライアッシュは現場で使用しているものと同一品を使用した。

砕石スラッジは含水率30%程度まで脱水されたケーキ状態のまま使用する。品質として平均粒径は約10 μ mでセメント、フライアッシュとほぼ同じであるが、比表面積は9,050cm²/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ことが特徴となっている。

混和剤Aは基本配合に用いた混和剤と同じものでN社製のAE減水剤(遅延形、主成分:リグニンスルホン酸化合物)である。標準使用量は単位結合材質量(C+F)に対して0.2~0.5%とされているが、0.25, 0.50, 1.00, 1.50%の4水準について実施した。混和剤BはN社製の超硬練りコンクリート用混和剤(主成分: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)である。標準使用量は

(C+F)に対して0.7~1.0%とされているが、1.00, 2.00, 3.00, 4.00%の4水準について実施した。

(3) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは容量100リットルの強制2軸型ミキサを使用して、材料は粗骨材、細骨材、砕石スラッジ、セメント、フライアッシュをミキサに投入し60秒間空練りをした後、あらかじめ混和剤を溶解させた水を加え120秒間練混ぜた。ただし、手順1)の練混ぜには容量55リットルのパン型ミキサを使用した。

(4) 試験方法

VC値はJSCE-F507に準拠して測定した。圧縮強度試験、引張強度試験はJIS A 1108, JIS A 1113に準拠して行った。圧縮強度試験用供試体は ϕ 15 \times 30cm, 引張強度試験用供試体は ϕ 15 \times 20cmとし、その作製はRCD工法技術指針(案)付録-2に従い、材齢は1, 7, 28日とした。

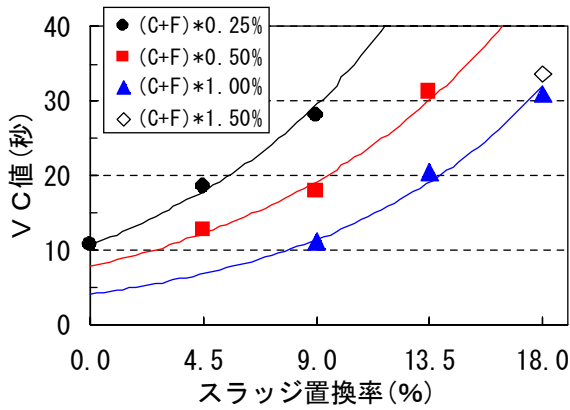
3.2 試験結果

(1) 練混ぜ直後のVC値

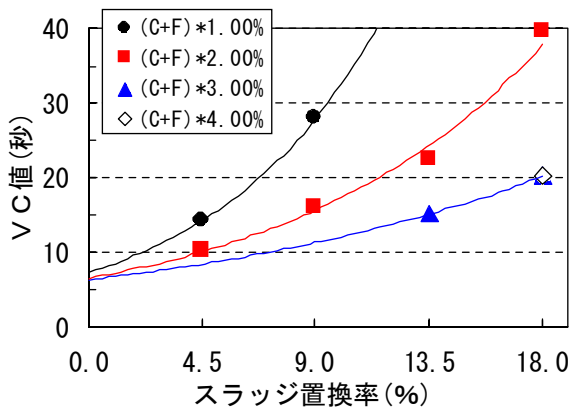
砕石スラッジ置換率毎に混和剤とその使用量を変化させて、練混ぜ直後のVC値を測定した結果を図-1(a)(b)に示す。図中の曲線は測定値を指数関数で近似したものである。

(2) 混和剤使用量選定

図-1より、混和剤A, Bともに使用量が一定の場合には、スラッジ置換率が多くなるにつれVC値が大きくなるが、スラッジ置換率を一



(a) 混和剤Aの場合



(b) 混和剤Bの場合

図-1 練混ぜ直後のVC値

表-2 スラッジ置換率と混和剤の組合せ

ケース	スラッジ置換率(%)	混和剤	使用量(x) (C+F)*x(%)	備考
①	4.5	A	0.50	
②	9.0		0.75	
③	13.5		1.00	
④	4.5	B	1.00	
⑤	9.0		2.00	
⑥	13.5		3.00	
⑦	16.0		4.00	
i	0.0	A	0.25	参考文献 1)の結果
ii	9.0		0.25	
iii	18.0		0.25	

定とした場合には、混和剤使用量を増加させることによりVC値を小さくすることが可能であることを示している。ただしスラッジ置換率18.0%の場合、混和剤Aでは使用量1.50%、混和剤Bでは使用量4.00%まで増加させても、各々の使用量1.00%、3.00%としたVC値とほとんど変わらない結果となった。

VC値15秒程度を満足するスラッジ置換率と混和剤使用量の組合せは、VC値判定の際の試験誤差も加味して表-2に示す①~⑦の7ケースを選定した。

(3) VC値経時変化

表-2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。

練混ぜ直後のVC値は何れも15秒前後に収まっていた。また混和剤Aを用いた場合の経時変化については、ケース②、③の結果に差異が見られるものの、混和剤使用量を増加させることでスラッジなし(ケースi)の経時変化曲線に近づけることが可能であると考えられる。混和剤Bの経時変化はケースiと同程度もしくはそれより緩い傾きを示す。ケース⑥、⑦のように標準使用量の3ないし4倍の使用量ではVC値の経時変化をさらに小さくする効果がみられる。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。

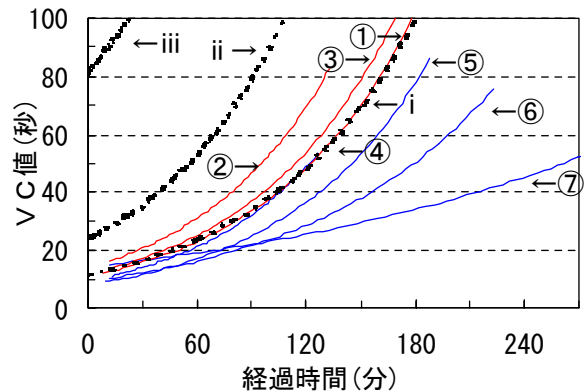


図-2 VC値経時変化

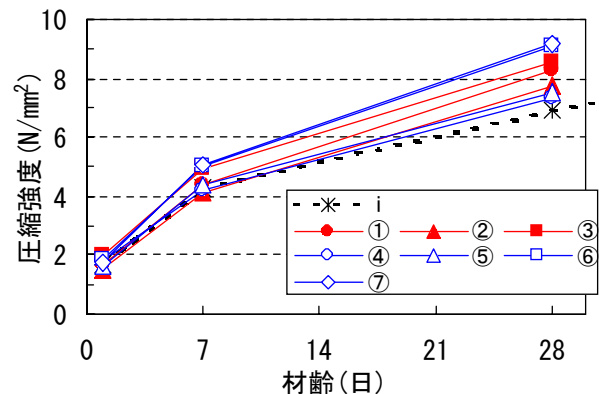


図-3 圧縮強度

(4) 強度試験

表-2の組合せによるコンクリートの圧縮強度試験結果を図-3に示す。

材齢28日では7ケースすべてがケースi（スラッジ置換率0%）の圧縮強度を上まわっており、並行して行った割裂引張強度試験の結果でも同様な結果を得ている。混和剤の使用量を標準使用量の4倍まで多くしても、混和剤の遅延効果による初期材齢での強度低下はなく、むしろ高くなる傾向を示している。

4. 硬化コンクリート試験

スラッジ置換が強度や中性化などに及ぼす影響を確認するため、単位水量、混和剤の使用量とともに一定条件の下で、スラッジ置換率のみを変化させ初期から長期材齢におよぶ試験を行った。

表-1の配合に示した4種類のコンクリートを対象とし、圧縮強度試験、引張強度試験のスラッジ置換率は表-3のとおりとした。

また外部コンクリートを対象として乾燥収縮試験、曲げ強度試験、中性化深さの測定、細孔径分布試験を実施した。

表-3 配合とスラッジ置換率

配合	スラッジ置換率(%)	図-4, 6の凡例
RCD	0.0, 9.0, 18.0	○, ▲, ■
ELCM	0.0, 4.5, 9.0	○, ▲, ■
外部		
高流動		

4.1 試験方法

(1) 練混ぜ方法

3.1(1)と同じ。高流動のみ、練混ぜ水を加えた後180秒間練混ぜた。

(2) 試験方法

圧縮強度試験、引張強度試験はJIS A 1108, JIS A 1113に準拠して行った。圧縮強度試験用供試体寸法は、RCDは $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 、ELCMと外部は $\phi 12.5 \times 25\text{cm}$ 、高流動は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、引

張強度試験用供試体は $\phi 15 \times 20\text{cm}$ とし、その作製はJIS A 1132に準拠、材齢は1(高流動のみ2日)、7, 28, 91, 182, 365日とした。

乾燥収縮試験、曲げ強度試験、中性化深さ測定、細孔径分布試験は $10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を用いて、水中養生期間7日と28日の後、気中養生とした。

乾燥収縮試験はJIS A 1129に準拠し、12ヶ月まで測定を行った。曲げ強度試験はJIS A 1106に準拠し、水中養生後と気中養生6, 12ヶ月後に供試体1体ずつで測定を行った。中性化深さの測定は、供試体を10cmごとに4分割した3断面について、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、打設面、両側面、底面方向から各5点ずつ、計60点を測定した。細孔径分布試験では、中性化深さを測定した後のモルタル片を試料として、水銀圧入法により試験を行った。

4.2 試験結果

(1) 圧縮強度試験、割裂引張強度試験

圧縮強度試験の材齢ごとの強度を図-4、スラッジ置換率0.0%に対するスラッジ置換率9.0%の圧縮強度比を図-5に示す。

4種類のコンクリートとも、スラッジを置換したもののほど初期材齢での圧縮強度が大きい。材齢365日まで強度の増加がみられるが、次第にスラッジなしの強度に近づく傾向を示す。ダム用コンクリートの標準材齢91日における圧縮強度比はRCD1.20, ELCM1.22, 外部1.08となっている。高流動の場合の圧縮強度比は0.91とやや小さいが、圧縮強度自体は 45N/mm^2 (材齢365日では 65N/mm^2) 近くある。

割裂引張強度試験の材齢ごとの強度を図-6に示す。割裂引張強度について材齢182日以降は強度の伸びが鈍化しているものの、初期材齢ではスラッジを多く置換したもののほど引張強度が大きく、圧縮強度と同様な傾向である。

スラッジ置換率が多いほど初期材齢の強度発現が大きいことから、施工時には脱型時期を早めることが可能と考えられる。

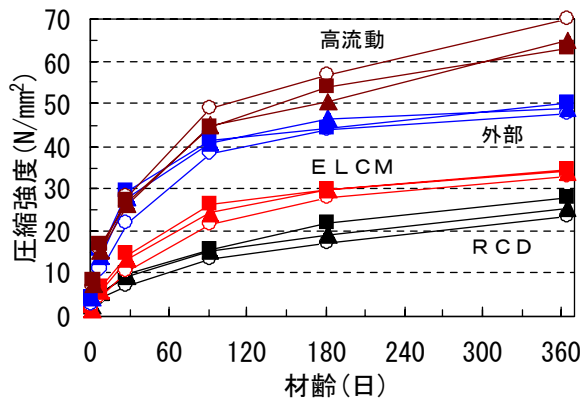


図-4 圧縮強度

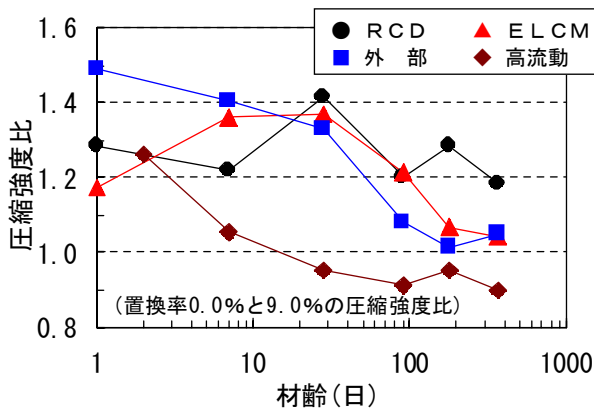


図-5 圧縮強度比

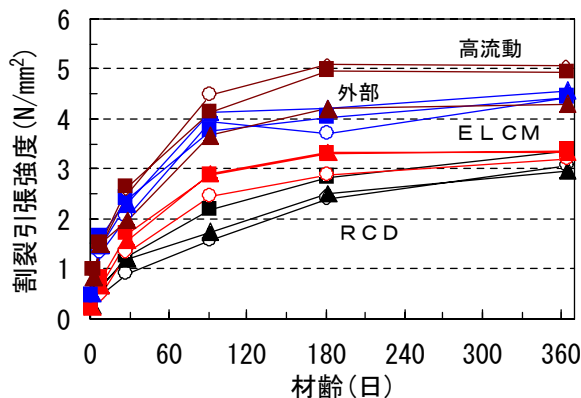


図-6 割裂引張強度

(2) 外部コンクリートを対象とした試験

外部コンクリートを対象として実施した、養生条件とスラッジ置換率を変化させた乾燥収縮試験、曲げ強度試験、中性化深さの測定、細孔径分布試験結果を図-7~10に示す。

1) 乾燥収縮試験 (図-7)

乾燥収縮ひずみはスラッジ置換率、水中養生期間の違いによる明瞭な差はみられない。しかし質量変化率、相対動弾性係数では水中養生期

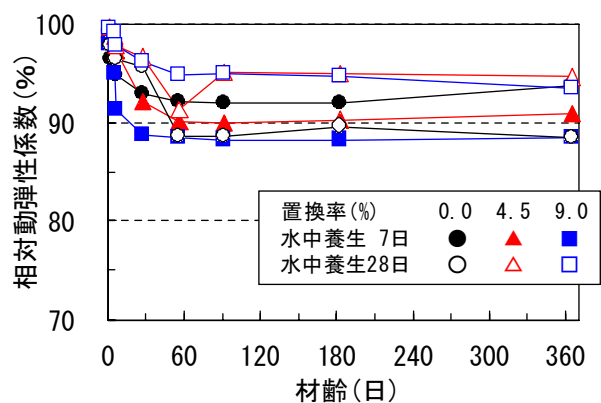
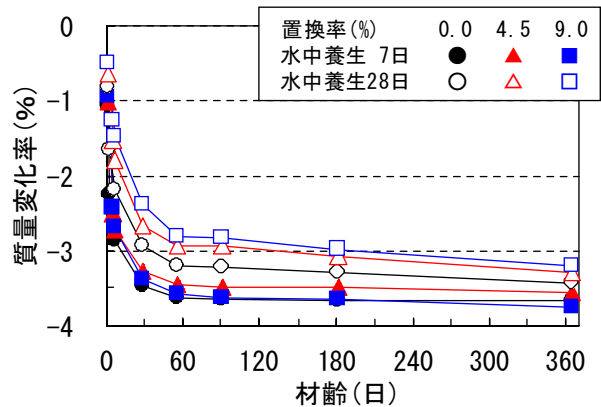
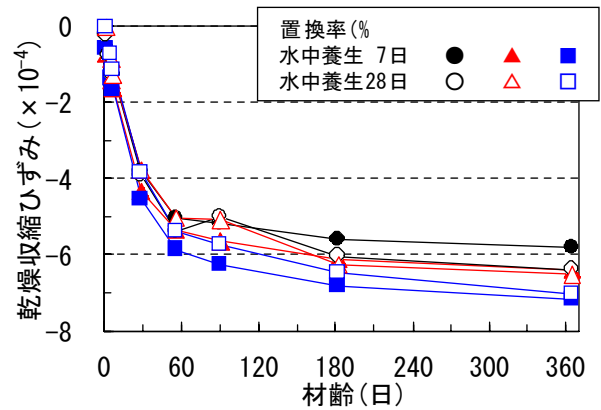


図-7 乾燥収縮試験

間の長い方が変化率は小さい。さらに水中養生28日の場合、スラッジ置換率が多いほどその変化率が小さい傾向を示し、スラッジを用いた方が良好な結果となっている。

2) 曲げ強度試験 (図-8)

曲げ強度試験結果は供試体1体ずつの結果であるが、スラッジを置換したときの強度がスラッジ置換率0%の強度を上まわるとともに、水中養生期間の長い方が強度が大きくなる傾向を示す。

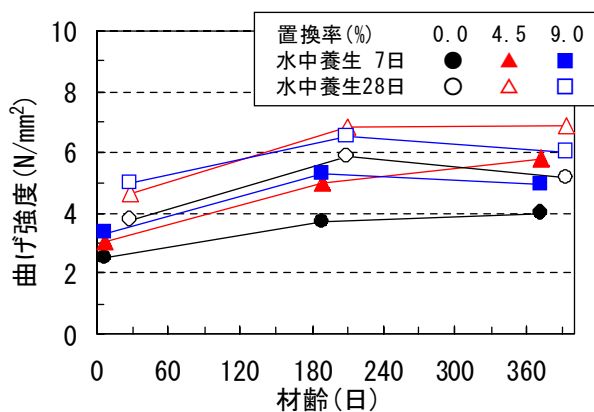


図-8 曲げ強度

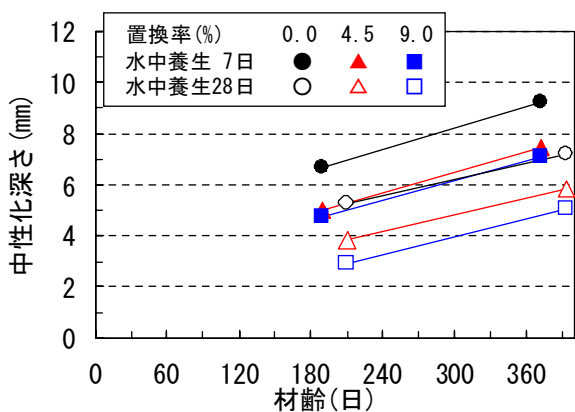


図-9 中性化深さ測定

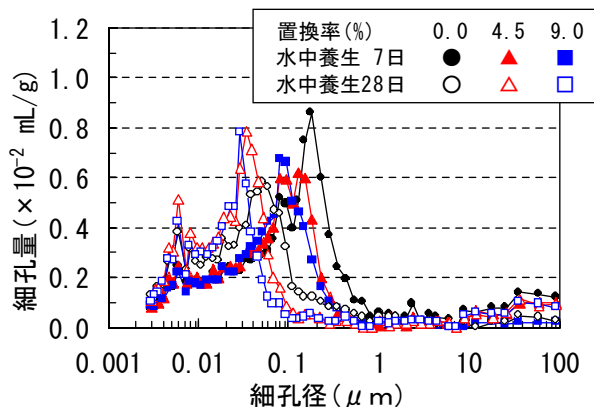


図-10 細孔径分布

3) 中性化深さ測定 (図-9)

図中には中性化深さを測定した60点の平均値を示している。

スラッジ置換率が同一の場合には、水中養生期間の違いにより中性化深さが異なり、養生期間28日の場合は7日の場合よりも中性化深さが小さい。一方、水中養生期間が同一の場合には、スラッジ置換率の多い方が中性化深さが小さい。

砕石スラッジを多く使用し、水中養生期間を長くした方が良好な結果となっている。

4) 細孔径分布試験 (図-10)

図には水中養生終了時点で測定した細孔径分布を示しており、スラッジ置換率が多いほど、さらに水中養生期間が長いほど、細孔量がピークとなる細孔径が小さい傾向を示す。

これは砕石スラッジによりコンクリート組織が緻密化されたことによるものと考えられ、圧縮強度や引張強度、曲げ強度の増加、乾燥収縮や中性化深さが小さい理由の一つと考えられる。

5. まとめ

RCDコンクリートに砕石スラッジを用いる場合、単位水量を一定としても、スラッジ置換率に応じて混和剤を多量に使用することによりワーカビリティの調整が可能である。さらに混和剤の多量使用による圧縮強度、割裂引張強度への影響はみられず、スラッジ置換率0%のコンクリートよりも強度が大きくなる傾向であった。

また単位水量、混和剤の使用量を一定とし、スラッジ置換率を変化させたときの強度は、高流動を除いてスラッジ置換率の多い方が置換率0%よりも大きく、特に初期強度はかなり高い傾向がある。

乾燥収縮や中性化深さは、スラッジ置換率を多くしたコンクリートが置換率0%のコンクリートより小さい。これは細孔径分布試験の結果が示すように、砕石スラッジの使用により組織が緻密になるためと考えられる。

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, 2001.7