

土木研究所資料

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

(2) RCD用コンクリートのワーカビリティの改善

2003年3月

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

Copyright © (2003) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

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

(2) RCD用コンクリートのワーカビリティの改善

構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 河野 広隆

主任研究員 森濱 和正

交流研究員 土田 克美*

要 旨

ダム建設工事の濁水処理設備から排出される大量のスラッジは、多くの場合において産業廃棄物として処分されている。この大量に発生するスラッジをダム用コンクリートに混入したときの品質試験を行い、有効利用の可能性について検討を行なっている。

第1報では、スラッジを混入することによりコンクリートが緻密になり、圧縮強度は増加し、乾燥収縮と中性化は低下することがわかった。一方、ワーカビリティはスラッジの混入量が増加すると急激に低下した。

そのため、本報では、RCD用コンクリートを対象に、混和剤を多量添加することによるワーカビリティの改善効果について検討した。また、混和剤の多量添加が強度に及ぼす影響についても検討した。

キーワード：スラッジ，リサイクル，比表面積，RCD用コンクリート，
混和剤多量添加，ワーカビリティの改善，強度，配合設計

* 戸田建設(株)(2000年4月～2002年3月の期間)

目 次

1 章 実験目的	1
1. 1 前回の成果と問題点	1
1. 2 今回の実験目的	2
2 章 使用材料の品質	3
2. 1 粉体の品質	3
2. 1. 1 粉体の試験項目	3
2. 1. 2 粉体の試験結果	3
2. 2 骨材の品質	4
2. 2. 1 骨材の試験項目	4
2. 2. 2 骨材の物理試験結果	4
2. 2. 3 細粗混合骨材の空隙特性	4
2. 3 混和剤	6
2. 3. 1 AE減水剤（混和剤A）	6
2. 3. 2 RCD用混和剤（混和剤B）	6
2. 3. 3 高性能AE減水剤（混和剤C）	6
3 章 ワークビリティ試験	7
3. 1 実験概要	7
3. 1. 1 試験手順	7
3. 1. 2 試験方法	7
3. 2 スラッジ置換率、混和剤添加率とVC試験結果	8
3. 2. 1 練混ぜ直後のVC値	8
3. 2. 2 混和剤添加率の選定	10
3. 3 VC値の経時変化	11
3. 4 スラッジを混入したRCD用コンクリートの配合	12
3. 4. 1 粗骨材および細粗混合骨材かさ容積	12
3. 4. 2 細粗混合骨材かさ容積、混和剤添加率とVC値	12
4 章 強度試験	14
4. 1 試験方法	14
4. 2 圧縮強度試験結果	14
4. 2. 1 材齢と圧縮強度、ヤング係数の関係	14
4. 2. 2 スラッジ置換率と圧縮強度の関係	14
4. 2. 3 強度発現特性	19
4. 3 割裂引張強度試験結果	22
5 章 ま と め	24

1 章 実験目的

ダム建設工事では、骨材製造プラント、コンクリート製造プラント、堤体のグリーンカットなどから発生した濁水を処理することにより大量のスラッジが発生する。スラッジの多くは産業廃棄物として処分されているのが現状である。

この大量に発生するスラッジを、発生現場において有効利用を図るため、ダム用コンクリートに混入することを考えた。そのため、スラッジ混入コンクリートの品質試験を行い、有効利用の可能性について検討を行なっている。

前回の実験結果(以下、「第1報」¹⁾と呼ぶ)から以下のようにいくつかの成果とともに、ワーカビリティを確保する方法を検討する必要があることが明らかになった。そこで、本報では、スラッジを混入した RCD 用コンクリートのワーカビリティを確保するために1.2節のことについて検討した。

1. 1 前回の成果と問題点

第1報では、

①スラッジの品質に関する各種評価試験

②ダム内部用の RCD, ELCM 用コンクリート、外部用の有スランブコンクリート、構造物周りの高流動コンクリートの 4 種類のコンクリートを対象としたスラッジを混入したモルタルによるワーカビリティ、強度試験

③上記 4 種類のコンクリートについて、単位水量、単位結合材量一定のもとで、スラッジを混入したコンクリートのワーカビリティ、強度、耐久性試験を行なった。

その結果、①では、スラッジの比表面積がコンクリートのワーカビリティに及ぼす影響が大きいこと、スラッジのゼータ電位もワーカビリティの評価に重要な指標になる可能性があること、混和剤が本来持っている性能を発揮しやすいかどうかについてはメチレンブルー吸着量で評価できる可能性があることがわかった。

②からは、有スランブコンクリートである ELCM 用、外部用コンクリートのワーカビリティに及ぼす影響についてはモルタルのフロー値で評価できる可能性があることがわかった。

③からは、スラッジの混入量を増やすことにより強度は増加すること、とりわけ RCD 用コンクリートの初期強度はスラッジ無混入に比べ大幅に増加することがわかった。外部コンクリートの耐久性試験の結果も、スラッジの混入量を増やすことにより乾燥収縮量、中性化深さが小さくなった。これらの理由は、細孔径分布を測定した結果、総細孔量が減少しており、スラッジ混入により緻密になったためと考えられる。

ところが、②③の実験では、水結合材比の影響を排除するため単位水量一定の条件のもとで実験を行なったので、スラッジの混入量を増やすとワーカビリティは急激に低下し、施工上実用性のないものとなった。

そこで、次の段階として、スラッジ混入による品質の改善効果を活かしながら実用的なワーカビリ

1) 土木研究所資料第 3855 号、ダム建設現場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(1)各種コンクリートのワーカビリティ、強度、2002 年 3 月

ティーを得る方法の検討が必要となった。

1. 2 今回の実験目的

硬化コンクリートの品質を低下させることなくワーカビリティを確保する方法として、混和剤を多量添加する方法を考えた。

本報告では、RCD 用コンクリートを対象に、次の3点について確認することを目的に実験を行った。

① スラッジ置換率を変化させながら、混和剤の種類と添加率を変化させ、どの程度ワーカビリティが改善されるかについて検討する。そして、スラッジ置換率、混和剤の種類ごとに、混和剤添加率とワーカビリティの関係を把握、所要のワーカビリティに応じた混和剤添加率を選定する。

② ワーカビリティを改善するには、混和剤の添加率が多量になることが予想される。混和剤を多量添加することによって施工時間が確保できるのか、あるいは凝結の遅れなどはないかを確認するために、混和剤の種類ごとに、①によってスラッジ置換率ごとに選定された混和剤添加率のときのワーカビリティの経時変化を確認する。

③ また、混和剤の多量添加が強度に及ぼす影響についても検討するため、強度発現特性を確認する。

2 章 使用材料の品質

スラッジ、骨材、セメント(中庸熱ポルトランドセメント)、フライアッシュは第 1 報と同じものを使ったので、品質試験の結果のみを掲載する。詳細は第 1 報をご覧ください。

今回重要な役割を果たす混和剤は、通常ダム工事によく使用されている AE 減水剤(遅延型)に加え、RCD 用コンクリートの施工時間確保のために開発された混和剤と、減水効果を高めた高性能 AE 減水剤の 3 種類を使用した。

これらの品質を以下に示す。

2. 1 粉体の品質

2.1.1 粉体の試験項目

スラッジ、セメント、フライアッシュは、物理的試験として密度、粒度分布、かさ密度、比表面積を測定した。化学的試験としては、ゼータ電位、メチレンブルー吸着量を測定した。スラッジと原石骨材については、組成の分析も行なった。

2.1.2 粉体の試験結果

物理的および化学的試験結果を表-2.1.1に、組成分析結果を表-2.1.2に示す。

表-2.1.1 粉体の物理的, 化学的試験結果

粉体の種類	記号	密度 g/cm ³	かさ密度 (かため) g/cm ³	実積率 (かため) %	平均粒径 μm	比表面積 (ブレン法) cm ² /g	メチレンブルー 吸着量 mg/g	ゼータ 電 位 mV
スラッジ	Sa	2.70	1.275	47.2	9.1	9050	9.68	11
	Sb	2.53	0.912	36.1	5.9	13750	8.94	3
セメント	C	3.21	1.757	54.7	10.7	3210	—	14
フライアッシュ	FA	2.10	1.838	65.9	12.5	2950	0.07	9

表-2.2.2 スラッジの組成分析結果

種別	組成分析 (wt%)														※1
	湿 分 (%)	強熱 減量 ig. loss (%)	二酸化 けい素 SiO ₂ (%)	酸 化 アルミニウム Al ₂ O ₃ (%)	酸 化 第二鉄 Fe ₂ O ₃ (%)	酸 化 カルシウム CaO (%)	酸化マ グネシウム MgO (%)	三酸化 硫 黄 SO ₃ (%)	酸 化 ナトリウム Na ₂ O (%)	酸 化 カリウム K ₂ O (%)	二酸化 チタン TiO ₂ (%)	五酸化 りん P ₂ O ₅ (%)	一酸化 マンガン MnO (%)	(%)	
Sa	(0.75)	8.3	51.5	18.9	6.9	2.5	2.4	1.5	1.6	5.0	0.96	0.22	0.14	4.88	
Sb	(1.47)	15.1	40.8	15.5	5.2	15.9	2.0	0.60	0.98	2.3	0.65	0.21	0.17	2.52	
G	—	4.7	64.0	13.9	3.9	2.6	1.5	0.36	3.4	2.1	0.50	0.13	0.06	4.73	

※1: アルカリ評価指数 $\text{Na}_2\text{Oeq} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 * \text{K}_2\text{O}$

表-2.2.3 セメント、フライアッシュの組成分析結果

種別	組成分析									主要化合物組成		
	湿 分 (%)	強熱 減量 ig. loss (%)	二酸化 けい素 SiO ₂ (%)	酸 化 アルミニウム Al ₂ O ₃ (%)	酸 化 第二鉄 Fe ₂ O ₃ (%)	酸 化 カルシウム CaO (%)	酸化マ グネシウム MgO (%)	三酸化 硫 黄 SO ₃ (%)		エーライト C ₃ S (%)	ビーライト C ₂ S (%)	アルミネート C ₃ A (%)
C	—	—	23.3	4.2	4.1	63.9	—	2.2		43	35	4
FA	(0.12)	0.02	55.1	26.5	3.9	6.8	1.7	0.26		—	—	—

2. 2 骨材の品質

2.2.1 骨材の試験項目

細骨材，粗骨材の一般的な物理試験である密度，吸水率，粒度，単位容積質量・実積率，安定性，すりへり試験を行なった。また，細骨材と粗骨材の混合比率を変化させたとき（細粗混合骨材）の空隙特性（実積率，間隙比）に関する試験も行なった。

2.2.2 骨材の物理試験結果

骨材の物理試験結果は表-2.2.1のとおりであった。

表-2.2.1 骨材の物理試験結果

骨材の種類	粒度の範囲	表乾密度 g/cm ³	絶乾密度 g/cm ³	吸水率 %	安定性 損失質量 %	すりへり減量 %			FM	単位 容積質量 kg/l	実積率 %
						A 10-40	B 15-25	C 5-15			
粗骨材	4020	2.69	2.68	0.51	—	—	—	—	7.69	—	—
	2005	2.67	2.65	0.62	—	—	—	—	6.55	1.654	61.9
	4005	2.68	2.66	0.57	6.7	14.8	15.4	15.6	7.19	1.667	62.3
細骨材	5mm以下	2.66	2.64	1.33	1.9	—	—	—	2.51	1.696	64.0

2.2.3 細粗混合骨材の空隙特性

粗骨材最大寸法（Gmax）が20mmと40mmの場合について，細粗混合骨材の粗骨材混合率（骨材に定める粗骨材の割合）を変化させたときの実積率，間隙比と，混合率と間隙比の関係から求めた干渉係数を表-2.2.2および表-2.2.3に示す。粗骨材混合率と実積率，間隙比の関係は，図-2.2.1および図-2.2.2のようになった。

干渉係数について，文献 2)に基づいて回帰した結果は図-2.2.3および図-2.2.4のとおりである。この結果から間隙比を求めた結果を図-2.2.1および図-2.2.2の曲線で示した。

表-2.2.2 細粗混合骨材の実積率，間隙比，干渉係数（Gmax 20）

粗骨材混合率 x (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	間隙比 e(x)	A(x)	B(x)	干渉係数 k(x)
0.00	1.696	64.0	0.563	0.563	0.563	
0.10	1.777	67.0	0.493	0.568	0.507	
0.20	1.831	69.0	0.450	0.574	0.450	
0.30	1.884	70.9	0.410	0.579	0.394	0.088
0.40	1.942	73.0	0.370	0.584	0.338	0.129
0.50	1.987	74.7	0.339	0.590	0.281	0.188
0.55	1.989	74.7	0.339	0.592	0.253	0.252
0.60	2.007	75.3	0.327	0.595	0.225	0.276
0.70	1.978	74.2	0.348	0.600	0.169	0.416
0.80	1.889	70.8	0.412	0.606	0.113	0.608
0.90	1.772	66.3	0.507	0.611	0.056	0.813
1.00	1.654	61.9	0.616	0.616	0.000	1.000

2) 森濱ほか：細粗混合骨材かさ容積に着目したペースト量の検討 その3 細粗混合骨材の空隙比，第57回セメント技術大会講演要旨，pp.40-41，2003.5

表-2.2.3 細粗混合骨材の実積率, 間隙比, 干渉係数 (Gmax 40)

粗骨材混合率 x (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	間隙比 $e(x)$	※ $A(x)$	$B(x)$	干渉係数 $k(x)$
0.00	1.696	64.0	0.563	0.563	0.563	
0.10	1.795	67.7	0.477	0.567	0.507	
0.20	1.884	71.0	0.409	0.571	0.450	
0.30	1.950	73.4	0.362	0.575	0.394	
0.40	2.016	75.8	0.319	0.579	0.338	
0.50	2.062	77.5	0.291	0.584	0.281	0.031
0.55	2.066	77.6	0.289	0.586	0.253	0.107
0.575	2.082	78.2	0.280	0.587	0.239	0.116
0.60	2.065	77.5	0.290	0.588	0.225	0.179
0.70	2.005	75.2	0.330	0.592	0.169	0.381
0.80	1.875	70.2	0.424	0.596	0.113	0.643
0.90	1.777	66.5	0.504	0.600	0.056	0.822
1.00	1.667	62.3	0.604	0.604	0.000	1.000

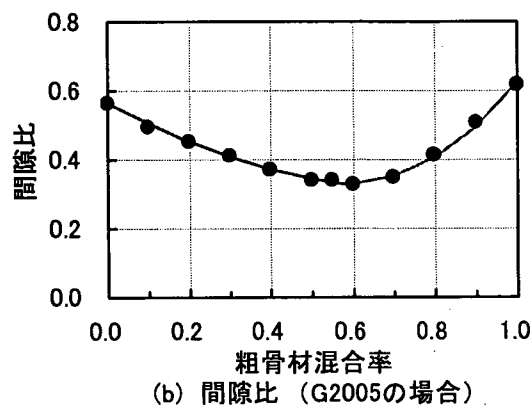
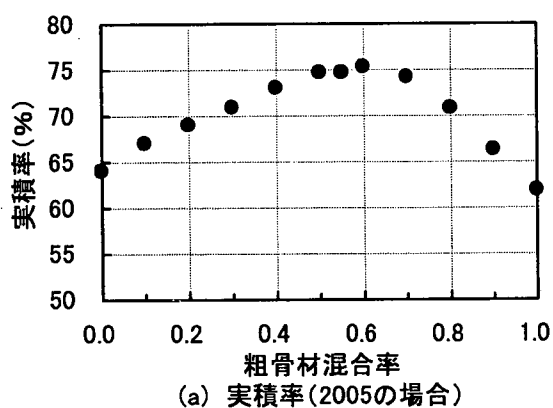


図-2.2.1 粗骨材混合率と実積率2005の場合

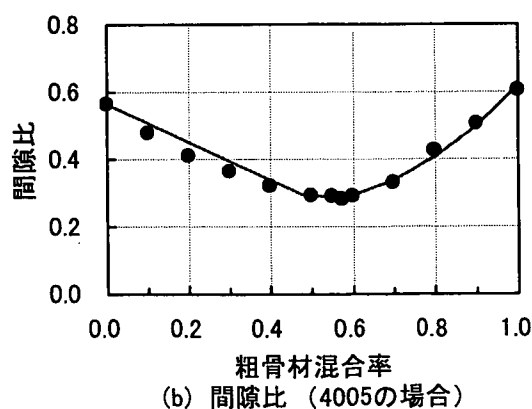
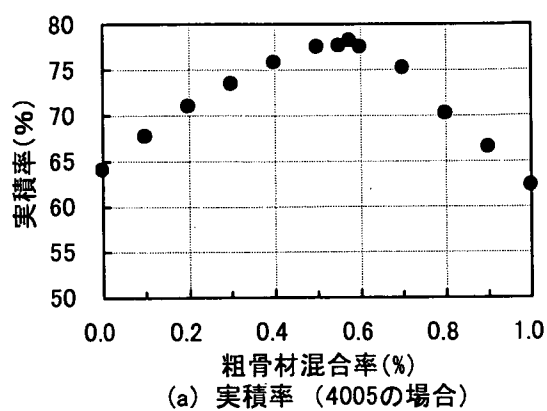


図-2.2.2 粗骨材混合率と間隙比 (粒度範囲4005の場合)

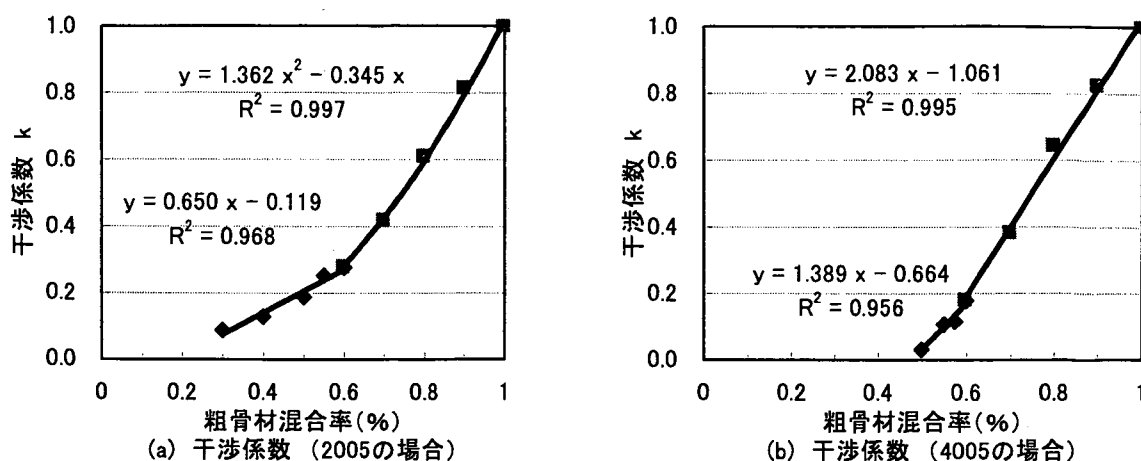


図-2.2.3 干渉係数

表-2.2.3 間隙比の計算結果

骨材の種類	骨材の 粒度範囲	領域Ⅱの開始点		領域Ⅲの開始点	
		x_1	間隙比 $e(x_1)$	x_2	間隙比 $e(x_2)$
細粗混合骨材	2005	0.183	0.460	0.592	0.327
	4005	0.478	0.294	0.596	0.286

2. 3 混和剤

2.3.1 AE減水剤(混和剤A)

AE 減水剤は㈱エヌエムビー社製の「No.8」を使用した。

主成分はリグニンスルホン酸化合物の遅延型である。

標準使用量は、通常、単位結合材質量 (C+F) に対して 0.25 % である。

2.3.2 RCD用混和剤(混和剤B)

RCD 用混和剤は㈱エヌエムビー社製の「RD-100」を使用した。

主成分は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複合物であり、超硬練りコンクリートの湿潤を保持し、しっとりしたコンクリートに仕上げ、施工時間を確保するために開発された混和剤である。

標準使用量は (C+F) に対して 0.7 ~ 1.0 % とされている。

2.3.3 高性能AE減水剤(混和剤C)

高性能 AE 減水剤には、㈱エヌエムビー社製の「レオビルド SP8SBM」を使用した。

遅延型で、フライアッシュ混和に対応したものである。主成分は、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体である。高い分散性能を期待して使用した。

標準使用量は、(C+F) に対して 1.1 % である。

3 章 ワーカビリティー試験

3. 1 実験概要

3.1.1 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、混和剤の種類と添加量を変えることによりワーカビリティーの改善効果と経時変化、強度発現特性について確認する。

ここでは、スラッジを細骨材の内割りとし、細骨材質量に対する碎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。

ワーカビリティーの測定方法は、対象とするコンクリートが RCD 用コンクリートであることから VC 試験とし、VC 値で評価する。

つぎの手順で試験を行なう。

- 1) スラッジ置換率ごとに混和剤添加率を変化させて、練混ぜ直後の VC 値を測定する。
- 2) RCD 用コンクリートの目標 VC 値(15 秒程度)を満足する混和剤添加率を選定する。
- 3) 選定された混和剤添加率により練混ぜを行い、VC 値の経時変化試験を行なうとともに、初期材齢・長期材齢の圧縮および割裂引張強度試験用供試体の作製を行なう(強度試験は4章)。

3.1.2 試験方法

(1) 基本配合

スラッジを置換していない基準とする配合を「基本配合」とした。

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なって基本配合を決定した。配合決定に至る詳細な試験練りの結果は第 1 報をご覧ください。

基本配合は表-3.1.1のとおりである。

表-3.1.1 RCD用コンクリートの基本配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	目標 VC値 (秒)	水結合 材比 (%)	フライアッシュ 置換率 (%)	細骨材 率 (%)	単位数 (kg/m ³)						
					水	セメント	フライ アッシュ	細骨材	粗骨材		混和剤 (kg)
									4020	2005	
40	20	94.0	30.0	47.4	133.0	99.0	42.4	1005.4	564.9	564.9	0.35

(2) スラッジ置換率と混和剤の種類、添加率の組合せ

表-3.1.2にスラッジ置換率と混和剤の種類、添加率の組合せを示す。混和剤 C はスラッジ置換率 9.0 %のときのみである。添加率は、標準添加率に対して 4 倍まで高めた。

表-3.1.2 スラッジ置換率と混和剤の種類、添加率の組合せ

材料	置換率または添加率(%)
スラッジ	0.0, 4.5, 9.0, 13.5, 18.0
混和剤A	0.25, 0.5, 1.0, 1.5
混和剤B	1.0, 2.0, 3.0, 4.0
混和剤C	1.0, 1.5, 2.0 (置換率9.0%のみ)

(3) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには、スラッジ置換率と混和剤添加率の試験には容量 55 リットルのパン型ミキサを、経時変化および強度試験用供試体の作製には容量 100 リットルの強制 2 軸型ミキサを使用した。材料の投入手順と練混ぜ時間は、粗骨材、細骨材、スラッジ(ケーキ状のもの)、セメント、フライアッシュをミキサに投入し 60 秒間空練りとし、その後、あらかじめ混和剤を溶解させた水を加え 120 秒間練混ぜとした。

投入したスラッジは、ケーキ状のものを握りこぶし程度の大きさにしたものである。単位水量は、スラッジの含水率によって補正した。

(4) 試験方法

VC 値は JSCE-F507 に準拠した。VC 値の経時変化は、1 時間ごとに 5 時間測定した。

圧縮強度試験用供試体の大きさは $\phi 150 \times 300 \text{mm}$ 、割裂引張強度試験用供試体は $\phi 150 \times 200 \text{mm}$ とし、その作製は RCD 工法技術指針(案)付録-2 に準拠した。

3. 2 スラッジ置換率、混和剤添加率と VC 試験結果

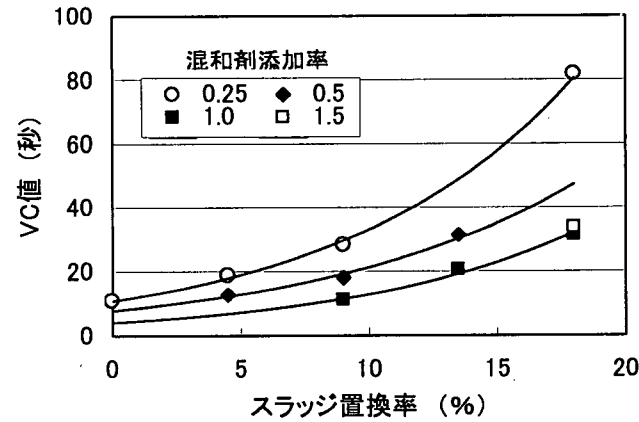
3.2.1 練混ぜ直後の VC 値

混和剤の種類ごとにスラッジ置換率と練混ぜ直後の VC 値、混和剤添加率と VC 値の関係を示したのが図-3.2.1～図-3.2.3 である。(a) 図に前者の関係、(b) 図に後者の関係を示している。図-3.2.1 と図-3.2.2 の (a) 図の曲線は測定値を指数関数で近似したものである。図-3.2.3 は、スラッジ置換率が 9 % の場合のみであり、混和剤添加率と VC 値の関係のみである。

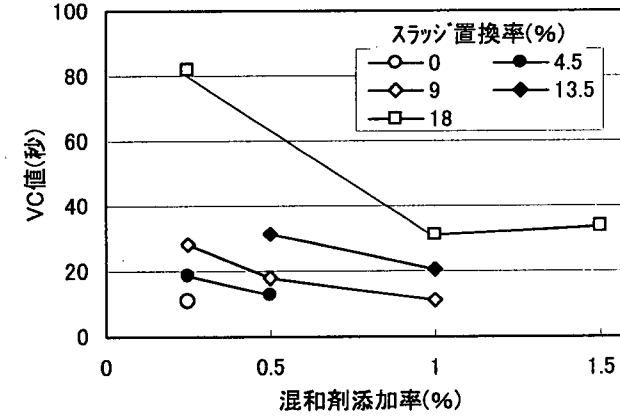
図-3.2.1 と図-3.2.2 の (a) 図より、混和剤 A、B とともに添加率が一定の場合には、スラッジ置換率が多くなるにつれ VC 値が大きくなっており、ワーカビリティが低下していることがわかる。

一方、(b) 図のようにスラッジ置換率を一定とし、混和剤添加率を増加させることにより VC 値は小さくなっており、混和剤の添加率を増加させることにより VC 値が改善され、混和剤の種類、添加率を適切に選定することにより、所要のワーカビリティを制御することができることがわかる。ただし、スラッジ置換率 18.0 % の場合、混和剤 A では添加率 1.5 %、混和剤 B では添加率 4.0 % まで増加させても、各々の添加率 1.0 %、3.0 % とした VC 値とほとんど変わらない結果となっており、添加率 1.0 %、3.0 % は混和剤が効果を発揮するほぼ上限値と考えられる。

混和剤 C は、図-3.2.3 のように添加率を増やすと VC 値は低下したが、標準添加率の 2 倍程度で VC 値はほぼ一定値になった。そのときの VC 値は 23 秒であり、目標とする 15 秒には達せず、今回使用したスラッジでは、混和剤 A、B ほどワーカビリティを改善する効果はなかった。そのため、混和剤 C を使った以後の実験 (VC 値の経時変化、強度試験) は実施しないこととした。

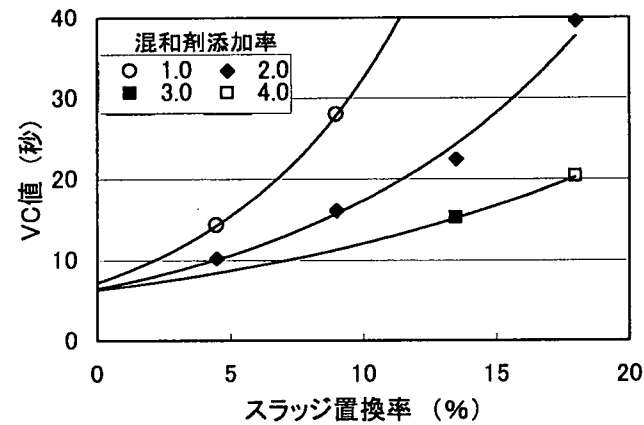


(a) スラッジ置換率とVC値

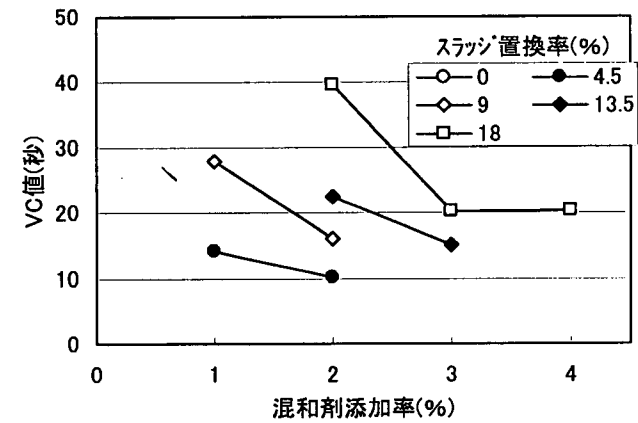


(b) 混和剤添加率とVC値

図-3.2.1 スラッジ置換率, 混和剤添加率とVC値(混和剤A)



(a) スラッジ置換率とVC値



(b) 混和剤添加率とVC値

図-3.2.1 スラッジ置換率, 混和剤添加率とVC値(混和剤B)

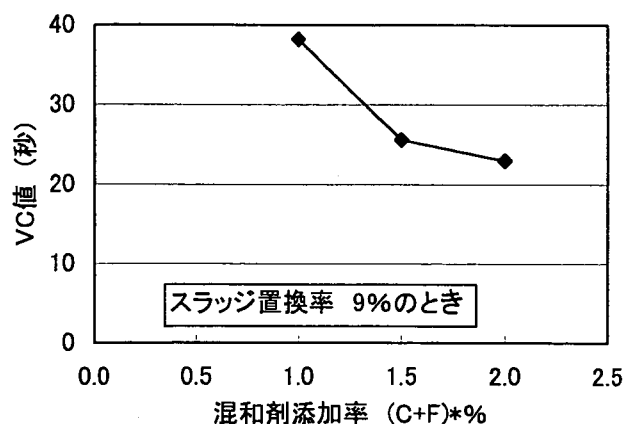


図-3.2.3 スラッジ置換率，混和剤添加率とVC値(混和剤C)

3.2.2 混和剤添加率の選定

上記のとおり，混和剤添加率を増加させることにより VC 値を制御できることがわかったので，混和剤 A, B について，VC 値 15 秒程度を満足するスラッジ置換率と混和剤添加率の組合せを，VC 値判定の際の試験誤差も加味して表-3.2.1のとおり選定した。

この組合せで VC 値の経時変化試験，次章の強度試験を行なった。

表-3.2.1 スラッジ置換率と混和剤添加率の組合せ

ケース	スラッジ置換率 (%)	混和剤	
		種類	添加率 (C+F)*%
A-0	0.0	A	0.25
A-1	4.5		0.50
A-2	9.0		0.75
A-3	13.5		1.00
B-1	4.5	B	1.0
B-2	9.0		2.0
B-3	13.5		3.0
B-4	18.0		4.0

3. 3 VC値の経時変化

表-3.2.1の組合せによる VC 値の経時変化測定結果を図-3.3.1および図-3.3.2に示す。図中の曲線は指数関数で近似した結果である。

練混ぜ直後の VC 値はいずれも 15 秒前後に収まっていた。

混和剤 A を用いた場合の経時変化については、いずれもスラッジ置換率 0 % (ケース A-0) の経時変化曲線よりもわずかに変化(傾き)が大きくなっているものの、スラッジ置換率に適した混和剤添加率を選定することにより、施工性を確保できることを示している。

混和剤 B の経時変化については、混和剤添加率を混和剤 A の場合と同様に練混ぜ直後の VC 値によって選定したが、経時変化曲線の傾きは、ケース B-1 から B-4 になるに従い、つまりスラッジ置換率が増加するとともに混和剤添加率も増やしていくと、徐々に緩くなっている。これは、長時間にわたり施工性を確保できることを意味しており、混和剤 B は施工時間確保に効果が高いことがわかった。

施工時間の観点のみからは、混和剤 B を使用すればスラッジの置換率をさらに増加させることもできる可能性がある。

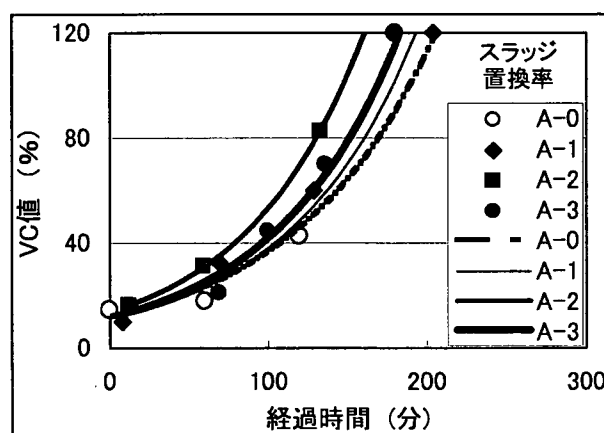


図-3.3.1 VC値の経時変化(混和剤A)

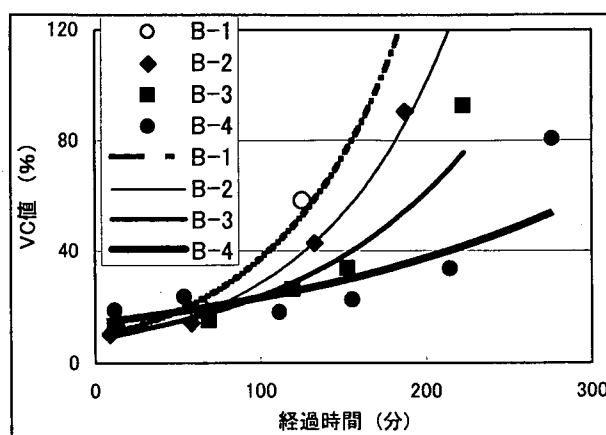


図-3.3.2 VC値の経時変化(混和剤B)

3. 4 スラッジを混入したRCD用コンクリートの配合

3.4.1 粗骨材および細粗混合骨材かさ容積

試験練りした配合の単位粗骨材かさ容積および単位細粗混合骨材かさ容積を，スラッジ置換率との関係で示すと図-3.4.1となる(資料1.1参照)。

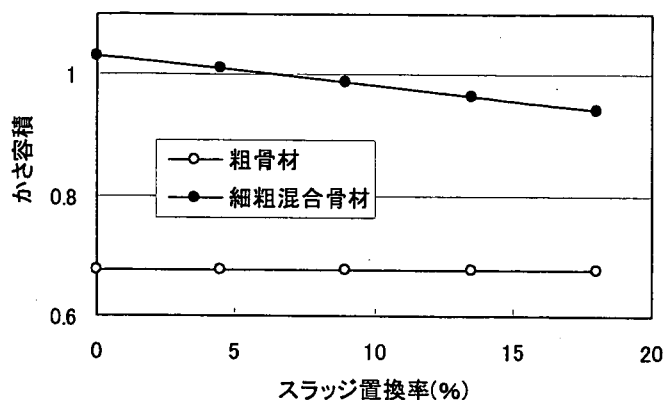


図-3.4.1 スラッジ置換率とかさ容積

粗骨材かさ容積は，スラッジを細骨材に置換しているのて，一定である。

細粗混合骨材かさ容積は次のようにして求めた。

スラッジは，配合では細骨材に置換したが，セメントなどと同程度の粉体特性を有していることから，ここではセメント，フライアッシュと合わせて粉体として取り扱っている。具体的には，2.2.3項に基づいて，次の手順で求めた。

- ①スラッジを除いた細骨材と粗骨材の細骨材率を求めた。
- ②細骨材率から粗骨材混合率を求めた。
- ③粗骨材混合率に相当する間隙比を求めた。
- ④間隙比から実積率を求めた。
- ⑤細骨材量，細骨材の密度，粗骨材量，粗骨材の密度，実積率から細粗混合骨材かさ容積を求めた。

図-3.4.1 の細粗混合骨材かさ容積は，スラッジ置換率が大きくなるほど小さくなっているが，スラッジ置換率 0 および 4.5 % のとき 1 より大きくなっている。これは，細粗混合骨材の空隙を充填するペースト量が不足していることを示している。しかしながら，かさ容積の計算に用いた実積率の試験は，JIS A 1104(骨材の単位容積質量及び実積率試験方法)に準じて突き棒による締固めを行なった結果であり，VC 試験のように強力な締固めを行なった場合，計算に用いた実積率より大きな値になり，VC 試験と同じように振動テーブルで強力に締め固めて実積率を求めた結果を用いると，実際のかさ容積は 1 以下になるものと考えられる(文献3)参照)。

3.4.2 細粗混合骨材かさ容積，混和剤添加率とVC値

混和剤添加率ごとに細粗混合骨材かさ容積と VC 値の関係を示したのが図-3.4.2および図-3.4.3で

3) 森濱ほか：細粗混合骨材かさ容積に着目したペースト量の検討 その 2 細粗混合骨材かさ容積の実態，第 56 回セメント技術大会講演要旨，pp.290-291，2002.5

ある。いずれもスラッジを置換することによって細粗混合骨材かさ容積は減少しているが、かさ容積が小さくなってもスラッジを置換することにより表面積が増加するので VC 値も大きくなっている。しかし、両図とも混和剤添加率を増加させることによってスラッジを含むペーストの流動性が改善されることにより、VC 値は小さくなっている。

細粗混合骨材かさ容積、混和剤置換率と VC 値の関係を回帰すると、式(3.4.1)および式(3.4.2)のように高い相関関係を有しており、スラッジ置換率に応じた所要のワーカビリティを制御できるものと考えられる。

$$\text{混和剤 A} \quad VC = 428.7 - 401.5x_1 - 21.2x_2 \quad (r = 0.979) \quad (3.4.1)$$

$$\text{混和剤 B} \quad VC = 346.1 - 316.7x_1 - 8.83x_2 \quad (r = 0.934) \quad (3.4.2)$$

ここに、VC：VC 値(秒)， x_1 ：細粗混合骨材かさ容積， x_2 ：混和剤添加率(%)

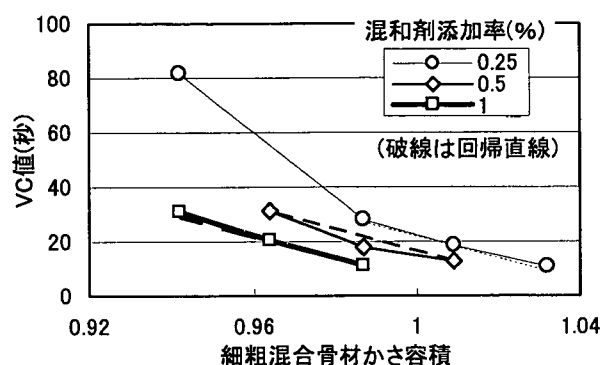


図-3.4.2 細粗混合骨材かさ容積，混和剤添加率とVC値(混和剤A)

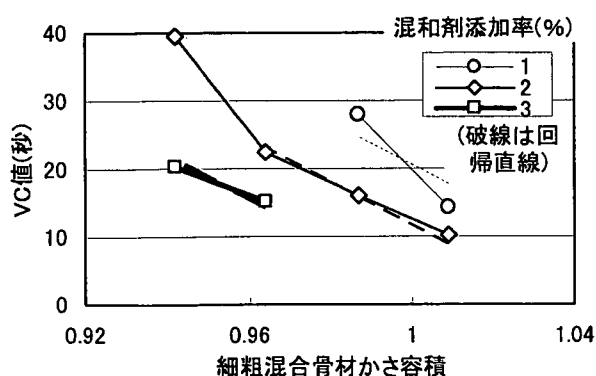


図-3.4.3 細粗混合骨材かさ容積，混和剤添加率とVC値(混和剤B)

4 章 強度試験

4. 1 試験方法

表-3.2.1 の 8 ケースの配合について圧縮強度、割裂引張強度試験を行なった。

試験は、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1113 に準拠した。供試体の大きさは、圧縮強度試験用供試体は $\phi 150 \times 300 \text{mm}$ 、引張強度試験用供試体は $\phi 150 \times 200 \text{mm}$ である。

圧縮強度試験時には、縦ひずみ、横ひずみを測定し、ヤング係数、ポアソン比を求めた。

試験した材齢は 1, 7, 28, 91, 182 日である。

4. 2 圧縮強度試験結果

4.2.1 材齢と圧縮強度、ヤング係数の関係

材齢と圧縮強度、ヤング係数、スラッジ置換率 0 % (ケース A-0) に対する強度、ヤング係数比の関係を図-4.2.1 および図-4.2.2 に示す。また、比較のために混和剤 A を標準添加率 (0.25 %) 一定とし、スラッジ置換率を変化させた場合 (第 1 報) の結果を図-4.2.3 に示す。

混和剤を多量添加した場合の圧縮強度 (図-4.2.1) は、混和剤 A, B とも、材齢初期は A-0 とほぼ同じ (強度比 ≈ 1) であるが、28 日まで急激に強度比は大きくなっており、しかも置換率が大きくなるほど強度比も大きくなる傾向があり、スラッジ置換による強度増進効果があることがわかる。

この傾向は、混和剤標準添加の場合 (図-4.2.3) と異なっている。標準添加の場合、初期の強度比は 1.4 程度と高いが、その後は低下していき材齢 1 年では約 1.1 ~ 1.2 になっている。

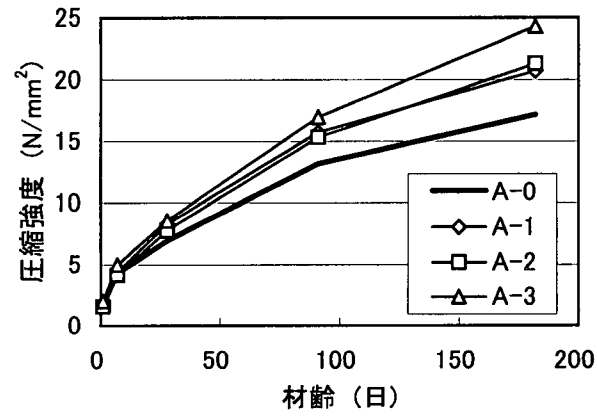
混和剤標準添加と多量添加で初期材齢において傾向が異なるのは、つぎのような理由によるものと考えられる。スラッジを置換すると標準添加の場合は微粉末効果により初期の強度発現は大きい。一方、実験で使用している混和剤は遅延型であるため、多量添加した場合は遅延効果が大きくなる。そのため、多量添加の場合、スラッジ置換による強度発現効果は混和剤の遅延効果によって打ち消されてしまうものと考えられる。

ヤング係数は、圧縮強度とは異なり、混和剤多量添加 (図-4.2.2)、標準添加 (図-4.2.3 の中段) にかかわらず初期 (7 日) の係数比は 1.4 程度と大きい、28 日以降はほぼ 1 で一定しており、スラッジ置換がヤング係数に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。

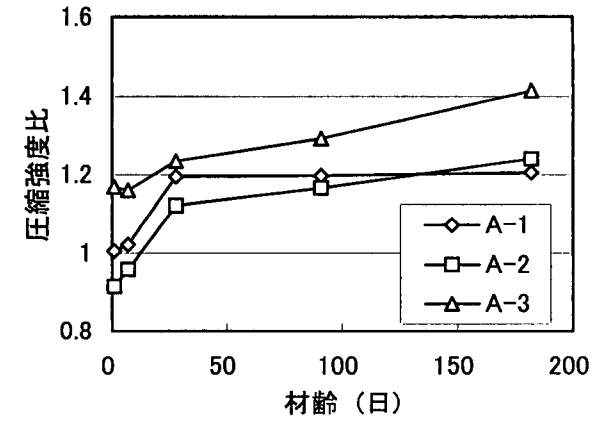
4.2.2 スラッジ置換率と圧縮強度の関係

スラッジ置換率と、置換率 0 % のときの強度に対する各置換率の強度比は、図-4.2.4 のようになった。混和剤 A, B とも置換率 9 % 以下のとき、材齢初期においては強度増進効果はほとんどないが、28 日以降になると置換率 13.5 % まではほぼ直線的に強度比が増加しており、スラッジの置換率を増やすと強度も増加することがわかる。置換率 13.5 % および 18 % のとき、材齢 28 日、91 日の強度比は約 1.3, 182 日では約 1.5 にもなっており、スラッジ置換率を増加させ混和剤を多量添加してワーカビリティを確保すれば、強度増進効果が極めて高いことを示している。

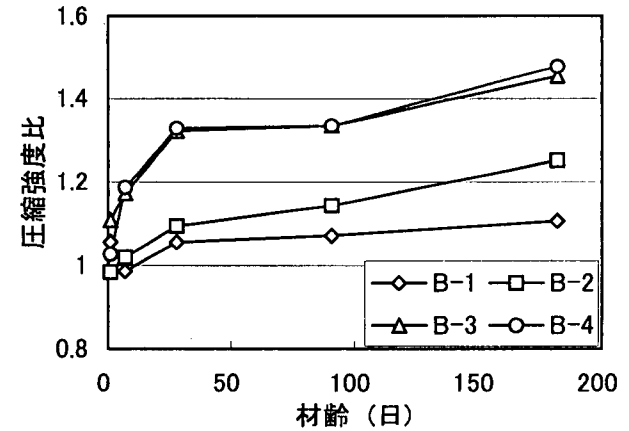
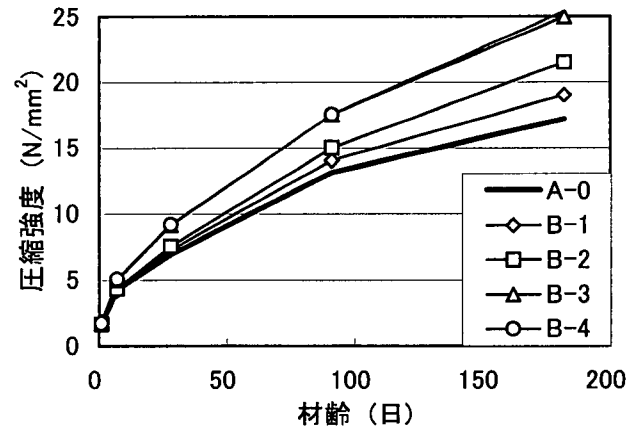
材齢－圧縮強度の関係



圧縮強度比



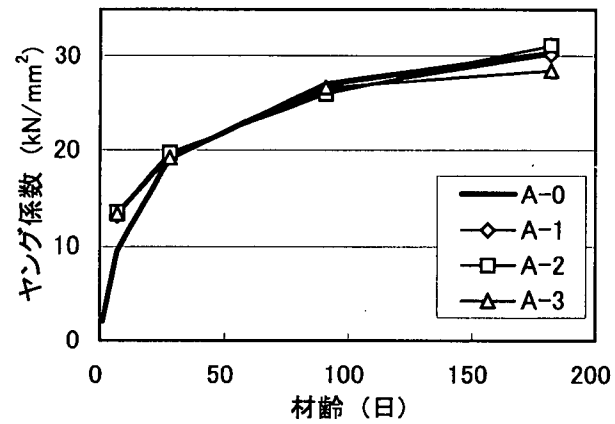
混和剤A



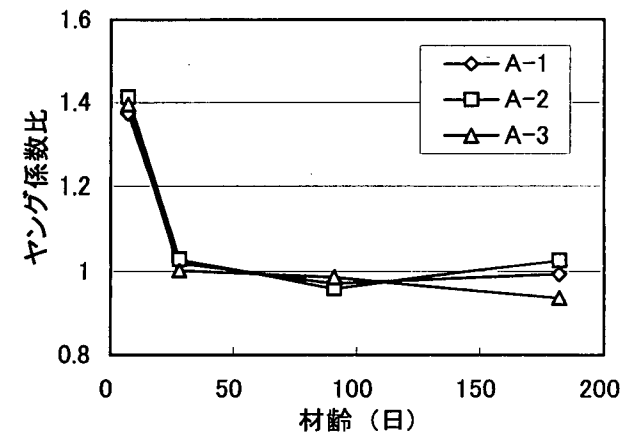
混和剤B

図-4.2.1 圧縮強度

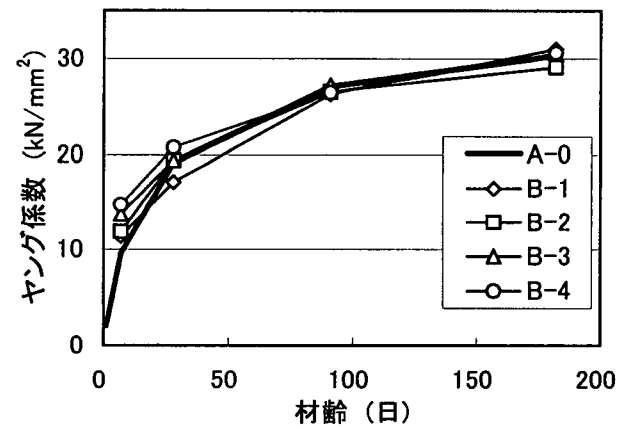
材齢－ヤング係数の関係



ヤング係数比



混和剤A



混和剤B

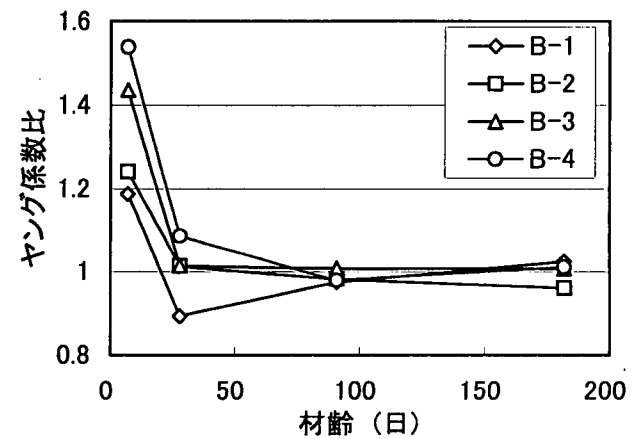


図-4.2.2 ヤング係数

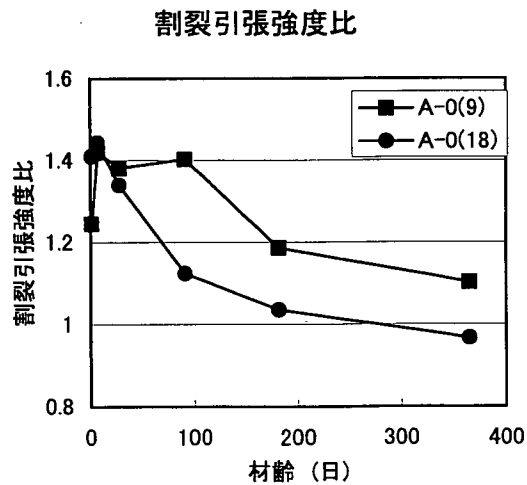
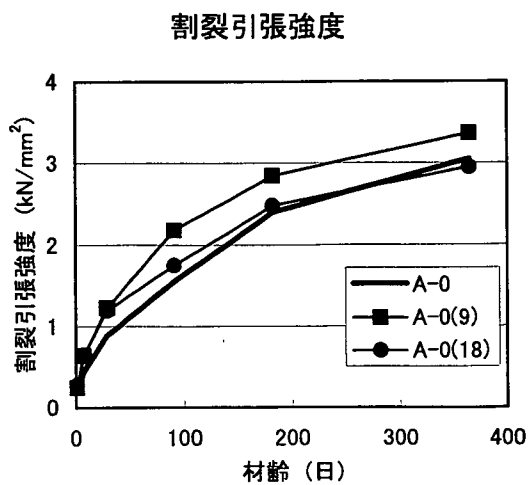
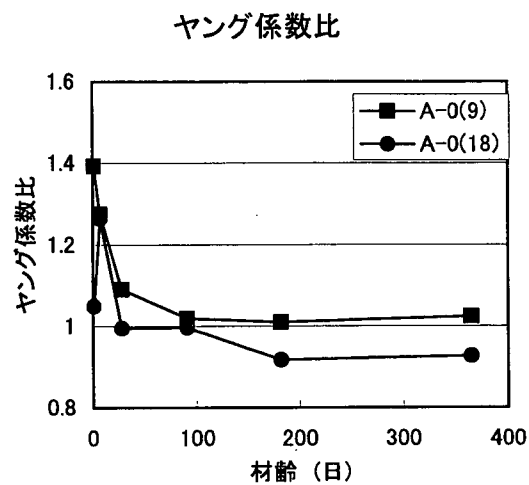
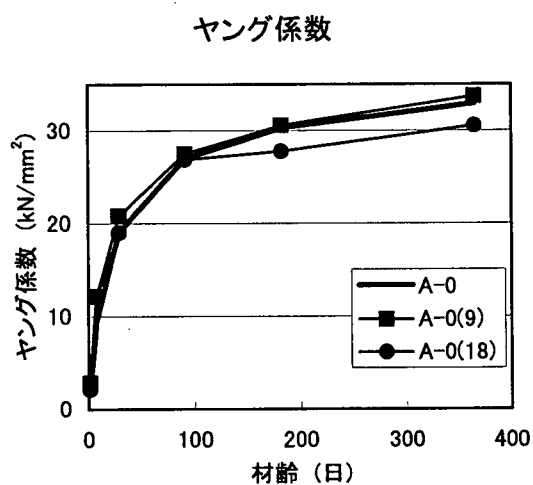
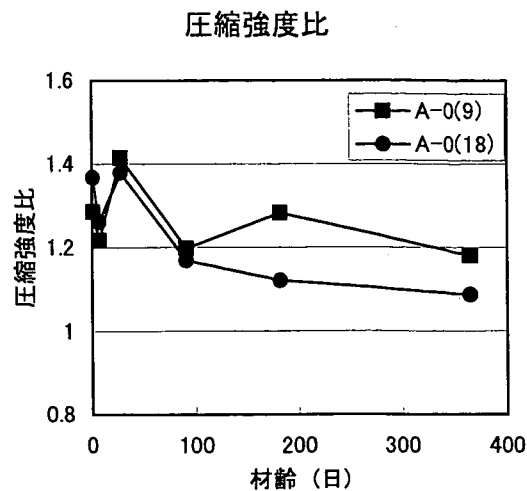
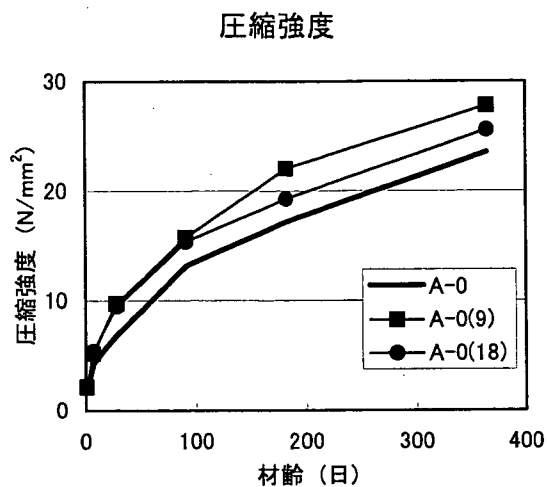


図-4.2.3 混和剤Aの標準添加率の場合の圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度と、スラッジ置換率0%に対する比率

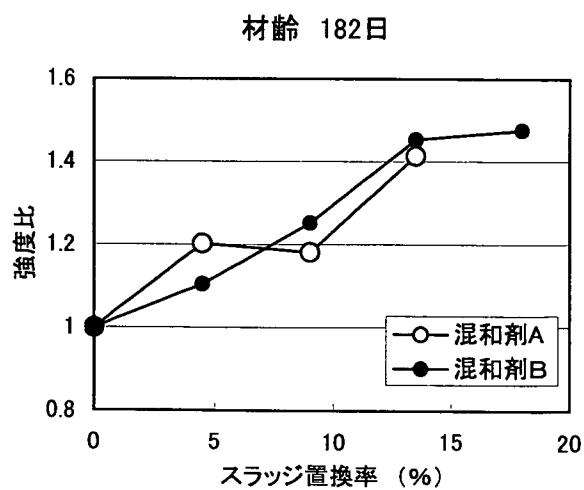
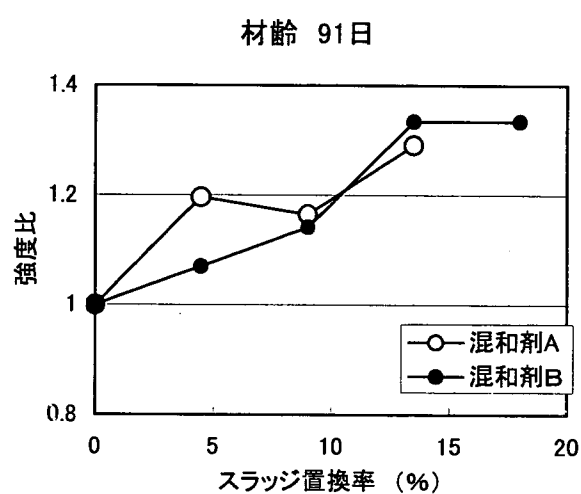
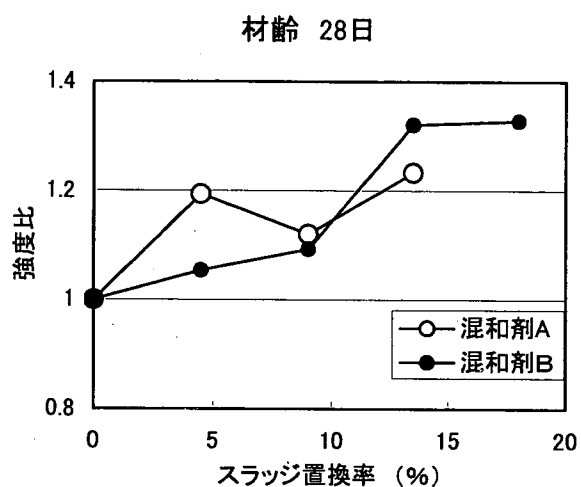
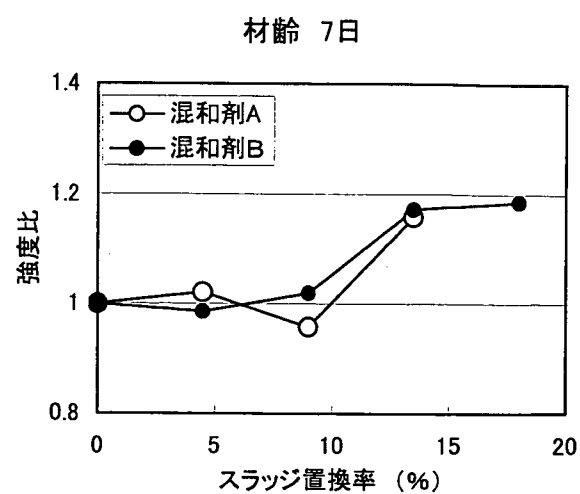
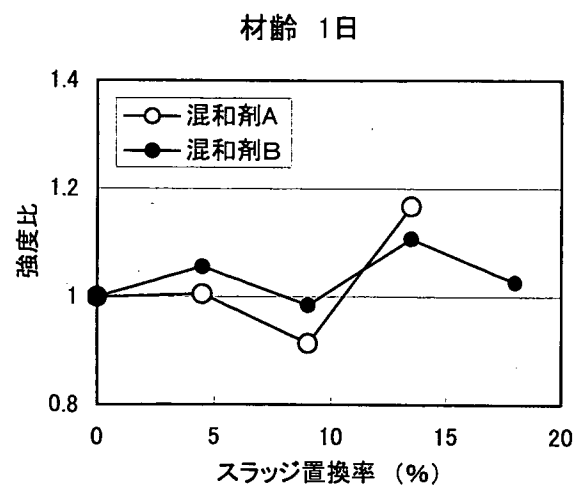


図-4.2.4 スラッジ置換率と置換率0%強度に対する強度比

4.2.3 強度発現特性

(1) 強度発現曲線

スラッジ置換率、混和剤添加率が変化することによる強度発現特性をもう少し詳細に検討するために、式(4.2.1)によって材齢と圧縮強度の関係を回帰し、置換率と回帰係数の関係を検討した。

$$f_{ct} = \frac{t - t_0}{\frac{1}{a} + \frac{t - t_0}{b}} \quad (4.2.1)$$

ここに、 t ：材齢(日)、 t_0 ：硬化が開始する材齢(日)、 a ： $t = t_0$ のときの接線勾配であり、初期の強度発現速度を表わす係数、 b ：最終到達($t = \infty$)強度を表わす係数である。

式(4.2.1)は、双曲線関数であり、記号の説明のとおり、 t_0 から a の速度で強度発現を開始する。しだいに硬化速度がゆっくりになり、最終的には b の強度に収束していくことを表す式である。

回帰した結果を表-4.2.1に示す。回帰係数 t_0 、 a 、 b とスラッジ置換率の関係は図-4.2.5のようになった。

表-4.2.1 強度発現曲線の回帰係数

ケース	混和剤		スラッジ	回帰係数			
	種類	添加率 (%)	置換率 (%)	t_0	a	b	r
A-0	A	0.25	0.0	-7.63	0.278	25.4	0.997
A-0(9)			9.0	-7.84	0.361	31.5	0.995
A-0(18)			18.0	-5.73	0.465	24.3	0.998
A-1		0.5	4.5	-4.96	0.369	28.2	0.998
A-2		0.75	9.0	-5.15	0.330	29.5	0.998
A-3		1.0	13.5	-6.78	0.344	34.1	0.996
B-1	B	1.0	4.5	-6.81	0.302	26.7	0.996
B-2		2.0	9.0	-6.32	0.312	29.5	0.996
B-3		3.0	13.5	-5.18	0.406	31.6	0.997
B-4		4.0	18.0	-4.67	0.425	30.6	0.996

(2) 係数 t_0

まず、硬化開始を表す係数 t_0 は、マイナスになっている。本来、硬化の開始は凝結が終了したあとに始まり、通常 0 ～ 1(日)の範囲にあるはずである。実際に強度試験から t_0 を求めようとするとな多くの時間材齢ごとの強度試験を行なう必要がある。しかし今回は、試験材齢が 1 日、その次が 7 日であり、本来の t_0 を求めるには至らなかった。ただし、図-4.2.5 の (a) 図を見ると、A-0(混和剤 A を標準添加)と B(混和剤 B)はスラッジ置換率が増加すると t_0 は大きく(グラフでは下がっている)なっており、強度発現が早まる傾向があることを示している。それに対し、A(遅延型の混和剤 A)の場合は、今回はスラッジ置換率の増加とともに混和剤添加率も増やしており、混和剤の遅延効果により t_0 が減少傾向にあるものと考えられる。

(3) 係数 a

硬化開始時の硬化速度を表わす係数 a も、(b) 図のとおり A-0 と A、B では傾向が異なっている。A-0 は、スラッジ置換率の増加に伴いほぼ直線的に大きくなっており、スラッジ置換率が大きくなると初

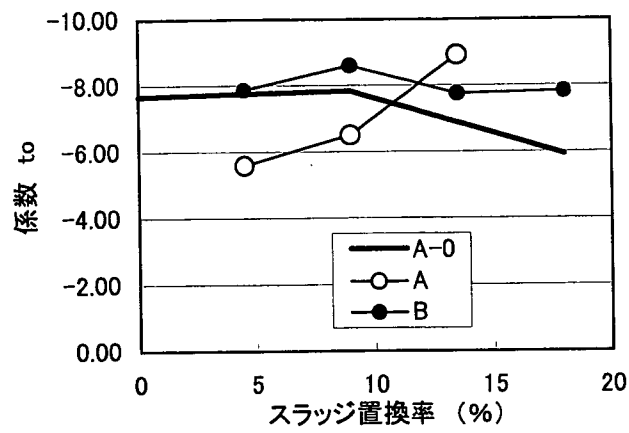
期の強度発現も大きくなることを示している。混和剤 B の係数 a もわずかに増加傾向にあり、スラッジ置換に伴い強度発現効果がわずかにあるものと考えられる。

A はわずかに低下傾向にある。これは、混和剤の遅延効果によるものと考えられ、スラッジ置換による強度増進効果と、混和剤の遅延効果がほぼ打ち消しあっているものと考えられる。

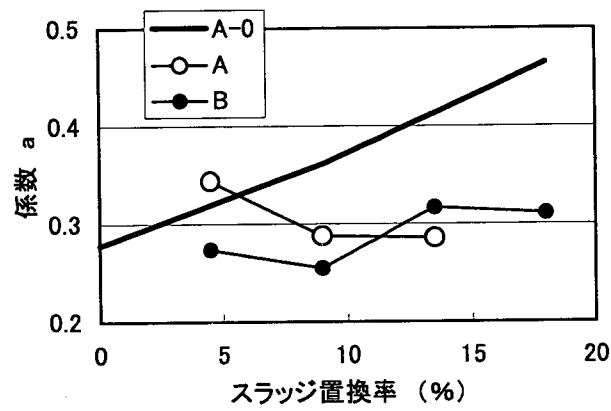
(3) 係数 b

係数 b は(c)図のとおりである。A-0 は、スラッジ置換率 9 %程度が上限になっている。スラッジ置換率を増加させることにより強度も増加するが、混和剤を標準量しか添加せずワーカビリティが低下すると、供試体作製時にコンクリートの充填不良になりやすく、しだいに強度が低下するものと推測される。

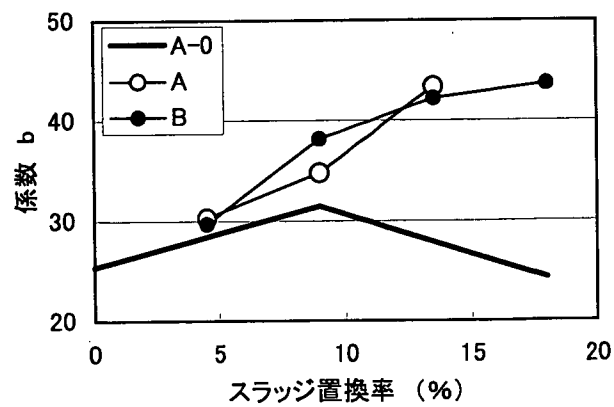
それに対し A, B は、スラッジ置換率が大きくなるほど混和剤添加率を増やして所要のワーカビリティを確保しているので、供試体作製時にはコンクリートの充填も良く、微粉末効果により置換率の増加により強度も増加したものと考えられる。そのため、置換率の増加により係数 b も大きくなり、最終強度も大きくなるものと考えられる。



(a) 係数to



(b) 係数a



(c) 係数b

図-4.2.5 スラッジ置換率と回帰係数の関係

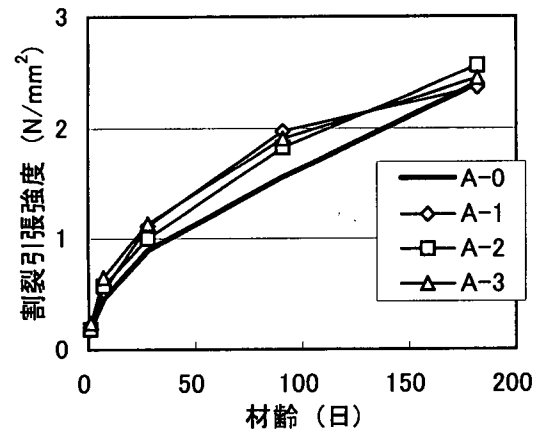
4. 3 割裂引張強度試験結果

材齢と割裂引張強度の関係と、スラッジ置換率 0 %のときの強度に対する各強度の比率を図-4. 3. 1 に示す。混和剤 A を標準添加し、スラッジ置換率を変化させたときの結果は、図-4. 2. 3の下段のとおりであった。

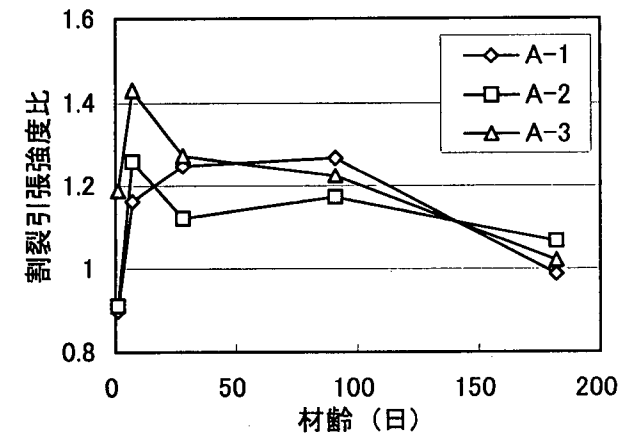
割裂引張強度の結果は、混和剤多量添加の場合、材齢 1 日の強度比が 1 程度になっていることを除くと、標準添加の場合と同じような傾向を示している。すなわち、混和剤が標準添加の場合、初期の強度比が大きく、しだいに一定値に収束している。しかし、混和剤を多量添加すると、材齢 1 日の強度比は約 1 であるが、材齢 7 日では約 1.4 になっており、標準添加の場合とほぼ同じくらい増加している。その後はしだいに低下している。

割裂後、スラッジが均一に混合されているかを確認するため、割裂面の目視観察を行なった。観察の結果、割裂面にスラッジの塊を確認することはなかった。目視観察によって確認できるほど大きな塊は練混ぜ時に解砕されているものと考えられる。

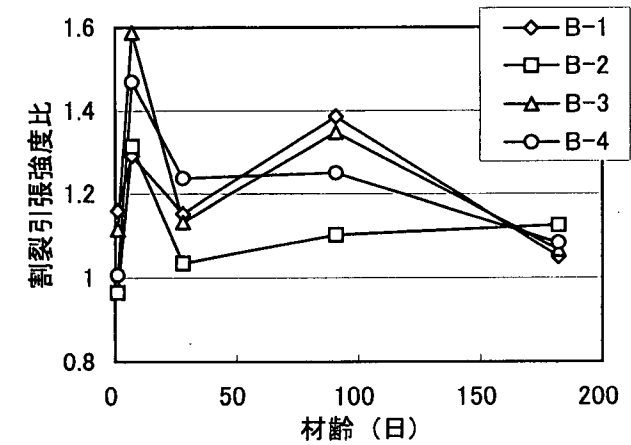
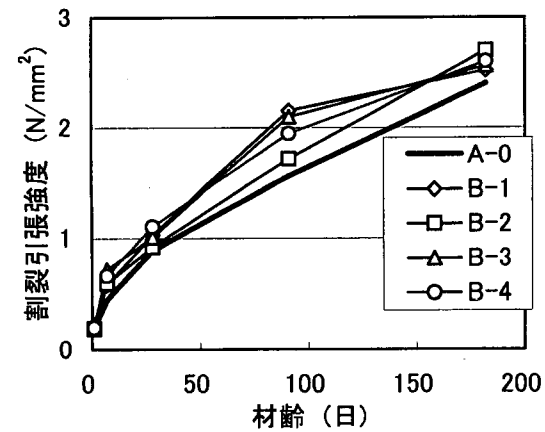
材齢－割裂引張強度の関係



割裂引張強度比



混和剤A



混和剤B

図-4.3.1 割裂引張強度

5章 ま と め

RCD 用コンクリートにスラッジを置換し、置換率を増加させるとワーカビリティは急激に低下する。そのため、混和剤の種類を変え、添加率を増加することによってワーカビリティの改善を図ることができないかどうかについて検討した。合せて、混和剤を多量に添加することから、強度に及ぼす影響についても検討した。これらの実験の結果、次のことが明らかになった。

(1) 混和剤の添加率によって VC 値の制御が可能である。

スラッジ置換率に応じて混和剤の添加率を増やすことにより所要の VC 値を得ることができる。ただし、混和剤の種類によって、VC 値を制御できるスラッジ置換率の上限は異なる。今回の結果では、ダムコンクリートによく用いられている AE 減水剤(混和剤 A)と RCD 用に開発された混和剤(混和剤 B)の効果が高く、標準使用量の 3～4 倍使用することにより、前者はスラッジ置換率 13.5%，後者は 18%でも所要の VC 値を得ることができた。

(2) 混和剤の種類によって経時変化は異なる。

混和剤 A、B について、練混ぜ直後の VC 値の結果からスラッジ置換率に応じて VC 値が 15 秒程度になるように混和剤添加率を決め、経時変化試験を行なった。混和剤 A の場合は、置換率 0%で標準添加率の場合とほぼ同じ経時変化曲線となった。

それに対し、混和剤 B の場合は、スラッジ置換率の増加に伴い混和剤添加率も多くなるにしたがい、経時変化曲線の傾きも緩くなり、施工時間が確保しやすいことがわかった。また、この結果は、混和剤 B を使用することにより、スラッジ置換率を増やすことができる可能性がある。

(3) 混和剤の多量添加により初期の強度増進効果は打ち消されるが、長期的には安定した強度増加が期待できる。

混和剤を標準添加した場合、スラッジを置換していない場合(無置換)と比較して初期強度は大幅に増加するものの、その後は徐々に強度増加率は低下していった。

ところが、今回のように混和剤を多量添加すると、初期強度はその遅延効果により強度増加分は打ち消されてしまい、無置換のものと同程度であった。しかし、長期強度は、混和剤の種類、添加率に係らず 6 ヶ月までは増加していた。また、強度増加率はスラッジ置換率に比例する傾向があった。

以上のように、スラッジ置換率の増加によるワーカビリティの低下は、混和剤を多量添加することにより改善でき、添加率によりワーカビリティを制御することができることから、所要のワーカビリティを確保することができる。また、混和剤多量添加により初期強度の増加は期待できないものの、長期強度の増加は期待できることがわかった。

資 料

1. 配 合	資－1
1. 1 試験練り配合	資－1
1. 2 選定したRCD用の配合	資－2
2. VC試験結果	資－3
2. 1 スラッジ置換率，混和剤添加率とVC値	資－3
2. 2 VC値の経時変化	資－4
3. 強度試験結果	資－5
3. 1 圧縮強度試験結果	資－5
3. 2 割裂引張強度試験結果	資－6
3. 3 混和剤Aの標準添加率（0.25％）の場合の圧縮強度，割裂引張強度試験結果	資－7

1. 配 合

1.1 試験練り配合

混和剤 の種類	スラッ 置換率 (%)	混和剤 添加率 (%)	$\frac{W}{(C+FA)}$ (%)	$\frac{FA}{(C+FA)}$ (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								粗 骨 材 かさ容積	細粗混合 骨 材 かさ容積	
						W	C	F	S	Sa	G (4020)	G (2005)	混和剤 (g/m ³)			
A (No.8)	0.0	0.25	94	30	47.4	133	99.0	42.4	1005.4	0.0	564.9	564.9	1415	0.677	1.032	
		4.5			0.25				46.2	960.2			45.2		1415	1.009
					0.50					960.2			45.2		2830	
	9.0	0.25			45.0				914.9	90.5			1415		0.987	
		0.50							914.9	90.5			2830			
		1.00							914.9	90.5			5660			
	13.5	0.50			43.8				869.7	135.7			2830		0.964	
		1.00							869.7	135.7			5660			
		18.0							0.25	42.5			824.5			181.0
	1.00				824.5				181.0				5660			
	1.50				824.5				181.0				8489			
	B (RD100)	4.5			1.00				94	30			46.2		133	99.0
2.00			45.0	960.2	45.2	2830	0.987									
1.00				914.9	90.5	1415										
9.0		2.00	45.0	914.9	90.5	2830	0.964									
		2.00		869.7	135.7	2830										
		3.00		869.7	135.7	4245										
13.5		2.00	43.8	824.5	181.0	2830	0.942									
		3.00		824.5	181.0	4245										
		4.00		824.5	181.0	5660										
18.0		2.00	42.5	914.9	90.5	1415	0.987									
		3.00		914.9	90.5	2122										
		4.00		914.9	90.5	2830										
C (SP8S)	9.0	1.00	94	30	45.0	133	99.0	42.4	914.9	90.5	564.9	564.9	1415	0.677	0.987	
		1.50							914.9	90.5			2122			
		2.00							914.9	90.5			2830			

1.2 選定したRCD用の配合

混和剤 の種類	スラッジ 置換率 (%)	混和剤 添加率 (%)	$\frac{W}{(C+FA)}$ (%)	$\frac{FA}{(C+FA)}$ (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								粗 骨 材 かさ容積	細粗混合 骨 材 かさ容積
						W	C	FA	S	Sa	G (4020)	G (2005)	混和剤 (g/m ³)		
No.8	4.5	0.50	94.0	30.0	46.2	133.0	99.0	42.4	960.2	45.2	564.9	564.9	2830	0.677	1.009
	9.0	0.75			45.0				914.9	90.5			4245		0.987
	13.5	1.00			43.8				869.7	135.7			5660		0.964
RD100	4.5	1.00	94.0	30.0	46.2	133.0	99.0	42.4	960.2	45.2	564.9	564.9	1415	0.677	1.009
	9.0	2.00			45.0				914.9	90.5			2830		0.987
	13.5	3.00			43.8				869.7	135.7			4245		0.964
	18.0	4.00			43.1				844.6	160.9			5660		0.952

2. VC試験結果

2.1 スラッジ置換率, 混和剤添加率とVC値

混和剤A

測定項目	スラッジ 置換率 (%)	混和剤添加率 (C+F)*%			
		0.25	0.5	1.0	1.5
VC値 (秒)	0.0	10.8			
	4.5	18.6	12.7		
	9.0	28.0	17.9	11.1	
	13.5		31.2	20.4	
	18.0	81.7		31.0	33.6
締固め率 (%)	0.0	99.6			
	4.5	97.5	96.3		
	9.0	95.4	96.1	99.2	
	13.5		95.0	96.7	
	18.0	91.6		97.0	96.7

混和剤B

測定項目	スラッジ 置換率	混和剤添加率 (C+F)*%			
		1.0	2.0	3.0	4.0
VC値 (秒)	0.0				
	4.5	14.2	10.2		
	9.0	27.9	16.0		
	13.5		22.4	15.1	
	18.0		39.5	20.2	20.3
締固め率 (%)	0.0				
	4.5	95.7	99.3		
	9.0	97.2	100.1		
	13.5		98.3	98.0	
	18.0		97.7	98.5	96.9

混和剤C

測定項目	スラッジ 置換率	混和剤添加率 (C+F)*%			
		1.0	1.5	2.0	
VC値 (秒)	0.0				
	4.5				
	9.0	38.2	25.6	23.0	
	13.5				
	18.0				
締固め率 (%)	0.0				
	4.5				
	9.0	95.8	96.8	95.6	
	13.5				
	18.0				

2.2 VC値の経時変化

混和剤A

時間 (分)	VC値 スラッジ置換率 (%)			
	0.0	4.5	9.0	13.5
0	14.5			
60	17.7			
120	42.5			
180	119.7			
240	160			
8		10.0		
69		32.4		
129		60.0		
204		120.0		
12			16.2	
59			31.1	
133			82.5	
188			120<	
13				16.3
69				20.9
100				44.5
136				70.0
181				120.0
206				120<

時間 (分)	締固め率 スラッジ置換率 (%)			
	0.0	4.5	9.0	13.5
0	97.4			
60	94.4			
120	95.7			
180	91.2			
240	94.3			
8		97.5		
69		97.9		
129		94.9		
204		94.7		
12			98.5	
59			99.3	
133			97.1	
188			93.5	
13				96.2
69				95.1
100				96.3
136				96.3
181				94.6
206				92.7

混和剤B

時間 (分)	VC値 スラッジ置換率 (%)			
	4.5	9.0	13.5	18.0
13	12.3			
65	18.9			
126	58.0			
199	120<			
9		10.1		
58		14.2		
133		42.7		
188		90.5		
234		120<		
12			12.9	
69			14.9	
120			25.9	
153			33.5	
223			92.5	
12				18.5
54				23.3
112				17.7
156				22.3
215				33.3
277				80.3
327				120<

時間 (分)	締固め率 スラッジ置換率 (%)			
	4.5	9.0	13.5	18.0
13	99.0			
65	95.1			
126	93.3			
199	94.3			
9		97.2		
58		97.6		
133		94.8		
188		91.7		
234		93.3		
12			99.1	
69			96.8	
120			95.1	
153			95.5	
223			94.5	
12				98.6
54				97.5
112				96.6
156				96.3
215				95.3
277				94.5
327				93.1

3. 強度試験結果

3.1 圧縮強度試験結果

ケース	スラッジ 置換率 (%)	混和剤		材 齢 (日)	圧縮強度試験			A-0に対する比率	
		種類	添加率 (%)		密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度	ヤング係 数
A-0	0.0	A	0.25	1		1.68	2.03		
				7		4.28	9.57		
				28		6.90	19.13		
				91		13.15	27.00		
				182		17.19	30.30		
A-1	4.5		0.5	1	2.389	1.69	-	1.005	-
				7	2.415	4.37	13.14	1.021	1.373
				28	2.418	8.24	19.53	1.194	1.021
				91	2.416	15.73	26.25	1.197	0.972
				182	2.420	20.70	30.10	1.204	0.993
A-2	9.0		0.75	1	2.394	1.53	-	0.913	-
				7	2.403	4.10	13.51	0.958	1.413
				28	2.418	7.73	19.70	1.120	1.030
				91	2.414	15.32	25.91	1.165	0.960
				182	2.415	21.30	31.10	1.239	1.026
A-3	13.5		1.0	1	2.386	1.96	-	1.168	-
				7	2.404	4.96	13.35	1.159	1.396
				28	2.410	8.52	19.17	1.234	1.002
				91	2.423	16.98	26.64	1.291	0.987
				182	2.416	24.30	28.40	1.414	0.937
B-1	4.5	B	1.0	1	2.400	1.77	-	1.056	-
				7	2.410	4.23	11.36	0.986	1.187
				28	2.397	7.28	17.10	1.055	0.894
				91	2.421	14.07	26.29	1.070	0.974
				182	2.413	19.00	31.00	1.105	1.023
B-2	9.0		2.0	1	2.389	1.65	-	0.984	-
				7	2.406	4.37	11.87	1.019	1.241
				28	2.409	7.55	19.37	1.093	1.013
				91	2.425	15.01	26.50	1.142	0.982
				182	2.408	21.50	29.10	1.251	0.960
B-3	13.5		3.0	1	2.402	1.86	-	1.108	-
				7	2.413	5.02	13.73	1.172	1.435
				28	2.438	9.12	19.38	1.321	1.013
				91	2.434	17.54	27.20	1.334	1.007
				182	2.434	25.00	30.50	1.455	1.007
B-4	18.0		4.0	1	2.412	1.72	-	1.027	-
				7	2.410	5.08	14.71	1.186	1.538
				28	2.428	9.17	20.75	1.328	1.085
				91	2.417	17.54	26.41	1.334	0.978
				182	2.423	25.40	30.60	1.478	1.010

3.2 割裂引張強度試験結果

ケース	スラッジ 置換率 (%)	混和剤		材 齢 (日)	割裂引張強度試験		A-0に対す る比率
		種類	添加率 (%)		密度 (g/cm ³)	割裂引張 強度 (N/mm ²)	
							割裂引張 強度
A-0	0.0	A	0.25	1		0.20	
				7		0.45	
				28		0.89	
				91		1.56	
				182		2.40	
A-1	4.5		0.5	1	2.407	0.18	0.897
				7	2.361	0.53	1.162
				28	2.424	1.11	1.248
				91	2.442	1.97	1.267
				182	2.430	2.37	0.987
A-2	9.0		0.75	1	2.414	0.18	0.910
				7	2.473	0.57	1.259
				28	2.424	1.00	1.121
				91	2.423	1.82	1.172
				182	2.410	2.56	1.066
A-3	13.5		1.0	1	2.424	0.23	1.188
				7	2.419	0.65	1.430
				28	2.437	1.13	1.273
				91	2.437	1.90	1.224
				182	2.426	2.45	1.021
B-1	4.5	B	1.0	1	2.424	0.23	1.160
				7	2.420	0.58	1.291
				28	2.428	1.03	1.152
				91	2.427	2.16	1.386
				182	2.421	2.52	1.050
B-2	9.0		2.0	1	2.404	0.19	0.965
				7	2.413	0.59	1.314
				28	2.400	0.92	1.034
				91	2.445	1.71	1.102
				182	2.417	2.70	1.125
B-3	13.5		3.0	1	2.414	0.22	1.116
				7	2.435	0.72	1.588
				28	2.414	1.01	1.132
				91	2.386	2.10	1.348
				182	2.426	2.56	1.066
B-4	18.0		4.0	1	2.408	0.20	1.007
				7	2.422	0.66	1.469
				28	2.417	1.10	1.237
				91	2.422	1.95	1.250
				182	2.454	2.60	1.083

3.3 混和剤Aの標準添加率(0.25%)の場合の圧縮強度、割裂引張強度試験結果

ケース	スラッジ 置換率 (%)	混和剤		材 齢 (日)	圧縮強度試験					割裂引張強度試験		
		種類	添加率 (%)		密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	A-0に対する比率		密度 (g/cm ³)	割裂引張 強度 (N/mm ²)	A-0に対す る比率 割裂引張
								圧縮強度	ヤング係数			
A-0	0.0	A	0.25	1	2.401	1.68	2.0			2.344	0.20	
				7	2.404	4.28	9.6			2.377	0.45	
				28	2.390	6.90	19.1			2.397	0.89	
				91	2.410	13.15	27.0			2.415	1.56	
				182	2.402	17.19	30.3			2.379	2.40	
				365	2.417	23.54	32.9			2.407	3.05	
A-0(9)	9.0			1	2.403	2.16	2.8	1.286	1.393	2.403	0.25	1.245
				7	2.412	5.22	12.2	1.218	1.275	2.423	0.64	1.421
				28	2.420	9.77	20.9	1.415	1.091	2.393	1.23	1.381
				91	2.418	15.75	27.5	1.198	1.020	2.424	2.18	1.403
				182	2.418	22.04	30.6	1.282	1.010	2.427	2.85	1.187
				365	2.429	27.78	33.7	1.180	1.024	2.406	3.36	1.102
A-0(18)	18.0			1	2.387	2.30	2.1	1.368	1.049	2.407	0.28	1.410
				7	2.403	5.40	12.1	1.262	1.265	2.401	0.65	1.444
				28	2.407	9.52	19.0	1.379	0.995	2.419	1.19	1.340
				91	2.411	15.37	26.9	1.169	0.996	2.429	1.75	1.124
				182	2.404	19.27	27.8	1.121	0.917	2.425	2.49	1.035
				365	2.413	25.60	30.5	1.087	0.927	2.436	2.95	0.967