

論文 微粒分の品質評価試験方法に関する検討

森濱和正*¹・河野広隆*²

要旨：骨材製造時に発生する大量の石粉の有効利用を図るため、コンクリートのワーカビリティ改善を目的に、超硬練りのRCD用コンクリートや高流動コンクリートへの適用を考え、その為の品質評価方法について検討した。その結果、石粉の比表面積、および充填性が重要であることがわかった。また、特にRCD用コンクリートの場合は細骨材、粗骨材も含めた充填性も重要である。

キーワード：石粉、充填性、比表面積、RCD用コンクリート、高流動コンクリート

1. はじめに

ダムコンクリート用骨材は、省資源、省エネルギー、環境保全などの観点から低品質骨材を使用せざるを得ない状況にある。低品質骨材を使用すると、ワーカビリティが低下し単位水量が増えるなどコンクリート品質の低下に加え、骨材製造時に大量の石粉が発生するという問題がある。そこで、この石粉を有効に利用し、コンクリートのワーカビリティをコントロールすることを目的に品質評価方法について検討した。

2. 石粉に要求される性能

対象としたコンクリートは、ダムの外部用のスランプを有する(有スランプ)コンクリート、超硬練りのRCD用コンクリート、高流動コンクリートの3種類である。

RCD用コンクリートはローラで転圧するためのコンクリートであり、材料分離しにくく、ローラが載ってもあまり沈下せず転圧できる“硬さ”を有すると同時に所要の品質が得られる“締め固めやすさ”が必要である。このような相異なる品質を持たせるために微粒分に要求される性能は、材料分離抵抗性を高めるため粘性を増す「増粘性」と、骨材に付着して潤滑材の

役割を果たす「潤滑性」が重要と考えられる。

高流動コンクリートも「フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく、流動性を著しく高めたコンクリート」¹⁾と定義されており、RCD用コンクリート以上に流動性を改善する効果「分散性」が重要と考えられる。

また、微粒分の空隙を充填し、さらに流動性を与えるために微粒分の粒子間の距離を確保するために必要な水量を得るために「充填性」や「比表面積」も必要と考えられる。

有スランプコンクリートには、それらの中間の品質が必要と考えられる。

3. 試料

3.1 試料骨材

石粉の製造およびコンクリートに使用した骨材は、表-1の2種類である。Y骨材は、砂岩と頁岩が混ざっているものである。風化の程度により、比較的良好的なものをCM種、風化が進み茶色に変質したものをCL種に分類した。Ks骨材は花崗岩であり、これも風化の程度によりB種、C種に分類した。骨材の物理試験結果は表-2のとおりである。

Y骨材、Ks骨材の比較的良好的なCM種、B種と、低品質のCL種、C種では密度、吸水率

* 1 建設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)

* 2 建設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)

表-1 実験に使用した骨材の種類

骨材	岩種	分類	特徴	粒径(mm)
Y	砂岩, 頁岩の混合	CM (砂質, 泥質) CL	節理が発達し, 最大寸法40mm程度までしか採取できない。風化により灰色→茶色に変色	40~5
Ks	花崗岩	B, C	風化により灰色→弱茶色に変色	150~5

※分類は, 良質なものから低品質の順である。

に品質の違いは現れてはいるものの, 密度は 2.6g/cm^3 以上, 吸水率も 1% 程度であり, 砕石, 砕砂の基準である JIS A 5005 を満足している。安定性損失質量は, Y 粗骨材の CM 種が 33.0%, CL 種が 19.3% と大きかったものの, そのほかは良好である。

3.2 石粉の製造方法

石粉は, 表-3 のように骨材をクラッシュで破碎して製造したものと, 骨材製造時に集塵機で粉塵を採取したものの 2 種類ある。

Y 骨材の場合は, CM 種をディスククラッシュで破碎して製造し, ふるいによって 0.15mm 以下に分級したものを試料とした。

Ks 骨材の場合は, B 種, C 種それぞれから, 骨材製造をコーンクラッシュを用いて水を使わない乾式で行い, 集塵機によって採取したものの (添字 1) と, Y 骨材と同様にディスククラッシュで製造したものの (添字 2) である。

4. 微粒分の品質

4.1 試験項目と試験方法

まず, 微粒分の基本的特性である密度, 粒度分布, 比表面積, 粒子形状を測定した。密度は JIS R 5201 に準じて測定した。粒度分布はレーザー回折により測定した。比表面積は, JIS R 5201 による空気透過法および窒素吸着法の BET 法によって測定した。また文献 2) ではメチレンブルー吸着量と比表面積の間に相関関係があることが報告されており, メチレンブルー吸着量も測定した。粒子形状は電子顕微鏡写真によって確認した。

充填性を把握するため, かさ密度を測定し実

表-2 骨材の物理試験結果

骨材の種類		表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	安定性 損失 質量 (%)	FM	50% 平均 粒径 (mm)	
細 骨 材	Y	CM	2.640	2.609	1.17	—	2.20	0.94
		CL荒	2.604	2.566	1.48	—	3.17	1.15
		CL細	2.611	2.579	1.20	—	1.22	0.25
	Ks	B	2.616	2.585	1.21	1.60	2.72	0.77
		C	2.609	2.584	0.98	2.31	2.68	0.75
粗 骨 材	Y	CM	2.660	2.632	1.07	33.0	6.44	11.9
		CL	2.624	2.597	0.91	19.3	6.75	11.4
	Ks	B	2.643	2.617	1.01	2.54	7.34	19.2
		C	2.624	2.587	1.41	6.80	7.30	21.1

表-3 石粉の分類

骨材	分類	記号	製造方法	対象コンクリート
Y	CM	YCM	クラッシュで作製	RCD
Ks	B	KsB1	骨材製造時に集塵機により採取	RCD 有スランブ
	C	KsC1		
	B	KsB2	クラッシュで作製	高流動
	C	KsC2		

積率, 間隙比を求めた。かさ密度の測定には, 粉体特性総合測定装置 (パウダーテスター) を用いた。かさ密度はタッピングを 180 回実施後の結果である。

潤滑性に関してここでは, 内部摩擦角と, 気中および水中における安息角を測定した。内部摩擦角は, 土質試験で行われている一面せん断試験により, 垂直応力を $0.049, 0.098, 0.196\text{N/mm}^2$ としたときの最大せん断応力から求めた。安息角の測定にもパウダーテスターを用いた。

分散性に関してはゼータ電位を測定した。試料 0.5g に対し, 飽和硫酸カルシウム溶液 50g を加えて 10 分間攪拌して試験試料とし, ゼータ電位測定装置のセルに投入し, その 10 分後にゼータ電位を測定した。

増粘性に関しては, 石粉はセメントなどのよ

表-4 粉体試験結果

試験項目	単位	セメント			混和材		石粉					
		M1	M2	N	F1	F2	YCM	KsB1	KsC1	KsB2	KsC2	
密度	g/cm ³	3.21	3.20	3.16	2.36	2.05	2.70	2.66	2.67	2.65	2.65	
かさ密度	g/cm ³	1.699	1.481	1.673	1.461	1.113	1.589	1.427	1.493	1.665	1.604	
実積率	%	52.9	46.3	53.0	61.9	50.1	58.8	53.4	55.9	62.8	60.5	
間隙比	%	0.890	1.160	0.887	0.616	0.996	0.701	0.873	0.789	0.592	0.653	
比表面積	空気透過法	cm ² /g	3580	3490	3490	3680	2920	4300	3460	3540	2270	1450
	BET法	m ² /g	0.767	0.674	0.737	1.780	0.821	3.160	1.612	1.297	0.921	0.813
粒度分布	平均径	μm	10.2	13.4	11.7	9.7	23.1	11.9	27.1	29.1	44.0	56.0
安息角	気中	deg	57	—	58	52	—	56	—	—	—	—
	水中	deg	49	—	56	43	—	38	—	—	—	—
内部摩擦角	deg	24.9	—	26.0	27.2	—	26.6	—	—	—	—	
ゼータ電位	mV	74	67	72	63	57	64	53	52	60	56	
メチレンブルー吸着量	mg/g	—	—	—	0.38	0.22	2.89	2.23	2.35	0.99	1.01	
粒度分布の式(1)による回帰	回帰係数	n	0.842	1.204	0.842	0.774	1.284	0.637	1.100	1.019	0.698	1.285
		b	275.4	2245.4	242.7	167.7	1458.6	51.2	521.2	288.1	38.0	1465.7
	比表面積	m ² /g	1.972	0.418	1.721	4.028	0.269	9.535	0.312	0.350	1.753	0.109

M1, M2 : 中庸熟ポルトランドセメント, N : 普通ポルトランドセメント, F1, F2 : フライアッシュ

うに反応性はほとんど考えられないので、細かさが重要であり、比表面積で代表できるものと考えた。

4.2 試験結果

石粉とセメント、フライアッシュ（以下、これらを総称して「粉体」と呼ぶ）の品質の試験結果を表-4に示す。

粒度分布を求め通過率 50%のときの粒子径を平均径とし、表-4に示した。粒度分布を次式のロージン・ラムラー式で回帰して求めた係数も表-4に示した。

$$R(D_i) = 100 \cdot \exp(-b \cdot D_i^n) \quad (1)$$

ここに、R(D_i) : 通過累積百分率(%), D_i : 粒子径, b, n : 回帰係数。nは均等数と呼ばれ、粒度分布の範囲を表す係数であり、値が小さいほど広い粒度分布となる。

粒子形状は、フライアッシュはきれいな球形をしていた。石粉およびセメントNは角ばっていたが、セメントMの角は丸味をおびていた。

図-1に細骨材、粗骨材を加えた平均径と粒度法(式(1)から求める方法³⁾)による比表面積の関係を示すようによい相関がある。メチレンブルー吸着量と比表面積の関係は明確ではなかった。

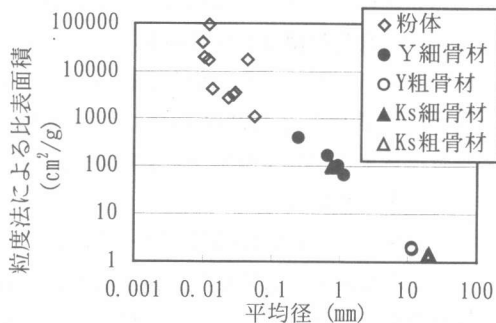


図-1 粉体、細骨材、粗骨材の平均径と比表面積の関係

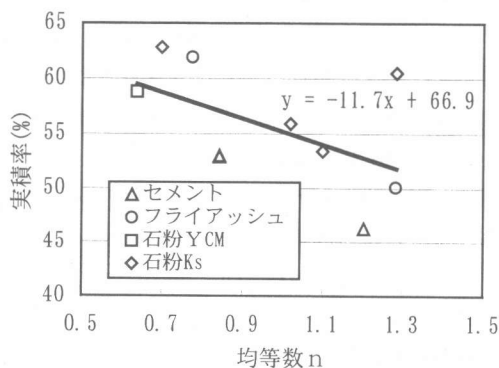


図-2 均等数nと実積率の関係

均等数nと実積率の関係を図-2に示す。nが小さく、粒度分布が広がるほど実積率は大きくなるという一般的な傾向を示している。

内部摩擦角は表-4のとおり、粉体の種類の違いは明確ではなかった。

安息角は図-3のように気中の試験ではF1 < M1 < YCM < Nの順に大きくなっており、ほぼ粒子形状による潤滑性を表している。水中の場合、F1よりYCMの方が小さくなっている。

ゼータ電位は、図-4のようにセメントに比べ石粉、フライアッシュはわずかに小さい。

5. コンクリートのコンシステンシー試験

3種類のコンクリートについて微粒分率を変化させたときのコンシステンシー試験を行った。ここで微粒分率とは、石粉量と細骨材中に含まれている0.15mm以下の微粒分量を細骨材量(石粉および微粒分を含む)で割った値である。

5.1 RCD用コンクリート

RCD用コンクリートの配合を表-5に示す。石粉量は細骨材の5,10,20%置換した。また、細骨材に含まれている微粒分を取り除いた場合についても試験した。

微粒分率とVC値の関係は、図-5のように微粒分率が増えると次第にVC値は低下し、ある微粒分率から増加に転じ、VC値が最小になる微粒分率(最適微粒分率と呼ぶ)が存在する。最適微粒分率を二次曲線で回帰して求めると、Y骨材の混合種14.9%、CL種14.7%、Ks骨材16.8%であった。また、図-5より微粒分率の変化がVC値に与える影響が異なることがわかる。表-4から石粉の特性を比較すると、

YCMはKsB1、KsC1に比べ実積率、ゼータ電位と、特に比表面積が大きい。石粉が最適微粒分率より多くなると水が拘束されやすくなりVC値の変化が大きくなっている。

図-6はモルタルのレオロジー試験結果であり、いずれの結果も

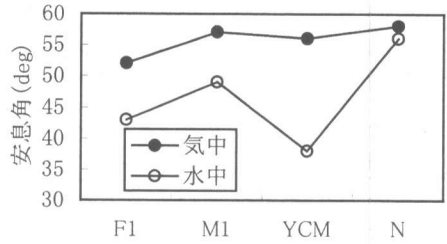


図-3 粉体の安息角

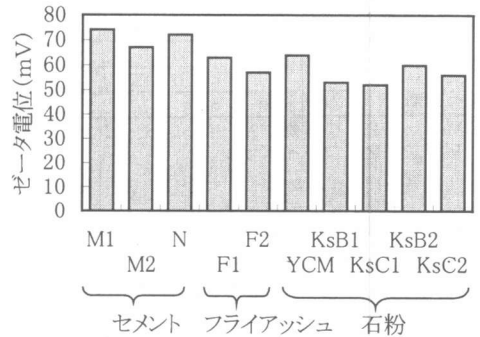


図-4 粉体のゼータ電位

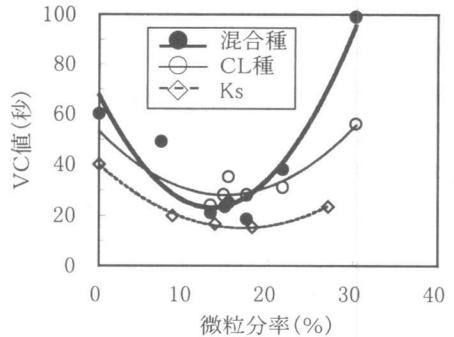


図-5 微粒分率とVC値の関係

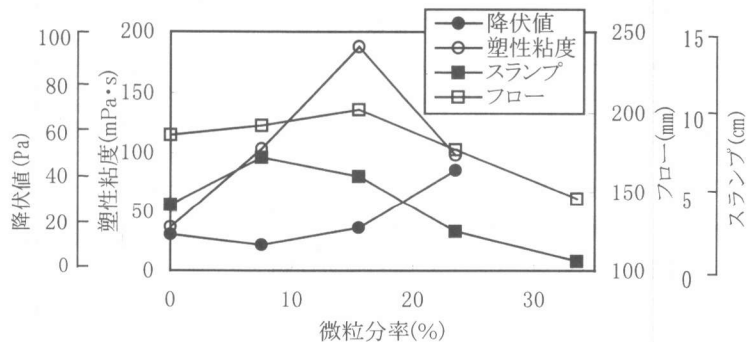


図-6 RCD用のモルタルのレオロジー、スランプ、フロー試験結果

表-5 配合表

コンクリートの種類	使用材料				コンステンション		目標	W/B	FA/B	s/a	単位量(kg/m ³)					混和剤
	石粉	セメント	FA	骨材	試験	目標値	空気量				%	%	%	W	C	
RCD	YCM	M1	F1	Y-混合	VC	30秒	—	80.7	50	38	113	70	70	833	1367	AE減水剤 B× 0.25%
	YCM	M1	F1	Y-CL	VC	30秒	—	82.9	50	38	116	70	70	829	1353	
	KsB1	M2	F2	Ks-混合	VC	20秒	—	76.3	30	40	122	112	48	844	1278	
有スランブ	KsB1 KsC1	M2	F2	Ks-混合	スランブ	5cm	4.5	51.7	30	40	155	210	90	723	1090	同上 +AE剤
高流動	KsB2 KsC2	M2	F2	Ks-混合	スランブ 70-	60cm	4.5	53.3	30	45.5	160	210	90	931	882	

高流動は石粉200kg/m³の場合を示す。混和剤量は式(2)で計算した値を使用。

表-6 各かさ容積比

コンクリートの種類		ペースト	モルタル		コンクリート	
		p	g	g'	r	r'
RCD	Y-混合	0.790	0.864 (0.755)	1.096	0.895 (0.786)	1.078 (0.978)
	Y-CL	0.755	0.876 (0.765)	1.081	0.885 (0.777)	1.080 (0.980)
	Ks	0.750	0.851 (0.747)	1.125	0.808 (0.785)	1.005 (0.982)
	有スランブ	0.658	0.704	1.035	0.689	0.882
	高流動 (石粉200kg/m ³)	0.840	0.624 (0.632)	1.193	0.558 (0.629)	0.768 (0.828)

() 内は、RCDの場合実積率をVC試験機を用い振動させて求めたもの、高流動の場合骨材を落下させたのみの実積率を計算に使用。

上に凸または下に凸になっており、図-5のVC試験結果と同様の挙動をしている。

これは、粉体や骨材の充填性が影響しているものと考え、ペースト容積に占める粉体のかさ容積の比を「粉体かさ容積比：p」、同様にモルタル容積に占める細骨材かさ容積比：g、粉体と細骨材混合物（粉粒体）かさ容積比：g'、コンクリートに占める粗骨材かさ容積比：r、細骨材と粗骨材の混合（細粗混合）かさ容積比：r'を求め（図-7）、最適微粒分率のときの値を表-6に示した。例えば、RCD用コンクリートのY-混合のp=0.79は、ペースト容積の0.79は粉体かさ容積が占め、粉体の空隙と残りの空隙0.21は水が占めていることを示す。同様にr'のカッコ内の値を見ると3種類とも0.98であった。細粗混合骨材の空隙以外の空隙を埋めているペーストは0.02だけであることを示しており、締固めを行うにあたってほぼ極限のペースト量になっている。

5.2 有スランブコンクリート

有スランブコンクリートの配合も表-5に示す。

石粉は細骨材の5,10%を置換した。また細骨材に含まれる微粒分を取り除いた場合についても試験した。

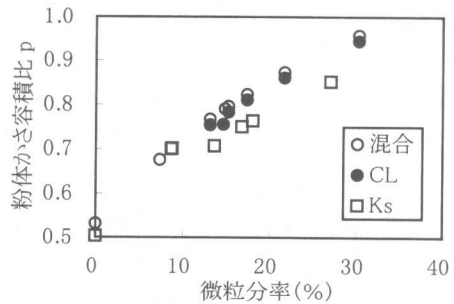


図-7 RCD用コンクリートの微粒分率と粉体かさ容積比の関係

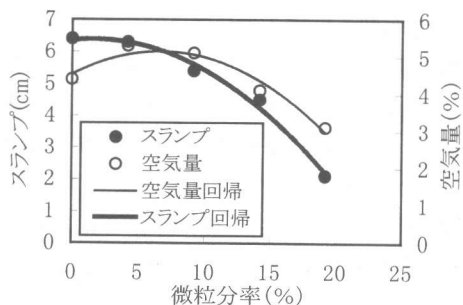


図-8 微粒分率とスランブ、空気量の関係

微粒分率とスランプ、空気量の結果を図-8に示す。微粒分率の増加に伴いスランプが急激に低下している。空気量の最大値の時を最適微粒分率とすると8.7%であった。その時の各かさ容積比も表-6に示した。RCD用コンクリートよりほぼ0.1程度小さい値になっており、通常よく用いられる単位粗骨材かさ容積比 r は0.69であり、ほぼ妥当な値である。

5.3 高流動コンクリート

高流動コンクリートは表-7のように6因子について3水準変化させた27配合についてスランプおよびスランプフロー試験を行った。

スランプとスランプフローの関係は、図-9のようにスランプ20cmまではスランプフローの増加もわずかであるが、スランプ20cm以上になるとスランプフローも急激に大きくなっている。そこでスランプ20cm（スランプフロー約30cm）以上について、スランプフローと表-7の6因子による重回帰を行うと次式のようにになった。

$$Sf = 0.893A + 6.22B + 0.015C - 0.0028D - 7.09E + 266.2F - 301.3 \quad (2)$$

ここに、Sf: スランプフロー(cm), A~F: 表-7の因子である。

式(2)より、単位水量A、高性能AE減水剤量Bが増えればスランプフローは大きくなり、増粘剤Dが増えると小さくなるという一般的な傾向を示している。しかし、石粉量Cはわずかではあるが増えればスランプフローも大きくなる結果となっており、増粘効果が期待できない結果となった。この理由は、使用した石粉は表-4のように平均径が大きく、比表面積が小さいためと考えられる。

表-5には、式(2)から石粉量200kg/m³、スランプフロー60cmのときの配合を求め、そのときの各かさ容積比を表-6に示した。

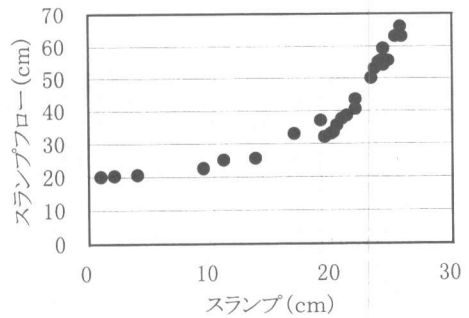


図-9 スランプとスランプフローの関係

表-7 因子と水準

因子	単位	水準		
		1	2	3
A 単位水量	kg/m ³	155	160	165
B 高性能AE減水剤量	%	3	4	5
C 石粉量	kg/m ³	100	200	300
D 増粘剤量	kg/m ³	0	0.2	0.4
E AE剤量	%	0.009	0.012	0.015
F 単位粗骨材かさ容積	m ³ /m ³	0.50	0.55	0.60

6. まとめ

骨材製造時に発生する石粉の有効利用を図るため、RCD、有スランプ、高流動というコンシステンシーの極端に違うコンクリートに適用してワーカビリティをコントロールすることを考え、品質評価試験を行った。コンクリートの種類ごとに使用した骨材、石粉が異なり、系統的な検討とはならなかったが、比表面積は重要なファクターであること、粉体はもちろん細骨材、粗骨材も含めた充填性も重要なことがわかった。

【参考文献】

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，コンクリートプラ-93，p.5，1998.7
- 2) 大橋正治他：砕石粉の品質評価試験方法ならびに品質基準に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.393-398，1995.7
- 3) 粉体工学会：粉体工学便覧，日刊工業新聞社，pp.7-11，1986.2