

## ◆ リサイクル特集 ◆

# 骨材製造時に発生する石粉の RCD 用コンクリートへの利用

森濱和正\* 河野広隆\*\* 加藤俊二\*\*\* 古賀裕久\*\*\*\*

## 1. まえがき

筆者らは、骨材資源の有効利用、省資源・省エネルギー、さらに原石山の掘削量及び掘削法面の縮小、廃棄物の削減など環境保全の観点から、これまで低品質骨材のダム用コンクリートへの利用に関して検討してきた<sup>1)~5)</sup>。しかし低品質骨材の使用は、①ワーカビリティーが低下するため単位水量が増加する、②強度が低下する、③耐久性が低下する、などコンクリートの品質の低下を招く。また、低品質骨材製造時には多量の石粉(スラッジ)が発生するという問題もある。スラッジは産業廃棄物であり、その廃棄処理には多額の費用が必要である。そのため、低品質骨材の有効利用に当たって、骨材製造時に発生する石粉の有効利用も重要な課題になっている<sup>6)</sup>。

今回、利用用途の検討対象とした RCD 用コンクリートは、ローラで転圧・締固めするために開発された貧配合・超硬練りのコンクリートである。材料分離にくく、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“締固めやすさ”(ワーカビリティー)が必要である。このような相反する品質を持たせるためには、骨材の空隙を充填し、骨材間の距離を一定に保持できるだけの微粒分の存在が重要と考えられている<sup>7)</sup>。ところが、RCD 用コンクリートは貧配合であることから結合材量が少なく、細骨材に含まれている 0.15mm 以下の微粒分も JIS A 5005 では 2~15% と規定されており、一般的には数%しか含まれていない。そこで石粉を添加することによりワーカビリティーの改善を図ることができるものと考えた。また、微粒分を添加すると「微粉末効果」によって強度が増加するといわれている<sup>8)</sup>。

このことから、ワーカビリティーなどコンクリートの品質の改善を図るために、低品質骨材製造時に発生する多量の石粉を RCD 用コンク

リートの微粒分として適用することについての検討を行った。

以下に、低品質骨材から副産される石粉の品質と、その石粉を RCD 用コンクリートへ添加したときのコンクリート品質の改善効果について報告する。

## 2. 骨材、石粉の品質

### 2.1 使用骨材

石粉の製造および RCD 用コンクリートの検討に用いた低品質骨材は、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、節理が発達し、掘削して採取する時点で既に最大寸法( $G_{max}$ ) が 40mm 程度になる。風化の程度により、比較的良好なものを 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、これも風化の程度の小さい方を B 種、大きい方を C 種に分類した。

### 2.2 骨材の品質

細骨材、粗骨材の物理試験結果は表-2 のとおりである。

単位容積質量及び実積率試験は、JIS A 1104 により突き棒で突き固める JIS 法と振動によって締め固める振動法により求めた。これはローラによる転圧・締め固め方法では、骨材の詰まり方が JIS 法の場合とはかなり異なり、振動法の場合に近いことから行ったものである。試験方法は、後述する VC 試験に用いる振動テーブルを用い、20 秒振動を加えた時の沈下量を測定し、単位容積質量と実積率を求めた。

Y 骨材、Ks 骨材の比較的良好な CM 種、B 種と、低品質の CL 種、C 種では密度、吸水率に品質の違いは現れてはいるものの、密度は 2.6g/cm<sup>3</sup> 以上、吸水率も 1% 程度であり、碎石、碎砂の基準である JIS A 5005(コンクリート用碎石及び碎砂)の基準を満足している。安定性は、Y の粗骨材が比較的品質が劣っているが、そのほかは良好であった。

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	筒理が発達し、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、CM、Bが良質なもの、CL、Cが低品質なものである。

表-2 骨材の物理試験結果

骨材の種類			表乾密度 g/cm <sup>3</sup>	絶乾密度 g/cm <sup>3</sup>	吸水率 %	安定性 損失質量 %	FM	平均径 mm	単位容積質量及び実積率			
									JIS法	振動法	単位容積質量 kg/ℓ	実積率 %
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	1.588	61.2	—	—
		混合	2.642	2.614	1.07	—	6.76	11.6	1.528	58.5	1.740	66.6
	Ks	B	2.643	2.617	1.01	2.5	7.34	19.2	1.553	59.4	1.628	62.2
		C	2.624	2.587	1.41	6.8	7.30	21.1	1.582	61.1	1.608	62.2
		混合	2.634	2.602	1.21	—	7.32	20.3	1.582	60.8	1.628	62.6
細骨材	Y	CM	2.640	2.609	1.17	0.8	2.20	0.942	1.761	67.8	—	—
		CL荒目	2.604	2.566	1.48	0.7	3.17	1.150	1.672	65.2	—	—
		CL細目	2.611	2.579	1.20		1.22	0.245	1.560	60.5	—	—
	Ks	混合	2.624	2.591	1.26	—	2.54	0.659	1.745	67.3	1.926	73.4
		B	2.616	2.585	1.21	1.6	2.72	0.772	1.700	65.8	1.842	71.3
		C	2.609	2.584	0.98	2.3	2.68	0.752	1.672	64.7	1.789	69.2
		混合	2.612	2.584	1.09	—	2.71	0.761	1.684	65.2	1.806	69.9

注) 粗骨材の試験した粒度は40~5mmである。混合は質量比で、YはCM : CL=1 : 1、KsはB : C=1 : 1、細骨材のYはCM : CL荒目 : CL細目=2 : 1 : 1、KsはB : C=1 : 1

表-3 粉体試験結果

試験項目	単位	セメント		混和材		石粉		
		M1	M2	F1	F2	YCM	KsBl	KsCl
密度	g/cm <sup>3</sup>	3.21	3.20	2.36	2.05	2.70	2.66	2.67
かさ密度	g/cm <sup>3</sup>	1.699	1.481	1.461	1.113	1.589	1.427	1.493
実積率	%	52.9	46.3	61.9	50.1	58.8	53.4	55.9
間隙比		0.890	1.160	0.616	0.996	0.701	0.873	0.789
比表面積	空気透過法	cm <sup>2</sup> /g	3580	3490	3680	2920	4300	3460
	BET法	m <sup>2</sup> /g	0.767	0.674	1.78	0.821	3.16	1.612
粒度分布	平均径	μm	10.2	13.4	9.7	23.1	11.9	27.1
安息角	deg	53	—	52	—	55	—	—
内部摩擦角	deg	24.9	—	27.2	—	26.6	—	—

M : 中庸熱ボルトランドセメント、F : フライアッシュを示し、種類の違いにより1、2を付した。

### 2.3 石粉の製造方法と品質

石粉は、Y骨材の場合、CM種をクラッシャで破碎して、ふるいによって0.15mm以下を分級して製造した。Ks骨材の場合は、B種、C種とも骨材製造を水を使わない乾式で行い、集塵機によつて採取したものを試料とした。

これら石粉とセメント、フライアッシュ(以下、これらを総称して「粉体」と呼ぶ)の品質を表-3に示す。ここでは、粉体を図-1のように分類した。かさ密度・実積率・間隙比は空隙特性を表す

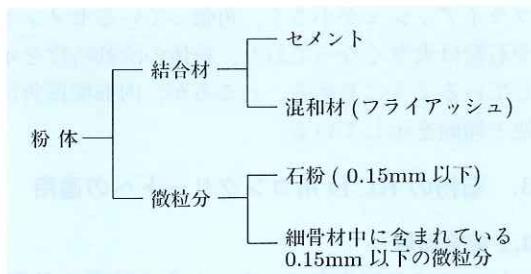


図-1 粉体の定義

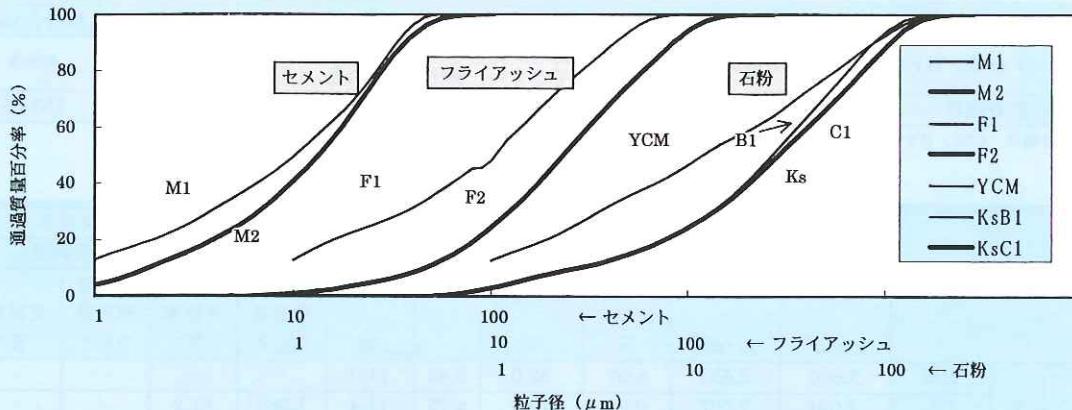


図-2 粒度分布

指標であり、粒度分布、粒子の形状を間接的に示している。安息角、内部摩擦角は、流動特性を把握するためのものである。

密度および空気透過法による比表面積は JIS R 5201 によって測定した。かさ密度および安息角の測定には、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。実積率、間隙比はかさ密度から計算で求めた。比表面積の BET 法は、窒素吸着法の一種であり、吸着特性を BET 式で求めたものである。粒度分布はレーザー回折装置を用いて測定し(図-2)、50%通過百分率の時の粒子径を平均径として示した。内部摩擦角は一面せん断試験により<sup>9)</sup>、垂直応力を 0.049, 0.098, 0.196N/mm<sup>2</sup>としたときの最大せん断応力から求めた。

骨材製造時に集塵機によって採取した石粉 Ks-B1, KsC1 の平均径は 30μm 近くあり、セメントの 2~3 倍程度になっている。クラッシャで製造した YCM はセメントと同程度である。しかしながら BET 法による比表面積は、石粉の方がセメントよりかなり大きくなっている。安息角は球形のフライアッシュが小さく、角張っているセメントや石粉は大きくなっている。粉体の流動特性を示しているように見える。ところが、内部摩擦角は逆の傾向を示している。

### 3. 石粉の RCD 用コンクリートへの適用

#### 3.1 配合試験

はじめに石粉を混入しないときの通常の RCD 用コンクリートの配合を求めた。Y 骨材の粗骨材

は、CM 種と CL 種の混合したもの(混合種)と、CL 種のみの 2 種類、細骨材は CM 種と CL 種の混合である。Ks 骨材は、粗骨材、細骨材、石粉とも B 種と C 種の混合種である。

#### (1) 単位水量

まず、所定のワーカビリティが得られる単位水量を次のように決定した。

単位結合材量を Y 骨材の場合 140kg/m<sup>3</sup> (F 置換率 50%)、Ks 骨材の場合 160kg/m<sup>3</sup> (F 置換率 30%) 一定、細骨材率は両者とも 40% 一定にしておき、単位水量を 100~130kg/m<sup>3</sup> まで 10kg/m<sup>3</sup> ごとに変化させて土木学会規準 JSCE-F507 に準じて VC 試験(振動台式コンシステンシー試験)を行い、目標 VC 値を Y 骨材は 30 秒、Ks 骨材は 20 秒とし単位水量を求めた。

Y 骨材と Ks 骨材で単位結合材量、F 置換率、目標 VC 値が異なるのは以下の理由による。一般的な RCD 用コンクリートは、G max 80mm または 150mm を使用し、単位結合材量 120kg/m<sup>3</sup> (F 置換率 30%) の配合である(これをフルミックス配合と呼ぶ)。VC 試験や圧縮強度試験を行うとき、フルミックスのコンクリートを 40mm ふるいで分取(ウェットスクリーニングという)した試料を使用する。このときの VC 値が 20 秒を標準としている。このときの単位結合材量は、計算上ほぼ 160kg/m<sup>3</sup> になっていることから、Ks 骨材の場合この値を用いた。

Y 骨材の場合は、G max 40mm が既にフルミックスの配合になっている。このときの標準的な配合は未定であるので、筆者らがダムコンクリート

表-4 RCD 用コンクリートの配合

粗骨材 の種類	W/B (%)	F/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	B	C	F	S
Y	混合	80.7	50	38	113	140	70	833
	CL	80.7	50	38	116	140	70	829
Ks	混合	76.2	30	40	122	160	112	844
								1278

の要求品質や文献<sup>10)</sup>を参考にして決めた値である<sup>11)</sup>。

### (2) 細骨材率 s/a

次に、VC 値が最小になる細骨材率 s/a を求めたため、単位結合材量、単位水量を上記の条件で、s/a=30~50%まで 5%ごとに変化させた試験を行った。

### (3) 配合の決定

以上の試験を行った結果から決定した配合は表-4 のとおりである。ただし、Ks 骨材の場合、VC 値が最小となる s/a は 32% になった。しかし、ウェットスクリーニングした配合に換算すると s/a=40% 程度になることから、ここでは 40% とした。

## 3.2 石粉を混入した RCD 用コンクリートの品質

### (1) 配合と試験項目

石粉は細骨材として置き換えたので配合は表-4 と同じである。ただし、細骨材中の 0.15mm 以下の微粒分量は変化している。石粉は細骨材の 5、10、20% を置換した。また、細骨材に含まれている 0.15mm 以下の微粒分を約 50%、100% カットした場合についても試験した。以下の検討に当たっては、図-1 のように細骨材に含まれている 0.15mm 以下の微粒分と混入した石粉を合わせて

「微粒分」として取り扱つており、微粒分量を細骨材量(微粒分を含む)で割った値を「微粒分率」と呼ぶこととする。

実施した試験は、練り上がり直後の VC 試験と、

材齢 28、91 日の圧縮強度試験である。

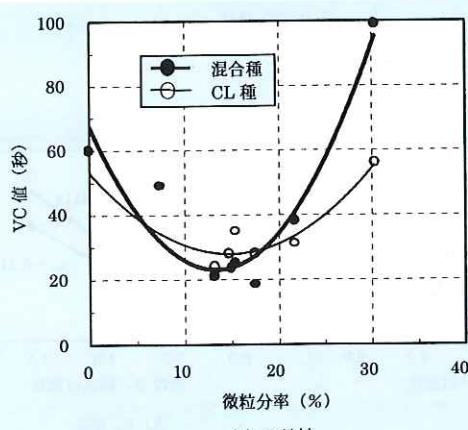
### (2) VC 値

微粒分率と VC 値の関係は図-3 のようになつた。曲線は二次曲線で回帰した結果である。

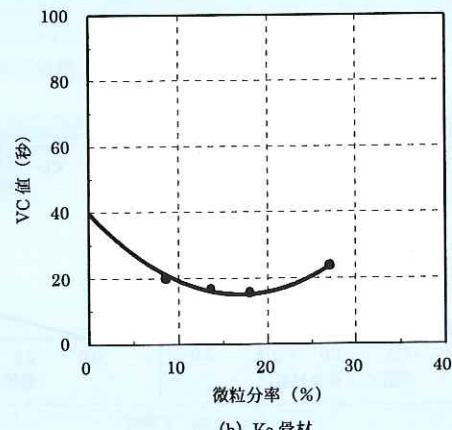
コンクリートの状態は、微粒分が少ないと“がさがさ”していたが、多くなるにしたがい、しだいに粘性が増し“ねっとり”してきた。それに伴い VC 値も次第に低下していく、ある微粒分率から増加に転じており、VC 値が最小になる施工しやすい微粒分率が存在することがわかる。二次曲線回帰の結果、VC 値が最小になる微粒分率は、Y 骨材の混合種の場合 14.9%、CL 種の場合 14.7%、Ks 骨材の場合 16.8% となった。

通常、細骨材に含まれている 0.15mm 以下の微粒分は数% である。この場合、VC 値は図-3 の右下がりの変化率が大きいところに位置している。ところが、微粒分を VC 値が最小になるように混入すれば、微粒分率の変化に対して VC 値の変化の小さい鈍感な配合ができる。

RCD 用コンクリートの場合、ワーカビリティーに影響を及ぼす指標として「ペースト容積/細骨材空隙比 :  $\alpha$ 」「モルタル容積/粗骨材空隙比 :  $\beta$ 」が便宜上用いられている<sup>7)</sup>。 $\alpha$  の分子のペースト



(a) Y 骨材



(b) Ks 骨材

図-3 微粒分率と VC 値

容積は、通常、水と結合材の容積で定義されている。しかし、今回のように微粒分率を変化させていても単位結合材量が一定であれば $\alpha$ は変化せず、微粒分の効果を評価することができない。

そこで、ペースト容積に細骨材に含まれている微粒分、混入した石粉も加えた粉体全量で計算すると、VC値が最小になる $\alpha$ はY骨材の場合1.45、CL種の場合1.40、Ks骨材の場合1.89であった。Ks骨材の $\alpha=1.89$ をフルミックス配合に換算すると $\alpha=1.3$ 程度になる。Y骨材の $\alpha=1.4$ 程度と合わせ、今後の配合設計の目安になるものと考えられる。

### (3) 圧縮強度

微粒分率と圧縮強度の関係は図-4のようになつた。微粒分率の増加にはほぼ比例して強度も増加していることがわかる。微粒分混入により強度が増加した理由は、今回使用した微粒分が不活性であることから、化学的反応によって強度が増加したとは考え難い。微粒分を増やすと、セメント粒子の集団の一部に微粒分が入り込み、セメント粒子

周辺における水和物を析出できるスペースが増すことによって水和反応が促進されるという微粉末効果<sup>8)</sup>によるものと考えられる。

微粒分の強度増進効果を見るため、単位結合材量 $B$ に対する微粒分量 $P$ の比 $P/B$ と微粒分率0%のときの強度に対する増加率を求めるに図-5のようになつた。通常、コンクリートの圧縮強度はセメント水比に比例する。石粉を混入する場合、次式のように結合材量にある係数 $\gamma$ (図-5の傾き)をかけた微粒分量を加えて評価できるものと考えられる。

$$\text{有効結合材水比} = \frac{B + \gamma \cdot P}{W} \quad (1)$$

ここに、 $B$ : 単位結合材量、 $P$ : 単位微粒分量、 $W$ : 単位水量、 $\gamma$ : 微粒分の強度増進効果を現す係数。

係数 $\gamma$ は、今回の試験ではY骨材が0.14~0.22、Ks骨材が0.31~0.41であった。係数 $\gamma$ は、図-5のとおり微粒分の品質はもちろん、材齢の影響などを受けることが考えられることから、一定値で

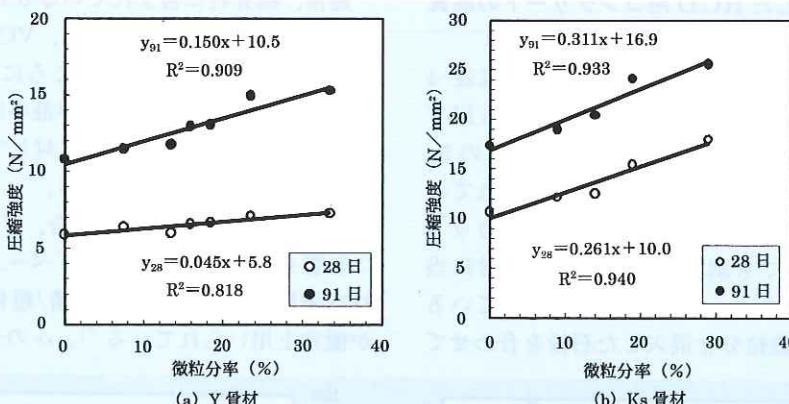


図-4 微粒分率と圧縮強度の関係

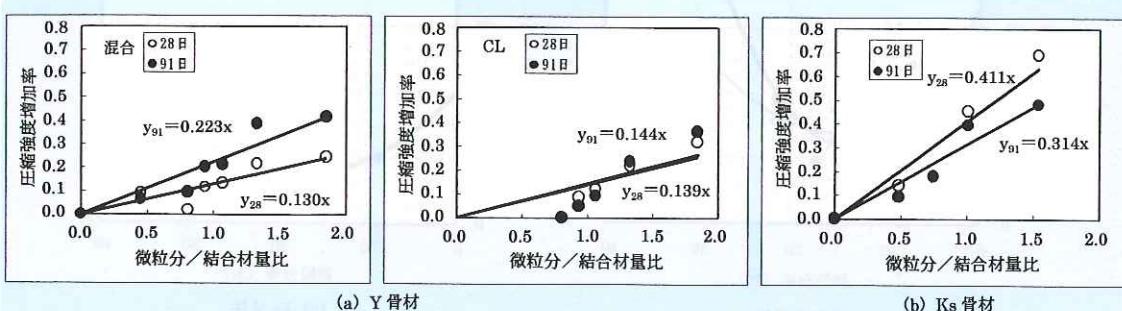


図-5 微粒分/結合材量比と圧縮強度増加率の関係

はなく時間などを含んだ関数になるものと考えられる。

#### 4. RCD 用コンクリートへ石粉を混入する場合の配合設計の提案

RCD 用コンクリートに石粉を混入することによりワーカビリティーおよび強度が改善されることがわかった。この効果を的確に設計に反映させるための配合設計の例を次のように提案する。

- ①石粉および細骨材の 0.15 mm 以下の微粒分を混和材と考え、結合材として扱う。ただし、粉体として取り扱える粒子径の上限については、今回は分級機の関係で 0.15mm としたが、今後の詳細な検討が必要であろう。
- ②石粉の混入量は、安定したワーカビリティーを確保するためには VC 値が最小となるようすることが望ましい。
- ③強度の評価には、結合材水比に代えて式(1)の有効結合材水比を用いる。ただし、係数  $\gamma$  については、微粒分の品質、材齡などを考慮する必要がある。

#### 5. まとめ

RCD 用コンクリートに骨材製造時に発生した石粉を適切な量混入することによりワーカビリティーが改善され、圧縮強度が増加することがわかった。また、石粉を混入したときの配合設計について提案した。

今後、低品質骨材と骨材製造時に発生する石粉の有効利用が図られ、コストの縮減、環境保全に役立つことを期待したい。

#### 参考文献

- 1) 森濱和正、河野広隆、加藤俊二：コンクリート用骨材の破碎性・強度・変形性の評価、土木技術資料、Vol.39, No.12, pp.38-43, 1997.12
- 2) 森濱和正、河野広隆、加藤俊二、土屋浩樹：骨材強度と RCD 用コンクリートの品質の関係、土木技術資料、Vol.39, No.12, pp.44-49, 1997.12
- 3) 森濱和正、河野広隆、加藤俊二、土屋浩樹：コンクリートの品質に及ぼす骨材強度の影響、土木技術資料、Vol.40, No.2, pp.50-55, 1998.2
- 4) 土屋浩樹、河野広隆、森濱和正、加藤俊二：ダムコンクリート用骨材の評価手法に関する実験的検討、ダム工学、Vol.8, No.1, pp.15-26, 1998.4
- 5) 森濱和正、河野広隆、加藤俊二、土屋浩樹、古賀裕久：ダムコンクリート用低品質骨材の新しい評価手法、ダム技術、No.149, pp.29-40, 1999.2
- 6) 永山功、渡辺和夫、西澤賢太郎：原石山における骨材採取状況に関する実態調査、ダム技術、No.134, pp.15-20, 1997.11
- 7) 中原康、横田慎一、平田重信：超かた練りコンクリートの配合の考え方とコンシスティンシー、セメント・コンクリート、No.384, pp.12-18, 1979.2
- 8) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度における効果に関する基礎研究、土木学会論文集、第 85 号、pp.15-46, 1962.9
- 9) 土質工学会：土質試験の方法と解説、pp.458-465, 1990.2
- 10) 糸日谷淑光、斎藤哲男、後藤英夫、十河茂幸：最大粗骨材寸法 40mm の転圧コンクリートによる橋台基礎の施工、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.1, pp.1079-1084, 1993.6
- 11) 河野広隆、森濱和正、古賀裕久：未利用骨材資源の利用技術に関する調査(5)横川ダム原石山骨材、土木研究所資料、第 3631 号、1999.2

森濱和正\*



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  
Kazumasa MORIHAMA

河野広隆\*\*



同 コンクリート研究  
室長  
Hirotaka KAWANO

加藤俊二\*\*\*



建設省土木研究所企画部  
企画課  
(前 材料施工部コンク  
リート研究室研究員)  
Shunji KATO

古賀裕久\*\*\*\*



建設省土木研究所  
材料施工部コンクリート  
研究室研究員  
Hirohisa KOGA