

# 砕砂の微粒分を多く含んだ コンクリート性状について

木村 守<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地方整備局 中国技術事務所 品質調査課（〒736-0082 広島市安芸区船越南2-8-1）

本論文は、微粒分を多く含んだ砕砂を用いたコンクリートの性状として、砕砂の微粒分の特性また、コンクリートの特性を実験的に明らかにしたものである。砕砂に含まれる微粒分は、ほとんど石粉であり、粒径などの物理特性は、セメント粒子と相似であり、中国地方の代表的な安山岩、硬質砂岩、粘板岩を用いたコンクリート試験結果から、12%程度の微粒分量であればブリーディングが抑制され、コンクリートの品質向上に寄与することが把握された。

キーワード 砕砂、75 $\mu$ m以下の微粒分、骨材品質、JIS規格、環境負荷軽減

## 1. はじめに

中国地方におけるコンクリート用細骨材は、天然骨材の枯渇及び海砂の採取規制により砕砂の依存率が全国的に見ても非常に高い現状にあり、中国地方においては図-1 に示すように、近年の瀬戸内海の家砂採取規制により、海砂の使用割合が著しく少なくなり、海砂の代わりとなる代替材として、砕砂の使用割合が増加している<sup>1)</sup>。砕砂については、湿式および乾式による2種類の製造方法があるが、砕砂の微粒分量については、JIS規格値以上は処分の対象となっており、その処分量は、中国地方で年間約50万トンに達すると推定されている。

このような現状に対して、コンクリート用細骨材の安定した品質確保及び骨材資源の有効活用についての検討が急務であり、砕砂の製造に伴って発生する微粒分をそのまま用いたコンクリートの実用化は、骨材資源の有効活用にもつながるものと期待されている。

現在、砕砂の微粒分量は、JIS A 5005 : 1993「コンクリート用砕石及び砕砂」においては7%以下、JIS A 5308 : 2003「レディーミクストコンクリート」においては、舗装版及びコンクリートの表面がすりへり作用を受けるものについては5%以下となるようなものを用いることとなっている。この微粒分量の規格については、その根拠となる研究成果がほとんど無く、どの程度の微粒分が混入するとコンクリートに不具合を生じさせるかは不明な点がある。近年の研究において、砕砂の製造に伴って発生する微粒分は、粘土鉱物やシルトなどの有害物質でない石の粉であり、これらのコンクリートへの適正量の混入はむしろ、材料分離抵抗の改善、ワーカビリ

ティーの向上、コンクリート強度の増加、緻密性の向上など、コンクリート品質の向上になるということが報告されている<sup>2)3)4)</sup>。本研究では、コンクリートの品質向上と良い材料は積極的に活用したいという観点で、微粒分を多く含んだ砕砂の有効活用を図るための技術的な検討を行うこととし、中国地方における代表的な岩種として、安山岩、硬質砂岩、粘板岩から乾式製造された砕砂を対象に、JIS規格を越える量の微粒分を含んだ砕砂（以下「MF（Micro-Fine）砕砂」）を使用したコンクリート（以下「MF（Micro-Fine）砕砂コンクリート」）のフレッシュ性状、硬化特性、耐久性、および、品質管理、配合設計、施工に関する手引き（案）を示したものである。なお、湿式製造において微粒分量を多くした場合については、凝集剤の影響などもあることから、本研究の対象外とした。

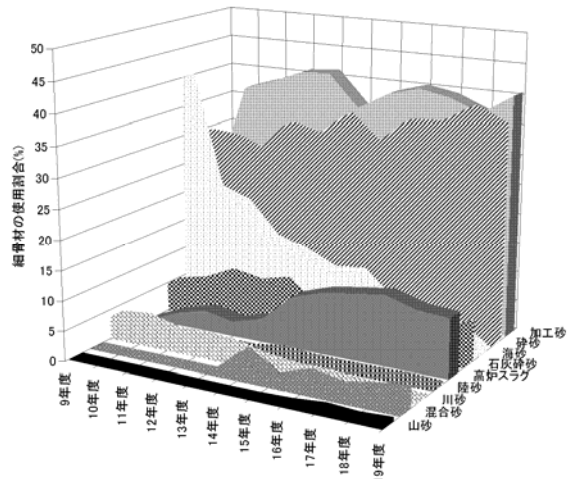


図-1 中国地方における細骨材の使用率

## 2. 実験概要

### 2.1 微粒分の物理・化学試験

微粒分を多く含んだ砕砂を 75 μmふるいでふるいわけし、微粒分を試料として取り出し、湿分、密度、粉末度、強熱減量、粒径および化学成分の測定を実施した。

### 2.2 微粒分の粘土鉱物の定量試験

砕砂の微粒分量に含まれる粘土鉱物量を評価するために、メチレンブルー吸着量試験および砂当量試験を実施した。

### 2.3 コンクリート試験

75 μm以下の微粒分を多く含んだコンクリートの品質を評価するために、表-1 に示すような、JIS 規格の微粒分量相当の砕砂（JIS 規格相当品）と微粒分量が最大となるように乾式製造した砕砂（微粒分最大品）を用いて、表-2 に示す、岩種、水セメント比および微粒分量の配合でスランプ値、ブリーディング率、空気量、圧縮強度、弾性係数、中性化深さ、乾燥収縮について測定を行った。

表-1 砕砂の物理試験結果

	規格値	安山岩		硬質砂岩		粘板岩	
		JIS規格相当品	微粒分最大品	JIS規格相当品	微粒分最大品	JIS規格相当品	微粒分最大品
表乾密度	—	2.62	2.62	2.69	2.69	2.67	2.67
絶乾密度	2.5以上	2.57	2.57	2.67	2.67	2.65	2.65
吸水率	3.0%以下	1.9	1.8	0.75	0.7	0.91	0.89
微粒分量	5.0%以下	4.4	12.2	3.8	11.3	2.9	10.3
粒径判定実積率	53以下	57	---	57.3	---	57.7	---
粗粒率	—	2.59	2.42	2.83	2.56	2.77	2.61

表-2 コンクリート実験の配合表

砕砂の岩種	砕砂の微粒分量		W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	砕砂	粗骨材	混和剤(SP)
安山岩	4.4	JIS規格相当品	45	45	165	367	789	998	1.54
	8.3	微粒分中間品		44			770	1017	2.13
	12.2	微粒分最大品		43			755	1033	2.64
	4.4	JIS規格相当品	50	46	165	330	820	998	1.58
	8.3	微粒分中間品		45			802	1017	2.11
	12.2	微粒分最大品		44			786	1033	2.57
	4.4	JIS規格相当品	55	47	165	300	852	992	1.62
	8.3	微粒分中間品		46			834	1011	1.92
	12.2	微粒分最大品		45			815	1030	2.46
	4.4	JIS規格相当品	60	48	165	275	880	987	1.71
	8.3	微粒分中間品		47			864	1007	1.93
	12.2	微粒分最大品		46			844	1025	2.31
硬質砂岩	3.8	JIS規格相当品	55	48	165	300	893	968	1.14
	11.3	微粒分最大品		46			855	1006	1.80
粘板岩	2.9	JIS規格相当品	55	48	165	300	886	968	1.08
	10.3	微粒分最大品		46			849	1006	1.56

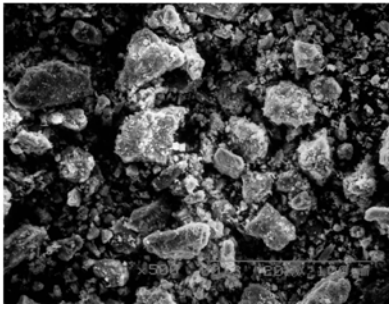
セメント:高炉セメントB種、粗骨材:(最大粒径20mm、表乾密度2.71g/cm<sup>3</sup>、粗粒率6.73)  
 混和剤:ポリカルボン酸系、スランプ:15cm、空気量:4.5%

## 3. 砕砂の微粒分の特性について

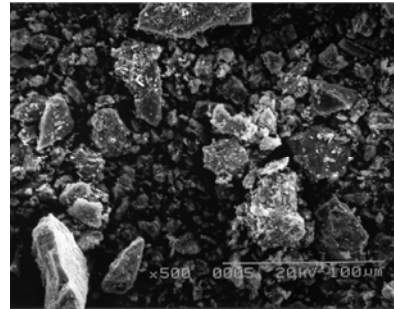
### 3.1 微粒分の物理的な特性

MF 砕砂とは、岩石をクラッシャなどで粉砕し、粒度調整した、75 μm以下の微粒分量が 7%を超えて 12%までの乾式で製造された微粒分が細骨材にそのまま付着したような状況にある砕砂のことである。

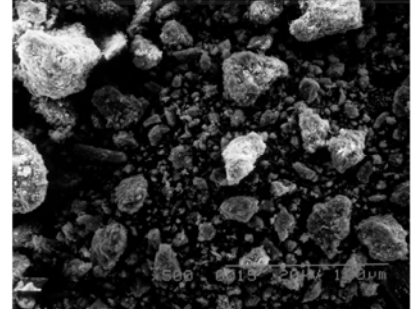
砕砂および微粒分の形状は、電子顕微鏡観察の結果、写真-1 に示すように、岩種が相違しても、微粒分の粒子の形状はほとんど相似であることが確認された。微粒分の物理特性は、表-3 に示すとおり、中国地方で使用されている代表岩種として挙げられる安山岩、硬質砂岩および粘板岩の砕砂から採取した、75 μm以下の粒径の微石粉については、粉末度が 4000cm<sup>2</sup>/g 程度、50%粒径が 20 μm 程度であり、普通ポルトランドセメントと同程度の幾何形状であることが把握された。また、微粒分の主な化学成分は表-4 に示すとおり、二酸化ケイ素 (SiO<sub>2</sub>) と酸化アルミニウム (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) であり、通常の岩石と同じような成分であることが把握された。



(a)安山岩



(b)砂岩



(c)粘板岩

写真-1 微粒分の電子顕微鏡写真(500倍拡大)

表-3 微粒分の物理特性

	湿分 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	強熱減量 (%)	50%径 (μm)
安山岩	0.3	2.74	4330	1.9	19.151
砂岩	0.3	2.77	3860	3.2	22.957
粘板岩	1.0	2.71	4260	3.2	18.564

表-4 微粒分の化学成分

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NaCl
安山岩	65.98	15.57	4.08	4.08	1.95	1.15	2.09	1.10	0.003
砂岩	65.06	14.06	6.53	6.53	2.32	0.01 未満	1.39	1.22	0.003
粘板岩	64.71	16.48	3.72	3.72	1.77	0.01 未満	1.04	1.93	0.002

表-5 メチレンブルー吸着量試験結果

	メチレンブルー吸着量 (mg/g)	
	TRA0015-2002	JBAS-107-91
安山岩 (100%)	3.3 (0.6%)	3.0 (0.6%)
粘板岩 (100%)	3.5 (0.7%)	3.0 (0.6%)
安山岩 (75%) + スメクタイト (25%)	19.0 (3.6%)	123.4 (23.6%)
粘板岩 (75%) + スメクタイト (25%)	19.2 (3.7%)	127.2 (24.3%)

□ 内：粘土鉱物の構成比率

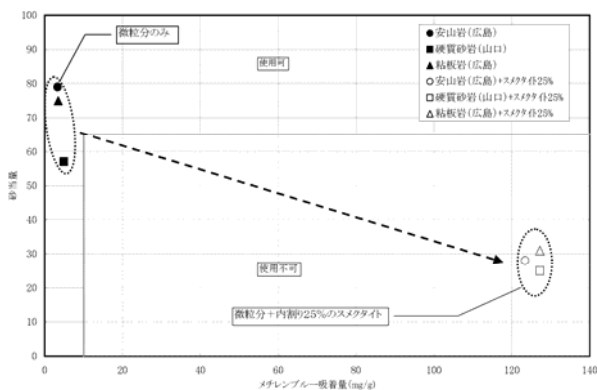


図-2 メチレンブルー吸着量試験結果と砂当量試験結果の相関図

## 3.2 微粒分に含まれる粘土鉱物について

砕砂の微粒分量が JIS 規格より多くなった場合、セメントの異常凝結や、練混ぜ水の吸収、混和剤の効果抑制などの悪影響及ぼすことも想定されるため、粘土鉱物としてスメクタイトを微粒分に内割り 25%混ぜ合わせた試料を用意し、日本ベントナイト工業会の方法 (JBAS-107-91) と碎石粉 TR 原案の方法 (TR A 0015)<sup>5)6)</sup> の2つの試験方法で試験を行い、検出した粘土鉱物量を比較することとした。メチレンブルー吸着量試験結果を表-3に示す。碎石粉 TR 原案の方法を用いた場合には、ほとんど粘土鉱物は検出が出来ず、日本ベントナイト工業会の方法であれば、精度良く、粘土鉱物量を定量できることが把握された。なお、日本ベントナイト工業会の方法の場合には、ピロリン酸ナトリウム溶液を使用することによって粘土鉱物を分散させる試験方法となっているが、碎石粉 TR 原案の方法は、試料の攪拌を水で行うため粘土鉱物が分散されず、試験誤差が生じるものと考えられる。メチレンブルー吸着量と砂当量の関係を図-2に示す。微粒分だけの場合には、メチレンブルー吸着量が 3 mg/g 程度となり、ほとんど、粘土鉱物が含まれないことが把握された。一方、微粒分に粘土鉱物が含まれる場合には、砂当量が小さくなり、メチレンブルー吸着量が大きくなる傾向にあることが把握された。よって、微粒分の品質は、メチレンブルー吸着量と砂当量で、判定可能であることが把握された。

#### 4. MF 砕砂コンクリートの性状について

##### 4.1 砕砂の表面乾燥飽水状態について

砕砂の表面乾燥飽水状態は、フローコーンを用いた方法で、状態を確認することが一般的であるが、微粒分が多量に含まれる砕砂の表面乾燥飽水状態の確認方法については、その方法が未定であるのが現状である。本研究

では、JIS A 5005 の解説に示される方法に従い、水洗いし、懸濁部分を除去した試料を用いて、表面乾燥飽水状態の判定を行い、配合設計における表乾密度及び吸水率を設定することとし、配合試験を実施し、1 m<sup>3</sup> で配合設計して練り混ぜたフレッシュコンクリートの体積を測定することとした。配合試験の結果、表-6 に示すとおり、各配合の単位容積質量試験結果から、1 m<sup>3</sup> で配合設計して練り混ぜたフレッシュコンクリートの体積は、

表-6 コンクリートの単位体積質量

	安山岩		硬質砂岩		粘板岩	
	JIS規格相当品	微粒分最大品	JIS規格相当品	微粒分最大品	JIS規格相当品	微粒分最大品
① 容器の容量	7.059	7.059	7.059	7.059	7.059	7.059
② 容器の質量	6047	6047	5853	5853	5853	5853
③ (試料+容器)の質量	22323	22302	22180	22259	22326	22302
④ 試料の質量(③-②)	16276	16255	16327	16406	16473	16449
⑤ 単位容積質量(④/①)	2306	2303	2313	2324	2334	2330
⑥ 配合設計上の質量(50ℓ)	115.45	115.45	209.34	209.34	208.71	208.80
⑦ 実測容積(⑥/⑤)×1000	50.07	50.14	90.51	90.07	89.44	89.61
⑧ 練り混ぜ容積	50.00	50.00	90.00	90.00	90.00	90.00
⑨ 測定容積係数(100×⑦/⑧)	100.14	100.27	100.56	100.08	99.37	99.56
差分	0.13		-0.48		0.19	

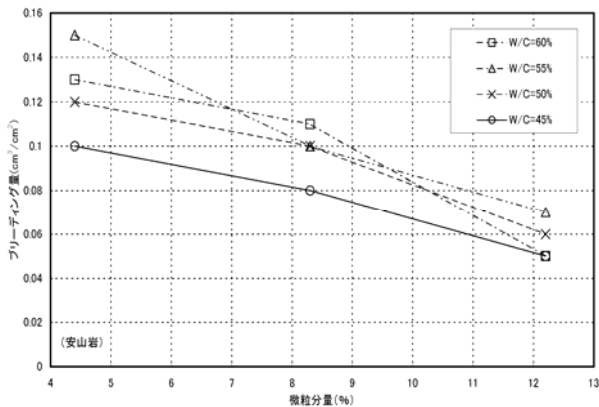


図-3 微粒分量とブリーディング量の関係 (安山岩の場合の例)

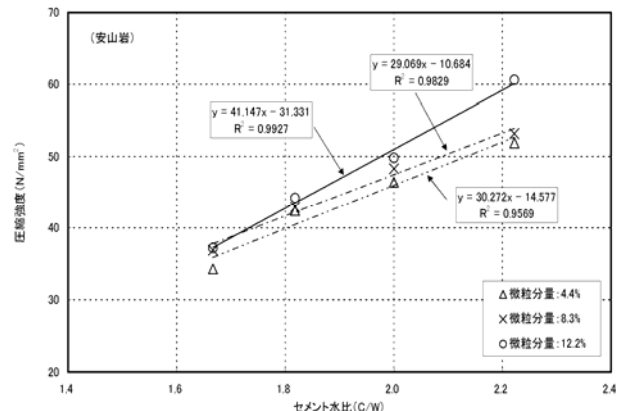


図-4 セメント水比と圧縮強度の関係 (安山岩の場合の例)

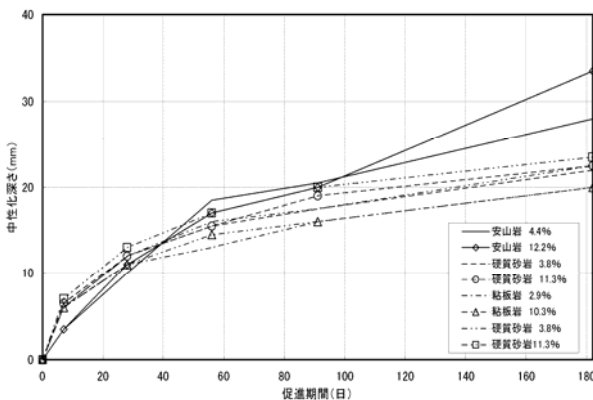


図-5 中性化深さと微粒分量の関係

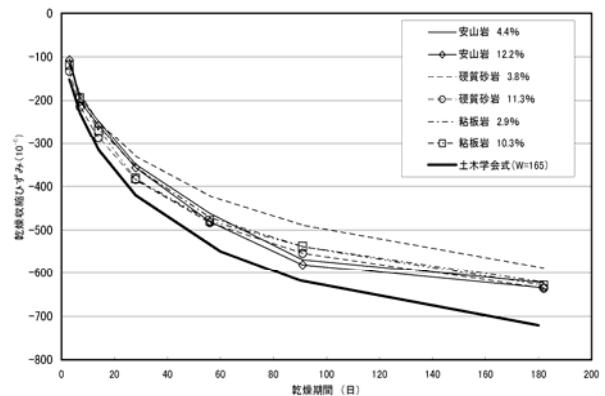


図-6 MF 砕砂コンクリートの長さ変化率試験結果

ほぼ1 m<sup>3</sup>であることが把握された。よって、MF 砕砂の表面乾燥飽水状態の判定は、微粒分を洗い流した試料を用いても、砕砂の密度の設定ができることが把握された。よって、MF 砕砂コンクリートにおける砕砂については、JIS A 5005 の解説に示される方法にしたがい水洗いし、懸濁部分を除去した試料を用いて、表面乾燥飽水状態の判定を行い、配合設計における表乾密度及び吸水率を設定することとした。

#### 4.2 フレッシュコンクリート性状

MF 砕砂コンクリートの場合においても、スランプ及び空気量の練混ぜ直後からの経時変化は、微粒分量が JIS 規格相当の場合と同程度であった。ブリーディング量は、図-3 に示すとおり、微粒分量が 12.3% のものでは、微粒分量が JIS 規格相当ものに比べて、ブリーディング量が半分程度となっており、微粒分量が増加すると、ブリーディング量が少なくなる傾向が把握された。微粒分量が増加することは、粉体の増加となり、材料分離抵抗性が向上することが把握された。

#### 4.3 硬化コンクリート特性

##### 4.3.1 力学特性

圧縮強度とセメント水比の関係を図-4 に示す。MF 砕砂コンクリートの方が、微粒分量が JIS 規格相当の場合の圧縮強度が若干増加する傾向が得られた。また、圧縮強度とセメント水比の関係は通常のコンクリートと同様に直線関係にあり、従来までのコンクリートと同様に強度を決定できることが把握された。なお、曲げ強度、引張強度および静弾性係数についても、微粒分量が JIS 規格相当の場合のコンクリートと比較して、MF 砕砂コンクリートの方が若干増加する傾向が得られた。

##### 4.3.2 耐久性

中性化深さと微粒分量の関係を図-5 に示す。中性化深さは、砕砂の微粒分量が相違しても、微粒分量が JIS 規格相当のものと、ほとんど差異がないことが把握された。乾燥収縮による長さ変化率と微粒分量の関係を図-6 に示す。乾燥収縮ひずみは、岩種や砕砂の微粒分量が相違しても微粒分量が JIS 規格相当のものと、ほとんど差異がないことが把握された。また、凍結融解抵抗性についても、砕砂の微粒分量が相違しても、微粒分量が JIS 規格相当のものと、ほとんど差異がないことが把握された。よって、MF 砕砂コンクリートの耐久性は、岩種および微粒分量が相違しても、通常のコンクリートと同等であると判断された。

## 5. 環境負荷軽減効果について

乾式による砕砂の製造工程をインベントリ分析し、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の排出量を算出した。従来まで廃棄されている微粒分を、12%まで使用できると仮定した場合、砕砂 1t を製造するにあたり 9% (0.64(CO<sub>2</sub>-kg/砕砂-t)) 程度の CO<sub>2</sub> 排出を削減できることが試算された。砕砂の工程や砕く岩の硬さなどによって、骨材製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量は、ある程度、変動することも予想されるが、微粒分を活用することは環境負荷軽減の効果があることが把握された。

## 6. MF 砕砂コンクリートの利用技術手引き (案)

手引き (案) は、砕砂の微粒分の性質や、それを用いたコンクリートの性質についてのまとまった資料がないことから、これを概説するとともに、使用に際しての留意点についてまとめており、コンクリート材料として MF 砕砂を用いる場合の技術者の助けとなるように、配合設計、製造、施工に係わる技術的な留意点をまとめたものである。MF 砕砂コンクリートの施工実績はほとんどなく、骨材製造、生コンプラント設備などの課題があるとともに、これまでの研究成果においても、微粒分の効果を完璧に捉えているとは言い難いものと思われる。したがって、この手引き (案) は、MF 砕砂コンクリートの現状において整理した内容を基本としてまとめている。なお、この手引き (案) に示していない事項は、従来のコンクリートと同様に扱えるため、土木学会「コンクリート標準示方書」によるものとしている。

### 1章 総 則

#### 1.1 適用の範囲

#### 1.2 定 義

### 2章 コンクリートの品質

#### 2.1 総 則

#### 2.2 ワークビリティ

#### 2.3 強 度

#### 2.4 耐久性

#### 2.5 鋼材を保護する性能

### 3章 材 料

#### 3.1 総 則

#### 3.2 MF 砕砂の品質規格

### 4章 配 合

#### 4.1 総 則

#### 4.2 配合設計に使用する MF 砕砂の表乾密度及び吸水率

#### 4.3 配合強度

4.4	空気量
4.5	水セメント比
4.6	単位水量
4.7	単位セメント量
4.8	細骨材率
4.9	混和剤の単位量
5	章 製 造
5.1	総 則
5.2	MF 砕砂の貯蔵
5.3	製 造
5.4	現場までの運搬
6	章 レディーミクストコンクリート
6.1	総 則
6.2	工場の選定
6.3	品質についての指定
6.4	受入れ
7	章 施 工
7.1	総 則
7.2	現場内での運搬および打込み
7.3	締固めおよび仕上げ
7.4	養 生
7.5	型枠の取外し
8	章 品質管理および検査
8.1	総 則
8.2	試 験
8.3	検 査
8.4	工事記録
9	章 設計に関する一般事項
9.1	総 則
9.2	単位容積質量
9.3	強 度
9.4	静弾性係数
9.5	ポアソン比
9.6	乾燥収縮量

## 7. まとめ

以上、岩種による微粒分特性、微粒分に含まれる粘土鉱物量、微粒分量が相違したMF砕砂コンクリートの特性について述べてきた。それらを要約すると以下のとおりとなる。

- (1) 砕砂に含まれる微粒分は、ほとんど石の粉であり、粒径などの物理特性は、セメント粒子と相似である。
- (2) 微粒分中の粘土鉱物量については、日本ベントナイト工業会の方法（JBAS-107-91）に示されているメチレンブルー吸着量試験を実施することで、粘土鉱物量が定量できることが確認され、品質管理の手法として使用できることが把握された。
- (3) 中国地方の砕石・砕砂の生産トン数の上位3岩種

（安山岩・硬質砂岩・粘板岩）を用いたコンクリート試験結果から、12%程度までの微粒分が混入しても悪い影響は及ぼさず、むしろ、ブリーディングが抑制され、微粒分がコンクリートの品質向上に寄与することが把握された。

- (4) 学識経験者・関係機関からなる「微粒分活用研究会」において、MF砕砂コンクリートの適用の範囲、品質、材料、配合、製造、施工など、MF砕砂コンクリートを利用する際に留意すべき基本的な事項について、手引き（案）をとりまとめた。
- (5) コンクリート用骨材の実態から、地域事情を考慮して有効に活用することが望まれており、中国地方では、MF砕砂コンクリートの利用も骨材の有効活用の一環として、大きな期待ができる。

謝辞：本研究は、三ヵ年のプロジェクトの成果を取りまとめたものであり、技術的な課題の解決には、「微粒分活用研究会（会長：米倉教授）」において、広島工業大学米倉教授、広島大学河合准教授、岡山大学綾野准教授、国立高等専門学校機構市坪室長、古井委員、山村委員、斉木委員のご指導、ご助言を頂きまして、産官学が協働して、課題の解決に邁進できたことを感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 広島県生コンクリート品質管理監査会議：平成 19 年度品質管理監査報告書
- 2) コンクリートライブラリー第 8 号 「鉱物質微粉末がコンクリートのウォーカーピリチーおよび強度におよぼす効果に関する基礎研究」、土木学会、1963
- 3) 賀谷、米倉ほか：粒径改善砕砂に微粒分を多量混入したコンクリートの諸性質、土木学会中国支部第 54 回研究発表会梗概集、pp.551-552、2002
- 4) 辻 幸和ほか：砕石粉を用いたコンクリートのフレッシュ性状及び硬化性状、コンクリート工学、Vol.42、No.8、pp.22-29、2004.8
- 5) コンクリートへのリサイクル資材活用技術の標準化に関する調査研究委員会：一般廃棄物と下水汚泥を起源とする溶融スラグ骨材の JIS 規格（案）および砕石粉 TR 原案の概要、コンクリート工学、Vol.39、No.12、p.63、2001.12
- 6) 砕石粉使用コンクリート（CSFC）研究会 HP [http://www.gbrc.or.jp/contents/test\\_research/materials/sub/konwa.html](http://www.gbrc.or.jp/contents/test_research/materials/sub/konwa.html)