

# 論文 乾式砕砂における細粒・微粒分の粒度分布がコンクリートのフレッシュ性状に与える影響

藤本 郷史\*<sup>1</sup>・橋本 勝由\*<sup>2</sup>・賀谷 隆人\*<sup>3</sup>・大久保 孝昭\*<sup>4</sup>

**要旨:** 150  $\mu$ m 以下粒度分布のみが異なる砕砂を調製して、コンクリートのフレッシュ性状を観察した。その結果、粒形・岩種・JIS A5005 における粒度分布が同一であっても、微粒分の粒度分布が異なればスランプ値で 10cm 以上異なることを示した。微粒分の粒度分布とスランプの相関分析を行い、特に 40  $\mu$ m 以下の微粒子がスランプに影響を及ぼすことを明らかにした。平均粒子径とスランプの相関分析を行い、微粒分の粒度分布評価指標として、平均粒子径が有用であることを示した。砕石粉の粒度実態調査を行い、相当量含まれている粗粒子を選択的に分級・回収できれば、砕砂の品質向上と砕石粉の排出抑制が可能となる事を示唆した。

**キーワード:** 砕砂, 製造プロセス, 砕石粉, 分級, フレッシュ性状

## 1. はじめに

良質なコンクリート用骨材の供給は逼迫する状況にあり、砕石、砕砂への移行が進むとの見解が多い。特に西日本では従前より細骨材の枯渇が深刻であり、海砂の採取禁止や中国砂の禁輸措置にもなっており、砕砂、石灰砕砂、あるいは加工砂（風化花崗岩砕砂）への移行が進んでいる。砕砂の製造方式には、大別して乾式・湿式の 2 種類があるが、近年では生産効率、廃棄物処理の容易さの観点から、乾式が採用される傾向にある<sup>1)</sup>。

乾式砕砂の製造時には副産物として砕石粉が発生する。排出量は総計 1200 万トン<sup>2)</sup>と推計され、その量に見合う用途が確立されていないことから大きな課題となっている。この課題を解決する方策として、砕石粉をコンクリート用混和材として混入し有効活用しようとする研究例が数多く行われてきた。例えば、山崎ら<sup>3)</sup>にはじまり、品質規準の策定<sup>4)</sup>、高流動コンクリートの分離抵抗性の向上、大量混入などである。また、2009 年には JIS A 5005(コンクリート用砕石及び砕砂)が改正され、微粒分量の規格値が緩和されるなど、標準規格においても対応する動きがある。しかし、数多くの研究例にも関わらず、現状では砕石粉を混和材として採用する事例は非常に少ない。これは、砕石粉が一般的に表面形状が角ばっているため、同一スランプを得るための単位水量を増加させ、結果として硬化コンクリートに有利な性状をもたらさないと認識されているからであろう。

以上のように、既往の研究を概観すると、砕石粉を混和材として単純混入する手法では砕石粉の大幅な排出抑制は難しい。そこで本報では、砕砂の製造プロセス、

砕石粉の分級・回収プロセスを改良する立場から、砕石粉の排出抑制に取り組む。具体的には、以下の a)-b) の検討を行い、コンクリートのフレッシュ性状と製造プロセスの量的分析、という 2 つの観点から細粒・微粒分の分級について検討することを目的とする。

- a) 150  $\mu$ m 以下粒度分布のみが異なる砕砂を調製してコンクリートのフレッシュ性状を観察し、細粒・微粒分の粒度分布の影響を実験的に検討する
- b) 砕石粉粒度の実態調査を行う。粗粒度の粒子が相当量含まれることを示し、粒度の量的バランスから見た分級の可能性を検討する。

## 2. 用語の定義

本報では、以下のように用語を定義した。"微粒分"は、JIS A 5005(2009)を参考に 75  $\mu$ m 以下の粒子と定義した。"細粒分"は、プロセスにおける分級性能を参考に 150  $\mu$ m - 75  $\mu$ m 粒子と定義した。"砕石粉"は、エア分級プロセスを通じて製造プロセス外へ排出される粉と定義し、JIS TRA 0015 への準拠を基準としないものとした。

## 3. 細粒・微粒分の粒度分布のみ異なる砕砂を用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する実験的検討

### 3.1 実験の目的

JIS A5005 (2009)では粒度試験 (JIS A1102) に供する試料は JIS A1103 による洗い操作を行ったものであると規定された。これは、岩質、粒形、微粒分量が同一であり、JIS A5005 の粒度分布が同一な二つの砕砂があれば、調合設計上ほぼ同一とみなしてよい、という工学的判断が根

\*1 広島大学 大学院工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)

\*2 コトブキ技研工業 (株) 開発部開発 1 課 (会員外)

\*3 コトブキ技研工業 (株) 常務取締役 技術・開発担当 (正会員)

\*4 広島大学 大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

底にあると推察される。同一の製造プロセスを用いる限り、砕砂、砕石粉など生成・副生成物の粒度分布はほぼ同一とみなせるであろう。また、砕石工場が破碎条件を変更することは少なく、仮に変更した場合には同時に粒度分布が変化し検出可能であるので、“同一の製造プロセス”という仮定も容易に満たされる。従って、上述の工学的判断は、多くの場合に妥当なものである。しかし、砕砂製造プロセス設計の観点から考えると、“調査設計上同一とみなしてよい”という工学的判断は注意を要する。

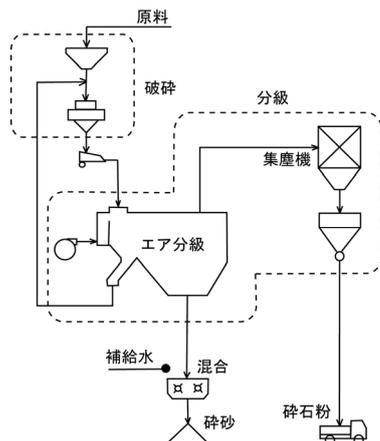


図-1 本報の想定する乾式砕砂製造プロセス模式図

乾式砕砂製造プロセスの模式図を図-1に示す。乾式砕砂の製造は大別すると破碎・分級の2プロセスからなる。ここで分級プロセスは一般に、破碎生成物のうち未破碎分を回収する一方、多すぎる微粒分を回収し砕石粉として分別する機能を担っている。すなわち、分級プロセスの設計しだいでは微粒分の粒度分布を変えることが可能である。言い換えると岩種、粒形、微粒分量が同一であり、JIS A5005(2009)の粒度分布が同一であっても、微粒分の粒度分布の異なる砕砂は“理論上”製造可能である。このように微粒分の粒度を調整した砕砂を用いた場合、コンクリートのフレッシュ性状は異なることが予想される。微粒分の最適な粒度分布の導出・製造が可能となれば、砕砂品質の改善につながるであろう。以上のような考えのもと、著者らは現在、細粒・微粒分の分級技術の開発に取り組んでおり成果を得つつある<sup>5)</sup>。

本実験では、細粒・微粒分の粒度分布のみ異なる砕砂を調製し、細粒・微粒分の粒度分布の違いが、コンクリートのフレッシュ性状に与える影響を実験的に抽出することを目的とした。

### 3.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g/cm}^3$ 、比表面積 $3370\text{cm}^2/\text{g}$ )、粗骨材は広島産砕石(実積率61.9%、表乾密度 $2.70\text{g/cm}^3$ 、吸水率0.00%)、細骨材は乾式プロセスで製造された砂岩砕砂(5~0.075mm:表乾密度 $2.62\text{g/cm}^3$ 、吸水率1.18%、2.5~1.2mm:実積率55.9%、表

乾密度 $2.63\text{g/cm}^3$ 、吸水率0.68%)を用いた。中国地方の砕砂コンクリートの調査実績を考慮して高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)を用いた。

### 3.3 実験の因子・水準

細粒・微粒分の粒度分布を因子として、 $150\mu\text{m}$ 以下の粒度範囲で異なるピークを持つ6水準の細骨材を比較した。ただし、基準となる砕砂Aについては、予め試し練りを行って粒度分布を決定した。図-2、図-3に細骨材の粒度分布を示す。どの水準も粗粒率2.61、 $150\mu\text{m}$ 以上で同一の分布であり、JIS A5005に適合している。

表-1 実験の因子と水準

因子	水準 ※0内は細粒・微粒分の粒度のピーク範囲
細粒・微粒分の粒度分布	砕砂 A (基準の粒度) 砕砂 all (砕石粉と同一の分布形状) 砕砂 B ( $150\mu\text{m}-75\mu\text{m}$ ) 砕砂 C ( $75\mu\text{m}-40\mu\text{m}$ ) 砕砂 D ( $40\mu\text{m}-20\mu\text{m}$ ) 砕砂 E ( $20\mu\text{m}$ 以下)

### 3.4 細骨材粒度分布の調製方法

砕砂の粒度調製は、以下の手順で行った。

- 1) 乾式砕砂プロセスで砕砂製造した。
- 2) 手順1)で得られた砕石粉を $75\mu\text{m}$ 以上は機械式のふるい分け、 $75\mu\text{m}$ 以下は気流分級方式(機械内部のロータによって強制的に気流を起こし遠心分離)によって分級した。以上の工程により、 $150-75\mu\text{m}$ 、 $75-40\mu\text{m}$ 、 $40-20\mu\text{m}$ 、 $-20\mu\text{m}$ の範囲にピークを持つ細粒・微粒粉を調製した。ただし砕砂allについては、現状の砕砂生産時に発生する細粒・微粒分を用い、 $150\mu\text{m}$ 以下含有率を14.6%としたものを用いた。
- 3) 砕砂Aの $150\mu\text{m}$ 以下含有率(14.6%)となるように、手順1)の砕砂に手順2)の細粒・微粒粉を混入した。

手順2)に示す分級方式は、実際の砕砂製造プロセスでは処理能力の観点から採用できない。本報は、粒度の影響を把握することを主目的としているため、同様の性能をもつ分級技術が開発できたと仮定して試験を行った。

また、本実験では乾式ふるい分けを行ったため、図-2、図-3に示す粒度分布は、砂粒子に付着した微粒分を考慮できていない。しかし、手順1)で作製された同一の砕砂を用いているため、水準間で比較すると付着粒子量は同一であると考えてよい。したがって、本実験の結果には影響しないものと判断した。また、別途おこなった洗い試験結果によると、砂に付着した微粒分は、0.4%程度であった。したがって、重量分率の観点からも大きな影響を及ぼさないと判断できる。

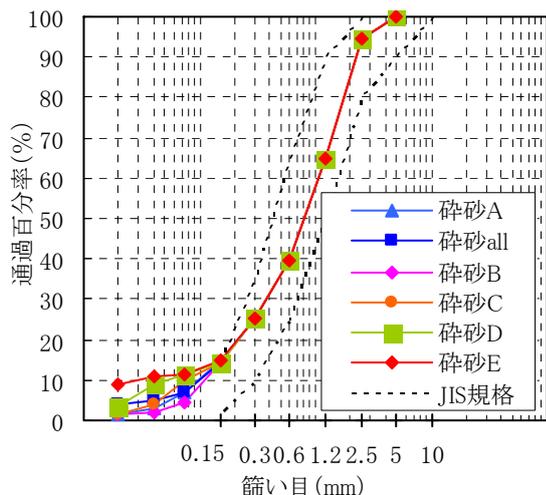


図-2 細骨材の粒度分布(150 $\mu$ m以上は全水準で同一)

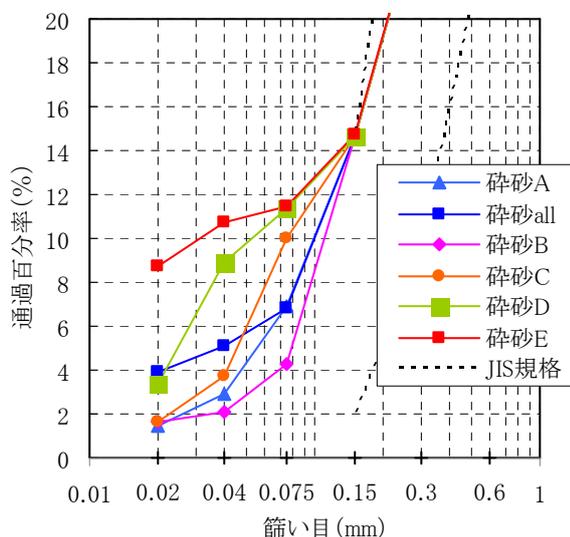


図-3 細骨材の粒度分布 (150 $\mu$ m以下を拡大)

### 3.5 コンクリートの調合

コンクリートの調合は、水セメント比 (W/C=50%)、細骨材率 (s/a=48.4%)、単位水量 (W=175kg/m<sup>3</sup>)、高性能 AE 減水剤添加量 (C×0.56%) とし、20℃、60%の室内で練り混ぜた。計画調合表を表-2 に示す。本調合は碎砂 A を用いて事前に試し練りを行い、目標スランプ 18cm、フロー比 1.6、空気量 4.5%となるように定めた。碎砂 B ~ E、碎砂 all については、碎砂 A と同一調合で試し練りを行い、空気量が 4.5%±0.5 の範囲に収まるように AE

表-2 計画調合表

水セメント比	細骨材率	単位粗骨材かさ容積	スランプ	目標空気量	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤
W/C(%)	s/a(%)	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	cm	%	W	C	S	G	C×%
50	48.4	0.558	測定	4.5±0.5	175	350	849	932	0.56

剤添加率を調整した。測定項目は、スランプ、スランプフロー、空気量とした。

### 3.6 実験結果

実験結果を表-3、図-4 に示す。碎砂 A と碎砂 all を比較すると、微粒分は 6.9%、6.8%とほぼ等しいにも関わらず、碎砂 all では顕著に粘性が上がりスランプが 5cm 異なった。同様に、碎砂 D と碎砂 E も微粒分量 11.4%、11.5%とほぼ同一であるが、スランプは 6cm 異なった。このように、微粒分量が同一でも、その粒度分布が異なれば、スランプや見た目の粘性が大きく変化することが明らかとなった。図-5 に微粒分量とスランプの関係を示す。若干の負の相関がみてとれるが明確でない。図-6 に 40 $\mu$ m 以下粒子の含有率とスランプの関係を示す。図-5 と対照的に高い負の相関が見て取れる。ここには示していないが 20 $\mu$ m 以下粒子のみを抽出した場合にも同様の高い相関を示した。

表-3 実験結果 (コンクリートのフレッシュ性状)

碎砂の種類	A	all	B	C	D	E
スランプ	18.5	13.0	19.5	18.0	11.5	4.5
フロー比	1.61	1.87	1.55	1.63	2.07	4.6
空気量(%)	4.7	4.4	4.0	4.3	4.4	4.3
AE 剤添加率	2.5	2.0	0.7	1.5	3.0	12.0

※スランプの単位は cm, AE 剤添加率は C×10<sup>-3</sup>%

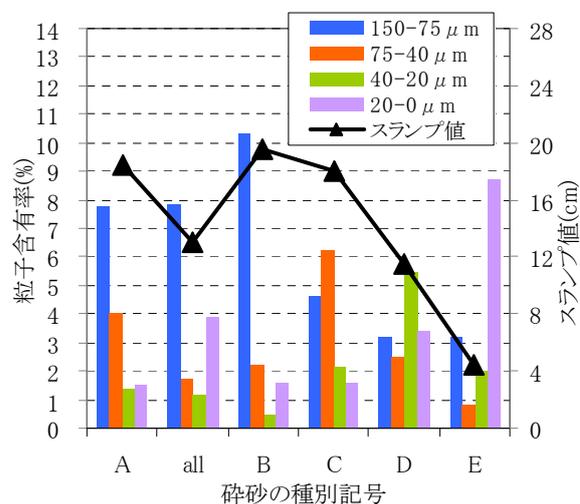


図-4 実験結果 (スランプと粒度分布)

### 3.7 微粒分の粒度とフレッシュ性状の関係

以上の実験結果から、乾式砕砂の細粒・微粒分のうち、コンクリートのフレッシュ性状に大きな影響を与えるのは、 $40\mu\text{m}$ 以下の粒子であると推察される。

すなわち、乾式砕砂の製造プロセスの観点からは、破碎生成物から  $40\mu\text{m}$  より粗い粒子を砕砂として分級することが、品質向上に有効であると考えられる。また、砕砂の品質評価の観点からは、 $40\mu\text{m}$  以下の粒子含有率が単位水量に特に影響を与えると言える。

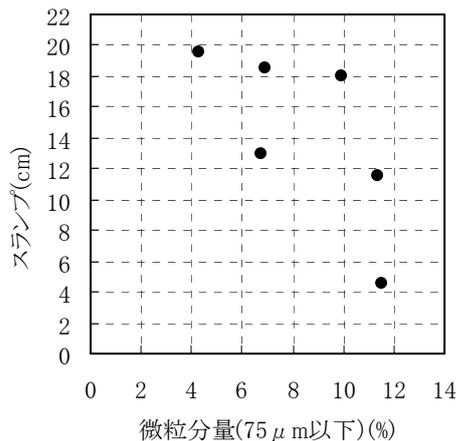


図-5 微粒分量とスランプの関係

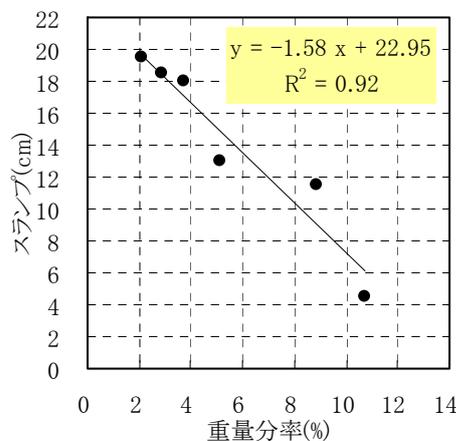


図-6  $40\mu\text{m}$  以下粒子の含有率とスランプの関係

### 3.8 微粒分の粒度分布評価指標の試行的検討

前項までの実験結果から、岩種、粒形、微粒分量が同一であり、JIS A5005 の範囲で粒度分布が同一な二つの砕砂であっても、微粒分の粒度分布が異なればコンクリートのフレッシュ性状が大きく異なることが明らかとなった。既往の研究例<sup>4)</sup>で微粒分の粒度分布は工場によって多様であることが示されている点、砕砂製造プロセスの分級技術の向上の可能性がある点などを考慮すると、微粒分の粒度分布を評価できる簡便な指標があれば有用であろう。そこで、粒度分布指標とスランプとの相関を検討した。分布のある粉体に対する代表径の算定方法

は多数存在するが、ここでは、最も簡便な平均粒子径<sup>6)</sup>を試行的に採用した。ただし、3.4 の手順 2)に示す各粒度範囲の中央値を粒子径  $z(\mu\text{m})$  と仮定し、 $q(z)$ : 粒子径  $z$  の粒子が  $z_{\min} = 0\mu\text{m}$  から  $z_{\max} = 75, 150\mu\text{m}$  の粒度範囲に占める重量分率(%)として算定した。

$$\text{平均粒子径 } \bar{z} = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} z \cdot q(z) dz \quad (1)$$

細粒・微粒分の平均粒子径とスランプの関係を図-7に示す。 $150\mu\text{m}$  以下平均粒子径とスランプには高い相関が見られた。現状の一般的な乾式砕砂プロセスのエアセパレータでは  $150\mu\text{m}$  で分級して碎石粉とすることが多い。(4節参照)従って、砕砂製造プロセス設計においてこの碎石粉を全粒・または分級して砕砂の一部として混入する場合、 $150\mu\text{m}$  以下の平均粒子径を評価指標とすれば、コンクリートのフレッシュ性状の変化を、ある程度予測できると考えられる。

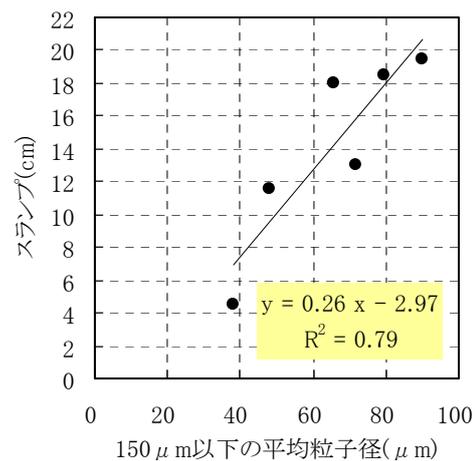


図-7 平均粒子径とスランプの関係(細粒・微粒分)

微粒分 ( $75\mu\text{m}$  以下) の平均粒子径とスランプの関係を図-8に示す。細粒・微粒分の場合と同じように、微粒分の平均粒子径とスランプにも高い相関が見られた。JIS A5005(2009)では微粒分量を用いて砕砂の試験成績書の表示を行うよう定めている。しかし、実験結果 3.6 項に示すように微粒分の粒度分布が異なればコンクリートのフレッシュ性状が大きく変化した。この場合、微粒分量のみの表示では砕砂の物性表示として不十分である。粒度分布に関わる指標を試験成績書に記載すれば、砕砂の物性・性能の簡便かつ適切な伝達に有効と考える。

$150\mu\text{m}$  以下平均粒子径、 $75\mu\text{m}$  以下平均粒子径は、いずれもスランプ値とよい正の相関を示した。したがって、本実験の範囲では、平均粒子径は微粒分の粒度分布を評価する指標として有効といえる。

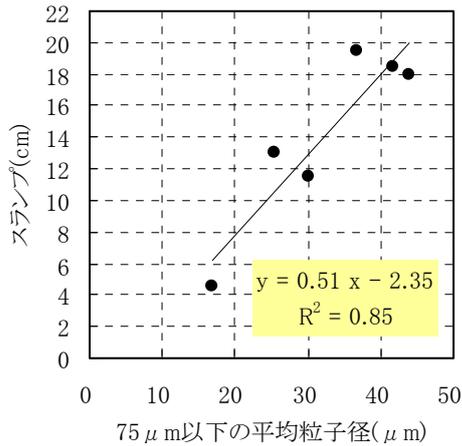


図-8 平均粒子径とスランプの関係(微粒分)

#### 4. 砕石粉の粒度バランスからみた分級可能性

##### 4.1 砕石粉の実態調査の目的と概要

3節では、破砕生成物から比較的粗い成分を優先的に分級・回収することが、砕砂の品質向上に有効であると指摘した。しかしながら、破砕生成物の細粒・微粒分の粒度、すなわち現在排出されている砕石粉の粒度分布は、岩種など多様な要因によって異なるであろう。そこで、分級・回収による砕石粉の量的な削減可能性を検討することを目的として、砕石粉粒度分布を測定した。

砂岩、安山岩、石灰岩の3岩種それぞれについて3工場を選定し砕石粉を採取した。砕石粉は、JIS A1102(骨材のふるい分け試験方法)によって、ふるい分けを行った。さらに、砂岩1工場については、レーザー回折・散乱法粒度分布測定装置を用いて、粒度分布を測定した。

##### 4.2 調査結果と考察

ふるい分け試験の結果を図-9、図-10、図-11に示す。工場Eを除く全ての工場で、150μmふるい残分が5%を上回った。例えば、工場Cでは15.6%、工場Fでは16.6%が150μm以上の粒子であった。JIS TR A0015(コンクリート用砕石粉,2009年にJIS化)では、150μmふるい残分を5%以下と規定していたが、品質管理を行っていない排出の実態としては、5%をかなり上回る150μmふるい残分があることが分かった。

砕石粉(工場I)のレーザー回折粒度分析の結果を図-12に示す。本測定では、細粒分(150-75μm)が重量分率で約20%であり、20μm以下のきわめて細かな微粒分が30%であった。大橋ら<sup>4)</sup>も砂岩3工場を対象にほぼ同様の結果を得ている。本測定結果によれば、砕石粉のうち、相当量が比較的粗い粒子であり、40μm以上は51.6%を占める。3節の結果を考慮すると、プロセス設計によっては砕石粉の大幅な削減の可能性が示唆される。

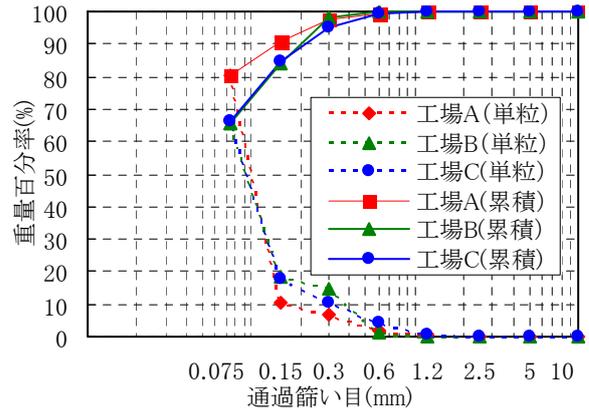


図-9 石灰石砕石粉の粒度分布と単粒重量分率

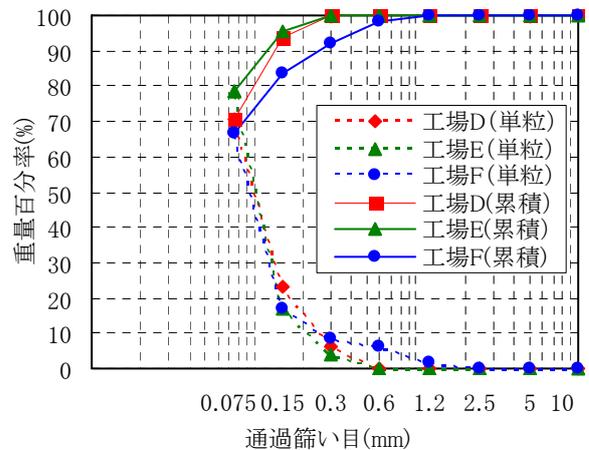


図-10 安山岩砕石粉の粒度分布と単粒重量分率

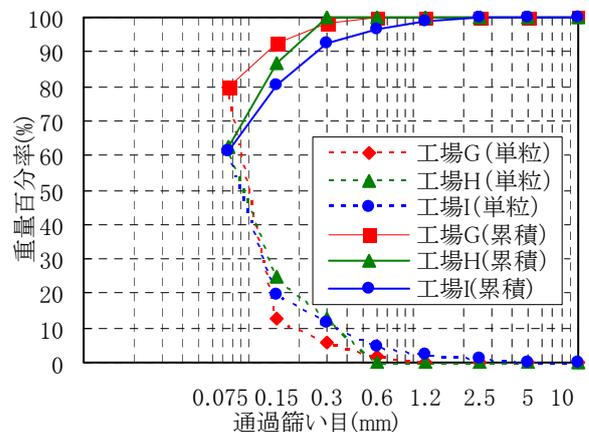


図-11 砂岩砕石粉の粒度分布と単粒重量分率

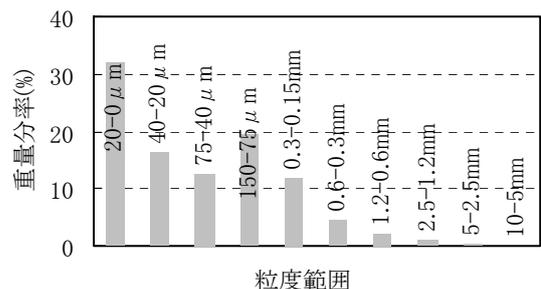


図-12 粒度範囲ごとの重量分率(砂岩砕石粉・工場I)

## 5. まとめ

本研究は、砕砂の製造プロセス、具体的には砕石粉の分級・回収プロセスを改良する立場から、砕石粉の排出抑制を図ることを最終目標としていた。本報は、以下のようにまとめられる。

- (1) 150  $\mu\text{m}$  以下粒度分布のみが異なる砕砂を人工的に調製して、コンクリートのフレッシュ性状を観察した。その結果、粒形・岩種・JIS A5005 における粒度分布が同一であっても、微粒分の粒度分布が異なればスランプ値で 10cm 以上異なることを示した。
- (2) 上述の実験結果をもとに、微粒分の粒度成分の重量分率とスランプ値の相関分析を行った。その結果、粒径 40  $\mu\text{m}$  以下の微粒子が特にコンクリートのフレッシュ性状に影響を与えることを明らかにした。
- (3) 上述の実験結果をもとに、微粒分の粒度分布を評価する指標として、平均粒子径の採用を検討した。150  $\mu\text{m}$  以下平均粒子径、75  $\mu\text{m}$  以下平均粒子径は、いずれもスランプ値とよい正の相関を示したので、本報の範囲では、粒度分布評価指標として有効と結論した。
- (4) 上述の実験では、破砕生成物から比較的粗い成分を優先的に分級・回収することが、砕砂の品質向上に有効であると結論された。そこで、分級・回収による砕石粉の量的な削減可能性を検討することを目的として、砕石工場から砕石粉を収集し、粒度分布を分析した。その結果、砕石粉のうち相当量が粗い粒子であることを示し、砕砂プロセスの設計によっては砕石粉の大幅な削減可能性があることを示唆した。

## 謝辞

本研究は、平成 21 年度 ひろしま産業創生補助金（産業廃棄物抑制・リサイクル枠）研究開発テーマ名「粒形改善砕砂生産時に副産される微石粉のコンクリートへの有効利用の研究開発および実用化」（申請代表者：賀谷隆人、コトブキ技研工業株式会社常務取締役 開発担当）の一部を用いて行われた。関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 真野孝次, 辻幸和, 友澤史紀, 深松孝: 砕石粉を使用した砕石・砕砂コンクリートの性状, コンクリート工学, Vol.46, No.11, pp.18-24, 2008.11
- 2) 友澤史紀, 辻幸和, 山本和成: 「JIS A 5005 (コンクリート用砕石及び砕砂) の改正について, コンクリート工学, Vol.47, No.3, pp.3-9, 2009.3
- 3) 山崎寛司: 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的研究, コンクリートライブラリ 8, (社) 土木学会, 1963.7
- 4) 大橋正治, 田村博, 谷川恭雄: コンクリート用混和材としての砕石粉の有効利用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.532, 7-11, 2000.6
- 5) 賀谷隆人, 橋本勝由, 山本春行: 粒形改善砕砂生産時に発生する微石粉のコンクリートへの有効利用に関する研究, 骨材資源, Vol.40, No.158, pp.84-89, 2008
- 6) 粉体工学会 編: 粒子計測技術, 日刊工業新聞社, pp.15, 1994.11