

## 論文 各種細骨材の微粒分のキャラクタリゼーション

松下 文明\*1・青野 義道\*2・柴田 純夫\*3

**要旨:** 海砂, 石灰砕砂, 硬質砂岩砕砂, 風化花崗岩砕砂, 高炉スラグ細骨材, 銅スラグ細骨材と混合砂を篩い分け, レーザー粒度分布及び電子顕微鏡観察により評価した結果, 各種代替細骨材の F.M.値は混合砂と同等であるが, 75 $\mu$ m以下の微粒分, もしくは10 $\mu$ m以下の超微粒分は細骨材の種類により, さらには銘柄によって大きく異なっていた。細骨材の微粒分の評価手段として, スラグ細骨材, 砕砂の様な代替細骨材に対しては従来の篩い分けによる<150 $\mu$ m量, <75 $\mu$ m量のみでは不十分であり, レーザー粒度分布による<10 $\mu$ m量を加えることが適当と考えられた。

**キーワード:** 粒度分布, 篩い分け, レーザー粒度分布計, 比表面積, 微粒分

### 1. はじめに

近年, コンクリート用骨材として良質な天然の砂利, 砂, 陸砂利, 山砂などの資源枯渇や採取規制の広がりに従い, 砕石・砕砂, 産業副産物起源の骨材, 再生骨材などが順次使用され始めている<sup>1)</sup>。これらの代替骨材は順次必要な JIS 規格の制定が進んでいるが, その特性が細骨材として必要十分なものではないものが多く, 単独で天然骨材の代替になることは少ない。そこで天然骨材の一部を代替する, もしくは複数の代替骨材の混合によって特性を調整して使用される場合が多い。

一方, 骨材の評価方法としては, 篩い分け粒度分布, 密度, 単位容積質量, 実積率などの天然骨材を主に使用していた当時の方法を踏襲しているため, 代替骨材の評価として適切かどうかの検討は十分ではない。例えば, コンクリート標準示方書や JASS5 における砂の標準粒度において, 150 $\mu$ m以下の微粒分は2~10%とされているが, 高炉スラグ細骨材では JISA5011-1 (コンクリート用スラグ骨材-第1部: 高炉スラグ骨材) において150 $\mu$ m以下の微粒分が2~20% (BFS2.5) 含むことを, 銅スラグ細骨材では JISA5011-3 (コンクリート用スラグ骨材-第3部: 銅スラグ骨材) において150 $\mu$ m以下の微粒分が5~20% (CUS2.5) 含むことを許容している。これは, スラグ細骨材を使用する場合, 砂の標準粒度に合わせてもブリーディングが大きい特徴を持つ<sup>2)</sup>ため, 微粒分量を標準粒度よりも多く含ませてブリーディングを抑制させるための措置である。その根本原因は, スラグ細骨材と天然砂では微粒分量である150 $\mu$ m以下における粒度が大きく異なるためと考えられるが, 天然砂から適用されてきた従来の篩い分け粒度では, 代替砂の粒度を十分に評価できていない可能性がある。

そこで本報告では, 細骨材の評価方法の1つである粒

度の中でも特に微粒分における粒度が各種骨材によってどのように異なるかに着目し, 微粒分の粒度が細骨材の評価方法として必要かどうかを検討した。

### 2. 試験方法

#### 2.1 試験体

試験体として, 天然の海砂1銘柄, 石灰砕砂5銘柄 (A~E), 硬質砂岩砕砂2銘柄 (A, B), 風化花崗岩砕砂2銘柄 (A, B), 高炉スラグ (BFS5) 3銘柄 (A~C), 銅スラグ (CUS2.5) を使用した。併せて, 細骨材として既にその特性が調整され単独で使用されている混合砂1銘柄 (愛媛県) を使用した。

#### 2.2 評価方法

粒度の評価は JISA1102 (骨材のふるい分け試験方法) に従って, 呼び寸法5mm, 2.5mm, 1.2mm, 0.6mm, 0.3mm, 0.15mm で篩い分けると共に F.M.値 (粗粒率) を求めた。併せて, JISA1103 (骨材の微粒分量試験方法) に従って, 75 $\mu$ m篩いを通過する微粒分量を求めた。さらに, 75 $\mu$ mの篩い下について, 日機装 (株) 製レーザー粒度分布計マイクロトラック MT3300EX II により, 大容量循環器を用いた超音波分散の湿式条件下で0.02~2000 $\mu$ mの範囲で粒度分布 (以下, レーザー粒度分布と称する) を測定した。粒子の形態と表面性状は走査型電子顕微鏡により観察した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 各細骨材の評価結果

##### (1) 海砂

図-1に海砂の評価結果を示す。篩い分け粒度分布では, <150 $\mu$ mが少なく, ピークが150~300 $\mu$ mと小さめである。F.M.値は2.31, 微粒分量 (<75 $\mu$ m) は0.9%,

\*1 住友金属鉱山シボレックス (株) 技術部三重分室 工博 (正会員)

\*2 住友金属鉱山シボレックス (株) 技術部 工博 (正会員)

\*3 住友金属鉱山シボレックス (株) 技術部 工博 (正会員)

レーザー粒度分布では  $10\mu\text{m}$  以下の超微粒分がほとんど見られない。粒子形態としては、滑らかな表面状態で、粒子のエッジも尖っていない形状である。また、粒子表面に微粒分の付着はほとんど見られない。

### (2) 石灰砕砂

図-2~4に石灰砕砂の銘柄 A, C, D の評価結果を示す。F.M.値は 2.5~2.8 と大きな差はないものの、銘柄間で微粒分の粒度が大きく相違することが分かった。篩い分け粒度分布では  $<150\mu\text{m}$  が 8~18%、微粒分量 ( $<75\mu\text{m}$ ) は 3%~15%、レーザー粒度分布では  $10\mu\text{m}$  以下の超微粒分が 0.5~5%まで変動している。粒子形態としては、銘柄によって多少の差はあるが、丸みを浴びた粒子形状が主であり、粒子表面に微粒分の付着が多く認められる。

### (3) 硬質砂岩砕砂

図-5, 6に評価結果を示す。篩い分け粒度分布では、 $0.6\text{mm}\sim 2.36\text{mm}$  にピークを持つ正規分布に近く、F.M.値は 2.6~2.8 と銘柄間での相違は小さい。しかしながら、微粒分量 ( $<75\mu\text{m}$ ) は 2.2~5.4%、レーザー粒度分布での  $10\mu\text{m}$  以下の超微粒分が約 0.3~1%と銘柄間での相違が大きいことが認められた。粒子形態としては、銘柄に関わらず丸みを浴びた粒子形状が主であり、粒子表面に微粒分の付着はあまり認められない。

### (4) 風化花崗岩砕砂

図-7, 8に評価結果を示す。篩い分け粒度分布では、 $<150\mu\text{m}\sim +2.36\text{mm}$  まで幅広く分布し、F.M.値は 2.6~2.7 と銘柄間の相違は小さい。しかしながら、微粒分量 ( $<75\mu\text{m}$ ) は 4.7~7.3%、レーザー粒度分布では  $10\mu\text{m}$

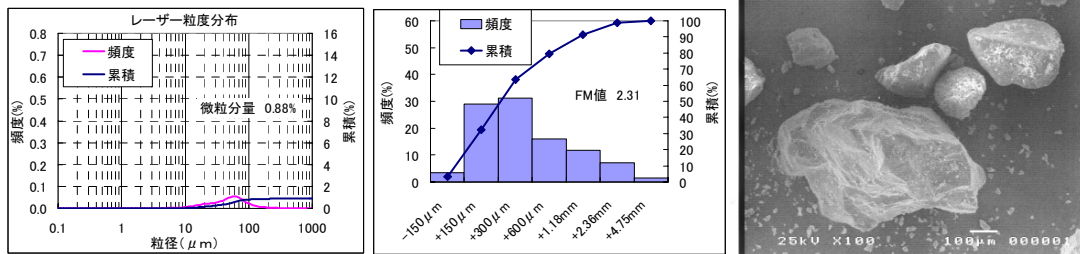


図-1 海砂の評価結果

(左；レーザー粒度分布，中；篩い分け粒度，右；電子顕微鏡写真( $\times 100$ 倍)，以下同じ)

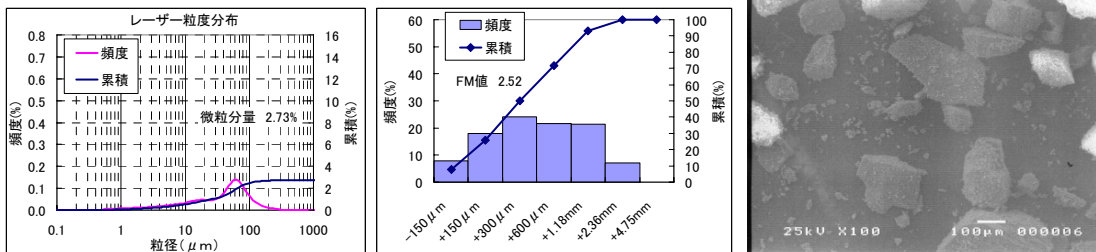


図-2 石灰砕砂 A の評価結果

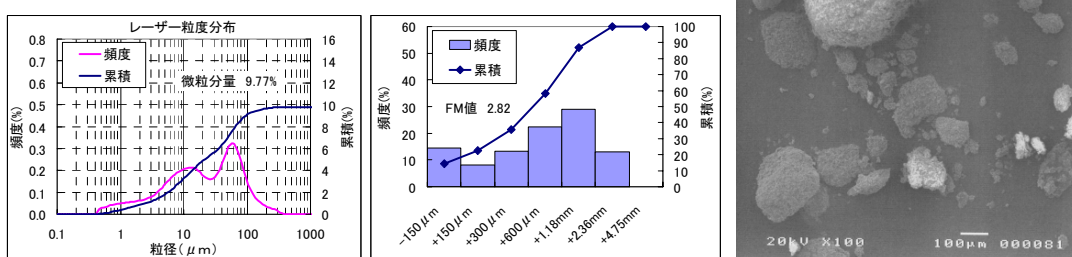


図-3 石灰砕砂 C の評価結果

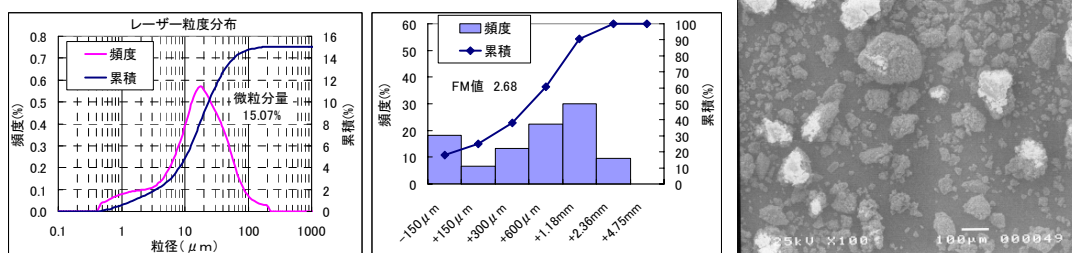


図-4 石灰砕砂 D の評価結果

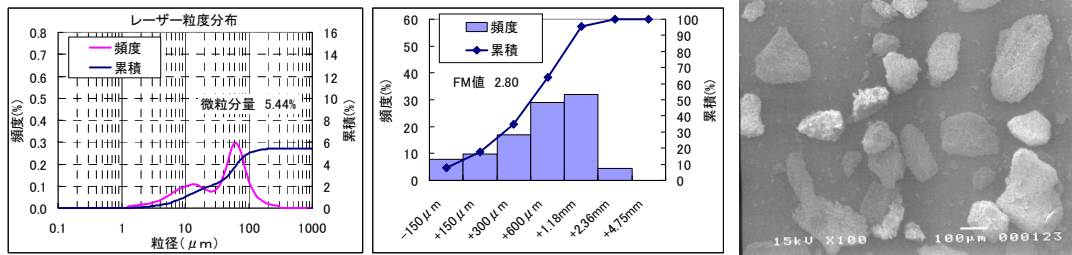


図-5 硬質砂岩砕砂 A の評価結果

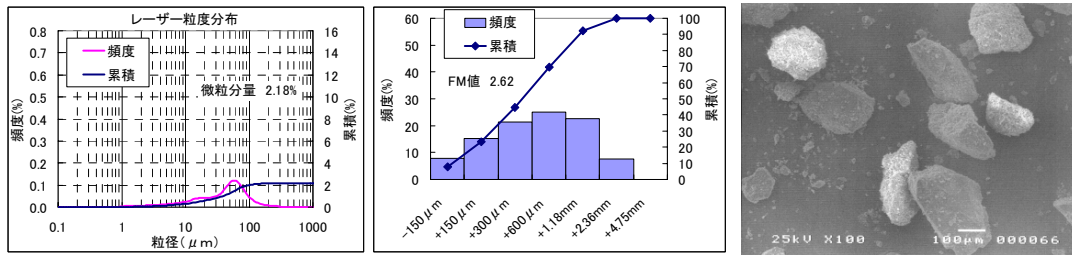


図-6 硬質砂岩砕砂 B の評価結果

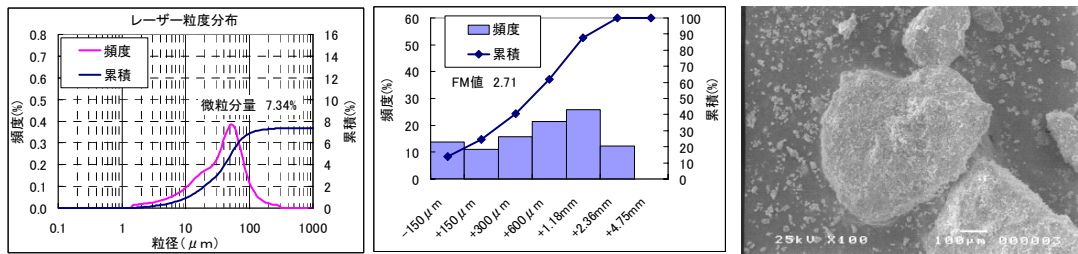


図-7 風化花崗岩砕砂 A の評価結果

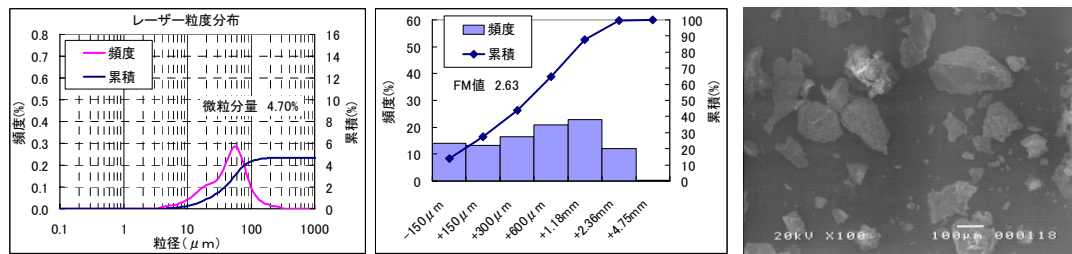


図-8 風化花崗岩砕砂 B の評価結果

以下の超微粒子が 0.2~0.9%と銘柄間での相違が大きいことが認められた。粒子形態としては、銘柄 A は粒子表面に微粒子の付着が非常に多く認められ、銘柄 B では逆に微粒子の付着はあまり認められなかった。

(5) 高炉スラグ細骨材 (BFS5)

図-9~11に評価結果を示す。篩い分け粒度分布及び微粒子粒度、粒子形態について、銘柄による相違は非常に小さいことが分かった。篩い分け粒度では 600 μm ~1.18mm にピークを持ち、2.36mm 以上の粒度がほとんど無かった。F.M.値は 2.3~2.5、微粒子量 (<75 μm) は 3.2~3.8%、レーザー粒度分布では 10 μm 以下の超微粒子が 0.1%以下でほとんど見られなかった。粒子形態としては滑らかな表面状態であるが、粒子のエッジが尖った

形状であった。また紡錘の粒子が認められ、ガラス質が破碎されて生成されたことが伺える形態である。また、粒子表面に微粒子の付着はほとんど見られない。

(6) 銅スラグ細骨材(CUS2.5)

図-12に評価結果を示す。篩い分け粒度分布では、600 μm ~1.18mm にピークを持ち、2.36mm 以上の粒度がほとんど無い。F.M.値は 2.59、微粒子量 (<75 μm) は 3.2%、レーザー粒度分布では 10 μm 以下の超微粒子がほとんど見られなかった。粒子形態としては滑らかな表面状態であるが、粒子のエッジが尖った形状であり、紡錘の形態が多い。ガラス質が破碎されて生成されたことが伺える形態である。また、粒子表面に微粒子の付着はほとんど見られない。すなわち、銅スラグ細骨材の特徴は

高炉スラグ細骨材とほぼ同様であることが分かった。

(7) 混合砂

図-13に評価結果を示す。篩い分け粒度分布では、中央にピークを持ち、 $<150\mu\text{m}\sim+2.36\text{mm}$ まで全体の粒度にわたって正規分布の様に分布している。F.M.値は2.71、微粒分量( $<75\mu\text{m}$ )は3.1%、レーザー粒度で、

$10\mu\text{m}$ 以下の超微粒分を0.6%含有している。粒子形態としては混合砂であるため特徴付けるのは難しいが、主な粒子は滑らかな表面状態を示し、粒子表面に $10\mu\text{m}$ 以下の微粒分の付着が幾分認められた。

表-1に粒度分布の特徴をまとめて示す。適正な粒度に調整していると考えられる混合砂を基準に、細骨材の

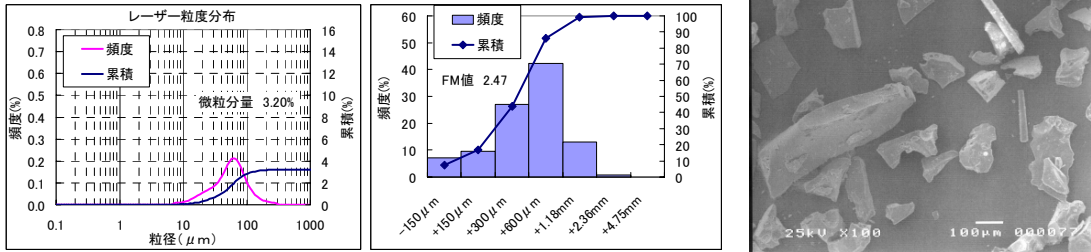


図-9 高炉スラグ細骨材 (BFS5) A の評価結果

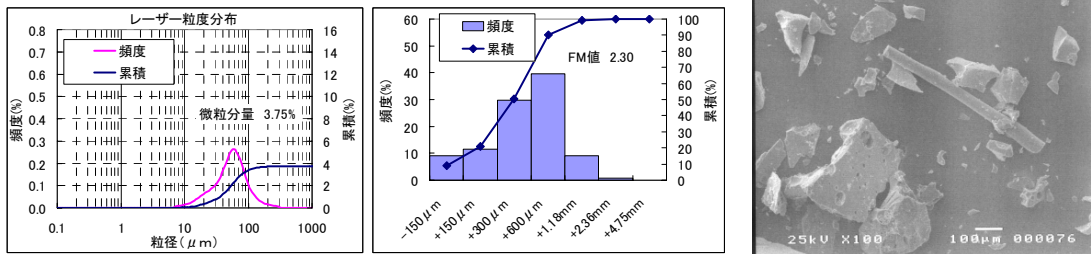


図-10 高炉スラグ細骨材 (BFS5) B の評価結果

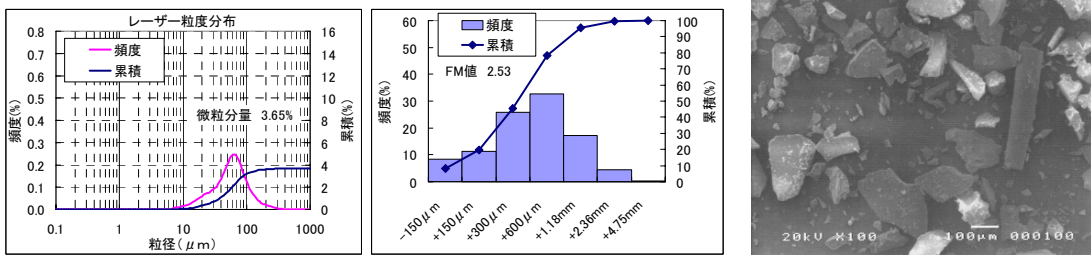


図-11 高炉スラグ細骨材 (BFS5) C の評価結果

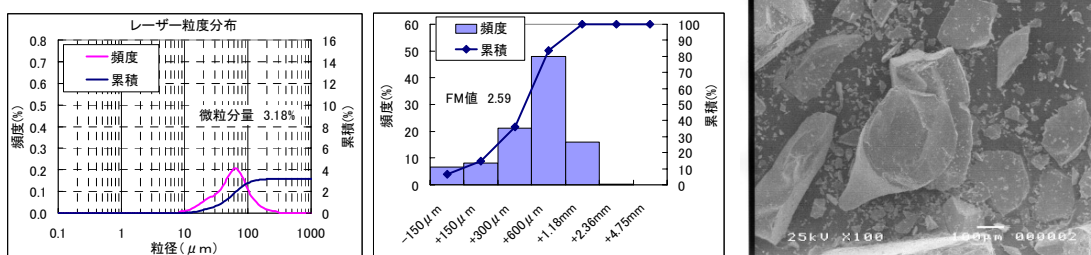


図-12 銅スラグ細骨材(CUS2.5) の評価結果

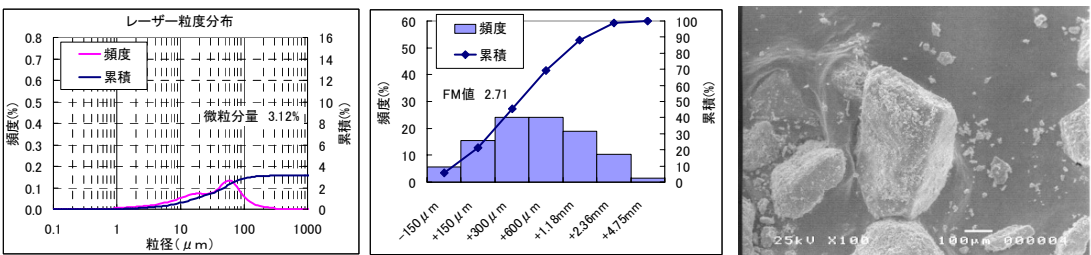


図-13 混合砂の評価結果

表-1 粒度分布結果のまとめ

No.	細骨材の種類	銘柄	篩い分け粒度の分布形状	FM値	<75 $\mu$ m (%)	<10 $\mu$ m (%)
1	海砂		0.15~0.6mmにピーク	2.31	0.9	<0.1
2	石灰砕砂	A	-0.15~2.36mmに幅広く分布	2.52	2.7	0.5
3		B	1.18~2.36mmにピーク	2.85	5.3	1.1
4		C	-0.15mm、1.18~2.36mmにピーク	2.82	9.8	3.3
5		D	-0.15mm、1.18~2.36mmにピーク	2.68	15.1	4.9
6		E	-0.15mm、1.18~2.36mmにピーク	3.22	11.9	6.1
7	硬質砂岩砕砂	A	1.18~2.36mmにピーク	2.80	5.4	1.0
8		B	0.6~1.18mmにピーク	2.62	2.2	0.3
9	風化花崗岩砕砂	A	-0.15~2.36mmに幅広く分布	2.71	7.3	0.9
10		B	-0.15~2.36mmに幅広く分布	2.63	4.7	0.2
11	高炉スラグ細骨材(BFS5)	A	0.6~1.18mmにピーク、>2.36mm無し	2.47	3.2	<0.1
12		B	0.6~1.18mmにピーク、>2.36mm無し	2.30	3.8	0.1
13		C	0.6~1.18mmにピーク、>2.36mm無し	2.53	3.7	0.1
14	銅スラグ細骨材(CUS2.5)		0.6~1.18mmにピーク、>2.36mm無し	2.59	3.2	<0.1
15	混合砂		全体に正規分布形状	2.71	3.1	0.6

種類ごとの特徴を考察していく。

海砂は、F.M.値が2.31と若干小さく、微粒分、<10 $\mu$ mの超微粒分が少ないことが特徴である。

石灰砕砂は、銘柄によって粒度の相違が非常に大きく、F.M.値では2.52~3.22、微粒分は2.7~15%、<10 $\mu$ mの超微粒分は0.5~6%の範囲で変動している。従って、石灰砕砂として銘柄を考慮せずに使用すると、全く性状の異なる生コンクリートとなる可能性が高い。

硬質砂岩砕砂及び風化花崗岩砕砂は、F.M.値が混合砂と同等に調整しており、微粒分量は2~7%、<10 $\mu$ mの超微粒分0.2~1%と、混合砂と同等に近い特徴を有していると考えられるが、特に75 $\mu$ m以下の微粒分は銘柄による相違が大きい。

高炉スラグと銅スラグ細骨材は、F.M.値は混合砂と同等であるが、紡錘の形態を持ち表面が平滑で、>2.36mmの粗粒と<10 $\mu$ mの超微粒分がほとんど無いのが特徴である。これらの特徴は、スラグ細骨材がその製造時に急冷されてガラス質となり、さらに破碎して粒度調整しているためのもと考えられる。

以上の様に砕砂やスラグ骨材等の各種代替細骨材は、F.M.値については混合砂と同等であるが、75 $\mu$ m以下の微粒分、もしくは10 $\mu$ m以下の超微粒分は細骨材の種類により、さらには銘柄によって大きく異なっていた。

### 3.2 微粒分のキャラクターゼーション

細骨材中の微粒分は生コンクリートの流動性やブリーディング、乾燥収縮などに大きな影響を及ぼす。スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質向上の要点の1つは微粒分量の調整であり、微粒分が適量であればコンクリートの流動性を向上させると共にブリーディングを抑制できることが分かっている<sup>2)</sup>。また、細骨材の一部を石灰石微粉末によって置換することによる高強度・高流動コンクリートの実用化<sup>3)</sup>が進んでいる。従って、微粒分量の評価は今後のコンクリート技術の向上において重要なポイントであることは間違いない。近年になっ

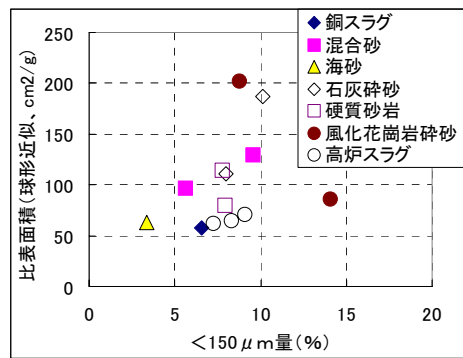


図-1-4 比表面積と<150 $\mu$ m量の関係

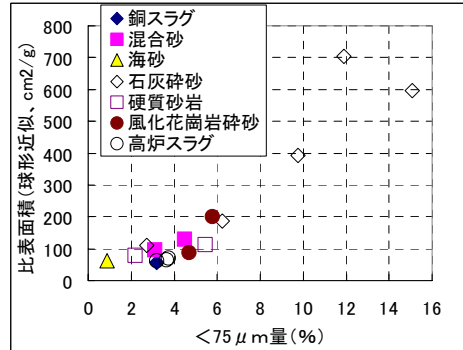


図-1-5 比表面積と<75 $\mu$ m量の関係

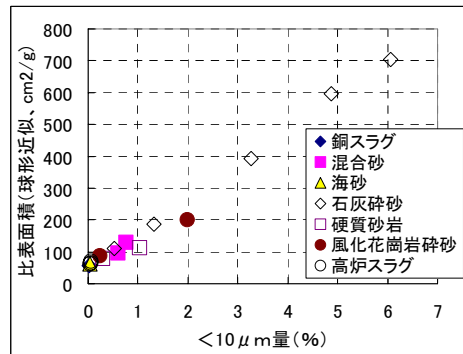


図-1-6 比表面積と<10 $\mu$ m量の関係

て使用され始めた砕砂やスラグ細骨材などでは、本報に示すように微粒分が細骨材の種類や銘柄によって大きく異なるため、微粒分の評価が大変重要である。上野ら

4)は、モルタルの流動性の指標である液性限界と細骨材の比表面積には直線の相関関係があることを示した。そこで本研究では、篩い分け及びレーザー粒度分布計による粒度分布データから比表面積を計算し、微粒分の指標として $<150\mu\text{m}$ 量、 $<75\mu\text{m}$ 量、 $<10\mu\text{m}$ 量との関係を調べた。比表面積は全ての粒子を球形近似とし、式(1)により求めた。

$$\text{比表面積}(\text{cm}^2/\text{g})=\sum \{3/(r_n \times \gamma) \times f_n\} \quad (1)$$

ここで、 $r_n$ : 粒径(cm),  $\gamma$ : 絶乾密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $f_n$ : 粒径  $r_n$  における頻度, とする。 $r_n$  は、篩い分け粒度においては、5mm 篩い上では 7.5mm を、その他については当該頻度をはさむ篩いの呼び寸法の平均 (例えば、呼び寸法 0.15mm~0.30mm の範囲であれば 0.225mm) を用い、 $75\mu\text{m}$  以下のレーザー粒度分布の範囲については測定レンジの粒径を用いた。

図-14~16に、比表面積と $<150\mu\text{m}$ 量、 $<75\mu\text{m}$ 量、 $<10\mu\text{m}$ 量との関係をそれぞれ示す。細骨材の微粒分として通常用いられる指標は、篩い分けによる $<150\mu\text{m}$ 量、もしくは $<75\mu\text{m}$ 量である。 $<150\mu\text{m}$ 量と比表面積の関係に正の相関は見られず、同一の $<150\mu\text{m}$ 量でも比表面積が大きく異なる。例えば、混合砂と同等の $<150\mu\text{m}$ 量において比表面積は 50~100 $\text{cm}^2/\text{g}$  程度の開きがある。 $<75\mu\text{m}$ 量と比表面積の関係においても正の相関は明確には見られず、例えば混合砂と銅スラグ細骨材では $<75\mu\text{m}$ 量はほぼ同等であるが、比表面積は 60~100 $\text{cm}^2/\text{g}$  程度の開きがある。また、特に $<75\mu\text{m}$ 量の多い石灰砕砂においては $<75\mu\text{m}$ 量と比表面積に正の相関は見られない。従って、細骨材の微粒分が生コンクリートの挙動へ影響する程度を予見する評価手段として、スラグ細骨材、砕砂の様な代替細骨材に対しては従来の篩い分けによる $<150\mu\text{m}$ 量、 $<75\mu\text{m}$ 量のみでは不十分であると考えられる。

一方、 $<10\mu\text{m}$ 量と比表面積の関係はほぼ正の相関が見られており、比表面積の代替指標としてレーザー粒度分布による $<10\mu\text{m}$ 量が適当である可能性がある。これは、式(1)に示すように比表面積が粒子径に反比例するため、サブミクロンから数 mm までの粒径の幅を持つ細骨材においては、比表面積が $10\mu\text{m}$ 以下の粒子の頻度に大きく左右されるためである。今回の評価結果から、代替細骨材では $10\mu\text{m}$ 以下の粒度が種類や銘柄により大きく異なることが認められた。これらの代替細骨材を天然砂の一部に代替する、もしくは代替細骨材を調合して良好な特性をもつ混合砂を得るためには、従来の篩い分け粒度に加え、レーザー粒度分布計による粒度分布測定を実施して $10\mu\text{m}$ 以下の超微粒分についての評価を加えることが必要と考えられる。

#### 4. まとめ

- (1)海砂, 石灰砕砂, 硬質砂岩砕砂, 風化花崗岩砕砂, 高炉スラグ細骨材, 銅スラグ細骨材と混合砂を篩い分け, レーザー粒度分布及び電子顕微鏡観察により評価した結果, 各種代替細骨材の F.M. 値は混合砂と同等であるが,  $75\mu\text{m}$  以下の微粒分, もしくは  $10\mu\text{m}$  以下の超微粒分は細骨材の種類により, さらには銘柄によって大きく異なっていた。
- (2) 細骨材の微粒分の評価手段として, スラグ細骨材, 砕砂の様な代替細骨材に対しては従来の篩い分けによる $<150\mu\text{m}$ 量,  $<75\mu\text{m}$ 量のみでは不十分であり, レーザー粒度分布計による $<10\mu\text{m}$ 量を加えることが適当と考えられた。

#### 参考文献

- 1) 阿部道彦ほか: コンクリート用骨材の現状と有効活用技術, コンクリート工学, Vol.46, No.5, pp.4-126, 2008.5
- 2) 古田敦史ほか: スラグ細骨材を用いたコンクリートのブリーディング制御方法の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.97-102, 2005.7
- 3) 鶴田昌宏ほか: 細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.99-104, 2004.7
- 4) 上野敦ほか: 骨材微粒分の表面積がモルタルの流動性および乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.69-74, 2008.7