

論 文

砕砂の粒子形状観察と 細骨材としての性状評価^{※)}

鴨志田 直 人^{※※)} 今 井 忠 男^{※※※)}

1. はじめに

環境保全や資源の枯渇などの要因により天然砂利・砂の供給量は減少し、粗骨材の約7割が砕石でまかなわれている¹⁾。しかし、砕砂については細骨材の3割程度しか利用されていない^{2), 3)}。その原因として、砕砂は天然砂と比較して粒形が角張っているため、砕砂の実積率は小さく、フレッシュコンクリートのフロー（流動性）が得られ難いことがあげられる。今後、天然砂の代替え細骨材として砕砂の需要を増やすためには、フレッシュコンクリートの求める性能を有する砕砂の開発が必要であり、そのためには砕砂の粒子形状の特徴を把握し、粒子形状が細骨材としての性状にどのような影響を及ぼすのかを把握する必要がある。

砕砂の粒子形状評価方法については、粒形判定実積率^{4), 7)}やコンピュータによる画像解析⁷⁾、カラーレーザー顕微鏡や非接触3次元画像測定器による計測⁸⁾などが用いられてきた。また、細骨材の性状評価方法については、モルタルフロー^{4), 6), 8)}や、コンクリートフロー⁵⁾、コンクリートスランプ・ブリージング⁶⁾などの指標が用いられてきた。

例えば、藤井ら⁷⁾は天然砂3試料と砂岩砕砂、粒子形状改善を施した花崗岩砕砂8試料を用いたモルタルフロー試験より、花崗岩砕砂8試料では粒形判定実積率が高いほどモルタルフローは改善され、両者の間には強い相関があること、花崗岩砕砂8試料に天然砂3試料と砂岩砕砂を含めると、フロー値と粒子形状の関係を検討するには粒径判定実積率よりも凹凸係数（2.1を参照）の方が適していること、などを明らかにしている。

しかし、粒形判定実積率を用いた粒子形状評価は粒子

形状を直接観察・評価しているわけではなく、カラーレーザー顕微鏡や非接触3次元画像測定器による計測はその測定装置が高価であり、各々の砕石生産現場において自社製品砕砂の粒子形状を安価で簡便に計測することはできない。また、モルタルフローやコンクリートフローを用いた砕砂の性状評価は、セメント・水・骨材の配合割合や、骨材の粒度調整など多数の要因に左右される問題を有している。したがって、多種多様な砕砂を対象とした場合、従来の研究手法を用いて砕砂の粒子形状と細骨材としての性状を明らかにすることは難しい。

本研究の目的は、砕砂の粒子形状と細骨材としての性状の関係について定量的に評価することである。具体的には、始めに、砕砂の粒子形状の定量化方法として家庭用スキャナーによる粒子形状評価指標の計測を行った。次に、砕砂の細骨材としての性状評価指標として実積率と流動性の計測を行い、砕砂について細骨材の性状評価と粒子形状評価の関係を明らかにした。さらに、天然砂についても砕砂と同様の計測を行い、砕砂と天然砂の細骨材としての性状評価について比較検討を行った。

2. 粒子形状評価方法

2.1 粒子形状評価指標

砂のような粉状体の粒子形状を定量化する試みは古くから行われており、その指標としてはWadell⁹⁾の円磨度を表す指標、Lees¹⁰⁾の角張度合いを表す指標、Zingg¹¹⁾の粒子形状を球状・円盤状・棒状・葉片状に分類する方法などが提案されてきた。しかし、これらの指標はその計測に個人差が入りやすく、しかも砕砂・天然砂のように粒径が小さい場合には定量化の作業がかなり煩雑であるか、あるいは不可能に近いなどのために適切

※) 2016年7月20日受付 2016年9月29日受理

※※) 正会員 岩手大学理工学部 助教、博士（工学）

※※※) 正会員 秋田大学国際資源学部 教授、博士（工学）

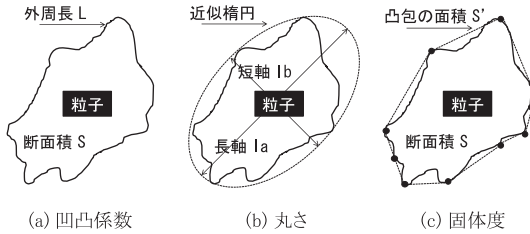


図1 粒子形状評価指標

であるとは言えない。また、最近では砕砂よりも粒径の小さい砕石粉において3次元の粒子形状評価¹²⁾も行われているが、その測定には高価な計測装置が必要であり、各々の砕石生産現場において自社製品砕砂の粒子形状を安価で簡便に計測することはできない。

そこで、本研究では砕砂の粒子形状を評価する指標として凹凸係数・丸み・固体度を用いる。図1にその概要を示す。

凹凸係数 (coefficient of form unevenness)¹³⁾ は、円形度 (Circularity)¹⁴⁾ とも呼ばれ、粒子形状が真円にどの程度近いのか、あるいは粒子表面がどの程度角張っているか・縁に丸みがあるかを表す指標である。粒子投影断面の面積をS、周長をLとすると、凹凸係数は(1)式で定義される(図1(a))。

$$\text{凹凸係数} = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (1)$$

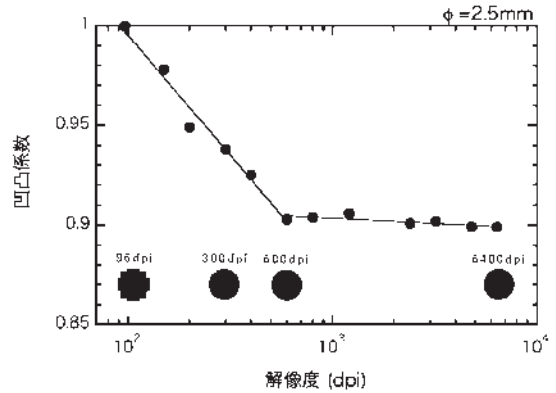
凹凸係数は、粒子形状が真円のとき1であり、形状が真円から楕円へと長細くなるにしたがって、または、真円から凹凸が増えるにしたがって0に近づく指標である。

丸さ (Roundness)¹⁴⁾ は、縦横比などとも呼ばれ、粒子投影断面の近似楕円が真円にどの程度近いのかを表す指標である。近似楕円の長軸と短軸の半径をそれぞれla、lbとすると、丸さは(2)式で定義される(図1(b))。

$$\text{丸さ} = \frac{lb}{la} \quad (2)$$

丸さにとる値の範囲は0から1であり、1に近いほど粒子形状は円や正多角形に近いことを意味する。

固体度 (Solidity)¹⁴⁾ は、凹みの少なさを表す指標である。粒子投影断面の面積をS、凸包面積S' とすると、固体度は、(3)式で定義される(図1(c))。

図2 解像度と凹凸係数の関係
(直径2.5mm円の場合)

$$\text{固体度} = \frac{S}{S'} \quad (3)$$

ここで、凸包とは与えられた点の集合を囲む凹みの無い包み、つまり、与えられた点をすべて包含する最小の凸多角形のことである。固体度にとる値の範囲は0から1であり、1に近いほど粒子形状には凹みが少ない(角が鋭角では無いことを意味する)。

2.2 デジタル画像で凹凸係数を用いる場合の問題点

デジタル画像では、図形をピクセル(微小四角形)の集合体として扱う。粒子形状評価の指標として凹凸係数を用いるにあたり、粒子形状のデジタル化により発生する問題点を整理した。

一つ目の問題は、デジタル化する際の解像度が凹凸係数に及ぼす影響である。図2に真円(φ2.5mm)のデジタル画像を解析した際の、解像度と凹凸係数の関係を示す。デジタル化された真円は、解像度を上げるに従いジャギー(階段状のギザギザ)が増加することで凹凸係数は小さくなる。このことは、粒子の大きさが極端に異なる場合(例えば、粒径5-0.075mmなど)、解像度を同じにすると同じ粒子形状でも凹凸係数に違いが生じることを意味する。したがって、大きさが広範囲に分布する粒子の粒子形状を測定し比較するためには、解像度では無く画素数を統一してデジタル化する必要がある。

二つ目の問題は、デジタル化した真円の凹凸係数が計算値の1とはならないことである。図3に楕円形の丸さと凹凸係数の関係を示す。黒丸は計算値を、白丸は画像解析による測定値(長軸2.5mm、解像度300dpi)を示し

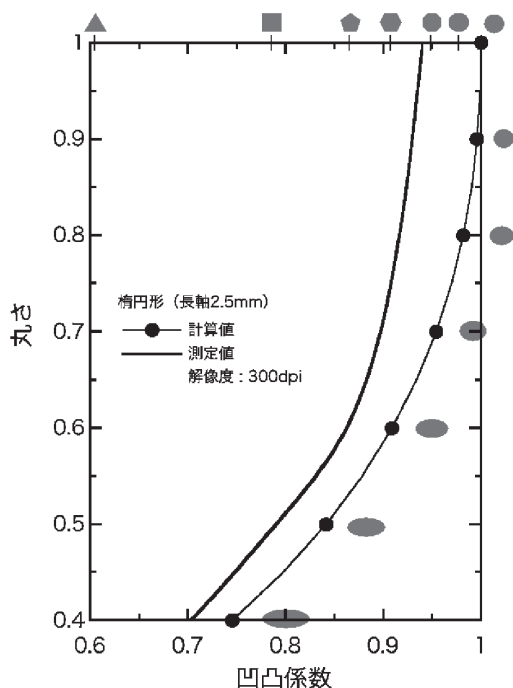


図3 丸さと凹凸係数の関係
(長軸2.5mm楕円の場合)

ている。また、参考として円・楕円・多角形の図形と多角形の計算値(図中の+)を併せて示した。同図より、

楕円の測定値と計算値は一致しないことが明らかである。この原因は楕円が微小四角形の集合体、つまり多角形に置き換えることに起因する。したがって、凹凸係数の測定値はデジタル化による量子化誤差を含み、計算値よりも低い値となる。測定した凹凸係数から粒子形状の滑らかさ(または、角張り)を判断するためには、予め楕円の丸さと凹凸係数の関係(検量線)を求めておく必要がある。

3. 実験方法

3.1 試料

本研究では、安山岩砕砂(岩手県二戸市産)、輝緑岩砕砂(岩手県盛岡市産)、硬質砂岩砕砂(岩手県遠野市産)、粘板岩砕砂(岩手県一関市産)、硬質砂岩・粘板岩砕砂(宮城県石巻市産)の5つ砕砂を用いた。また、砕砂と比較検討する天然砂として陸砂(岩手県紫波町産)を用いた。

各砕砂・砂の粒径加積曲線を図4に、粒度特性値と密度および吸水率を表1にそれぞれ示す。ここで、粒径加積曲線と粒度特性値および粗粒率は土の粒度試験(JIS A 1204)、密度および吸水率は細骨材の密度及び吸水率試験方法(JIS A 1109)、に基づいて測定した。また、本研究での粒度試験のふるい分けは、骨材のふるい分け試験(JIS A 1102)の粒度区分に則って行った。

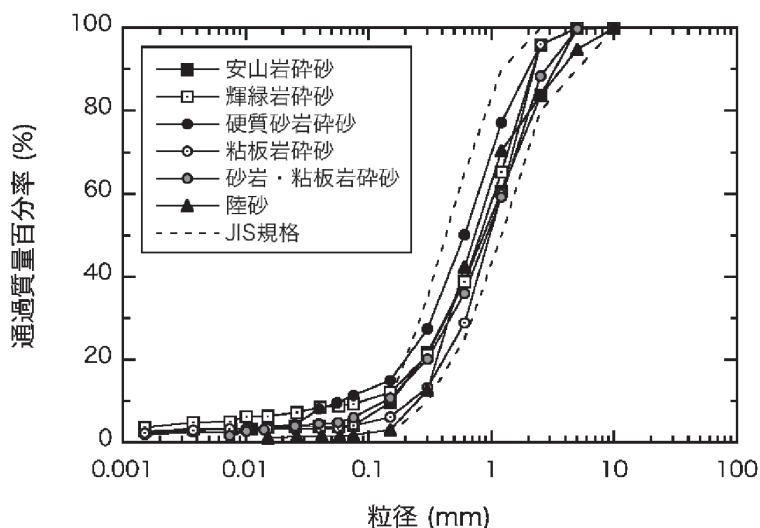


図4 粒径加積曲線

表1 細骨材の粒度特性と物理試験結果

	平均粒径 (mm)	均等係数	曲率係数	細粒分含有率 (%)	粗粒率	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
安山岩砕砂	0.85	7.73	1.01	4.13	2.85	2.68	2.61	2.70
輝緑岩砕砂	0.80	11.3	1.92	9.31	2.66	2.92	2.85	2.30
硬質砂岩砕砂	0.60	12.7	2.39	11.4	2.34	2.66	2.60	2.43
砂岩・粘板岩砕砂	0.90	8.93	1.21	6.04	2.86	2.60	2.54	2.41
粘板岩砕砂	0.95	5.68	1.35	4.03	2.96	2.66	2.59	2.56
陸砂	0.73	2.16	0.90	1.92	2.93	2.52	2.44	3.36

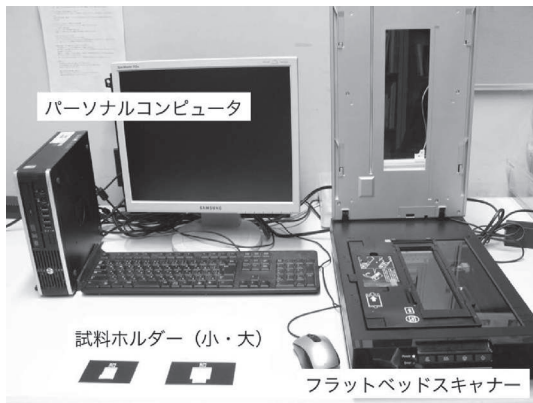


図5 測定装置

3.2 実験装置

粒子形状評価に用いる画像入力・解析装置の外観を図5に示す。本装置は、画像入力に用いる家庭用フラットベッドスキャナー（読み取りCCD方式、光学解像度6400dpi、透過原稿ユニット付き）とスキャナーの制御および画像解析に用いるパーソナルコンピュータ（CPU：Core i5-3470S、GPU：HD Graphics 2500、メモリ：4GB、OS：Windows 7 Pro 64bit）およびスキャナーに細骨材を置くための試料ホルダーからなる。

また、画像入力ソフトウェアにはフラットベッドスキャナーに付属のもの、画像編集ソフトウェアにはGIMP、画像解析ソフトウェアにはImageJを用いた。なお、GIMPとImageJは、ともに無料のソフトウェアである。

3.3 粒子形状評価の手順

砕砂・砂の粒子形状評価は、以下の手順で行った。始めに、試料を置いた試料ホルダーをスキャナーにセットし、画像入力ソフトウェアを用いて試料のデジタル画像

を取得・保存する。この時、試料を透過画像としてデジタル画像を取得する。次に、画像編集ソフトウェアを用いて取得した試料画像の色調補正を行う。また、判別分析法により画像二値化のための閾値を決定する。最後に、画像解析ソフトウェアを用いて試料画像の二値化を行い、各試料の凹凸係数、丸さ、固体度を計測する。

本研究では、粒子形状の測定を粒度試験によって分けられた粒度区分毎に行った（5-2.5mm・2.5-1.2mm・1.2-0.6mm・0.6-0.3mm・0.3-0.15mm・0.15-0.075mmの6区分）。大きさが広範囲に分布する粒子の粒子形状を測定し比較するためには、解像度ではなく画素数を統一してデジタル化の方が望ましい。そこで、画像取得の際の入力解像度をそれぞれ300・600・1200・2400・4800・6400dpiと設定した。粒度区分ごとの標本数は100程度である。

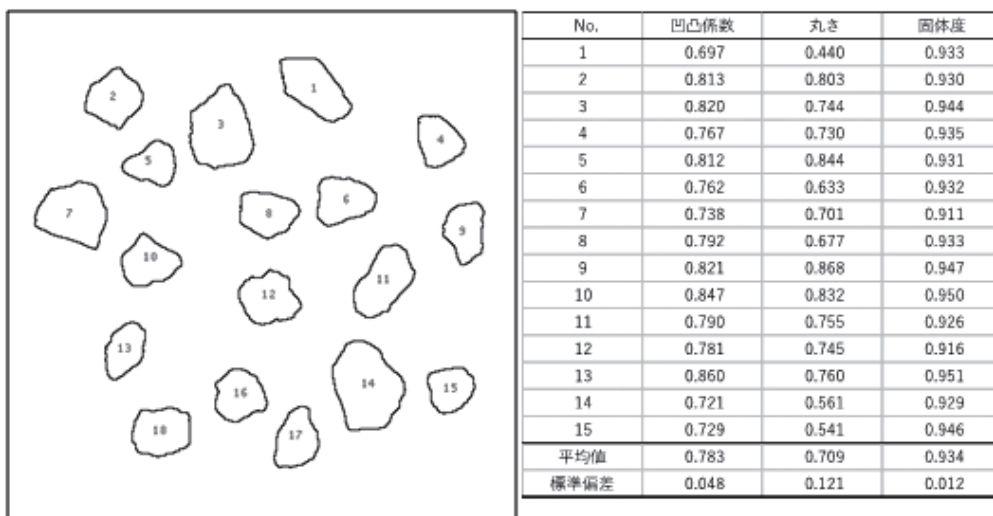
4. 粒子形状評価結果

4.1 粒子形状測定結果の一例

図6に粒子形状測定結果の一例として、硬質砂岩砕砂と陸砂の粒度区分2.5-1.2mmの結果を示す。本研究では、粒度区分毎に複数枚の粒子画像を撮影しているが、その中から1枚、2値化した後の画像を掲載している。同図より粒子形状の特徴を比較すると、両粒子ともほぼ同じ形状に見えるが、硬質砂岩砕砂の方が陸砂よりもやや凹凸が多く、角張っていることが見て取れる。

図7に粒子形状評価の一例として、硬質砂岩砕砂の粒度区分2.5-1.2mmにおける（a）凹凸係数と丸さの分布と（b）固体度と丸さの分布を示す。図中には、楕円形の測定値（検量線）と、凹凸係数・丸さ・固体度の平均値を合わせて示した。

(a) 硬質砂岩砕砂



(b) 陸砂

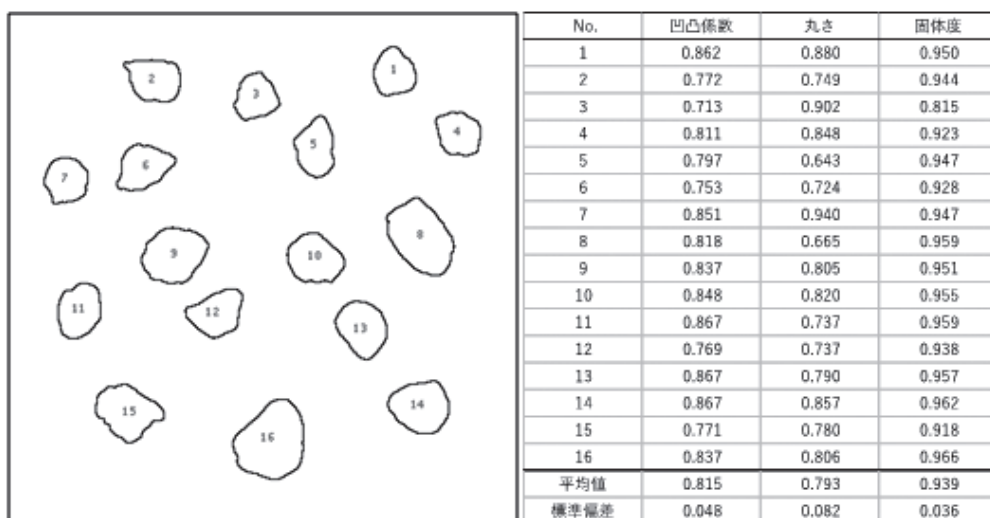


図6 粒子形状測定結果の一例（粒度区分2.5-1.2mm，一辺18mm）

同図 (a) より、砕砂の凹凸係数と丸さの関係は、広範囲に分布する。特に、丸さの分布範囲は広く、丸さ約 0.98（縦横比1:1.02）のほぼ円形から、約0.52（縦横比1:1.92）の長細い粒子までの範囲を占めている。凹凸係数は、分布範囲の左右の端が楕円形の測定値（検量線）とほぼ同じ傾きで分布していることから、粒子形状の角張りの度合は、それほど変化していないと考えられる。

同図 (b) より、固体度は約0.9から約0.96の範囲で分布しており、砕砂の角張りの度合いは鋭角では無く、凹みが少ないことがわかる。

以上のことより、砕砂は多種多様な形状の粒子で構成されていることから、本研究では、粒子形状評価を凹凸係数の平均値と丸さの平均値を用いて検討することにした。

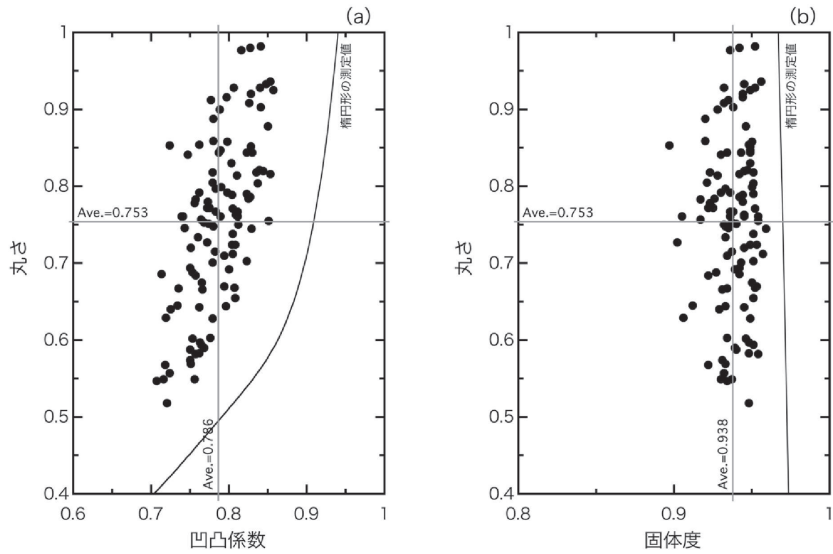


図7 粒子形状評価の一例（硬質砂岩碎砂 2.5-1.2mm）

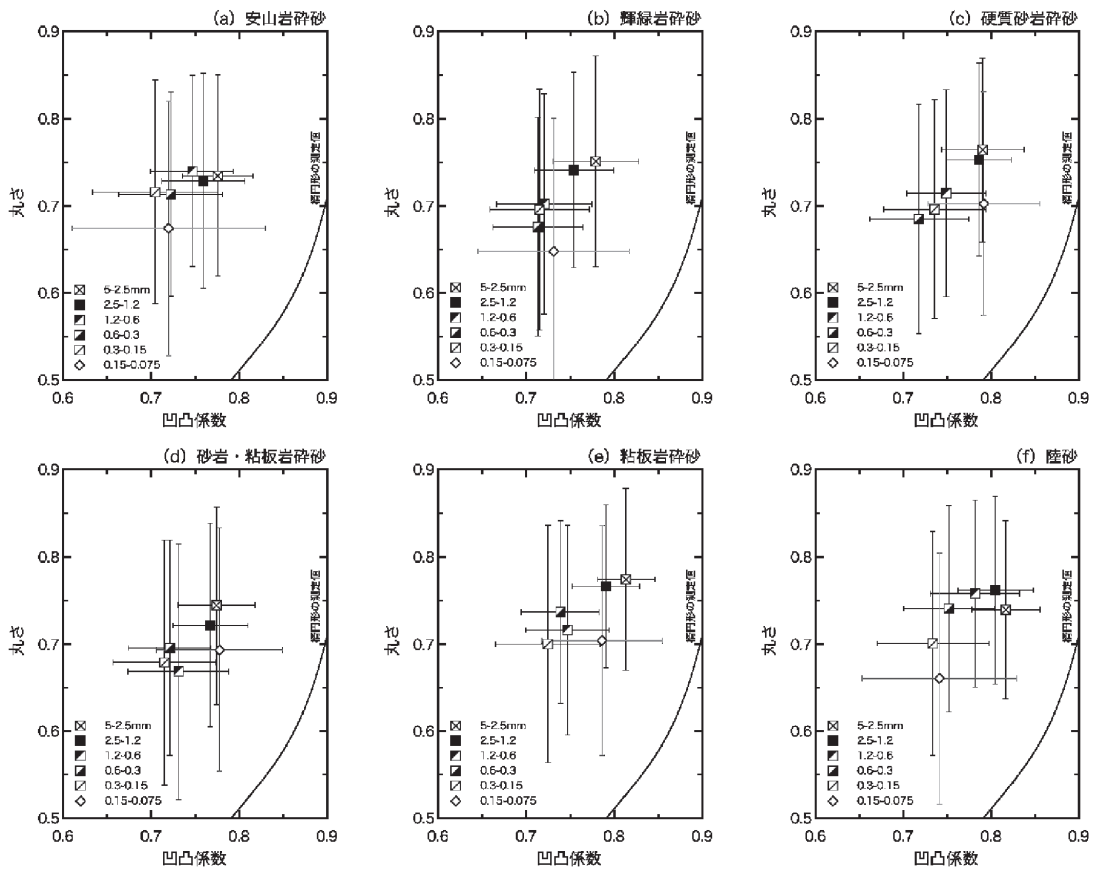


図8 碎砂・砂の粒子形状評価結果

4.2 粒子形状評価

図8に砕砂・砂の粒子形状評価（凹凸係数と丸さの平均値）を示す。同図には、凹凸係数と丸さの標準偏差も合わせて示した。また、測定時の解像度が他の粒度区分と異なるのだが、粒度区分0.15-0.075mmのデータも参考値として示している。

砕砂の粒子形状は、粒径が小さくなるほどその粒径は、角張り（凹凸係数が低下）・偏平（丸さが低下）となり細骨材の理想的な形状とされる球形（円形）からかけ離れる傾向にある。その粒径と粒子形状の関係は、各試料で異なりその傾向は安山岩砕砂（図8（a））とその他の砕砂（図8（b）-（e））、および陸砂（図8（f））の3つに分類できる。具体的に安山岩砕砂は、粒径が小さくなるにしがたい凹凸係数は低下するが、丸さはそれほど変わらない。その他の砕砂は、粒径が小さくなるにしがたい凹凸係数・丸さともに低下する傾向を示す。陸砂の粒子形状は、安山岩や他の4つの砕砂とも異なる傾向を示している。

上野¹⁵⁾は粒径（粒度区分5-2.5・2.5-1.2・1.2-0.6mm）と円形度係数（＝凹凸係数）の関係について、砕砂・砂の円形度係数は粒径が異なってもほぼ同等となると報告している。本測定結果においても粒度区分5-2.5mmと2.5-1.2mmでは上野の報告と調和的であるが、それ以外の粒度区分では異なる結果となった。

以上より、粒形判定実積率で用いる粒子（粒度区分2.5-1.2mm）の粒子形状は製品全体（粒径5-0.075mm）を代表していないことが明らかとなった。

細骨材に用いる砕砂の粒子形状の良否は、粒形判定実積率で判定する。そこで、粒度区分2.5-1.2mmにおける砕砂の粒子形状について比較した。

図9に粒度区分2.5-1.2mmにおける砕砂・砂の粒子形状評価（凹凸係数と丸さの平均値）を示す。同図より、砕砂の凹凸係数と丸さの関係をみると、粒子形状の比較的良好（凹凸係数・丸さがともに高い）グループとそれほど良くない（低い）グループに分けられることがわかる。一般に天然砂は、砕砂と比較して粒子形状が丸みを帯び、表面が滑らかであると言われているが、本研究に供した砕砂の中では、2つの砕砂が陸砂に近い粒子形状であった。

しかしながら、凹凸係数の良否に及ぼす要因（例えば、

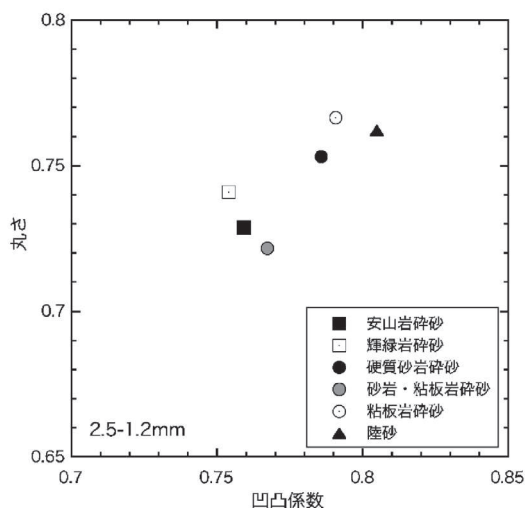


図9 凹凸係数と丸さの関係
(粒度区分2.5-1.2mm)

岩種・製造装置・生産過程)については、現時点では測定結果が少なく判断することができない。

5. 細骨材としての性状評価

5.1 実積率およびスランブフローの測定方法

砕砂の細骨材としての物理的性状を評価する指標として、本研究では粒形判定実積率とスランブローを用いた。

粒形判定実積率 (JIS A 5005) は、通常、骨材の単位容積質量および実積率試験 (JIS A 1104) に基づいて測定するが、本研究では砂の最小密度・最大密度試験方法 (JIS A 1224) を用いて測定した。具体的には、粒度区分2.5-1.2mmの砂（または砕砂）の最大密度 ρ_d と土粒子密度 ρ_s から間隙比 e と間隙率 n を算出し、(6) 式を用いて粒形判定実積率を求めた。

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (4)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{実積率} = 100 - n \quad (6)$$

本研究において粒形判定実積率の測定に砂の最小密

度・最大密度試験方法を用いるのは、試験に必要な細骨材の量（500g程度）が、通常の実積率試験で必要になる量（8 kg程度）よりも少なく、試験室内で簡単に測定できるからである。また、本試験法は、最小密度を用いることで実積率の最小値を求めることも可能である。

一般に細骨材の流動性は、フレッシュコンクリートのスランプ試験やスランプフロー試験を基に評価するが、本実験ではフローコーンを用いてスランプ試験を行う今井らの方法¹⁶⁾より着想を得たフローコーンを用いたスランプフロー試験を基に細骨材の流動性の評価を試みた。

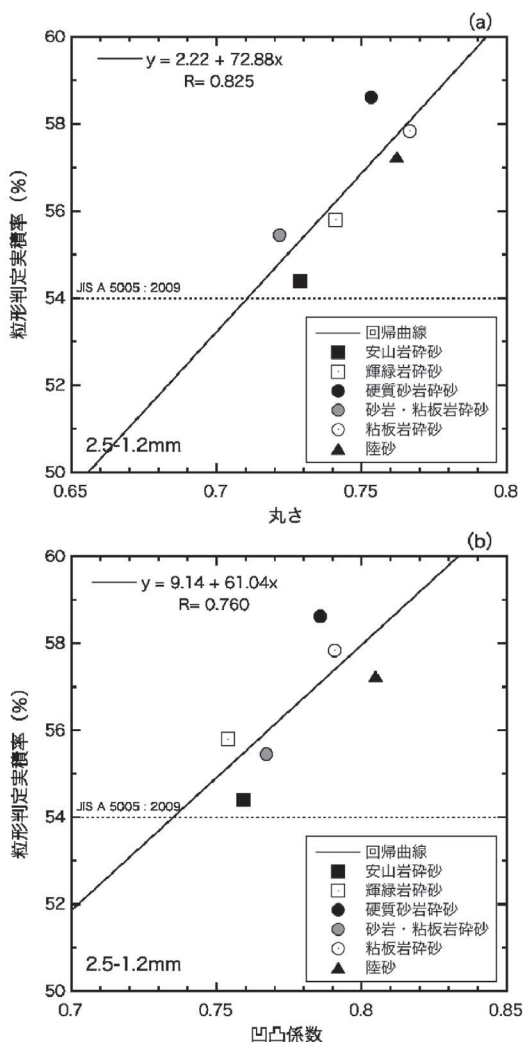


図10 粒形判定実積率と粒子形状の関係

具体的には、以下の手順で行った。始めに、細骨材の密度及び吸水率試験（JIS A 1109）の要領でフローコーンに試料を詰める。この時、①「絶乾状態」の細骨材を試料として用いていること、②突き固めた後残った空間を「試料で再度満たす」こと、以上が吸水試験と異なる点である。次に、フローコーンを静かに鉛直に引き上げ、スランプした試料の広がりを見ながらスランプフロー試験（JIS A 1150）の要領で計測する（0.1cm単位）。

5. 2 細骨材としての性状と粒子形状の関係

図10に砕砂・砂の粒形判定実積率と粒子形状の関係を示す。同図より、丸さ・凹凸係数ともに大きくなるほど粒形判定実積率は大きくなり、両者の間には正の相関が見られ、従来の報告^{7), 14)}とも調和的である。その相関は、丸さの方が凹凸係数よりも強い。これは、粒形判定実積率を用いた粒子形状評価は、粒子の角張り度合よりも扁平の度合に起因されることを意味する。

図11にスランプフローと粒子形状の関係を示す。同図より、粒形判定実積率・凹凸係数ともに大きくなるほどスランプフローは大きくなり、両者の間には正の相関が見られる。しかし、粒形判定実積率・凹凸係数とでその相関の強さが異なり、粒形判定実積率とスランプフローの関係は中程度の相関（丸さとの関係でも相関係数約0.4の弱い相関）、凹凸係数との関係は強い相関となる。一般に粒形判定実積率の大きい細骨材は、粒子形状が丸みを帯びており流動性が良いと判断されてきた。しかし本結果は、細骨材の流動性は粒子の扁平（球形）の度合よりも角張り度合に起因することを示唆している。

以上より、細骨材の粒子形状が細骨材としての性状に影響を及ぼすことを明らかにした。しかし、粒度区分2.5-1.2mmが流動性に及ぼす影響は、粒度区分1.2-0.6mm、0.6-0.3 mmに比べて小さい⁸⁾との報告もあり、粒形判定実積率に用いられる粒度以下の粒子について粒子形状とスランプフローの関係を明らかにすることが、フレッシュコンクリートの求める性能を有する砕砂の開発する上で必要ではないかと考える。

6. まとめ

本研究では、砕砂の粒子形状を定量化するため、スキャナーを用いて砕砂の凹凸係数と丸さを測定した。次に、砕砂の粒形判定実積率と流動性を測定し、砕砂の粒子形

状と細骨材としての性状の関係について検討した。本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 粒子形状評価指標として凹凸係数と丸さを用いることで、砕砂の粒子形状を定量的に評価することが可能である。
- (2) 粒形判定実積率で用いる粒子（2.5-1.2mm）の粒子形状は、製品全体（5-0.075mm）の粒子形状を代表していない。
- (3) 粒形判定実積率と粒子形状の関係は、粒子の凹凸係数（角張り度合）よりも丸さ（偏平の度合）の方が相関性は強い。

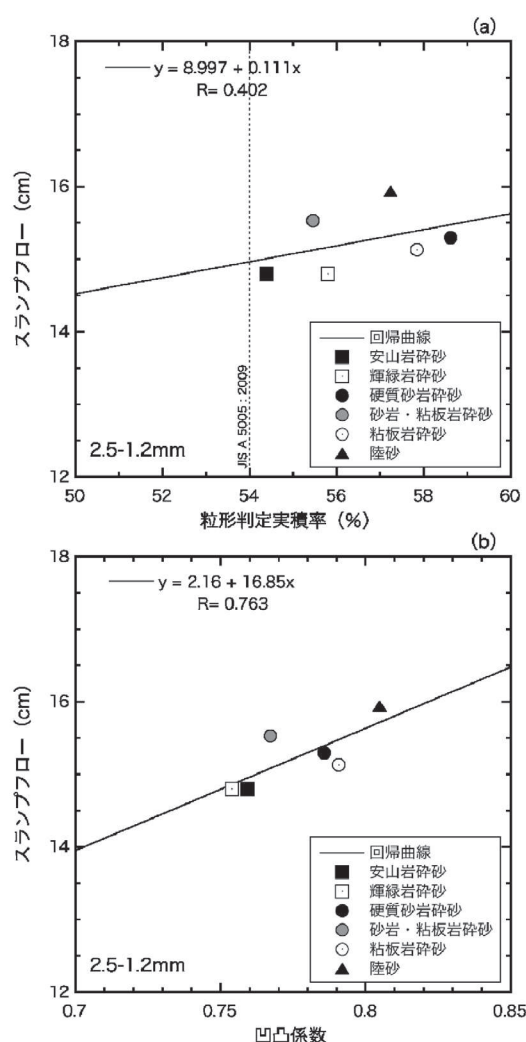


図11 スランプフローと粒子形状の関係

- (4) 細骨材の流動性と粒子形状の関係は、粒子の丸さ（偏平の度合）よりも凹凸係数（角張り度合）の方が相関性は強い。

以上のことより、生産過程において砕砂の丸さ（偏平の度合）を改善することで粒形判定実積率を上げても、砕砂の流動性が改善されるとは限らず、フレッシュコンクリートのワーカビリティ向上には繋がらないことが明らかとなった。

謝 辞

本研究は一般社団法人日本砕石協会の平成27年度研究助成を受けて実施した。砕砂試料は砕石研究会法人会員各社より提供頂いた。また、実験の遂行に当たっては元岩手大学学生の加藤静磨君・眞壁陽輔君のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：骨材需給表（新材ベース），（2015.4.21公表）
- 2) 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
- 3) 木村守：東北地方における骨材諸問題の考察，建設用原材料，18（1），38-41，2010
- 4) 菊本幸雄：細骨材の粒形および粒度がモルタルの性質に及ぼす影響，セメント・コンクリート，286，3-8，1970
- 5) 和田努，小島明，小嶋利司：砕砂の粒形がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，27（1），73-78，2005
- 6) 田澤栄一，米倉亜州夫，西岡直樹，石田雅彦：細骨材の粒形の相違がコンクリートの諸性質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，11（1），35-40，1989
- 7) 藤井学，阪田憲次，為沢長雄，川上俊器：細骨材の粒子形状改善がモルタルの諸性状に及ぼす影響，コンクリート工学論文集，7（1），67-77，1996
- 8) 高海克彦，田畑美紀，湯間謙次，古谷治昭：砕砂の粒子性状改善がモルタルフローに及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，27（1），67-72，2005
- 9) Wadell, H.: Volume, Shape and Roundness of

- Rock Particles, Jour. Geol., 40, 443-451, 1932
- 10) Lees, G. : A New Method for Determining the Angularity of Particles, Sedimentology, 3, 2-21, 1964
- 11) Zingg, Th. : Beiträge zur Schotteranalysis, Min. Perog. Mitt. Schwiz, 15, 39-140, 1935
- 12) 麓隆行, 柏木洗一 : 碎石粉の物理的性質が舗装用ポーラスコンクリートの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集 32 (1) , 1391-1396, 2010
- 13) 吉村優治, 小川正二 : 砂のような粒状体の粒子形状の簡易的な定量化法, 土木学会論文集, 463/Ⅲ-22, 95-103, 1993
- 14) Ferreira, T. and Rasband, W. : ImageJ User Guide IJ1.46r, United States National Institute of Health (<https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>) , 136-138, 2012
- 15) 上野敦 : 碎石微粉による砕砂コンクリートの流動性改善に関する研究, 碎石フォーラム2015 第42回全国碎石技術大会 (盛岡) 資料, 85-88, 2015
- 16) 今井忠男, 木崎彰久, 杉本文男 : 噴流を利用した砕砂の研磨法, 建設用原材料, 23 (1) , 20-26, 2015
-