

新しい円磨度を用いた砕砂の粒子形状評価

SHAPE EVALUATION OF CRUSHED SAND BY NEW PARAMETER OF ROUNDNESS

鴨志田直人*・齊藤 剛**・今井忠男***

by Naoto KAMOSHIDA, Tsuyoshi SAITO and Tadao IMAI

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の供給量は減少している¹⁾。砕砂は粗骨材の約7割を賄っているが、砕砂は細骨材の3割程度しか利用されていない^{2),3)}。その原因として、砕砂の粒子形状は天然砂と比較して角張っていることより砕砂の実績率は小さく、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。したがって、砕砂が天然砂の代替材料として利用される為には、砕砂の粒子形状を天然砂のそれに近づける必要がある。

砕砂の粒子形状評価に関する研究では、粒形判定実績率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。しかし、粒形判定実績率を用いた粒子形状評価は、粒子形状を直接観察および評価している訳ではない。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、各々の砕砂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。この様な理由から、砕砂の粒子形状に関する研究では直接観察した例は少ない。

著者ら⁹⁾は、砕砂の粒子形状を直接観察し評価する手法として、家庭用スキャナーによる粒子形状評価を試みた。その結果、粒子形状の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こと、粒形判定実績率で用いる粒度区分(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ことなどを明らかにした。しかしながら、凹凸係数は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低下するという性質があることから、丸さの異なる粒子の凹凸の大小を直接比較することができないという形状評価上の欠点も明らかになった。

本研究では、丸さ(縦横比)の異なる粒子の凹凸の

度合いを直接比較することを目的に、砕砂の粒子形状評価指標に Takashimizu and Iiyoshi¹⁰⁾が提案する新しい円磨度を導入し、円磨度とこれまで本研究で粒子形状評価指標に用いてきた丸さと凹凸係数の比較を行った。

2. 実験方法

2.1 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)、粘板岩砕砂(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)、硬質砂岩砕砂(福島県棚倉町産)、陸砂利砕砂(新潟県長岡市産)の7つ砕砂を用いた。また、砕砂と比較検討する目的で混合砂(新潟県長岡市産、陸砂80%+陸砂利砕砂20%)を用いた。

試料の粒径加積曲線を図1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1より試料の粒度分布は陸砂利砕砂を除き、土木学会標準示方書¹¹⁾に規定された標準粒度(点線)の範囲内にある。

2.2 実験装置と実験方法

粒子形状評価に用いる画像入力・解析装置の外観を写真1に示す。画像入力には透過原稿ユニット付き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)を、スキャナー制御および画像解析には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)をそれぞれ用いた。また、画像入力ソフトウェアにはEPSON Scan(開発元EPSON社)、画像編集ソフトウェアにはGIMP(開発元The GIMP Development Team)、画像解析ソフトウェアにはImageJ(開発元アメリカ国立衛生研究所)をそれぞれ用いた。なお、GIMPとImageJはともに無料のソフトウェアである。

* 岩手大学助教 理工学部 (〒020-8551 岩手県盛岡市4-3-5)、** 岩手大学技術専門職員 技術部、*** 秋田大学教授 国際資源学部

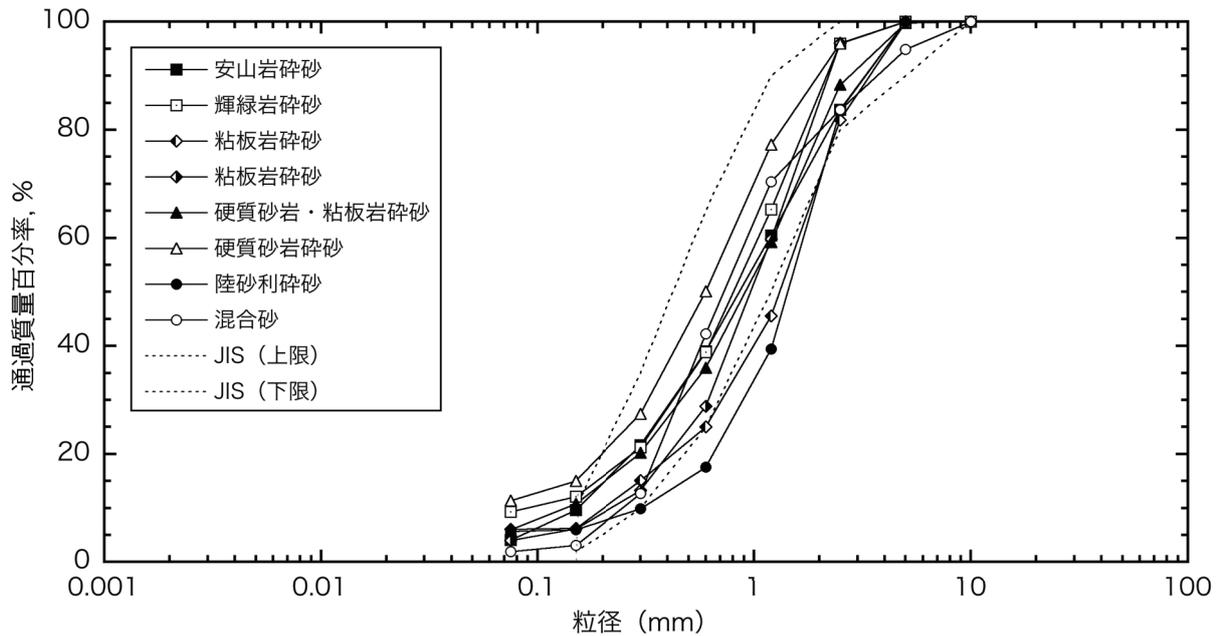


図1 粒径加積曲線

表1 粒径加積曲線

	土粒子密度 (g/cm^3)	平均粒径 (mm)	均等係数	曲率係数	細粒分含有率 (%)	粗粒率
安山岩	2.80	0.84	7.67	0.97	4.13	2.85
輝緑岩	3.03	0.78	11.84	1.97	9.31	2.66
粘板岩	2.73	1.30	7.95	1.59	6.05	3.26
粘板岩	2.73	0.96	5.41	1.38	4.03	2.96
硬質砂岩・粘板岩	2.73	0.89	9.31	1.35	6.04	2.86
硬質砂岩	2.70	0.59	12.67	2.25	11.38	2.34
陸砂利碎砂	2.73	1.42	5.60	1.54	5.66	3.44
混合砂	2.78	0.85	7.73	0.97	1.92	2.93

砕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。試料のデジタル画像は、透過画像として取得する。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。この時、画像二値化のための閾値を判別分析法により決定する。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、粒子形状を測定する。

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4つの粒度区分(5-2.5mm・2.5-1.2mm・1.2-0.6mm・0.6-0.3mm)を対象に実施した。画像取

得の際の入力解像度は6400dpiと設定し、粒度区分ごとの標本数は100-200粒程度とした。

2.3 粒子形状評価

本研究では、粒子形状の評価指標として丸さ、凹凸係数、円磨度を測定した。

丸さ(Roundness)¹²⁾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。ここで、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(1)式で定義される(図2A)。

$$\text{丸さ} = \frac{lb}{la} \quad (1)$$



写真1 測定装置

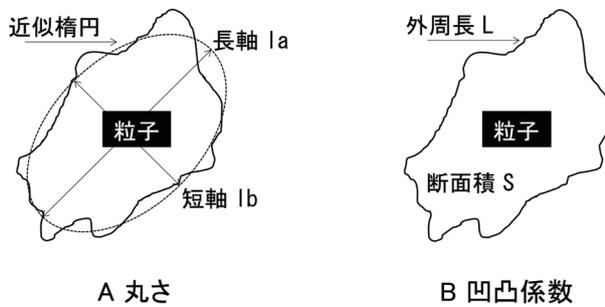


図2 粒子形状評価指標

丸さは近似楕円が真円の場合に 1 となり、扁平の度合いが大きくなるにともない低下する指標である。

凹凸係数 (Coefficient of form unevenness)¹³⁾は、円形度 (Circularity)¹²⁾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(角張度)・縁に丸みがあるか(円磨度)を表す指標である。ここで、粒子投影断面の面積を S 、周長を L とするとき、凹凸係数は(2)式で定義される(図2B)。

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

凹凸係数は粒子形状を真円と想定した場合に 1 となり、周長が一定のままで面積が小さくなる(形状が真円から楕円へと長細くなる)にともなって、または、面積が一定のままで周長が長くなる(真円から凹凸が増える)にともなって低下する指標である。

しかしながら、凹凸係数には丸さの異なる粒子の凹凸の大きさを直接比較することができないという形状評価上の欠点を有する。この凹凸係数の欠点を改善する方法として、Takashimizu and Iiyoshi¹⁰⁾は新しい円磨度を提案した。

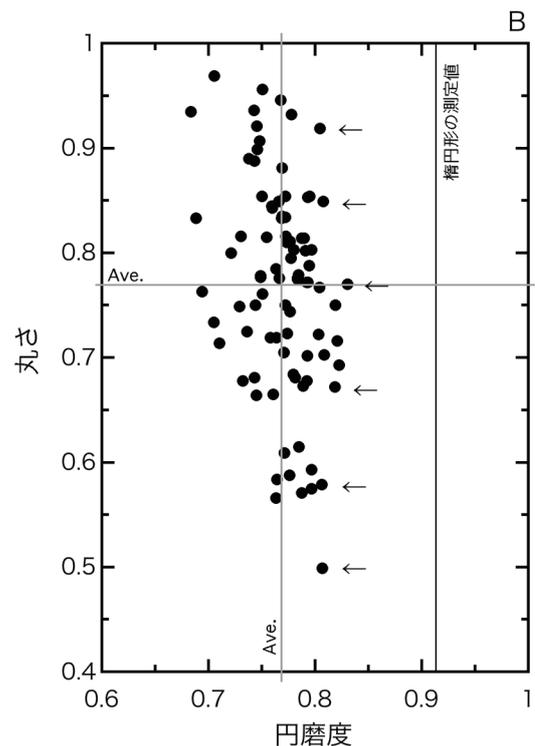
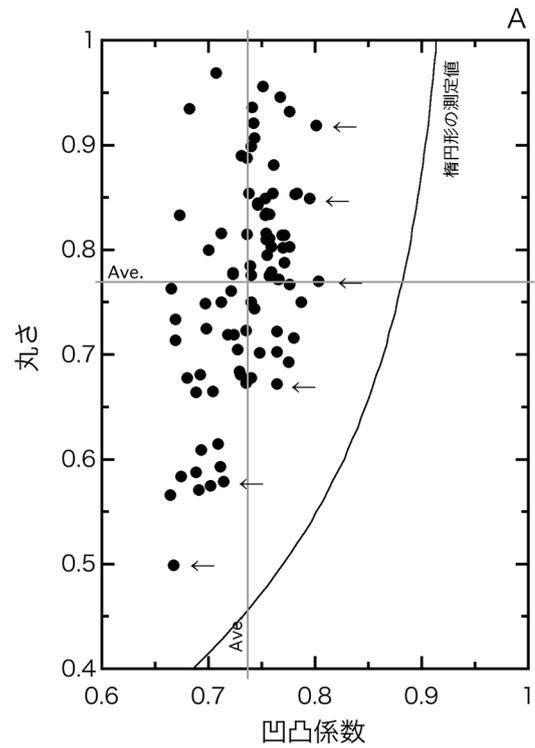


図3 粒子形状評価の一例
粘板岩砕砂、粒度区分 2.5-1.2mm

新しい円磨度 (New parameter of roundness : R) は、凹凸係数をアスペクト比 (丸さの逆数) で補正することで粒子形状の角張度 (または円磨度) のみを定量化する指標である。ここで、凹凸係数_{真円} を真円の

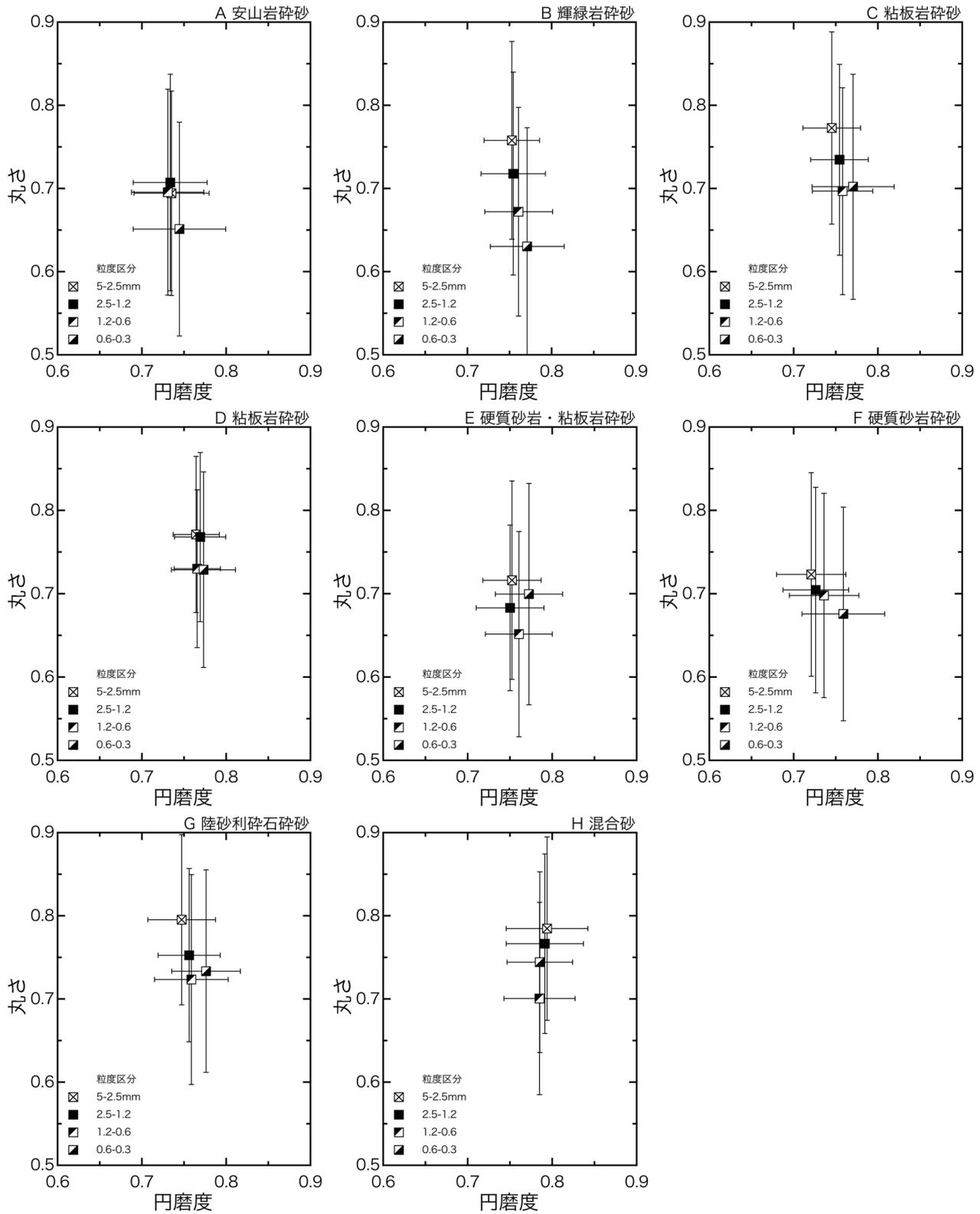


図4 砕砂・混合砂の粒子形状評価

値（最大値をとる）、凹凸係数_{アスペクト比} を真円から丸さ（縦横比）のみが変化したときの値とするととき、円磨度は(3)式で定義される。

$$\text{円磨度} = \text{凹凸係数} + (\text{凹凸係数}_{\text{真円}} - \text{凹凸係数}_{\text{アスペクト比}}) \quad (3)$$

Takashimizu and Iiyoshi は、画素数が 100～

1024pixels、縦横比が 10:10~10:1 (アスペクト比が 1~10) の範囲にある様々なサイズの真円・楕円のデジタル画像を対象に、画像解析ソフトウェア ImageJ を用いて円磨度 R を分析した。その結果、円磨度 R は(4)式で算出できることを明らかにした。

$$R = C_I + (0.913 - C_{AR}) \quad (4)$$

$$C_{AR} = 0.826261 + 0.337479 \cdot AR_I - 0.335455 \cdot AR_I^2 + 0.103642 \cdot AR_I^3 - 0.0155562 \cdot AR_I^4 + 0.00114582 \cdot AR_I^5 - 0.0000330834 \cdot AR_I^6$$

ここで、 C_I は ImageJ で測定した粒子の凹凸係数、 C_{AR} は測定した粒子と同じアスペクト比をもつ楕円の凹凸係数、 AR_I は測定した粒子のアスペクト比 (丸さの逆数) である。なお、真円の凹凸係数の項が理論値の 1 ではなく 0.913 と低い値をとるのは、真円を微小四角形の集合体に変換する際に生じる誤差 (量子化誤差) によるものである

3. 実験結果

3. 1 測定結果の一例

粒子形状評価の一例として、図 3 に粘板岩砕砂の粒度区分 2.5-1.2mm における凹凸係数と丸さの分布 (A) と円磨度と丸さの分布 (B) を示す。図中には楕円形の測定値 (検量線)⁹⁾ と、丸さ・凹凸係数・円磨度の平均を合わせて示した。

図 3 A より砕砂の凹凸係数と丸さの関係は、広範囲に分布することがわかる。特に、丸さの分布範囲は広く、丸さ約 0.97 (縦横比 1:1.03) のほぼ円形から約 0.5 (縦横比 1:2) の長細い粒子までの範囲を占めている。また、図中の矢印で示した 6 つの粒子 (丸さ 0.92・0.85・0.77・0.67・0.58・0.50) について凹凸の大小を比較すると、凹凸係数は楕円形の測定値 (検量線) の曲線とほぼ同じ傾きで分布していることから、これら 6 つの粒子は凹凸係数の値は異なるが凹凸の程度はほぼ同じであると判断することができる。

一方、図 3 B より砕砂の円磨度と丸さの関係は、「ノ」の字の形状に分布していた凹凸係数と丸さの関係から「I」の字の分布形状へと変化していることがわかる。また、楕円形の測定値 (検量線) は円磨度を用いることで直線となり、粒子の凹凸の大小を比較する際に検量線は不要となる。その結果、図中の矢印で示した 6 つの粒子を円磨度で比較すると、凹凸係数では「同程度である」と判断した粒子形状の凹凸の程度には、実際には差があることが明確となる。具体的には、丸さ 0.77 の粒子の円磨度が 0.83 と最も大きく、また、丸さ 0.92・0.85・0.58・0.50 の 4 つの粒子は円磨度がほぼ同じ 0.8 であることが読み取れる。

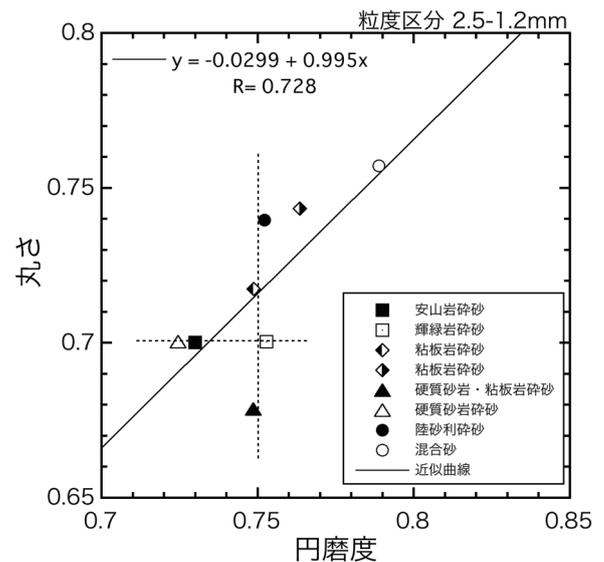


図 5 円磨度と丸さの関係

以上より、本研究では粒子形状評価を円磨度の平均値と丸さの平均値を用いて検討することにした。

3. 2 粒子形状評価

砕砂・混合砂の粒子形状評価 (円磨度と丸さの平均値) を図 4 に示す。同図には円磨度と丸さの標準偏差も合わせて示した。図 4 A-G の砕砂の粒子形状は、概ね粒度区分が小さくなるほど扁平 (丸さが低下) し、角張り度合いは減少 (円磨度が増加) する傾向がみられる。また、粒度区分の違いにともなう丸さの変化は円磨度のそれよりも大きい。

個々の砕砂に着目して粒度区分と粒子形状の関係を分析すると、その傾向は①粒度区分が小さくなるほど丸さが減少し円磨度が増加するもの (図 4 B, F)、②丸さと円磨度の値がほとんど変化しない粒度区分があるもの (図 4 A, C, D)、③粒度区分が 1.2-0.6mm から 0.6-0.3mm へと小さくなったにも関わらず、円磨度と丸さが増加するもの (図 4 E, G) の 3 つに分類することができる。また、混合砂 (図 4 H) の円磨度と丸さの関係は、砕砂のそれとは異なり、粒度区分が小さくなるにしたがって円磨度が減少する傾向を示している。これは、陸砂の粒度調整に陸砂利砕砂 (図 4 G) を加えた影響によるものと考えられる。

以上で示した砕砂の粒度区分と粒子形状の関係は、原石や製造装置・生産過程の違いを反映しているものと考えられる。しかしながら、粒度区分・円磨度・丸さに及ぼす岩種・産地や製造装置・生産過程の影響についての知見を得ることはできなかった。

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

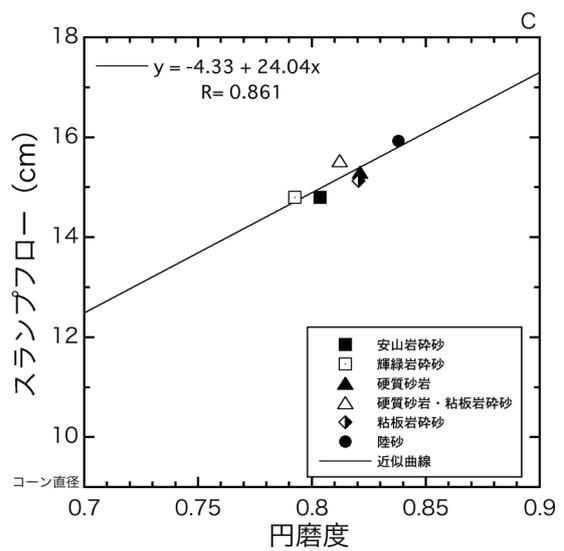
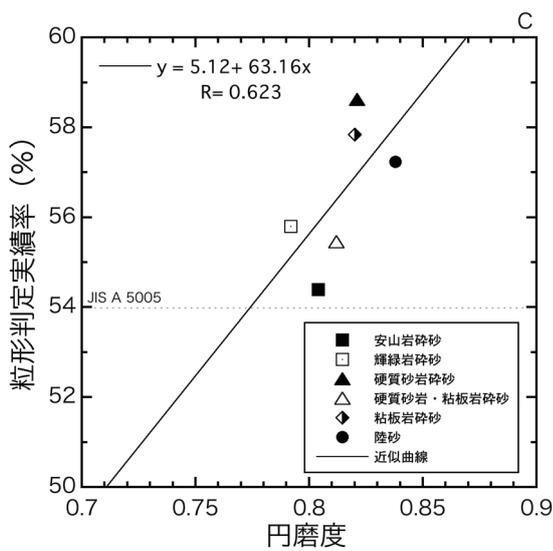
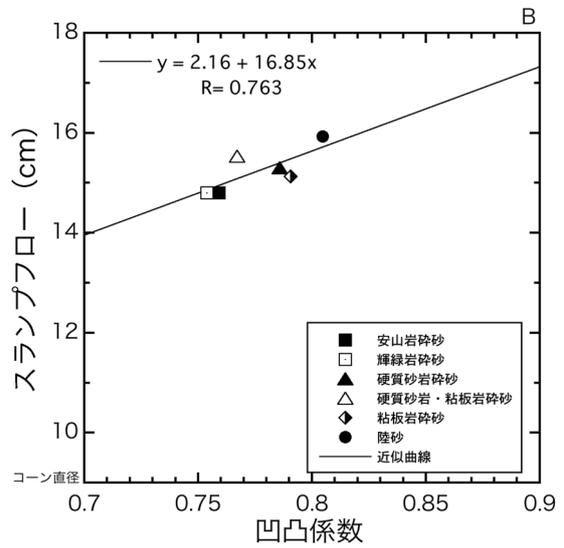
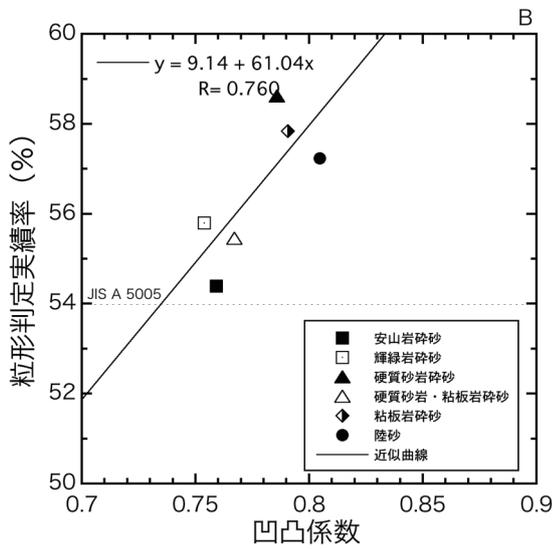
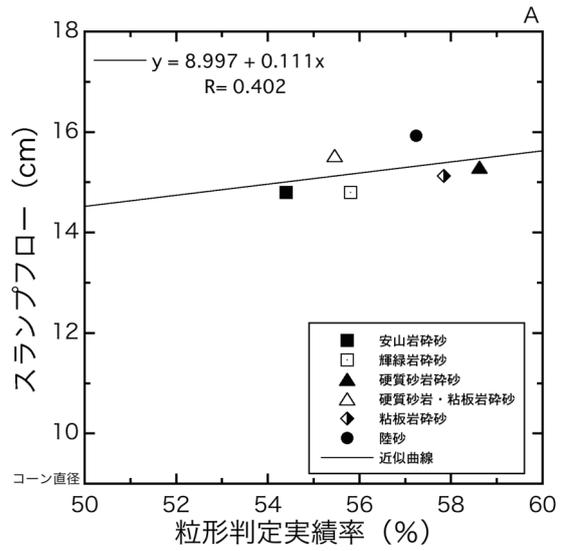
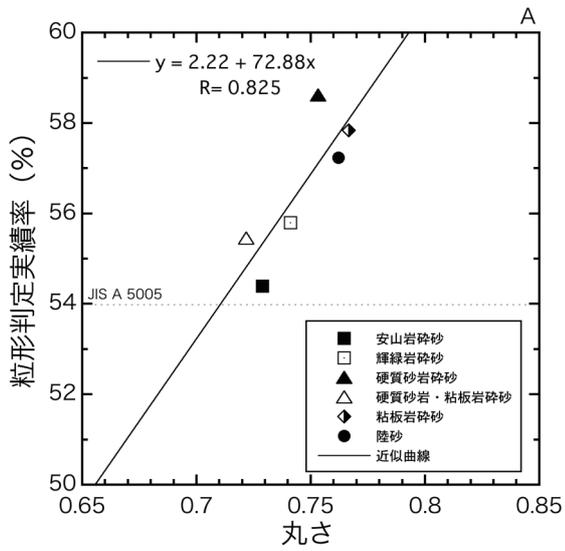


図6 粒径判定実績率と粒子形状の関係
粒度区分 2.5-1.2mm

図7 スランプフローと粒子形状の関係
粒度区分 2.5-1.2mm

おける砕砂の粒子形状について比較した。図5に粒度区分 2.5-1.2mm における砕砂の円磨度と丸さの関係を示す。同図の円磨度と丸さはそれぞれの砕砂の平均値をプロットしている。

図5より本実験で用いた砕砂は円磨度と丸さの間に強い正の相関があり、丸さが高く（真円に近く）なるほど円磨度も高く（凹凸が少なく）なる傾向にある。また、本実験においては天然砂を80%含む混合砂の方が砕砂よりも円磨度も丸さも高い値を示す。しかしながら、同図を詳しく分析すると、陸砂利砕砂と粘板岩砕砂、輝緑岩砕砂、粘板岩・硬質砂岩砕砂の結果より、円磨度が約0.75と同程度であるにも関わらず丸さが0.74から0.68と広範囲に分布することが読み取れる。また、輝緑岩砕砂と安山岩砕砂、硬質砂岩砕砂の結果より、丸さが0.7と同程度であるにも関わらず円磨度が0.75から0.72の範囲に分布することも読み取れる。以上のことより、円磨度と丸さの関係は必ずしも正の相関があるとは言えないことが明らかとなった。

4. 粒子形状と細骨材としての性状の関係

著者らはこれまで砕砂・天然砂の細骨材としての性状と丸さ・凹凸係数の関係について検討を行ってきた⁹⁾。そこで、本研究では文献9)の丸さと凹凸係数の測定結果から円磨度を算出し、円磨度と細骨材としての性状の関係について新たに検討を行った。

図6に砕砂・天然砂の粒形判定実積率と粒子形状の関係を示す。通常、粒形判定実積率（JIS A 5005）は、骨材の単位容積質量および実積率試験（JIS A 1104）に基づいて測定を行う。しかし、本図の粒形判定実積率は、砂の最小密度・最大密度試験方法（JIS A 1224）より評価したものである⁹⁾。また、同図における粒子形状の測定は、粒子の画素数が約30pixelと小さく円磨度を算出する(4)式の適用範囲外であった。そこで、本章では長軸30pixelの楕円の丸さと凹凸係数の関係（文献9図3）より円磨度を新たに算出する(5)式を立て直し、円磨度を求めた。

$$R = C_I + (0.937 - C_{AR}) \quad (5)$$

$$C_{AR} = 0.00020031 + 2.5222 \cdot AR_I - 2.1216 \cdot AR_I^2 + 0.6491 \cdot AR_I^3 - 0.44306 \cdot AR_I^4 + 0.33058 \cdot AR_I^5$$

ここで、 C_I はImageJで測定した粒子の凹凸係数、 C_{AR} は測定した粒子と同じアスペクト比をもつ楕円形の凹凸係数、 AR_I は測定した粒子のアスペクト比（丸さの逆数）である。

図6Aと図6Bより、丸さ・凹凸係数ともに粒子形状と粒形判定実積率の間には正の相関が見られ、その相関は丸さの方が強い。従来の報告^{7), 14)}とも調

和的である。図6Cより、円磨度と粒形判定実積率の間でも正の相関が見られるが、その相関は凹凸係数よりもさらに弱い。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7に砕砂・天然砂のスランプリューフローと粒子形状の関係を示す。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リューフロー試験やスランプリューフロー試験を基に評価する。しかし、同図のスランプリューフローは、著者らが考案したフローコーンを用いたスランプリューフロー試験を基に評価したものである⁹⁾。また、同図の円磨度は、図6と同様に(5)式より求めたものである。

図7Aと図7Bより、粒形判定実積率・凹凸係数ともに粒子形状とスランプリューフローの間には正の相関が見られ、粒形判定実積率との関係は中程度の相関（図は省略するが、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。図7Cより、スランプリューフローと円磨度の間においても正の強い相関が見られるが、その相関は凹凸係数よりもさらに強い。

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、以上の結果は、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。したがって、砕砂の流動性改善には、粒子の扁平の度合いよりも角張りの度合いの方が重要であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、砕砂の粒子形状評価指標に丸さで補正された凹凸係数である新しい円磨度を導入し、円磨度とこれまで本研究で粒子形状評価指標に用いてきた丸さと凹凸係数との比較を行った。

その結果、新しい円磨度を用いることで砕砂の角張りの度合いの差を凹凸係数よりも明確にすることができた。また、粒形判定実積率で用いられる粒度区分2.5-1.2mmの砕砂について円磨度を比較すると、本研究で用いた8種類の砕砂・混合砂の内4種類で丸さが0.68~0.74の範囲に分布するにも関わらず円磨度は約0.75であり、これらの砕砂は同程度の角張り度合いであることを明らかにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、試料を提供下さった碎石研究会会員各社ならびに骨材資源工学会会員各社に感謝申し上げます。

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) 鴨志田直人，今井忠男：砕砂の粒子形状観察と細骨材としての性状評価，骨材資源，48(191)，123-132，2016
- 10) Yasuhiro Takashimizu and Maiko Iiyoshi：New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio, Takashimizu and Iiyoshi Progress in Earth and Planetary Science (2016), DOI 10.1186/s40645-015-0078-x
- 11) 土木学会：コンクリート標準仕様書 基準編 JIS規格集,(東京都,日本基準協会,2013)
- 12) 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
- 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) 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

(2018年2月21日受付 2018年5月16日受理)