

フローコーンを用いた 砕砂の流動性評価^{※)}

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ている¹⁾。粗骨材の約8割を砕石で賄っているが、砕砂については細骨材の4割以下しか利用されていない²⁾。その原因として、砕砂は天然砂と比較して粒子形状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³⁾。今後、天然砂の代替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望まれる。

一般に、細骨材の粒子形状がコンクリートの諸性状に及ぼす影響に関する研究では、細骨材の流動性についてモルタルフロー^{4), 5), 6)}やコンクリートスランプ^{7), 8)}を用いて評価することが多い。しかし、この測定法では砕砂の粒子形状と、水セメント比、単位水量、細骨材比、空気量、セメントの銘柄、粗骨材の種類など数多くの因子を明確に分けることができず、細骨材そのものの流動性を定量的に把握することはできない。したがって、細骨材の粒子形状がコンクリートの諸性状に及ぼす影響を明らかにするためには、細骨材単体での流動性を定量評価する必要がある。

著者らは、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⁹⁾。ここで、この研究におけるスランプフローは、フローコーン（上面内径40mm、底面内径90mm、高さ75mmの円錐台）に細骨材を詰めてできた円錐台形が崩れ落ちた際の広がり（最大値とその直角方向の値の平均）とした。試験の結果、砕砂（粒径2.5-1.2mm）の粒子形状評価（凹凸係数）と細骨材のスランプフローの関係には正の相関が

あることが確認された。しかし、本測定方法は崩落後の試料について、広がりが最大と思われる直径とその直交する方向の直径を0.1cm単位で測定する必要があり、細骨材の違いによる測定値の差が非常に小さいこと、また、測定者の技量によって測定値が左右されやすいことなどの課題も明らかとなった。

本研究では、砕砂の粒子形状と流動性の関係を明らかにすることを目的とし、フローコーンを用いたスランプフロー試験の改良を試みた。具体的には、測定者に関係なくフローコーンの引き上げ速度が一定となるように、できるだけ「速やかに」引き上げる（フローコーンを引き上げる時間は高さ8cmで0.2秒以下）方法と試料をできるだけ崩さないように「慎重」に引き上げる（高さ8cmで8秒以上）方法の2つの速度を採用した。また、スランプフローをより正確に求めるため、崩落した試料の広がりを記録用紙に書き写し、その書き写した広がりに対して最大と認められる直径と、最小と認められる直径（最大と思われる直径と直交する方向とは限らない）を測定する方法を採用した。

得られたスランプフロー試験の結果より、粒径の違いが砕砂の流動性に及ぼす影響について、さらに、粒子形状が砕砂の流動性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 試料

本研究では、新潟県長岡市産の陸砂利砕砂と混合砂（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、密度・粗粒率と粒度特性値を表1にそれぞれ示す。粒径加積曲線は土の粒度試験方法（JIS A 1204）¹⁰⁾を準用し、骨材のふるい分け試

※) 2019年2月21日受付 2019年4月5日受理

※※) 学会会員 岩手大学理工学部 助教 博士(工学)

※※※) 個人正会員 理事 秋田大学国際資源学部 教授 博士(工学)

(2)

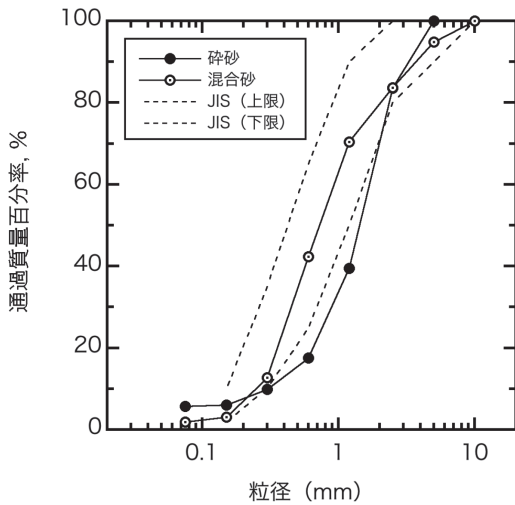


図1 粒径加積曲線

表1 密度・粗粒率と粒度物性値

| | 砕砂 | 混合砂 |
|-------------------------|------|------|
| 密度 (g/cm ³) | 2.73 | 2.78 |
| 粗粒率 | 3.44 | 2.93 |
| 平均粒径 (mm) | 1.42 | 0.85 |
| 均等係数 | 5.60 | 7.73 |
| 曲率係数 | 1.54 | 0.97 |
| 細粒分含有率 (%) | 5.66 | 1.92 |

験 (JIS A 1102)¹¹⁾ で規定されるふるいを用いて測定した。なお、JIS A 1204とJIS A 1102の主な違いは、ふるい分けの前に0.075mm以下の微粒分を洗い流すか否かにある。密度は細骨材の密度及び吸水率試験方法 (JIS A 1109)¹¹⁾ により測定し、さらに図1より、粗粒率をJIS A 1102に則って、平均粒径・均等係数・曲率係数・細粒分含有率をJIS A 1204に則って算出した。

本研究で用いた陸砂利砕砂は、細目の陸砂を生コン向け出荷用に粒度調整するために製造したものであるため、図1に示すように粒度分布が土木学会標準示方書¹¹⁾ に規定された標準粒度範囲 (点線) の外に一部外れていることが特徴である。

本研究では、試料を3つの粒度 (2.5-1.2 mm・1.2-0.6 mm・0.6-0.3 mm) に篩い分けし、0.075mm以下の微粒分を洗い流した後、それぞれの粒度区分毎に流動性を定

量評価した。

2.2 フローコーンを用いた細骨材のスランプフロー試験

細骨材の流動性は、モルタルのフロー試験やフレッシュコンクリートのスランプ試験・スランプフロー試験を基に評価することが一般的である。しかし、本研究では細骨材単体の流動性を評価するため、フローコーンを用いた細骨材のスランプフロー試験により定量評価を試みた。本試験法は、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¹²⁾ より着想を得た細骨材の流動性評価手法⁹⁾ であるが、本論文ではこの試験法に改良を加えた形で実施した。

(1) 試験器具

本試験では、図2に示すように細骨材の密度および吸水率試験 (JIS A 1109)¹¹⁾ に規定されるフローコーン (上面内径40mm、底面内径90mm、高さ75mmの円錐台) と砂の最小密度・最大密度試験 (JIS A 1224)¹⁰⁾ で規定される漏斗および直ナイフ、その他に記録用紙 (方眼紙)、油性ペン (超極細)、直尺 (JIS1級 300mm)、刷毛を用いた。

(2) 試験手順

フローコーンを用いた細骨材のスランプフロー試験は、以下の手順で行った。

始めに、記録用紙の中央にフローコーンを設置し、その中に漏斗を用いて絶乾状態の細骨材を注ぎ込むように緩く詰める。具体的には、フローコーン底面部中央に漏斗を立て、その中に試料 (絶乾状態の細骨材) を入れた後、漏斗を一定の速さで鉛直に引き上げフローコーンの



図2 試験器具

上端面全周から試料をあふれさせる。このとき、フローコーン内の試料最頂部と漏斗の口先が離れないように、かつ試料が途切れないように注意して入れる。フローコーンの上端面の縁に直ナイフをのせ、素早く滑らせ一気に余盛り部分を除去する。記録用紙上に落ちた試料は、刷毛を用いて取り除く。

次に、フローコーンを静かに鉛直に引き上げ、試料の広がりを見計らう。具体的には、試料の動きが止まった後、その広がりを記録用紙に書き写し、その広がりが最大と認められる直径と最小と認められる直径（最大と思われる直径と直交する方向とは限らない）をそれぞれ直尺で測定し、0.1cm単位で記録する。スランプフローは両直径の平均値を0.1cm単位で表す。

3. 実験結果

3.1 フローコーンの引き上げ速度と計測回数の検討

フローコーンを用いた細骨材のスランプフロー試験によるスランプフローは、フローコーンの引き上げ速度や計測回数に左右されると考えられる。そこで本研究では、山口県下関市豊浦産の豊浦珪砂（粒度区分0.3-0.15mm）を用いて予備試験を行った。ここで、豊浦珪砂とは、粒に丸みがあり、粒度が細かく均一に揃っており、不純物が少ないという特質から、実験などにおける誤差が生じ難く、セメントやコンクリートの強度・密度検査、土質・地質の実験などで標準的に使用されている砂である。

図3に豊浦珪砂のフローコーンを用いた細骨材のスランプフロー試験の結果を示す。本試験では、フローコーンをできるだけ「速やかに」引き上げた場合（Fast）と、試料をできるだけ崩さないように「慎重」に引き上げた場合（Slow）の結果を示した。本研究ではフローコーンの引き上げる時間を高さ8cmで0.2秒以下（Fast）と、8秒以上（Slow）に設定した。また、各引き上げ速度においてそれぞれ9回測定を行っており、本図には測定回数3、5、7、9回の平均値と標準偏差を示した。

始めに測定回数とスランプフローの関係を見ると、Fastの結果では回数を重ねても平均値と標準偏差に変化は見られない。また、Slowの結果においても、標準偏差がやや小さくなるものの平均値には変化は見られない。したがって、本試験法において測定回数は3回で十分であると考えられる。

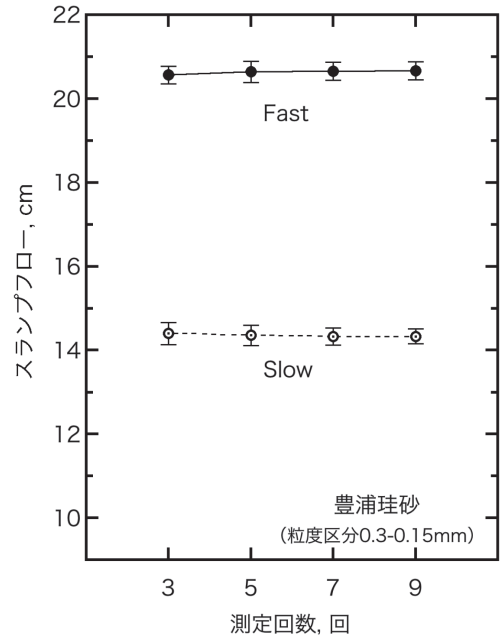


図3 測定回数とスランプフローの関係

表2 スランプフローより求めた傾斜角

| 条件 | フロー cm | 底面積 cm ² | 体積 cm ³ | 高さ cm | 傾斜角 deg. |
|------|-----------|------------------------|-----------------------|----------|-------------|
| Fast | 20.6 | 332 | 244.7 | 2.21 | 12.1 |
| Slow | 14.4 | 163 | 244.7 | 4.51 | 32.0 |

次にフローコーンの引き上げ速度とスランプフローの関係を見ると、Fastの方がSlowよりも値が大きく、試料が大きく崩れ落ちたことで広範囲に広がっていることが分かる。そこで、スランプフローと試料の流動性との関係について考察した。具体的には、崩れ落ちた後の形状を三角錐と近似することで傾斜角を算出した。

スランプフローより求めた傾斜角を表2に示す。ここでは、崩れ落ちた後の試料の体積をフローコーンの体積と等しい（砂粒子間の空隙（空隙率）は変化しない）と仮定することで三角錐の高さを算出し、その高さと半径（スランプフローの2分の1）から崩れ落ちた後の斜面と水平面とのなす角度（傾斜角）を求めた。

Slow条件での傾斜角は32.0度であり、これは豊浦珪砂の安息角（34.0度¹³⁾に近い値と言える。したがって、この条件では、試料の相互摩擦によってその自由表面が静的平衡状態を保つことができる最大角度（安息角）に

(4)

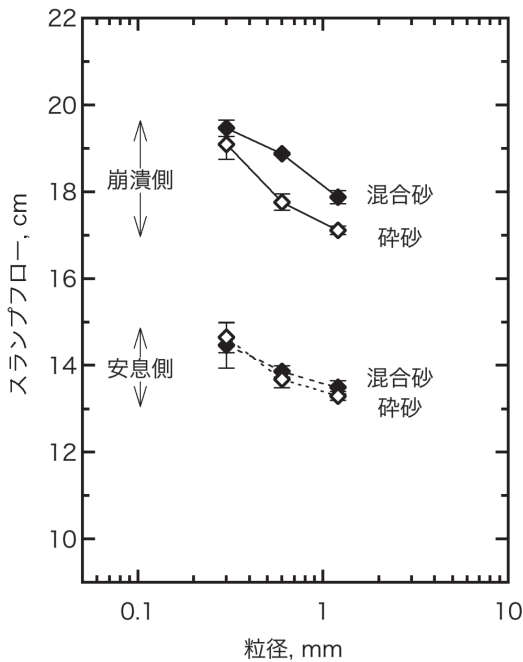


図4 粒径とスランプフローの関係

近い状態を再現しているものと考えられる。

一方、Fast条件の傾斜角は12.1度であり、こちらは、豊浦珪砂の崩潰角は明確ではないが、安息角に一定の衝撃を与えて崩れたときの角度（崩潰角）に近い状態を再現しているものと推察される。

以上より、本研究ではフローコーンをできるだけ速やかに引き上げた場合（Fast）の結果を「崩潰側」の、試料をできるだけ崩さないように慎重に引き上げた場合（Slow）の結果を「安息側」のスランプフローとして扱うことにした。

3.2 砕砂・混合砂のスランプフロー

砕砂と混合砂の粒径とスランプフローの関係を図4に示す。同図には3回測定した時の平均値と標準偏差を示した。

同図より、砕砂と混合砂と共通してスランプフローは粒径が小さいほど大きくなる傾向が見られ、その傾向は崩潰側の方が安息側よりも顕著である。また、砕砂と混合砂を比較すると、崩潰側のスランプフローは混合砂の方が大きい傾向を示すが、安息側ではほぼ同じ値となる。

以上より、同じ粒径で比較した場合、フローコーンをできるだけ速やかに引き上げた場合では、砕砂の方が混

合砂よりも流動性が低いという結果となったが、試料をできるだけ崩さないように慎重に引き上げた場合では、砕砂と混合砂とで流動性に差は無いという結果となった。

4. 考察

4.1 粒子形状とスランプフローの関係

一般に、砕砂を用いたコンクリートでは流動性が低下することが知られており、その要因の1つとして、砕砂は天然砂と比べて粒子形状が角張っていることが挙げられる。そこで、砕砂と混合砂の測定結果より、スランプフローと粒子形状の関係について検討した。

一般的に粒子形状の評価指標としては、粒子投影断面の面積Sと周長Lから算出される凹凸係数（ $=4\pi S/L^2$ ）が用いられる。しかし、この係数に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り、丸さ（縦横比）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。そこで、本研究では試料の粒子形状の評価指標として、凹凸係数をアスペクト比（丸さの逆数）で補正する手法で粒子形状の角張度（または円磨度）のみを定量化する円磨度¹⁴⁾を用いた。なお、本研究における円磨度の最大値（真円の円磨度）は、理論値1とはならず、それよりも小さな値をとる。この原因は、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）に起因するものである。

試料の粒径毎の粒子形状評価を図5に示す。ここで、粒子形状の測定にはスキャナーを用いたデジタル画像処理によりその角張り（または円磨）の度合いを定量化した。なお、スキャナーを用いた粒子形状の測定では、試料の粒度区分に関係なく解像度を固定、または画素数を固定の条件下でデジタル画像を取得する必要がある⁹⁾。図5では画素数固定（ふるいの呼び寸法当り約30pixel）の条件下で粒子形状を測定した。なお、本測定条件では円磨度の最大値（真円の円磨度）は、0.937となる。

図5より、砕砂の円磨度は粒径に関係なく同程度である。一方、混合砂の円磨度は粒径が小さくなるほど減少する傾向を示す。また、同じ粒径で比較すると、粒径0.6-0.3 mmを除き、混合砂の方が砕砂よりも円磨度が大きい、つまり縁に丸みがあることがわかる。

次に、円磨度とスランプフローの関係を図6に示す。

(5)

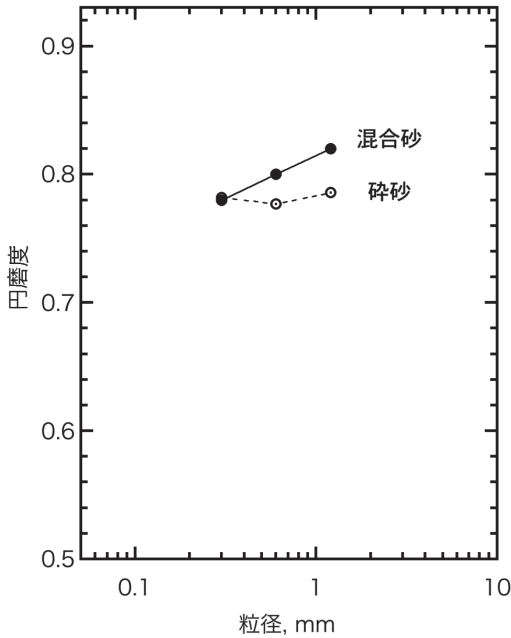


図5 粒径と円磨度の関係

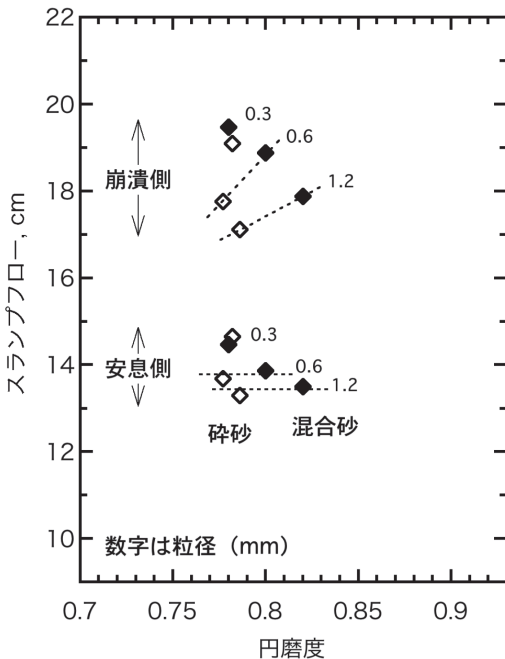


図6 円磨度とスランプフローの関係

同一の粒径で円磨度の違いを比較した場合、粒径2.5-1.2 mmと1.2-0.6 mmでは、円磨度が大きいほど崩潰側のスランプフローは大きい値を示す。一方、安息側では円磨度の大小に関わらずスランプフローの値はほぼ変わらない。また粒径0.6-0.3 mmでは、砕砂と混合砂の円磨度の差が小さいため、崩潰側・安息側ともにスランプフローの値はほぼ変わらない。以上より、細骨材の粒子形状(円磨度)は崩潰側のスランプフローに影響を及ぼすことが示唆される。

次に、同一の試料で粒径の違いを比較した場合、混合砂では粒径が2.5-1.2 mmから0.6-0.3 mmと小さくなるにしたがい、円磨度は減少するにも関わらず、崩潰側・安息側ともにスランプフローは増加する傾向を示す。また、その増加の度合いは崩潰側の方が安息側と比較して顕著である。一方、砕砂では粒径が小さくなるにしたがい、円磨度の差が非常に小さいにも関わらず混合砂と同様にスランプフローは増加する傾向を示す。こちらも、その増加の度合いは崩潰側の方が顕著である。

粉体の流動性を支配する主要因は、粒子間の相互作用力と摩擦力であると考えられ、これらの力に関与する粒子固有の因子としては、密度、平均粒径と粒度分布、粒子形状などが挙げられる。したがって、同一の試料で粒径の影響を比較した、粒径が小さくなるにしたがい(円磨度は減少するにも関わらず)スランプフローは増加するという結果は、流動性に及ぼす粒子形状の影響は、粒径と比較して小さいことを意味している。

4.2 スランプフローによる流動性の定量評価

粉体の流動性のしやすさを評価する手法の1つに、Carrの流動性指数および噴流性指数がある¹⁵⁾。ここで、流動性とは外から力が作用した時にある一定の力までは静止していて、力の限界を超えると急に流れ出す性質を、噴流性とは流れ出した後に粉体が空気を取り込むことで液体のように流れ出す性質を表している。流動性指数は粉体の圧縮度、安息角、スパチュラ角、凝縮度もしくは均一度の4因子により、噴流性指数は先に述べた流動性指数に崩潰角、差角、分散度を加えた4因子により求まる指数である。

フレッシュコンクリートのコンシステンシーに及ぼす細骨材の性状を考える上では、流動性よりも噴流性が重要であると考えられるが、これは、4.1で明らかにした

(6)

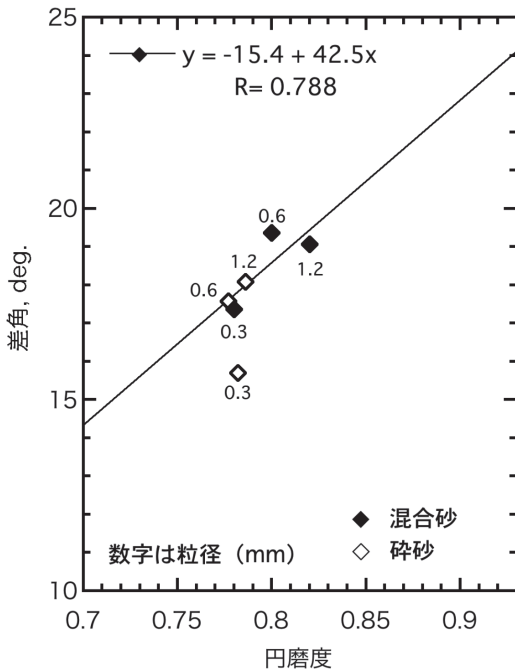


図7 円磨度と差角の関係

「細骨材の粒子形状（円磨度）は崩潰側のスランブフローに影響を及ぼすことが示唆される」の根拠と言える。

さらに、安息側と崩潰側のスランブフローを、それぞれ安息角と崩潰角に対応すると仮定すると、差角（安息角と崩潰角の差）を求めることができる。この差角は、崩潰角と同様にCarrの噴流性指数の因子の1つでもある。そこで、差角と円磨度の関係についても検討を行った。具体的には、安息側と崩潰側のスランブフローから3.1と同様に安息角と崩潰角を算出することで差角を求めた。

図7に砕砂と混合砂の円磨度と差角の関係を示す。同図より、円磨度の差が大きい混合砂では、円磨度が大きくなるにしたがい差角は増加する傾向を示す（相関係数0.788）。一方、粒径が異なるにも関わらず円磨度の差が非常に小さい砕砂では、円磨度と差角の間に相関は見られない。混合砂の結果は、差角を用いることで、コンクリートのコンシステンシーに及ぼす細骨材の性状を、粒径に関係なく粒子形状と流動性（正確には噴流性）の関係として定量評価できることを示唆している。しかしながら、円磨度の差が非常に小さい砕砂の結果より、差角

を用いても流動性に及ぼす粒径の影響を完全には取り除くことはできないことに留意すべきである。

5. まとめ

本研究では、砕砂の流動性の定量評価方法であるフローコーンを用いたスランブフロー試験の改善を試みた。次に、得られたスランブフロー試験の結果より、砕砂の流動性に及ぼす粒径と粒子形状の影響について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 豊浦珪砂を用いた予備試験結果より、試験方法を改善することで正確にスランブフローを測定することが可能となる。
- (2) フローコーンの引き上げ速度を変えることで、安息角に近い状態のスランブフロー（安息側のスランブフロー）と崩潰角に近い状態のスランブフロー（崩潰側のスランブフロー）を測定することができる。
- (3) 砕砂と混合砂の測定結果より、スランブフローは粒径が小さくなるほど増加する傾向を示す。また、崩潰側のスランブフローでは混合砂の方が砕砂よりも大きい値を示すが、安息側では混合砂と砕砂で値に差が見られない。
- (4) 粒子形状と流動性の関係について、異なる試料を同一の粒径で比較した場合、円磨度が大きいほど崩潰側のスランブフローは大きい値を示す。一方、安息側では、円磨度の大小に関わらずスランブフローの値はほぼ変わらない。したがって、粒子形状は崩潰側のスランブフローに影響を及ぼすことが示唆される。
- (5) 同一の試料を粒径の違いで比較した場合、粒径が小さくなるにしたがい、円磨度は減少するにも関わらず崩潰側・安息側ともにスランブフローは増加する傾向を示す。一方、砕砂では、粒径が小さくなるにしたがい、円磨度の差が非常に小さいにも関わらず、こちらもスランブフローは増加する傾向を示す。この結果は、流動性に及ぼす粒子形状の影響は、粒径の影響と比較して小さいことを意味する。
- (6) 円磨度の差が大きい混合砂の結果から、差角を用いることで、粒径に関係なく粒子形状と流動性（正確には噴流性）を定量評価できる可能性が示唆される。しかし、円磨度の差が非常に小さい砕砂の結果より、差

角を用いても流動性に及ぼす粒径の影響を完全には取り除くことはできない。

本試験結果は、細骨材単体での粒子形状と流動性の関係について定量評価を試みたものである。将来、細骨材の粒子形状がコンクリートの流動性に及ぼす影響を評価するためには、細骨材のスランフローとモルタルフロー・コンクリートスランプとの関係性を明らかにする必要がある。

謝 辞

本研究は一般社団法人日本砕石協会の平成29年度研究助成を受けて実施した。試料は骨材資源工学会会員より提供頂いた。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），（2017.4.14公表）
- 2) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課，国土交通省水管理・国土保全局水政課：砂利採取業務状況報告書集計表，（2017.4.14公表）
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 湯間謙治，高海克彦，古谷治昭，浜田純夫：研磨砕砂の物性評価，コンクリート工学年次論文報告集，26（1），111-116，2004
- 6) 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
- 7) 田澤栄一，米倉重州夫，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状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，11（1），35-40，1989
- 8) 和田勉，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
- 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) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説－二分冊の1－，（東京都，地盤工学会，2010）
- 11) 土木学会：コンクリート標準仕様書標準編JIS規格集，（東京都，日本基準協会，2013）
- 12) 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
- 13) 蜂谷菜穂子，菊池剛志，飛田善雄，山口晶，吉田望：粒状体の安息角と流動に関する基礎的実験，土木学会東北支部技術研究発表会（平成20年度），289-290，2008.
- 14) 鴨志田直人，齊藤剛，今井忠男：新しい円磨度を用いた砕砂の粒子形状評価，建設用原材料，26（1），15-22，2018.
- 15) R. L. Carr, Jr.: Evaluating flow properties of solids. Chem. Eng.72, 163-168, 1965.