

B型粘度計を用いた砕砂の流動性定量評価

QUANTIFICATION EVALUATION FOR FLUIDITY OF CRUSHED SAND USING B-TYPE VISCOMETER

鴨志田直人*・今井忠男**

by Naoto KAMOSHIDA 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利・砂の供給量は減少している¹⁾。粗骨材の約8割を碎石で賄っているが、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。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、細骨材の流動性をモルタルフロー^{3), 4), 5)}やコンクリートスランプ^{6), 7)}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一外から力が作用した時にある一定の力までは静止し、力の限界を超えると急に流れ出すという特徴一を定量的に把握することは難しい。したがって、細骨材の粒子形状がフレッシュ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、画像解析手法による砕砂の粒子形状の定量評価⁸⁾とフローコーンを用いた砕砂の流動性評価⁹⁾を試み、砕砂のスランプフロー（流動性）は砕砂の円磨度（円磨の度合い）の影響が小さく、粒子の丸さ（縦横比）に強い相関があること、そして、一般に砕砂の粒子形状判定に用いられる粒形判定実積率との相関は弱いことを明らかにした。しかし、フレッシュモルタル内の砕砂には浮力や間隙水圧、ペーストの粘性などが作用することで、その流動性が変化することが考えられる。したがって、乾燥状態

の砕砂を用いた流動性の定量評価指標は、液相に分散する砕砂の流動性を評価しているとは言えない。

本研究では、フレッシュモルタル内での砕砂の流動性を評価する前段階として、セメントの銘柄やモルタルの配合比の影響を取り除いた砕砂そのものの流動性評価を目的に、水中に充填された状態での砕砂の流動性評価方法の確立を目指す。具体的には、回転式粘度計を用いて固液2相材料（砕砂＋水）の見かけ粘度の測定を試みる。次に、液相が砕砂の流動性に及ぼす影響を検討するため、乾燥状態での流動性と比較する。最後に、粒形判定実積率および粒子形状評価指標を用いて、粒子形状が砕砂の流動性に及ぼす影響を検討する。

2. 回転式粘度計

2. 1 流体の粘性

流体がせん断変形をうけるとき、これに抵抗する性質を粘性という。図1¹⁰⁾に示す様に、流体中に面積 A の厚さが無視できる平面を2枚平行になるように間隔 h で挿入したとする。一方を固定し、他方を平行に移動させると、上下の板に接触している流体は平板面との境界ですべりが生じないので、平板面と流体の相対速度は0となる。したがって、平板を速度 U で移動させるのに必要な力を F とすると、せん断応力 $\tau = F/A$ と速度勾配 $du/dy = U/h$ の間には比例関係が成り立つ。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

ここで、粘性の強さを示す比例定数 μ を粘度または粘性係数といい、それぞれの流体に固有な物性値であ

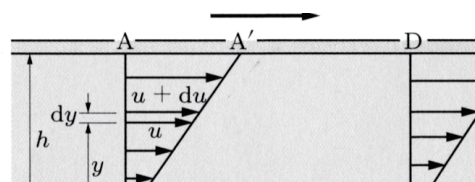


図1 流体の摩擦力¹⁰⁾

* 岩手大学准教授 理工学部システム創成工学科
社会基盤・環境コース (〒020-8551 岩手県盛岡市上
田4-3-5)、** 秋田大学教授 国際資源学部国際資
源学科

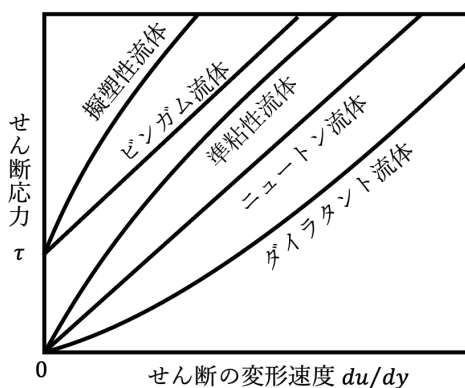


図2 流動曲線

る。水、油や空気など多くの流体は温度と圧力が与えられれば du/dy などに関係なく μ は一定値をとる。このような流体をニュートン流体とよび、それ以外の流体を非ニュートン流体という。

ニュートン流体と非ニュートン流体のせん断応力と速度勾配との関係（流動曲線）を図2に示す。ニュートン流体の流動曲線は原点を通る傾き μ の直線となり、非ニュートン流体では様々な曲線となる。せん断応力または速度勾配により粘度が変化するとき、これを見かけの粘度という。粘土泥しょうやフレッシュコンクリートはビンガム流体、適当な配合の砂と水の混合物はダイラタント流体に属する。

2. 2 回転式粘度計

粘度測定法としてJIS Z 8803に規格化されているのは、回転式粘度計、細管式粘度計、落球粘度計、振動粘度計の4種類である。これらのうち、本研究では一般的によく利用されている回転式粘度計を用いる。

回転式粘度計の構造を図3¹¹⁾に示す。粘度計本体のモーターの回転はスプリングを介してローターに伝達される。測定中、浸漬されたローターの外周には液体の粘度摩擦トルクがはたらき、このトルクとスプリングの力が平衡した状態で定常回転する。トルクの大きさはローター軸に固定された指針の偏角として、モーター軸に直結された目盛板で読み取った値に比例する。粘度 μ はせん断応力 τ 、せん断速度 γ とすると、次式で決まる。

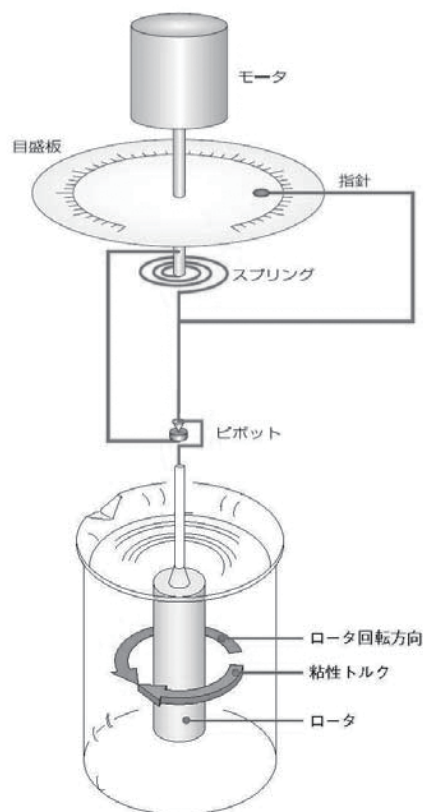
$$\tau = k_1 \theta \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

$$\gamma = k_2 \omega \quad [\text{s}^{-1}] \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (4)$$

ただし、 k_1 、 k_2 は粘度系固有の定数、 θ はねじれ角(rad)、 ω は回転速度(rad/s)である。

本研究では単一筒型回転式粘度計を使用した。本粘度計は、他の粘度計よりも構造が単純で取り扱い

図3 回転式粘度計の構造¹¹⁾

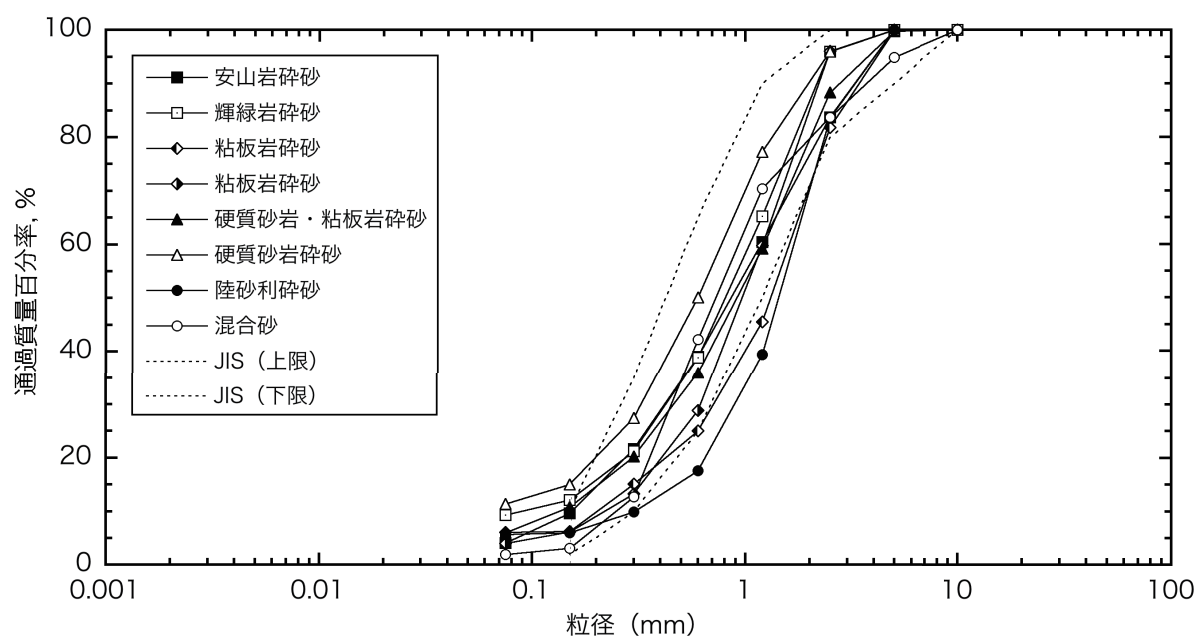
が容易であること、ずり速度またはずり応力を測定できないが、回転速度を変えることで粘性挙動を知ることができること、回転円筒に対して比較的大きい試料を用いることができるので、分散系の液体でも分散質の妨害なしに測定ができることなどの特徴を有する。

3. 実験方法

3. 1 試料

本研究では、以前、著者らが粒子形状評価を行った⁸⁾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つ砕砂と混合砂（新潟県長岡市産、陸砂80%+陸砂利砕砂20%）を用いた。

試料の粒度加積曲線を図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⁸⁾。ここで、粒度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

図4 粒径加積曲線⁸⁾表1 粒度特性⁸⁾

	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
安山岩碎砂	2.80	0.84	7.67	0.97	4.13	2.85
輝緑岩碎砂	3.03	0.78	11.84	1.97	9.31	2.66
粘板岩碎砂	2.73	1.30	7.95	1.59	6.05	3.26
粘板岩碎砂	2.73	0.96	5.41	1.38	4.03	2.96
硬質砂岩・粘板岩碎砂	2.73	0.89	9.31	1.35	6.04	2.86
硬質砂岩碎砂	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

定した。また、本研究での粒度試験のふり分けは、骨材のふり分け試験 (JIS A 1102) の粒度区分に則って行った。図4より試料の粒度分布は陸砂利碎砂を除き、コンクリート用碎石および碎砂 (JIS A 5005) に定められている砂の標準粒度 (点線) の範囲内にある。

本研究では、碎砂の流動性に及ぼす粒度分布の影響を取り除き、粒子形状の影響のみに着目するため、粒形判定実積率で用いられる呼び寸法2.5-1.2mmに篩い分けした試料を代表的な碎砂の粒子形状ととらえ実験に供した。

3.2 実験装置

回転式粘度計の選定には、泥の粘度を測定した細井ら¹²⁾や、砂の粘度を測定した国松ら¹³⁾の報告を基に碎砂の見かけ粘度範囲を想定し、本研究ではB型粘

度計 (ブルックフィールド、HBDV2T) を用いた (図5)。本粘度計の測定範囲は、0.8-320,000Pa・sである。スピンドルには、予備実験の結果からベーン長11.76mm、ベーン径 (回転の直径) 5.89mmの羽根型スピンドル (ブルックフィールド、V-74) を用いた (図6)。試料を入れる容器には200mLビーカー (岩城硝子) を用いた。

3.3 実験手順

碎砂の粘度測定は以下の手順で行った。はじめに、200mLビーカーに、水道水に浸した試料を200 mLの目盛りまで充填する。この時、試料は水道水に十分に浸るようにする。本研究では、試料の充填は羽根型スピンドルが回転できるようにゆる詰めの状態とした (実積率43.9-48.3%、平均46.3%)。次に、羽根型スピンドルを回転式粘度計に取り付け、所定の深さ

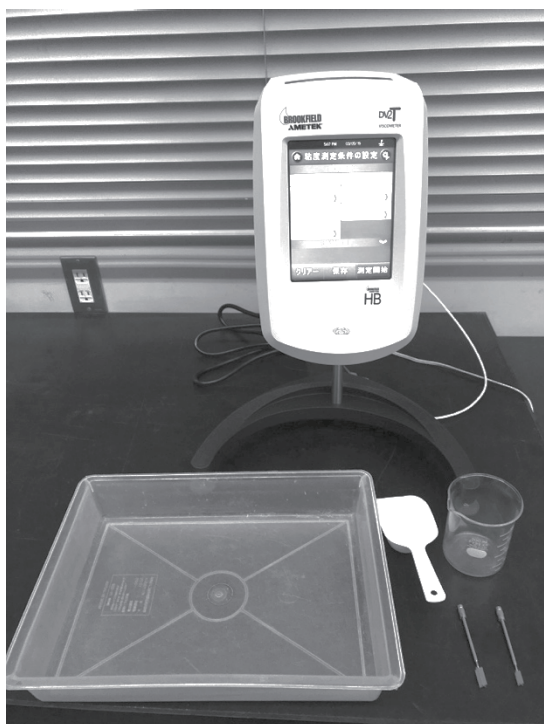


図5 実験装置



(a) スピンドルの挿入深さ (b) 試料を入れた状態

図6 スピンドルの位置

までスピンドルを試料に挿入する。最後に、試料の表面が平らになるように整えたあと、測定を開始する。

本研究では、スピンドルの挿入深さを（試料表面からスピンドル挿入位置までの距離）を、予備実験の結果から16mmとした（図6）。これは、200mLビーカーの200mL目盛りから150mL目盛りまでの距離に相当する。なお、挿入深さを深くすると、自重により試料の摩擦抵抗が増加するために、スピンドルに掛かる抵抗は大きくなり、最終的には測定可能な粘度の範囲を超えてしまう。反対に浅くすると、羽根の回転により回転半径の外側に移動した試料がその場

に留まることで円錐状の凹みが形成され、試料表面より羽根が露出することになり、スピンドルに掛かる抵抗は小さくなる。そこで、本実験では、円錐状の凹みに試料が崩れ落ちることにより、羽根が試料から見えなくなるように、つまり、ベーン長全体に試料が当たるように、挿入深さを設定している。

スピンドルの回転速度は、砕砂を測定する際の適切な回転数が不明だったので粘度計の設定可能範囲である0.1-200rpmを基に、200rpm、20rpm、2rpmの3通りとした。また、測定時間は2分間とし、そのうち後半1分間における粘度の平均値を記録した。測定回数は1つの試験条件につき10回繰り返し、それらの平均値を測定値として採用した。

4. 実験結果

図7に回転速度と見かけ粘度の関係を示す。図中のマーカーは測定回数10回（陸砂利砕砂と混合砂は3回）の平均値を、エラーバーは標準偏差を表す。同図より砕砂の見かけ粘度は、回転速度が一桁速くなると一桁程度小さくなり、両者の関係はべき関数で近似することができる。また、回転速度が速くなるほど見かけ粘度のバラツキは小さくなる。ここで、回転速度をせん断速度と読み替えると、砕砂の流動性は、せん断速度に依存することから、フレッシュコンクリートのようなビンガム流動よりも擬塑性流動に似た挙動を示している。さらに、回転速度の遅い2rpmではスピンドルが回転と停止を小刻みに繰り返し返される現象が確認された。これは、外から力が作用した時にある一定の力までは静止し、力の限界を超えると急に流れ出すという流動性の特徴を捉えたものであると考えられる。そこで2rpmでの見かけ粘度を、本研究では試料の代表的な見かけ粘度として扱った。

図8に2rpmでの見かけ粘度とべき関数の傾きの関係を示す。回転速度2rpmでの見かけの粘度は5.882～12.11kPa・sの範囲に分布し、試料によって差が見られる。他方、傾きは1.088～1.114の範囲にあり、試料による違いは見られない。

5. 考察

5.1 見かけ粘度とスランプフローの関係

浮力が砕砂の流動性に及ぼす影響を検討するため、本試験結果と乾燥状態での流動性と比較した。乾燥状態での砕砂の流動性評価には、著者らが提案したスランプフロー試験⁹⁾を用いた。ここでスランプフロー試験とは、「細骨材の密度および吸水率試験」

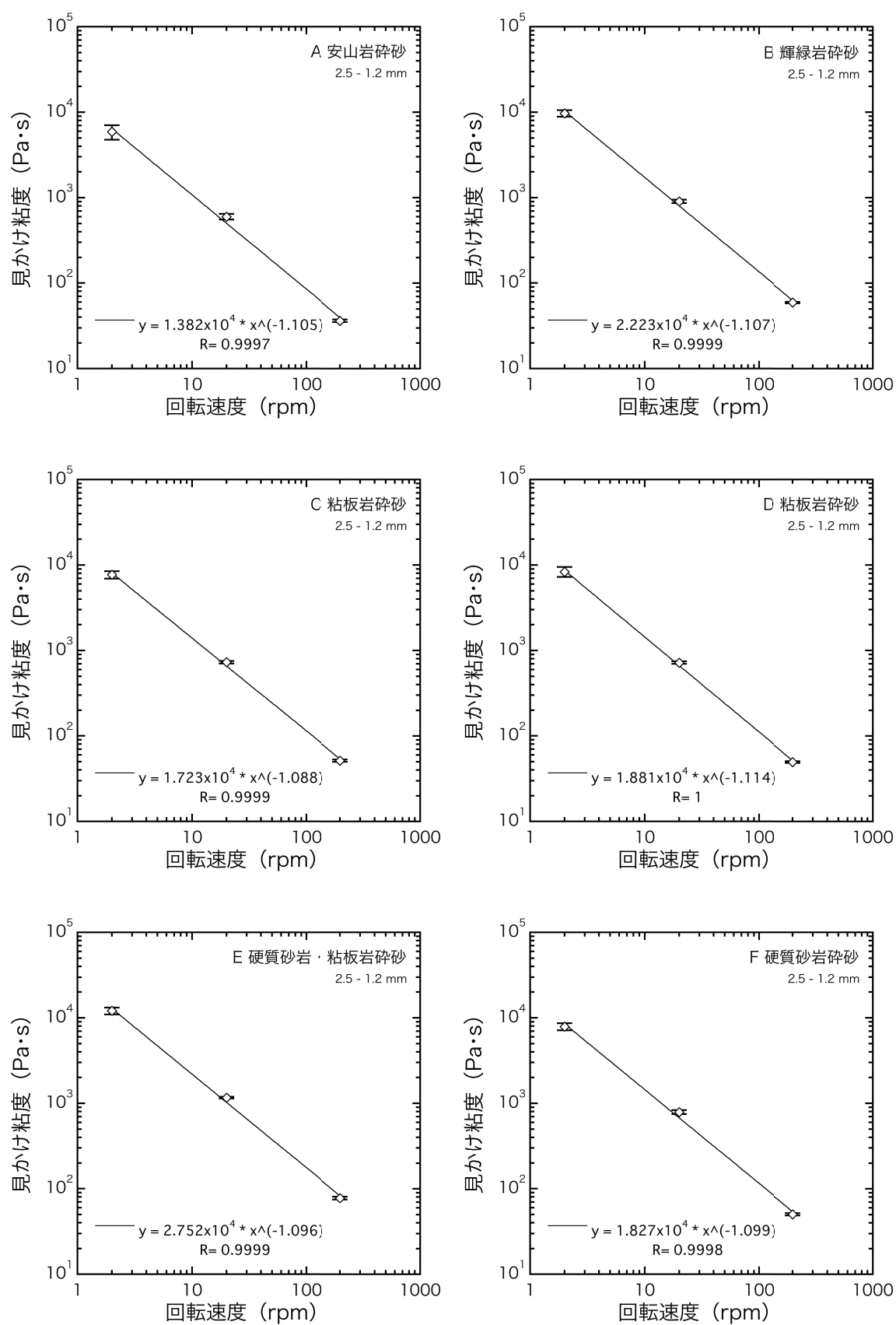


図7 回転速度と見かけ粘度の関係 (その1)

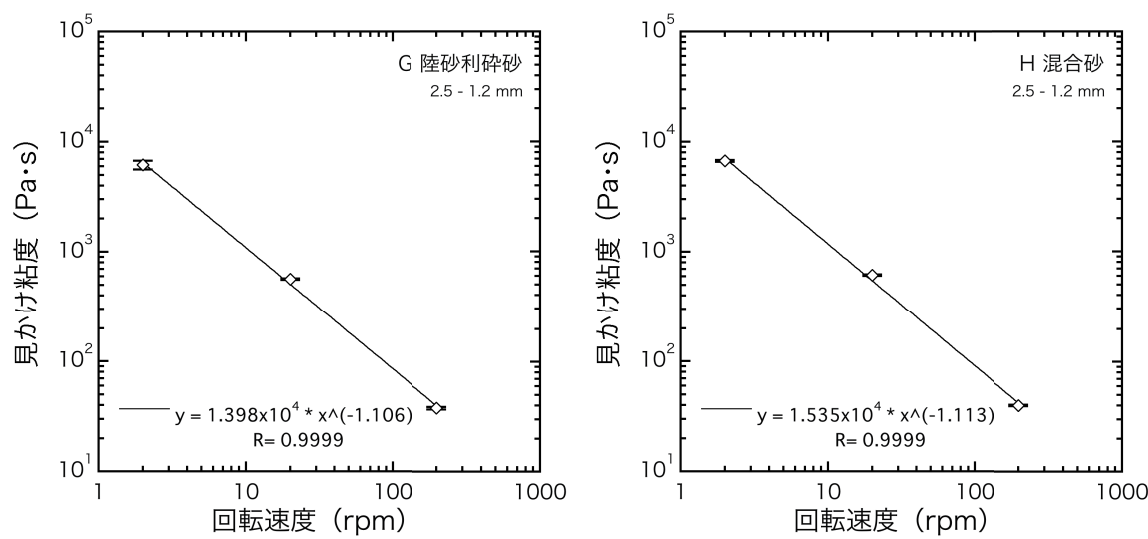


図7 回転速度と見かけ粘度の関係（その2）

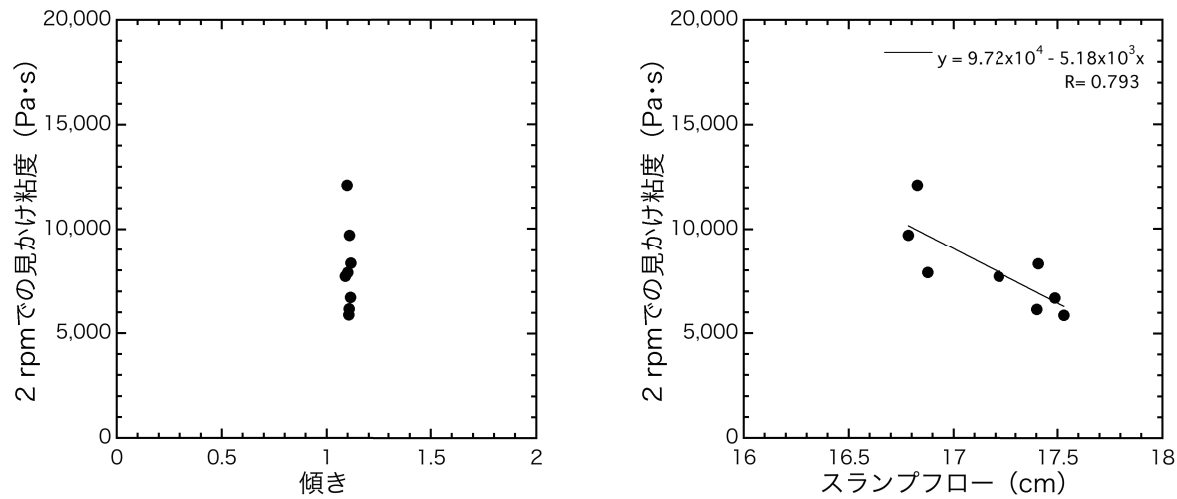


図8 べき関数の傾きと2rpmでの見かけ粘度の関係

図9 見かけ粘度とスランプフローの関係

(JIS A 1109) 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）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）を測定し、流動性を評価するものである。スランプフロー試験には見かけ粘度の測定と同じ呼び寸法2.5-1.2mmに篩い分けした試料を使用した。

図9に2rpmでの見かけ粘度とスランプフローの関係を示す。スランプフローが大きい（流動性が良い）ほど見かけ粘度は小さく（流動性が良く）なる。絶乾状態で測定した砕砂の流動性と浮力が働いた状態での流動性の間には、相関係数0.793の強い正の相関

がみられる。見かけ粘度の計測において、ビーカーに充填した砕砂の状態は、浮遊砂のような微粒子が懸濁している流体ではなく、容器の底に沈んだ状態のままであったため、砕砂の流動性に及ぼす浮力の影響は小さかったものと考えられる。

5. 2 見かけ粘度と粒子形状の関係

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、砕砂の粒子形状は天然砂と比べて角張っていることが挙げられる。そこで、見かけ粘度と粒子形状の関係について検討した。ここで粒子形状評価の指標としては、コンクリート用砕砂の粒子形状の判定に用いられる粒形判定実積率と、家庭用スキャナーを用

いた画像解析による丸さおよび円磨度を用いた⁸⁾。
ここで、丸さとは、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り、近似楕円の長軸と短軸の半径をそれぞれ la 、 lb とするとき次式で定義される。

$$\text{丸さ} = \frac{lb}{la} \quad (5)$$

また、円磨度とは、粒子投影断面の形状がどの程度角張っているか（角張度）または縁に丸みがあるか（円磨度）を表す指標であり、凹凸係数_{真円}を真円の値（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き、次式で定義される。

$$\text{円磨度} = \text{凹凸係数} + (\text{凹凸係数}_{\text{真円}} - \text{凹凸係数}_{\text{アスペクト比}}) \quad (6)$$

ここで、凹凸係数は粒子投影断面の面積を S 、周長を L とするとき次式で定義される。

$$\text{凹凸係数} = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (7)$$

図10に2rpmでの見かけ粘度と粒形判定実積率、丸さおよび円磨度の関係を示す。ここで、同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）より評価した結果を、丸さと円磨度は著者らが過去に測定した結果⁸⁾を用いた。両試験とも見かけ粘度の測定と同じ呼び寸法2.5-1.2mmに篩い分けした試料の結果である。また、画像解析に用いた砕砂の個数は、試料で異なるが100個前後（89-121個）である。同図(c)より丸さが大きくなる（円に近づく）ほど見かけ粘度は小さくなり、それらの関係には相関係数0.593の負の相関がみられる。一方で、(a)粒形判定実積率および(b)円磨度と見かけの粘度の関係は、相関係数がそれぞれ0.145と0.021であり、ほとんど相関がみられなかった。

以上の結果は、水中における砕砂の流動性を粒形判定実積率では評価できないこと、砕砂の流動性改善には、粒子の角張の度合い（円磨度）よりも扁平の度合い（丸さ）の方が重要であることを示唆している。

6. おわりに

本研究では、浮力が働いた状態における砕砂の見かけ粘度を、回転式粘度計を用いて測定した。次に、浮力が砕砂の流動性に及ぼす影響を検討するため、乾燥状態での流動性と比較した。最後に、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。得られた知見を以下にまとめる。

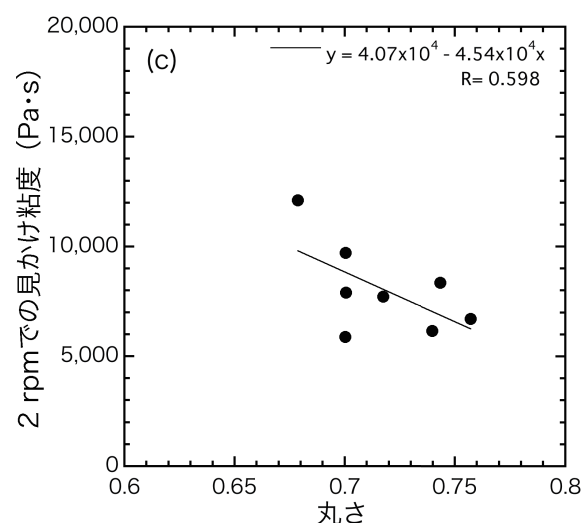
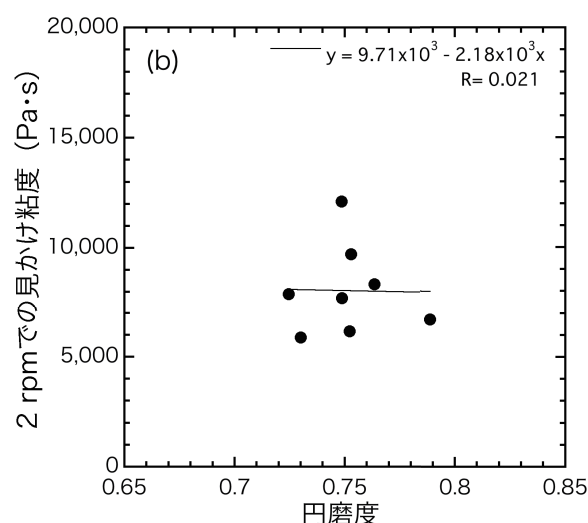
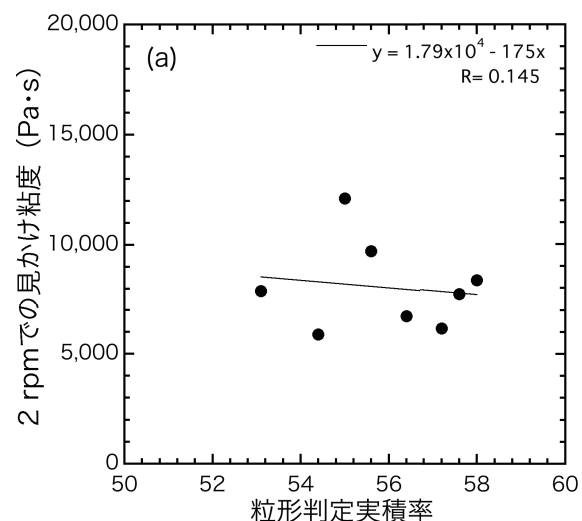


図10 見かけ粘度と粒子形状の関係

- (1) 砕砂の見かけ粘度は、回転速度が速くなると小さくなり、両者を対数にとると、それらの関係には強い負の相関が見られる。したがって、回転速度をせん断速度と読み替えると、浮力が働いた状態における砕砂の流動性は、せん断速度に依存することから、フレッシュコンクリートのようなビンガム流動よりも擬塑性流動に似た挙動を示したと考えられる。
- (2) 乾燥状態での流動性と比較した結果、スランプフローが大きい（流動性が良い）ほど見かけ粘度は小さく（流動性が良く）なる。絶乾状態で測定した砕砂の流動性と浮力が働いた状態での流動性の間には、強い相関がみられる。
- (3) 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結果、丸さが大きくなる（円に近づく）ほど見かけ粘度は小さくなり、それらの関係には負の相関がみられる。一方で、粒形判定実積率および円磨度と見かけの粘度の関係には、ほとんど相関がみられない。

本実験条件では、ビーカーに充填した砕砂が容器の底に沈んだ状態のままであったため、セメントペーストを分散媒、細骨材を分散相とするフレッシュモルタルのような分散系とは異なる条件での流動性評価になった可能性がある。したがって、今後はフレッシュモルタルに似た分散系での測定が望まれる。

謝辞

本研究は一般社団法人日本砕石協会の令和2年度研究助成を受けて実施した。試料は砕石研究会会員、および、長岡砂利採取販売協同組合組合員より提供頂いた。また、実験の遂行に当たっては元岩手大学学部の小松香織さん、膝国煌さんのご協力を得た。さらに、本稿の改良にあたり貴重なご指摘、ご意見を3名の匿名査読者から頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：平成29年度骨材需給表（新材ベース）（2020）https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/jyutaku/kotsuzai/29kotsuzaijukyuhyo.pdf,（参照2021-09-29）
- 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：平成29年度砂利採取業務状況報告書集計表（2020）http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/jyutaku/kotsuzai/29jari.pdf,（参照2021-09-29）
- 3) 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，Vol. 7, No. 1, pp. 67-77（1996）
- 4) 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，Vol. 26, No. 1, 111-116（2004）
- 5) 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，Vol. 27, No. 1, pp. 67-72（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状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 11, No. 1, pp. 35-40（1989）
- 7) 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，Vol. 27, No. 1, p. 73-78（2005）
- 8) 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，Vol. 26, No. 1, pp. 15-22（2018）
- 9) 鴨志田直人，今井忠男：フローコーンを用いた砕砂の流動性評価，骨材資源，No. 201, pp. 1-7（2019）
- 10) 宮井善弘，木田輝彦，仲谷仁志，巻幡敏秋：水力学（第2版），森北出版，p. 7（2014）
- 11) 東機産業株式会社技術部：回転粘度計と応用例，第7回流体物性クラブ（2013）http://www.nmij.jp/~nmijclub/fluidp/docimg/fluidp_2012_7_2.pdf,（参照2020-02-06）
- 12) 細井由彦，住友恒，岩井重久，福岡捷二：底泥の巻き上げに関する実験的研究（II），衛生工学研究討論会公演論文集，Vol. 15, pp. 28-33（1979）
- 13) 国松直，神宮寺元治，今泉博之：液状化した砂試料の粘性係数に関する一考察，土木学会論文集，659/Ⅲ-52, pp. 277-282（2000）
（2021年9月29日受付 2022年2月2日受理）