

ベントナイトペーストを用いた砕砂の流動性定量評価

QUANTIFICATION EVALUATION FOR FLUIDITY OF CRUSHED SAND USING BENTONITE PASTE

鴨志田直人*・菊地高羅**

by Naoto KAMOSHIDA and Takara KIKUCHI

1. はじめに

砕砂は、粒子形状が天然砂と比較して角張っていることからフレッシュコンクリートのフロー（流動性）が得られ難く、細骨材の4割以下しか利用されていない¹⁾。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^{（例えば2）}やコンクリートスランプ^{（例えば3）}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（ここでは、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特徴）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⁴⁾とフローコーンを用いた砕砂の流動性評価⁵⁾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の作用により流動性が変化することが考えられる。したがって、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という課題が残った。そこで、この課題を解決するため、固液2相材料（砕砂+水）の見かけ粘度の測定を回転式粘度計を用いて試みたところ⁶⁾、砕砂の見かけ粘度は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こと、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）なり、両者の間には強い相関がみられることを明らかにした。しかし、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考えられた。

一般に、セメントペーストやモルタル、コンクリートの流動性は、便宜上ビンガム流動としてモデル化することが多い^{（例えば7）}。その場合、流動性は降伏値と塑性粘度という2つのレオロジー定数によって評価される。また、降伏値はスランプ値と密接な関係があることが報告されている⁸⁾。

本研究では粒子形状の異なる砕砂で作成した疑似モルタルの降伏値の測定を試みた。具体的には、ベントナイトペースト（ベントナイト、水、豊浦標準砂を混合したもの）に砕砂を加えて擬似的なフレッシュモルタルを作製し、共軸二重円筒形回転粘度計を用いて降伏値を測定した。ここで、ベントナイトペーストを用いた理由は、フレッシュモルタルの流動性に及ぼす因子のうち、セメントの銘柄や単位水量、混和剤など砕砂の形状以外のものを除外するためである。

トン流動という。これとは反対に、傾きがせん断速度で変化する性質を非ニュートン流動という。図中ではダイラタント流動、塑性流動、擬塑性流動がそれに該当する。また、流動が始まるせん断応力 τ_0 （これを降伏値という）を持つものも非ニュートン流動に分類される。図中では、ビンガム流動、塑性流動がそれに該当する。

一般に、セメントペーストやモルタル、コンクリートの数式化で用いられることが多いビンガム流動は、降伏値を持ちながら流れ出すとニュートン流動のように一定の粘度となる挙動を示すものを指す。また、ビンガム流動の粘度はニュートン流動の粘度と区別して塑性

* 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）、** 岩手大学大学院総合科学研究科修士課程

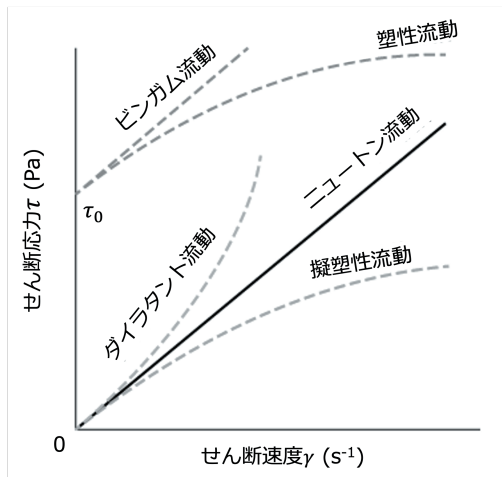
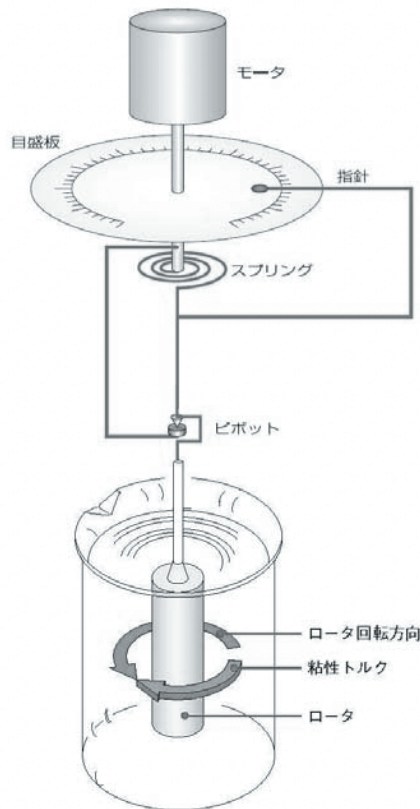


図1 流動曲線

図2 回転式粘度計の構造⁹⁾

粘度と定義される。

2.2 回転式粘度計

回転式粘度計の構造を図2⁹⁾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。

$$\tau = k_1 \theta \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

$$\gamma = k_2 \omega \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (3)$$

ここで、 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。

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⁴⁾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。

試料の粒径加積曲線を図3に、粒度特性値と密度を表1にそれぞれ示す⁴⁾。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。

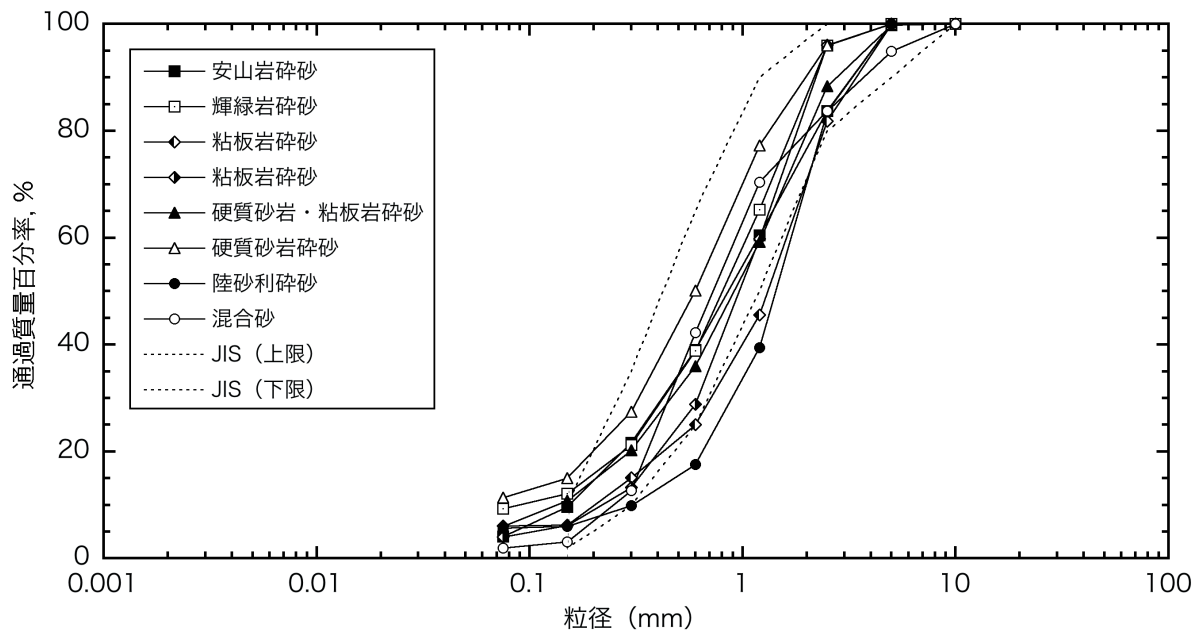
本研究では、砕砂の流動性に及ぼす粒度分布の影響を取り除き、粒子形状の影響のみに着目するため、粒形判定実積率で用いられる呼び寸法2.5-1.2mmにふり分けした試料を代表的な砕砂の粒子形状と仮定し、実験に供した。

3.2 実験装置

実験装置を図4に示す。本研究ではB型回転粘度計にHBDV2T(ブルックフィールド)を用いた。スピンドルにはSC4-27(ブルックフィールド、高さ33.02mm、直径11.76mm)を、試料を入れるためのサンプルチャンバーにはSC4-13R(ブルックフィールド、高さ64.77mm、直径19.05mm)をそれぞれ用いた。本実験装置構成の測定範囲は、8-6700 Pa・sである。

3.3 実験条件

擬似的なフレッシュモルタル(ベントナイトモルタル)は「JIS R 5201 セメントの物理試験方法」にならない、ペーストと細骨材の質量比を1:2で作製した。ここで、ベントナイトペーストの水/ベントナイト比は、質量比が大きいと粘度が小さくなり回転粘度計の測定可能範囲に収まらないこと、質量比が小さいと水とベントナイトを均一に混ぜ難いということより、質量比8で調整した。本研究では、ベントナイト

図3 粒径加積曲線⁴⁾表1 粒度特性⁴⁾

	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

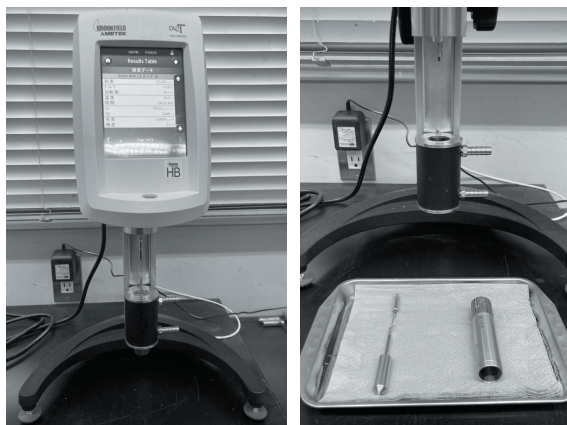


図4 試験装置 (左:B型回転粘度計、右:スピンドルとサンプルチャンバー)

は真密度2.6g/cm³、粒度0.001-0.004mmのものをを用いた。ベントナイトペーストの密度は1.08g/cm³である。

細骨材は碎砂（呼び寸法2.5-1.2 mm）と豊浦標準砂（粒度0.25-0.106 mm）の質量比を3:1とした。なお、ベントナイトモルタルに混入する粒子の体積は一定ではないが、土粒子密度の差が小さいことから、本論文では、混入体積の影響は無視できると判断した。

スピンドルの回転速度は、0.1、1、10、20、30、40、50rpmとした。実験は回転速度0.1rpmから開始し、6分間スピンドルを回転させた後、次の設定速度に回転速度を上げることで、スピンドルの回転を止めることなく実施した。粘度の測定は、各回転速度条件下において30秒間隔で12回行った。

せん断速度は、共軸二重円筒形の外筒と内筒の値から求まるせん断速度定数と回転速度の積より算出した。

ここで、本実験装置で用いたスピンドル（内壁）とサンプルチャンバー（外壁）の間は約3.6mmであり、呼び

寸法2.5-1.2mmの砕砂に対して1.4倍から3倍程度の距離しか確保できていない。したがって、サンプルチャンバー内のベントナイトモルタルの流動は、層流を再現できていないため、測定されるせん断応力には、粘性によるせん断応力のほかに乱れによる見かけのせん断応力が加わることに留意する必要がある。

4. 実験結果

図5にせん断速度とせん断応力の関係を示す。図中のマーカーは測定回数12回の平均値を、エラーバーは標準偏差を表す。また、破線は、後述するHerschel-Bulkleyモデルによる近似曲線である。回転速度0.1、1、10、20、30、40、50rpmは、共軸二重円筒形の外筒と内筒の値から求まるせん断速度定数との積により、せん断速度0.034、0.34、3.4、6.8、

10.2、13.6、17.0 s^{-1} となる。参考までに、予備実験で実施した細骨材を豊浦標準砂のみで作製したベントナイトモルタルの結果も合わせて示した。同図より砕砂に関係なく、せん断速度とせん断応力の関係は、ベントナイトモルタルの結果よりも大きな値を示す。したがって、砕砂はベントナイトモルタルの流動性を阻害することが明らかとなった。また全ての結果において、せん断速度の遅い領域（0.034、0.34 s^{-1} ）においてせん断応力が急増した後、せん断速度が速くなるにともないせん断応力は緩やかに増加する傾向を示す。一般に、セメントペースト、モルタルとコンクリートの流動曲線は、ビンガム流動で近似されることが多い。しかし、ほぼ線形的にせん断応力が増加するせん断速度の速い領域（6.8、10.2、13.6、17.0 s^{-1} ）の測定値に対してビンガム流

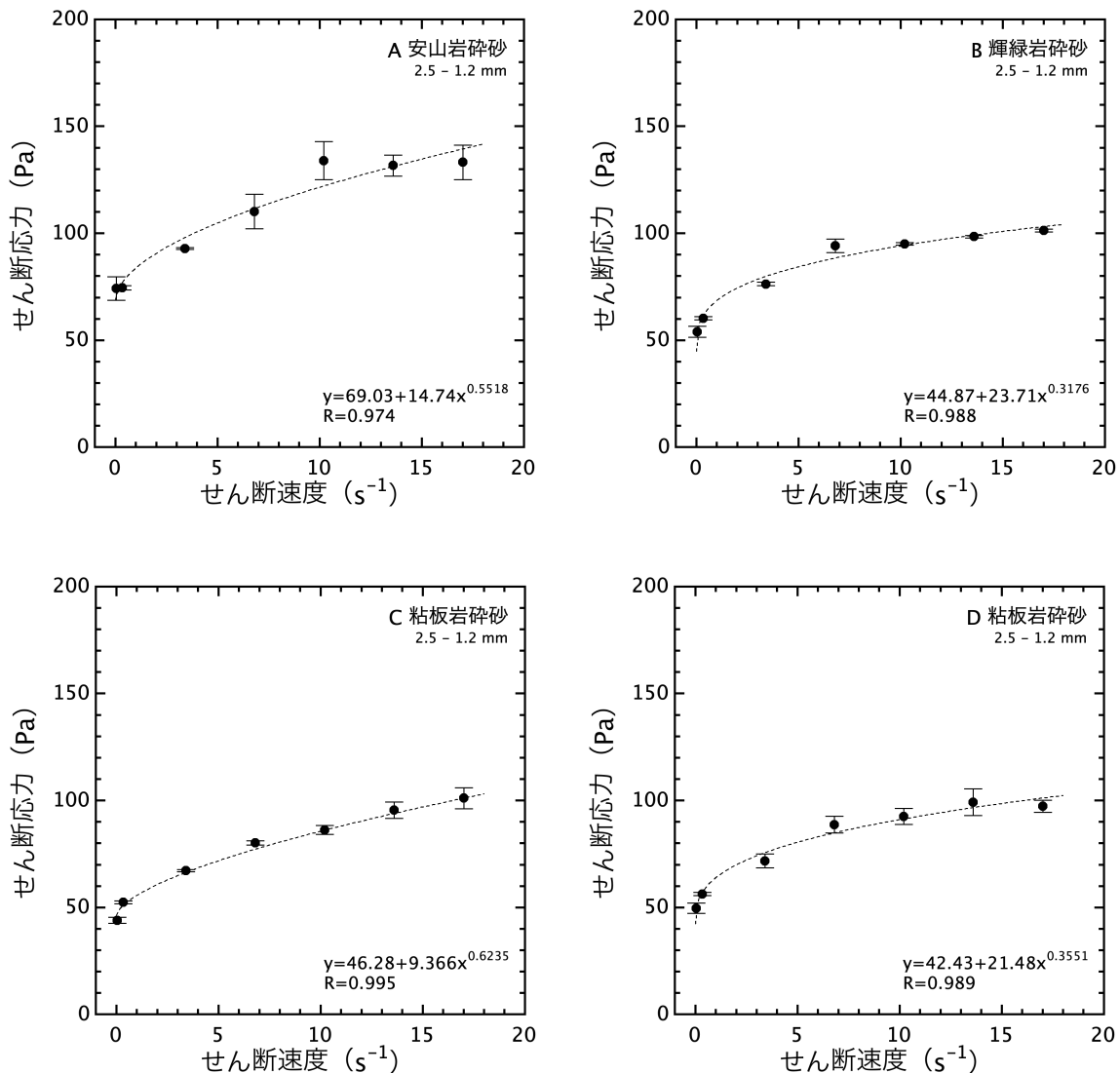


図5 せん断速度とせん断応力の関係（その1）

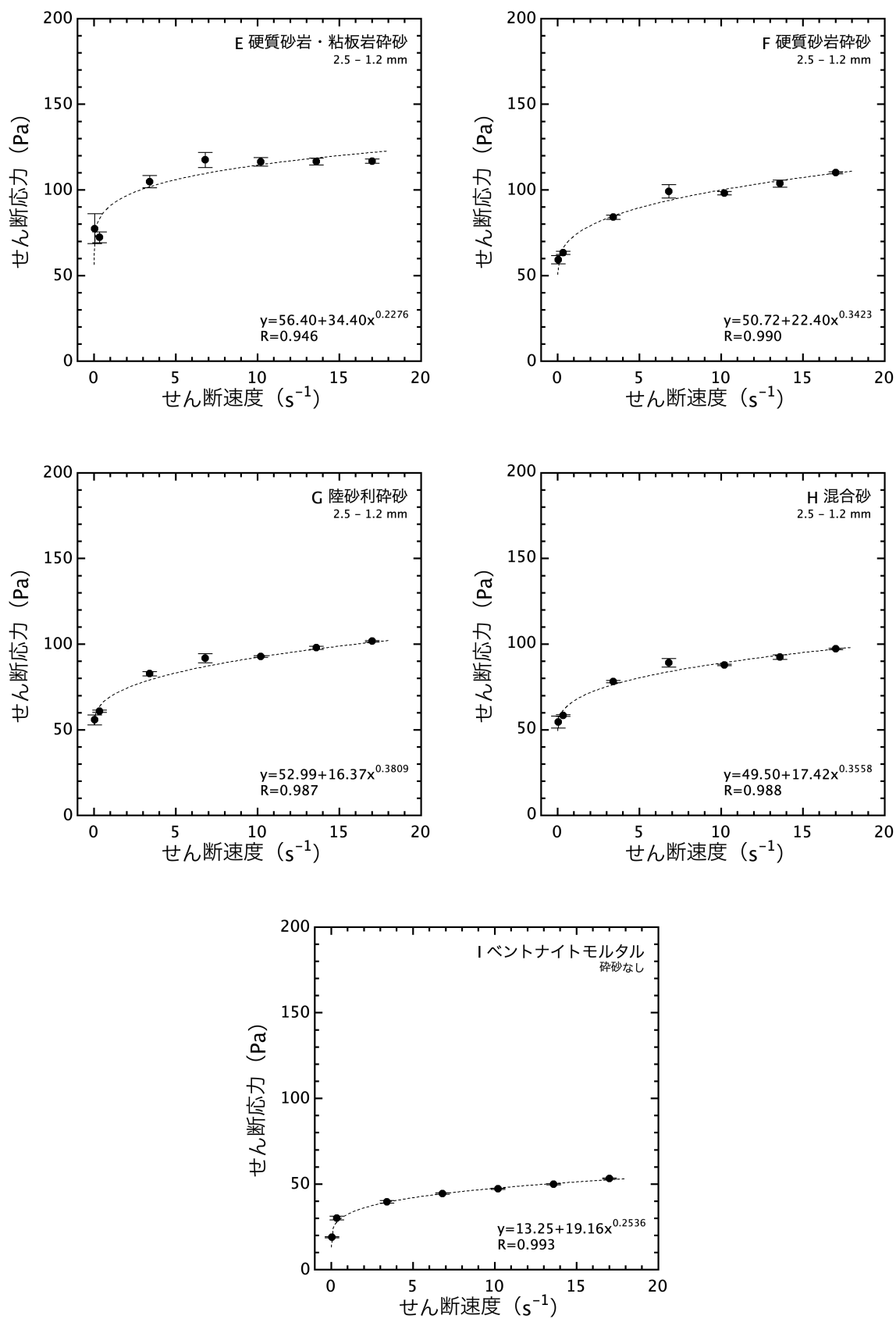


図5 せん断速度とせん断応力の関係 (その2)

動を当てはめると、せん断速度の遅い領域 (0.034 、 0.34s^{-1}) では、近似値が測定値よりも大きな値となる。つまり、推定される降伏値は過大評価となる問題が生じる。そこで本研究では、切片を持つパワーローモデルであるHerschel-Bulkleyモデルを用いて近似し、その切片を降伏値とした。

5. 考察

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、ベントナイトモルタルの降伏値と粒子形状の関係について検討する。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⁴⁾。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。

$$\text{丸さ} = \frac{lb}{la} \quad (4)$$

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。

$$\text{円磨度} = \text{凹凸係数} + (\text{凹凸係数}_{\text{真円}} - \text{凹凸係数}_{\text{アスペクト比}}) \quad (5)$$

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。

$$\text{凹凸係数} = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (6)$$

なお、凹凸係数 真円 は真円の面積と周長から、凹凸係数 アスペクト比 は楕円の面積と周長から算出する。

図6にHerschel-Bulkleyモデルより推定したベントナイトモルタルの降伏値と粒形判定実積率、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)より求める著者らの手法で評価した結果⁶⁾を用いた。具体的には、最大密度と土粒子密度から間隙比と間隙率を算出し、100から間隙率を引くことで、容器に満たした骨材の絶対容積、つまり実積率を求めている。また、丸さと円磨度は家庭用スキャナーを用いた画像解析で測定した結果⁴⁾を用いた。両試験とも降伏値の測定と同じ呼び寸法 $2.5-1.2\text{mm}$ にふるい分けした試料の結果である。同図(a)より、粒形判定実積率が高くなるにともない降伏値は小さくなり、それらの間には相関係数 0.537 の負の相関がみられる。一方で、(b)円磨度お

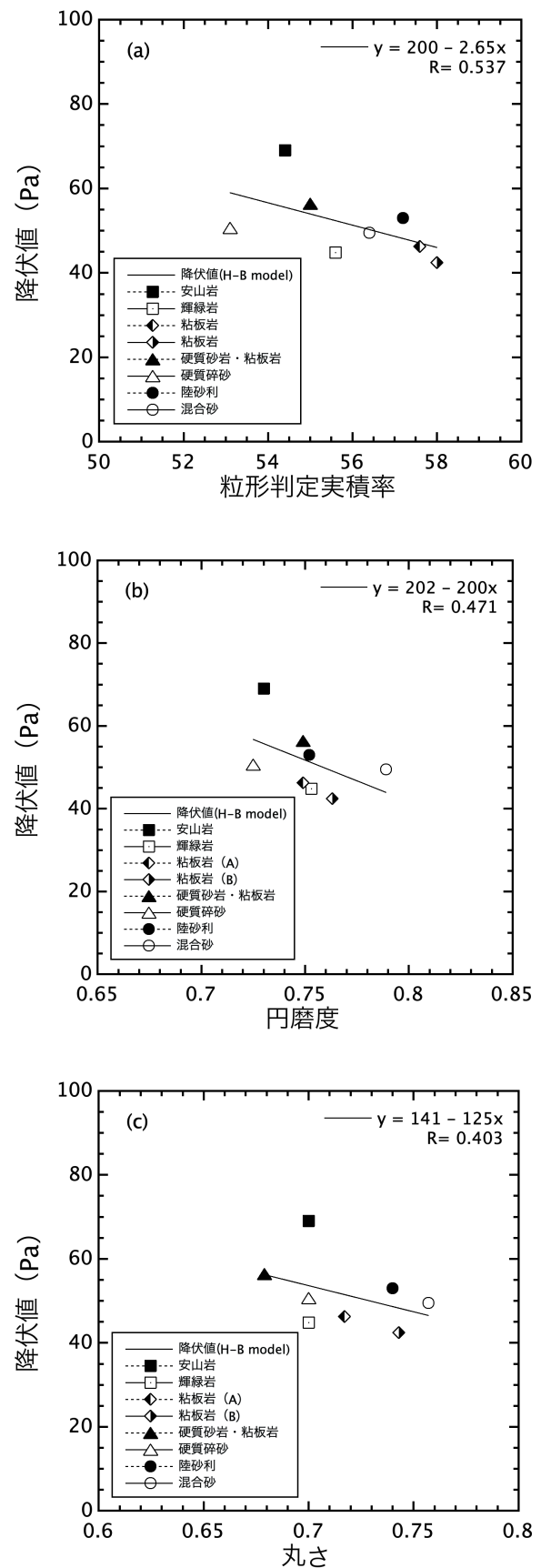


図6 降伏値と粒子形状の関係

よび(c) 丸さと降伏値との間にもやや相関関係は小さいが、粒形判定実積率と同様に負の相関関係がみられた。この結果は、砕砂の粒子形状がベントナイトモルタルの降伏値に影響を及ぼすことを示唆している。

先行研究では、乾燥砕砂の流動性（スランプフロー）は砕砂の粒子の丸さに強い相関がある一方で、円磨度の影響は小さく、粒形判定実積率との相関は弱いこと⁵⁾、また、水中での砕砂の流動性（見かけ粘度）は粒子の丸さに相関がある一方で、粒形判定実積率および円磨度とは相関がみられないこと⁶⁾を報告している。これらの結果は、ベントナイトモルタルの降伏値は丸さと弱い相関であるという本研究結果とは整合していないように思われる。そこで、ベントナイトモルタルの流動性（塑性粘度）に及ぼす粒子形状の影響について検討を加えた。具体的には、図5の結果より、せん断速度 $3.4 \sim 17.0 \text{ s}^{-1}$ の間ではせん断応力がほぼ線形に増加していることから、この速度区間ではビンガム流動を仮定できると考え、近似直線の傾きより塑性粘度を求めた。図7に塑性粘度と粒子形状の関係を示す。塑性流動と円磨度の間には負の相関が見られる。一方で、丸さ、粒形判定実積率との関係は、図は省略するが、相関係数がそれぞれ0.05、0.02であり、相関は見られなかった。

以上の結果を踏まえ、粒子形状が流動性（スランプフロー、見かけ粘度、塑性粘度）に及ぼすメカニズムについて検討する。ここでは、液体内を流動する砕砂の運動を回転と並進に分け、2つの砕砂が接触し、角張りの部分で引っ掛かった状態を仮定する。水や空気の粘性を無視できる液体（気体）では、砕砂が回転することで接触状態が直ちに解消され、個々の砕砂はお互いに移動の抵抗にはならない。したがって、粘性の影響を無視できる条件下は、砕砂の回転運動に関連する丸さ（縦横比）の影響が大きい。一方、ベントナイトペーストの様な粘性を無視できない液体では、砕砂の回転運動はペーストの粘性によって妨げられると考えられる。2つの砕砂の噛み合わさると、お互いの砕砂はそれぞれが移動する際の抵抗となる。したがって、粘性が作用する条件下は、粒子の引っ掛かりに関連する円磨度（角張り）の影響が大きいと考えられる。

次に、降伏値に及ぼす粒子形状の影響について検討する。降伏値は静止状態から流動を始めるまでの抵抗と言い換えることができる。ベントナイトモルタルではペーストの移動と砕砂の移動がこれに当り、粒子の回転のし難さ（丸さ）と粒子間の噛み合わせ（円磨度）の両者が影響を及ぼすと考えられる。ここで、粒形判定実積率と式(6)で紹介した凹凸係数との間には、図8で示すとおり強い相関があることから、粒形判定実積率は、粒子の丸さと円磨度に左右される指標であると考えられる。したがって、ベントナイトモルタルの降伏値

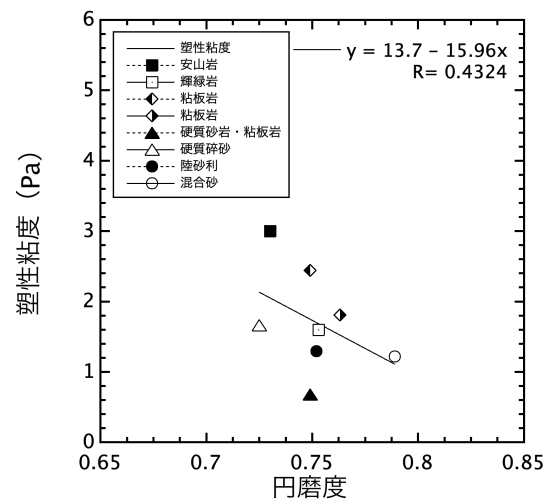


図7 塑性粘度と粒子形状の関係

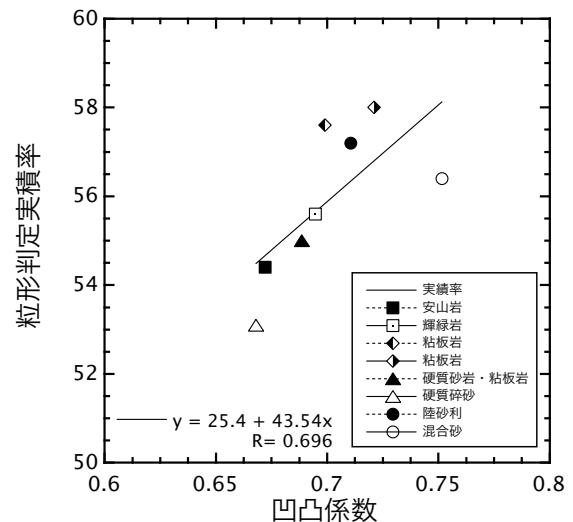


図8 凹凸係数と粒形判定実積率の関係

は、丸さと円磨度の両者から同程度の影響を受ける、つまり粒子判定実積率の影響を受けると解釈することができる。

6. まとめ

本研究では、砕砂（7種）と混合砂（1種）を試料に用い、共軸二重円筒形回転粘度計を用いてベントナイトモルタル（ベントナイト＋水＋豊浦標準砂＋砕砂）の降伏値の測定を試みた。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ベントナイトモルタルのせん断速度とせん断応力の関係は、ビンガム流動のような一次関数を示さず、せん断速度が 0.34 s^{-1} 以下の低速度領域においてせん断応力が急激に減少する塑性流動

のような流動曲線を示す。

- (2) 降伏応力を持ったパワーローモデルであるHerschel-Bulkleyモデルを適用することで降伏値を算出することができる。
- (3) 粒形判定実積率が高くなるにともない降伏値は小さくなり、それらの間には負の相関がみられる。

一般にセメントモルタルの流動性はビンガム流動として扱っているが、本研究で用いたベントナイトモルタルでは塑性流動（Herschel-Bulkleyモデル）を示した。これは、セメントモルタルの流動試験を行った際に、測定結果では塑性流動を示していたが数値モデル化する際に簡便なビンガムモデルを当てはめたこと、試験時にせん断速度の遅い領域での測定を実施しなかったことが原因として考えられる。セメントペーストは、ベントナイトペースト同様に無視できない粘性を有すると想定されることから、本研究で得られたベントナイトモルタルでの知見は、セメントモルタルにも適用できると考える。

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生の及川雅貴さんのご協力を得た。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，国土交通省水管理・国土保全局水政課：平成30年度（2018年度）砂利採取業務状況報告書集計表（令和3年7月）https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/jyutaku/kotsuzai/30jari.pdf, (参照2022-12-20)
- 2) 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）
- 3) 和田勉，小嶋明，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，pp. 73-78（2005）
- 4) 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）
- 5) 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）
- 6) 鴨志田直人，今井忠男：B型粘度計を用いた砕砂の流動性定量評価，建設用原材料，Vol. 28，No. 1，pp. 7-14，（2022）
- 7) 岸谷孝一，岡成一：フレッシュセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定，日本建設学会論文報告集，No. 305，pp. 1-8，（1981）
- 8) 小門武，細田尚，宮川豊章，藤井學：スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究，土木学会論文集，No. 578/V-37，pp. 19-29，（1997）
- 9) 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.nmi.j.jp/~nmijclub/fluidp/docings/fluidp_2012_7_2.pdf, (参照2020-02-06)
- 10) 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，No. 191，pp. 123-132，（2016）

（2022年12月22日受付 2023年3月17日受理）