高炉スラグ微粉末を大量に使用したペーストの流動性に関する基礎的検討

Fundamental Study on Flow Properties of Paste Incorporating High-Volume GGBS

茨木　泰介*1，鶴田　葵*1，臺　哲義*1，佐々木　亘*1
TAISUKE IBARAKI, AOI TSURUDA, AKIYOSHI DAI, WATARU SASAKI

CO_2排出量削減や耐久性向上を目的として，高炉スラグ微粉末（以下，GGBS）を使用したコンクリートの PC 部材への適用検討が進められている。本検討では，製造元が異なる 4 種類の GGBS を用いたセメントペーストを対象として，静的画像解析による粉体粒子の粒度分布および形状特性とペーストの流動特性との関係について検討を行った。その結果，水粉体比や GGBS 置換率が同様であっても，セメントおよび GGBS の種類や組合せによってペーストの流動特性が大きく異なることが分かった。また，流動に伴う粒子構造の変化に要するエネルギーは，粒子径および粒子形状の影響を受け，特に粒子の凹凸の度合いが及ぼす影響が大きい可能性を示した。

キーワード：GGBS，流動特性，レオロジー，粒度分布，粒子形状

High-volume ground granulated blast-furnace slag (GGBS) concrete has attracted increasing attention as a means of reducing CO_2 emissions. However, the effects of GGBS powder characteristics on the flowability and rheological properties of cementitious materials have not yet been fully clarified. This study investigates the influence of powder characteristics on paste flow behavior using GGBS. Particle size distribution and particle shape were evaluated, and their relationships with paste flow properties were examined. The results showed that both flowability and rheological behavior varied depending on the type of GGBS and cement, as well as their combination, even when the water-to-binder ratio and GGBS replacement ratio were kept constant. Furthermore, the findings suggest that particle size and shape affect the energy required for particle structure rearrangement during flow, with particle surface roughness being one of the most influential factors.

Keywords: GGBS, Flowability, Rheology, Particle size distribution, Particle shape

1. はじめに

CO_2 排出量削減の観点から，ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末（以下，GGBS）に置き換えたコンクリートの活用が推進されている。PC 構造物においても CO_2排出量削減と耐久性向上の両立を目的として，GGBS を使用した部材の開発が進められている [1)]。PC 部材では初期強度の確保が求められることから，早強ポルトランドセメントや比表面積の大きい GGBS の使用，水結合材比の低減といった材料および配合に関する対応がなされている。一方，こういった粉体量の多い条件では，粉体の特性がコンクリートの流動性に及ぼす影響が比較的大きいことが想定されるが，この点に関して検討が十分になされていないのが現状である。そこで，本検討では製造元の異なる 4 種類の GGBS と 2 種類の早強ポルトランドセメントを対象として，粉体粒子の粒度分布，形状特性ならびにペーストの流動特性を把握し，両者の関係性について検討を行った。

*1 技術研究所技術開発推進部

2. 実験概要

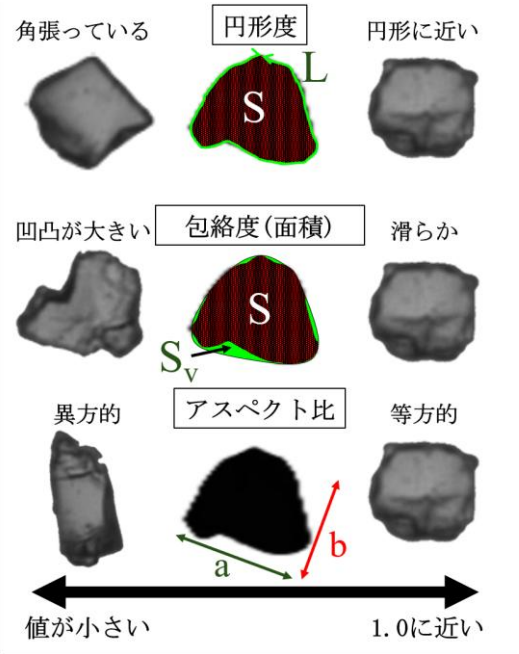
(1) 使用材料およびペーストの作製方法

使用材料は，製造元が異なる 4 種類のブレーン比表面積 6,000 cm²/g 級の GGBS，および 2 種類の早強ポルトランドセメント（以下，Cem）とした。各粉体の特性値を**表−1** に示す。GGBS の密度は 2.87～2.91 g/cm³ の範囲であり，ブレーン比表面積は GGBS-A～C で 5,820～5,970 cm²/g とおおむね同様であるのに対して，GGBS-D は 6,740 cm²/g と他の GGBS より高い。SO_3 量は種類による差が認められた。フロー値比はおおむね同様である。Cem の密度およびブレーン比表面積はおおむね同程度であり，SO_3 量に若干の差が確認された。

表−1 各粉体の特性値

項目	GGBS				Cem	
	A	B	C	D	A	B
密度 [g/cm³]	2.87	2.91	2.89	2.91	3.13	3.14
ブレーン比表面積 [cm²/g]	5970	5920	5820	6740	4510	4570
SO_3 [%]	3.02	3.08	3.30	3.22	3.01	2.94
フロー値比 [%]	101	97	101	97		

ペーストは GGBS4 種類と Cem2 種類を組合せた計 8 水準を作製した。配合は，水粉体比 30 mass%，GGBS 置換率 70 mass%とした。練混ぜ水は上水道水を使用し，化学混和剤としてポリカルボン酸系エーテル系化合物を主成分とする高性能減水剤を粉体に対して 0.45 mass%，ポリアルキレングリコール誘導体を主成分とする消泡剤を粉体に対して 0.01 mass%添加した。練混ぜには容量 5 L の縦型ミキサを使用し 1 L のペーストを作製した。練混ぜ手順は，30 秒間空練りした後に注水し 90 秒間練り混ぜ，5 分静置後に再度 30 秒間練り混ぜた。



図−1 各形状指標の概要

(2) 粒度分布および粒子形状の評価方法

粒度分布および粒子形状は既往文献 2)を参考とし，静的画像解析法により測定した。試料の調整にあたっては，少量の試料を容器に採取し，分散溶媒を加えたのちに超音波を 1 分間照射し分散させた。分散溶媒にはイソプロパノールを用いた。測定試料を検鏡プレートに滴下し，粒子画像分析装置へ導入した後に，20 倍のレンズを用いて 5×5 mm の範囲において 2 万個以上の粒子を測定した。粒子形状を評価する指標として，円形度，包絡度（面積），アスペクト比を選んだ。各指標の概要を**図−1** に示す。円形度は粒子の角張りの程度を粒子投影面積と周囲長を用いて評価する指標であり，式(1)により算出される。真円を 1 とし，角張っているほど値は小さくなる。包絡度（面積）は粒子の輪郭の凹凸を粒子投影面積と凸包面積の比で評価する指標であり，式(2)により算出される。粒子の輪郭が滑らかであるほど 1 に近い値となり，表面の窪みや欠けが多いほど輪郭は粗くなり値は小さくなる。アスペクト比は粒子の等方性を外接矩形における長軸と短軸の長さの比で評価する指標であり，式(3)によって算出される。円や正方形といった等方的な形状であるほど 1 に近い値となり，楕円や針状といった異方的な形状であるほど値は小さくなる。

$$\text{円形度} = \frac{4\pi S}{L^2} \tag{1}$$

$$\text{包絡度（面積）} = \frac{S}{S_V} \tag{2}$$

$$\text{アスペクト比} = \frac{b}{a} \tag{3}$$

ここに，S：粒子投影面積，S_V：凸包面積，L：粒子周囲長，b：短軸長，a：長軸長

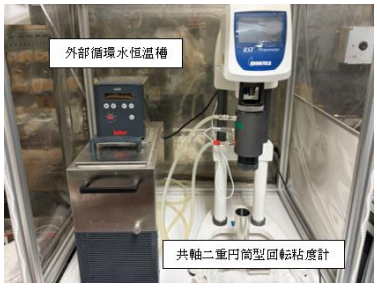


写真-1　レオロジー試験の状況

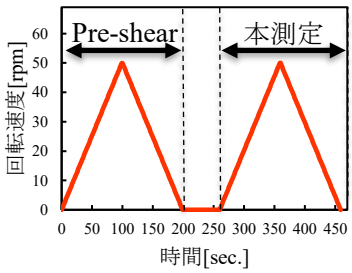


図-2　レオロジー試験の測定条件

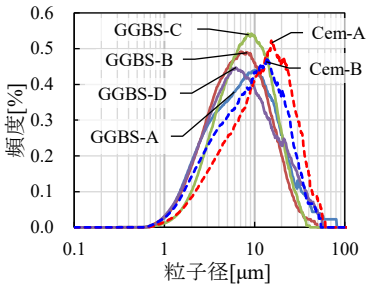


図-3　各粉体の粒度分布

表-2　各粉体の粒度分布の特性値

項目	GGBS				Cem	
	A	B	C	D	A	B
体積平均径[μm]	7.43	6.49	7.67	7.12	11.0	8.52
モード径[μm]	10.3	7.14	9.24	6.22	15.3	13.9
D10[μm]	2.43	2.52	3.23	2.45	3.49	2.68
D50[μm]	7.77	6.64	8.13	6.96	12.7	9.51
D90[μm]	20.3	15.5	17.0	22.7	26.4	22.0
Span	2.30	1.95	1.70	2.91	1.81	2.03

表-3　各形状指標の平均最頻値以下の割合

項目	GGBS				Cem	
	A	B	C	D	A	B
円形度≦peak[%]	72.2	74.6	79.8	77.7	72.1	68.9
包絡度≦peak[%]	92.4	92.2	93.5	93.6	94.2	92.4
アスペクト比≦peak[%]	65.9	68.6	72.8	69.6	65.8	63.4

(3) ペーストの流動特性の測定方法

ペーストの流動特性を把握するため，フロー試験およびレオロジー試験を実施した。フロー試験は JIS R 5201 に準拠したフローコーンを用いてガラス板上で落下衝撃を与えずに実施し，流動停止後のフローを測定した。また，ガラス板下側にカメラを設置し，映像からフロー200 mm 到達時間，フロー停止時間を判定した。レオロジー試験は，外円筒回転式の共軸二重円筒形回転粘度計を使用した（**写真-1**）。外円筒は φ70 mm，内円筒は φ65 mm のものを用いた。また，測定中の試料の温度変化を抑制するため，外部循環水恒温槽を用いて円筒周囲の温度を一定に保持した。測定条件を**図-2** に示す。既往文献 3)を参考に，回転速度を 0 rpm から 50 rpm まで 0.5 rpm/秒で上昇・下降した後に 1 分間静置し，再度同様の操作を実施した。1 回目の回転速度の上昇・下降は Pre-Shear とし，円筒への試料の付着状態の安定化および凝集状態の統一を目的として実施した。2 回目の回転速度の上昇・下降を本測定とし，流動曲線を取得した。フロー試験およびレオロジー試験はペーストの練り上がりから 5 分後に実施した。

3. 実験結果および考察

(1) 粉体の粒度分布および形状特性

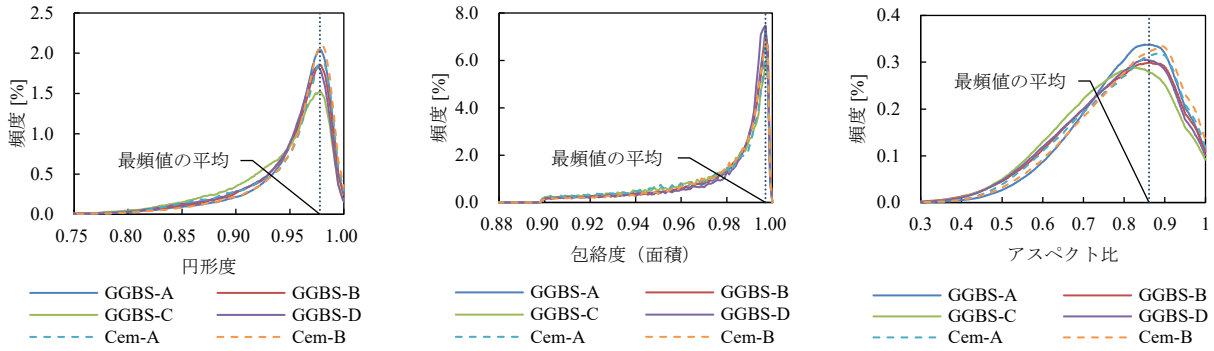
対象とした粉体の粒度分布（体積基準）を**図-3** に示す。また，粒度分布の特性値を**表-2** に示す。なお，*Span*は式(4)により算出され，粒度分布の広がりを示す指標である。粒度分布がブロードであるほど*Span*は大きくなる。

$$Span = \frac{D90 - D10}{D50} \tag{4}$$

ここに，*Span*：粒度分布の広がりを示す指標，*D90*･*D50*･*D10*：累積 90･50･10%径 [μm]

GGBS に着目すると，体積平均径および*D50*は GGBS-C が最大，GGBS-B が最小であった。モード径は GGBS-A が最大，GGBS-D が最小であった。粒度分布は GGBS-A を除きおおむね対称的な分布形状を示した。*Span*は GGBS-D が最も大きく，GGBS-C が最も小さい。次に、Cem に着目すると，体積平均径，モード径および*D50*は Cem-A の方が大きい。粒度分布の形状は，ピークよりも小粒径側の範囲では緩やかな分布をしており，大粒径側の範囲では急な分布をしている。また，*Span*は Cem-B と比較して Cem-A の方が小さい。

粒子形状の定量評価にあたり，既往文献 4)では形状指標に所定の閾値を設定し，その閾値を基準として選別した粒子の割合と流動性との間に一定の相関があることを示している。本検討では各形状指標について，GGBS4 種類および Cem2 種類の計 6 種の粉体における最頻値（分布におけるピーク位置）の平均を閾値として設定し，その閾値以下となる粒子の割合として円形度≦peak，包絡度≦peak，アスペクト比≦peak を算出した。各形状指標の

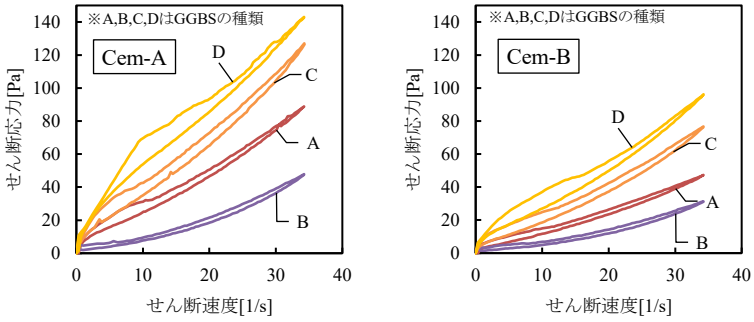


（a） 円形度　（b）包絡度（面積）　（c）アスペクト比

図-4　各粉体における粒子形状指標の頻度分布

表-4　w/p およびフロー試験の結果

Cem	GGBS	w/p [vol.]	フロー［mm］	フロー 200mm到達時間［秒］	フロー停止時間［秒］
A	A	0.884	261	1.34	21.5
	B	0.893	361	0.48	28.9
	C	0.888	251	1.91	15.9
	D	0.893	193	–	5.1
B	A	0.883	314	1.19	23.1
	B	0.892	359	0.30	39.8
	C	0.887	269	1.07	11.8
	D	0.892	238	1.94	9.5



（a） Cem-A を用いた水準　（b）Cem-B を用いた水準

図-5　レオロジー試験より取得した流動曲線

平均最頻値以下の割合を**表-3** に示す。また，各形状指標の頻度分布（個数基準）を**図-4** に示す。円形度の最頻値は**図-4**(a)に示す通り，GGBS および Cem の双方においておおむね一致しており，頻度の分布形状も類似している。円形度≦peak に着目すると，Cem に比べて GGBS の方が角張った形状の粒子を多く含む傾向が認められる。GGBS の種類で比較すると GGBS-C において，Cem の種類で比較すると Cem-A において，相対的に円形度が低い粒子の割合が大きい。包絡度（面積）の頻度の分布幅は**図-4**(b)に示す通り，他の粒子形状指標と比較して非常に小さく，最頻値は GGBS と Cem でおおむね同様である。包絡度≦peak に着目すると，Cem-A において凹凸のある粒子が多く存在する傾向が認められる。GGBS の種類で比較すると GGBS-C および GGBS-D において相対的に凹凸の大きい粒子が多い。アスペクト比は**図-4**(c)に示す通り，GGBS の種類で頻度の分布形状や最頻値に差が認められる。アスペクト比≦peak より GGBS の方が Cem よりも等方性が低い粒子が多いことがわかる。Cem の種類で比較すると Cem-A において，GGBS の種類で比較すると GGBS-C において相対的にアスペクト比の小さい粒子が多い。以上より，GGBS-C は角張り・凹凸を有し等方性の低い粒子を多く含み，GGBS-D は凹凸を有する粒子を多く含む特徴を示した。また，Cem-A は他の粉体と比較して凹凸を有する粒子を多く含むことが確認された。

(2) ペーストの流動特性

水粉体容積比（w/p）およびフロー試験の結果を**表-4** に示す。高炉スラグ微粉末の密度が異なるため，w/p も異なる条件となっている。フロー試験の結果は，GGBS および Cem の種類により大きく異なる結果となった。フローは GGBS の種類で比較すると，いずれの Cem 種類においても GGBS-B＞GGBS-A＞GGBS-C＞GGBS-D の順に大きく，GGBS-B が高い流動性を示した。Cem の種類で比較すると，おおむね Cem-B の方が Cem-A よりフローが大きい。また，フローが大きいほどフロー200 mm 到達時間は短く，フロー停止時間が長い傾向にあった。

レオロジー試験より取得した流動曲線を Cem の種類別に**図-5** に示す。こちらも GGBS および Cem の種類により異なる流動曲線を示すことが分かった。レオロジー定数を算出するため，下降流動曲線を式(5)の Bingham モデルおよび式(6)の Herschel-Bulkley モデルにより近似した。なお，流動初期は見掛け粘度が非常に高くなることから 5 rpm 以下のデータは除外した。また，上昇・下降流動曲線よりヒステリシスループ面積も算定した。

$$\tau = \tau_y + \eta\dot{\gamma} \tag{5}$$

ここに，τ：せん断応力[Pa]，τ_y：降伏値[Pa]，η：塑性粘度[Pa･s]，$\dot{\gamma}$：せん断速度[1/s]

$$\tau = \tau_y + \mu\dot{\gamma}^n \tag{6}$$

ここに，μ：非ニュートン粘性係数[Pa･s]（以下，粘性係数）
n：非ニュートン粘性指数（以下，粘性指数）

レオロジー定数およびヒステリシスループ面積を**表-5** に示す。塑性粘度と粘性係数は GGBS の種類で比較すると，いずれの Cem 種類においても GGBS-D＞GGBS-C＞GGBS-A＞GGBS-B の順に大きい。Cem の種類で比較すると Cem-B の方が Cem-A より小さい傾向を示した。降伏値に着目すると，Bingham モデルにおける降伏値が 0 となる水準がある。これらは，流動曲線よりせん断速度の増加に伴って粘性が増加するダイラタント性を有する挙動が認められる。また，塑性粘度や粘性係数が低い水準ほど粘性指数が高く，顕著にダイラタント性を示す傾向にある。このような場合では，Bingham モデルによる近似は困難なため，Herschel-Bulkley モデルによる近似が妥当と考えた。Herschel-Bulkley モデルにおける降伏値が高い水準ほど粘性係数も高い傾向であった。これより，GGBS および Cem の組合せによって，流動曲線の挙動や降伏値，粘性に比較的大きな差異が生じることが分かった。フローと Herschel-Bulkley モデルにおけるレオロジー定数およびヒステリシスループ面積の関係を**図-6** に示す。フローと降伏値および粘性指数，ヒステリシスループ面積には高い相関関係があること，降伏値が小さく，粘性係数が低いほど良好な流動性を示すことが分かった。また，流動性が高いほど粘性指数は大きく，ヒステリシスループ面積は小さくなる傾向を示した。

(3) ペーストの流動特性と粒子径および粒子形状特性との関係

前節においてフローと降伏値およびヒステリシスループ面積との間に高い相関があることを確認した。ヒステリシスループ面積は流動に伴う粒子構造の変化に関連した指標であり，その値が大きいことは流動に伴う粒子の再配置や凝集構造の破壊に多くのエネルギーを要することを示している [5),6)]。**図-7** は，モード径および 3. (1) で示した形状指標とヒステリシスループ面積との関係を示したものである。ここで，モード径は GGBS と Cem の粒度分布をペーストにおける粉体の体積比率で合成したものより求めた。形状指標についても同様に，粉体の体積比率より算出した値を用いた。ヒステリシスループ面積とモード径との間には明確な相関は確認されなかったが，モード径の小さい水準においてヒステリシスループ面積が大きい傾向が認められた。粒子径が小さいほど凝集構造が形成されやすく，流動に伴う凝集構造の破壊により多くのエネルギーを要したことが考えられる。円形度≦peak, アスペクト比≦peak および包絡度≦peak とヒステリシスループ面積との間には正の相関が認め

表-5 レオロジー定数とヒステリシスループ面積

Cem	GGBS	Binghamモデル			Herschel-Bulkleyモデル				ヒステリシスループ面積 [Pa/s]
		τ_y [Pa]	η [Pa･s]	R^2	τ_y [Pa]	μ [Pa･s]	n	R^2	
A	A	1.10	2.40	0.989	10.46	0.54	1.40	0.999	144
	B	0.00	1.13	0.917	3.16	0.05	1.92	0.999	85.9
	C	1.85	3.36	0.989	14.85	0.76	1.40	1.000	211.3
	D	16.02	3.58	0.997	19.24	2.75	1.07	1.000	253.5
B	A	0.00	1.26	0.896	4.04	0.27	1.43	1.000	92.6
	B	0.00	0.71	0.911	2.41	0.02	2.02	1.000	63.8
	C	0.00	2.02	0.982	7.61	0.33	1.51	1.000	162.4
	D	1.66	2.56	0.988	12.11	0.51	1.44	1.000	198.4

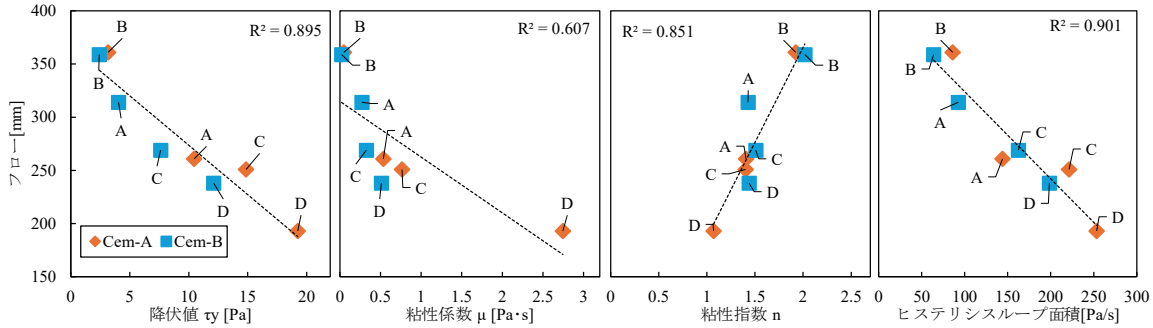


図-6 フローとレオロジー定数およびヒステリシスループ面積の関係

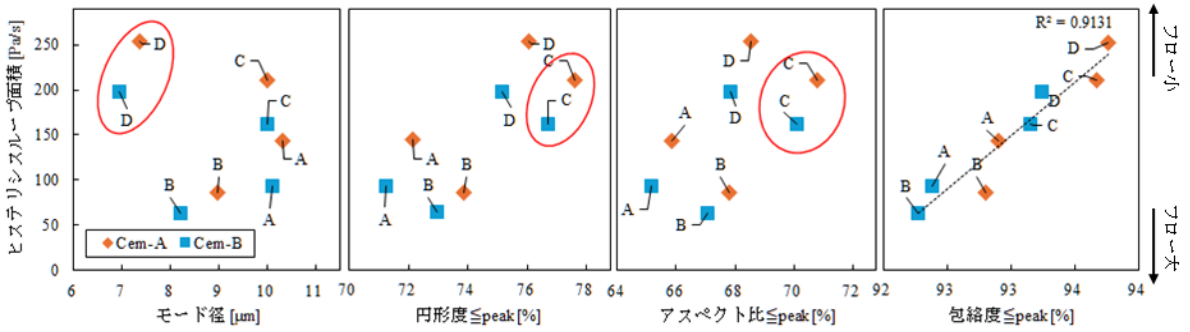


図-7　ヒステリシスループ面積とモード径および各粒子形状指標の平均最頻値以下の割合の関係

られた。特に，包絡度≦peak とヒステリスループ面積との間には高い相関が見られた。

図-8 に粒子形状が流動特性に及ぼす影響の模式図を示す。角張りや凹凸のある粒子は粒子同士の噛み合いによる機械的な抵抗により，異方的な粒子は粒子の再配置により流動において大きなエネルギーを要することが考えられる。また，形状が複雑かつ異方的な粒子は疎な充填構造を形成しやすく，流動に伴い見掛けの体積減少が生じる。対して，等方的かつ円形に近い粒子は密な充填構造を形成しやすく，流動に伴う見掛けの体積膨張が生じることでダイラタント性が発現しやすくなる可能性がある。これが前節において流動性が高い水準ほどダイラタント性が顕著となる原因と考えられる。以上より，粒子径および粒子形状は流動に伴う粒子構造の変化に要するエネルギーに影響を及ぼすことが示された。特に，粒子の凹凸度合を示す包絡度はその中でも重要な因子と考えられる。

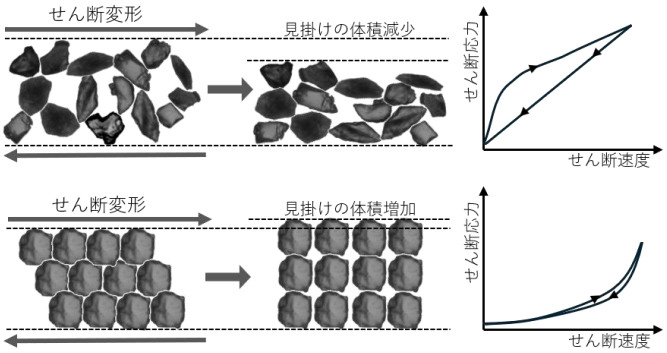


図-8　粒子形状が流動特性に及ぼす影響の模式図

4. まとめ

製造元の異なる高炉スラグ微粉末（GGBS）および早強ポルトランドセメントを対象として，粉体粒子の形状特性ならびにペーストの流動特性を把握し，両者の関係性について検討した。得られた知見を下記に示す。

① 水粉体比や GGBS 置換率が同様であっても，製造元の異なる GGBS および早強ポルトランドセメントの組合せによりペーストの流動特性は異なる。

② Herschel-Bulkley モデルにおける降伏値およびヒステリシスループ面積は流動性と相関があり，流動性の評価指標として用いることができる。

③ 流動に伴う粒子構造の変化に要するエネルギーは，粒径および粒子形状の影響を受けることが示唆された。特に，包絡度≦peak とヒステリシスループ面積との間には高い相関が認められ，粒子の凹凸の度合いが流動特性に大きく影響することが分かった。

本実験においては流動性が高いほど粘性が低い傾向を示しており，高流動コンクリートに用いる場合においては材料分離に留意する必要がある。また，流動性が低い，すなわち降伏値が高い粉体の組合せであっても，勾配保持性が必要とされる場面においては有効に機能する可能性がある。以上より，要求される流動性能に応じて適切に材料を選択できるように，流動機構について明らかにすることは重要と考える。また，本検討では粉体粒子の形状特性に着目したが，化学混和剤の吸着 [7]や水和反応の進行 [8]も流動性に影響を及ぼすことが報告されている。今後は，化学的要因も含めて整理することで，粉体の特性に基づく流動性評価および要求性能に応じた材料選定の指針の構築を目指す。

参考文献

1) 佐々木亘，梶貢一，臺哲義，樋口正典，松田拓：早強ポルトランドセメントと混和材を用いたコンクリートの強度発現および物質透過性に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文集，第19巻，pp.423-428，2019.10
2) 藤原了:シングルミクロン粒径を有する無機混和材料を用いたモルタル･コンクリートの諸特性に関する研究，博士論文，宇都宮大学，2021.3
3) A.Papo：Rheological models for cement pastes，Materials and Structures, 21, pp.41-46, 1988.1
4) 梅津真見子，近藤祥太，宮原茂禎，大脇英司：合成炭酸カルシウムの粒子形状がセメントペーストの流動性に及ぼす影響の評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.79，pp.344-351，2025
5) 東機産業株式会社：回転粘度計による粘度測定の実際，2018.1
6) 太田顕，名和豊春，大沼博志：セメント粒子の凝集構造とセメントペーストの流動性の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.271-276，2001.6
7) 根岸久美，檜垣徹，後藤考治：ポリカルボン酸系高性能AE減水剤が流動性および水和に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.51，pp.246-251，1997
8) 赤嶺糸織，伊波咲子，山田義智，細川佳史：凝集や水和によるセメントペーストの粘度変化に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.653-660，2012