

粒状体の安息角と流動に関する基礎的実験

東北学院大学工学部環境建設工学科（学）○蜂谷菜穂子 菊池剛志
東北学院大学工学部環境建設工学科（正）飛田善雄，（正）山口 晶，（正）吉田 望

1. はじめに

私たちの身の回りには、粉体・粒状体が流れる挙動が見られる。例えば、代表的なものとしては土石流をあげることができる。この流れは流体の流れとしては説明できず、大きな岩が流れるにしたがって、流れの表面に浮かぶという特徴的挙動を示す。また、化学工業の粉体の流れも粉・粒体の流れの例である。この場合には、効率よく流すためには密度を高くして流すことになるが、密度を高くすると目詰まり現象を起こすことになる。

コンクリートのポンプでの圧送も同様の例である。密度が比較的高い粉・流体の流れの開始条件、流れの速度を支配するメカニズム、流れの停止条件については不明なことが多く、多くの分野で研究が進められている¹⁾。

本研究では、粒状体の挙動についての知見を得るために、安息角および粒状体の流れについて、豊浦砂、ケイ砂、ガラスビーズを用いた基礎的実験結果を報告する。

2. 粒状体の安息角とそこから得られる砂山の分級作用について

2.1 実験概要

安息角とは、地盤工学用語辞書によれば、“砂や礫などの粘着力のない土の斜面をまきこぼした状態で安定を保ち得る傾斜面をいう”¹⁾と定義できる。粒子形状の異なる粒状体を用いて流れの実験を行うにあたり、各試料の性質を知る必要がある。安息角も粒状体も基本的性質の一つである。落下エネルギー(位置エネルギー)を常に一定にし、安息角の実験を行った結果について考察を行う。

また、安息角の実験を行っていく中で、粒子径が異なる混合粒子の場合には、小さい粒子と多い粒子で分級作用が生じている。そのメカニズムについても考察する。

2.2 実験方法

実験方法は以下の通りである。

各試料を 150g(ガラスビーズ (No.02, 04) とケイ砂 (5, 6, 7 号)は各粒径を等量混合する)計量する。

ケーキの絞り袋の出口部を 3mm 口径になるように切断し、ホッパーとする。

ホッパーを一軸試験機に固定し、ホッパー内に試料を堆積させ自由落下させる。また、粒子の落下エネルギーが常に一定になるように砂山の頂上部とホッパーの出口部の距離を一定にする。この距離は一軸試験機を上昇、下降を繰り返して操作する。

以上の実験を各試料につき 10 回行う。安息角 θ (度)

の測定は砂山をデジタルカメラで撮影し、印刷後測定する。また、砂山の形状を把握するために砂山の高さ h (mm)と直径 D (mm)も測定する。10 回の平均値を実験結果とする。

2.3 実験結果

実験結果は以下の通りである。

表 2.1 各試料の安息角と砂山の形状

試料名	豊浦標準砂	ガラスビーズ	珪砂
安息角 θ (°)	(右)33.7	(右)22.9	(右)36.5
	(左)34.2	(左)24.8	(左)35.8
直径 D (mm)	101.18	109.3	104.66
高さ h (mm)	29.27	22.1	36.46

実験結果より粒子形状が異なると安息角も異なることが分かった。

2.4 考察

実験結果より粒子形状によって安息角が異なる。これより安息角は粒子形状に大きく影響されることがわかる。

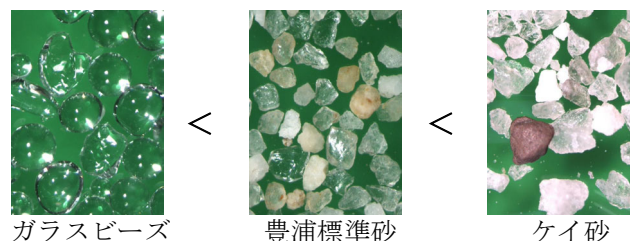


図 1：各試料の粒径拡大図

粒子形状と安息角の大小関係は図 1 に示すような関係となる。球体に近い粒子よりも角張った粒子の安息角が大きい理由は、角張った粒子ほど力を伝える構造の形成が容易であるためと考えられる。²⁾

安息角の測定において、異なる径を有する粒子が混合する場合、分級作用が見られた。

一般に、運搬過程を通じて不均一な堆積性碎屑物に対して粒子の大きさ、形状、比重などに対応した区別と集積とが行われる過程のうち、粒径に応じて分別が行われる作用を分級作用とよんでいる。

図 2 のように斜面に沿って粒状体を落下させた際に粒状体は堆積・崩壊を繰り返す。この繰り返しの中で、大きい粒子が移動した間隙に小さい粒子が入り込み(落ち込み)大きい粒子が相対的に浮き上がって見えるという現象である。多くの場合、その基本的メカニズムは理解できていない。

この現象が安息角測定の際に生じているかを確認するために、ガラスビーズの粒径 No.02 (小さな粒径の粒

子)を着色し、安息角の実験を行った。分級作用が起こっていれば、砂山表面は白くなり中心部は黒くなる。また、砂山の中心断面を確認するために透明な板を挟んで同実験を行った。

実験結果は図. 3 のようになり、分級作用が確認できた。また、実験中の崩壊の周期は、小さい場合は 2~3 秒に 1 回起き、大きい場合は 6~8 秒に 1 回に起きることも確認できた。

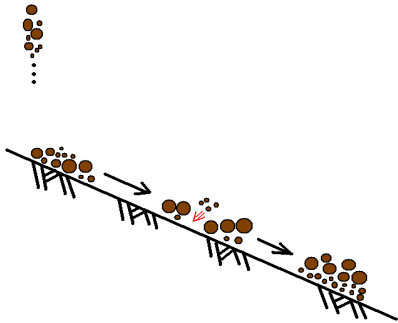
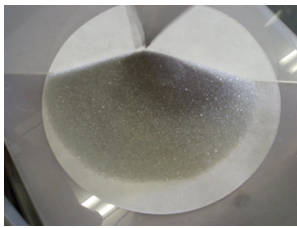
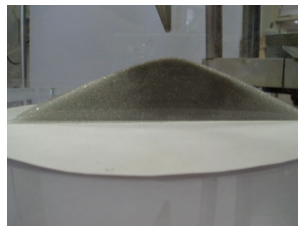


図 2：分級作用の模式図



砂山の上部図



砂山の断面図

図 3：分級作用の確認に関する実験

3. 粒状体の流動に関する基礎的実験について

3.1 実験概要

本実験では粒状体の流動に関する基礎的挙動を確認するために、円錐状のホッパーを用いて粒状体の落下実験を行った。ホッパーの口径は 3~9mm に変化させた。また、ホッパーの出口部にワイヤーを装着し、その影響を見る実験も行った。

この実験から得られたデータは、以下の式を用いて出口の面積で割った単位面積当たりの平均落下速度を算出する。

$$v(\text{m/s}) = \frac{0.01 \times m(\text{g/s})}{\rho(\text{g/cm}^3) A(\text{cm}^2)} = \frac{0.01 \times V(\text{cm}^3/\text{s})}{A(\text{cm}^2)} \quad (1)$$

ここに、 $m(\text{g/s})$ は、1 秒ごとの落下した質量、 $A(\text{cm}^2)$ ：ホッパーの出口の有効面積、 $\rho(\text{g/cm}^3)$ ：土粒子の密度である。

3.2 実験方法

実験方法は以下の通りである。

粒子の計量は、2.2 と同様に行った。内角が 40° になるようにプラスチック板を切断し、出口口径を 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9mm になるように作成した。ホッパー内に試料を堆積させ、自由落下させている時の試料の質量と時間をデジタルビデオカメラで撮影した。

実験より得られた結果から式(1)を使用しデータの整理を行う。グラフは横軸に有効直径 $D(\text{mm})$ 、縦軸にその有効直径での平均落下速度 $v(\text{m/s})$ をとり、各条件および各試料で比較を行う。また、データを明確にするために各試料で近似線を挿入する事とする。

3.3 実験結果

実験結果は以下の通りである。

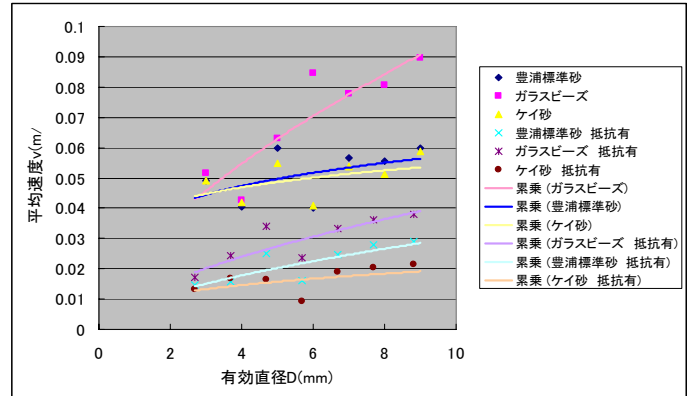


図 4：有効直径と平均落下速度の関係

3.4 考察

実験結果より、一般的に粒径の丸い粒子の方が、粒径が角張った粒子よりも平均落下速度が大きいことがわかる。また、ワイヤーを設置したことにより、平均速度が減少することがわかる。これらの実験結果は、単に粒子同士の衝突ではなく、出口におけるアーチ構造の形成、流動中の粒子間での内部構造の生成とその消滅が粒子の落下速度に影響を与えていることを示唆している。

密な状態での粒状体のホッパーからの落下時の流動メカニズムは未だ解明されておらず、今後の研究課題である。

4. まとめ

粒状体の安息角と流動メカニズムについての基本的知見を得るために、基本的な実験を行った。以下に主要な結果をまとめる。

1. 粒子形状が角張っている粒子ほど、安息角は大きくなる。
2. 安息角の実験でも、粒径の異なる混合粒子を用いた場合には、大きな粒子が表面に出てくる分級作用がみられた。
3. ホッパーからの流動実験では、ホッパーの出口の径が大きいほど、また粒子形状が丸いほど、平均流速は大きい。

これらの現象は、堆積時および流動時に形成する骨格構造の生成と消滅に関係していることが示唆された。

参考文献

- 1) 地盤工学会 地盤工学用語辞典改訂編集委員会：地盤工学用語辞典；
- 2) 粉粒体の物理学，吉岡書店；