

取り除けない要因も存在する。そこで本研究では、各実験における境界条件の差をできるだけ小さくするために、粒子流動速度制御式安息角測定装置を開発した。装置の概略図および外観を図-1に示す。図に示す様に、本実験装置は、直径 160mm、高さ 100mm の供試体投入容器(a)に粒子を投入後、電動モーターおよび速度制御装置(b)によってスクリージャッキ(c)を回転させて可動式側壁(d)を下方に移動させることで、粒子が容器外へ流動する速度を制御する仕組みになっている。側壁の制御を電動で行うことで、人的実験誤差を無くすことを図っている。また、容器底面(e)およびフレーム(f)は、水平に設置され、実験中は不動となっており、側壁を移動させることも含めて、台の振動による安息角の影響を小さくするように設計されている。排出された粒子は排出口(g)から回収される。デジタルカメラ(h)は可動式側壁下部に設置台を固定し、側壁との相対的な高さを一定に保ちつつ、パーソナルコンピュータ(i)によるリモート撮影を実験中に行う。実験中の変位は変位計(j)によって測定され、変位計モニタ(k)によってデジタルで変位を確認し、実験条件ごとに変位速度を速度制御装置によって調整する。また、実験装置には位置を調整するために微調整用バルブ(l)も併せて設置されている。

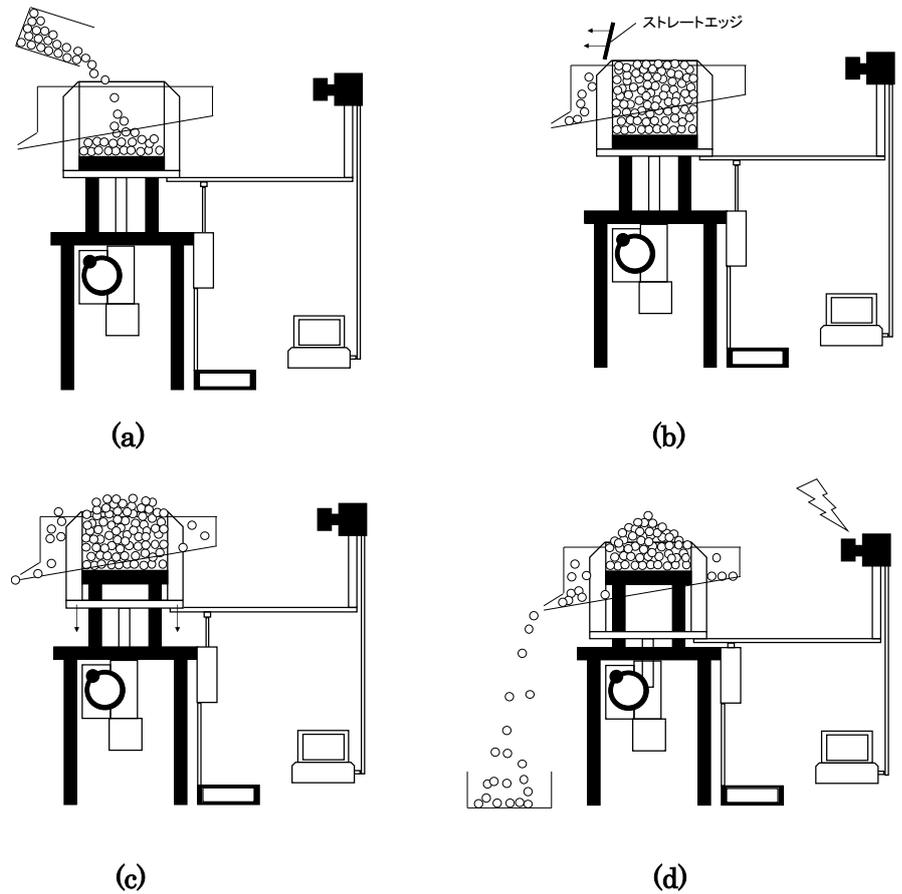
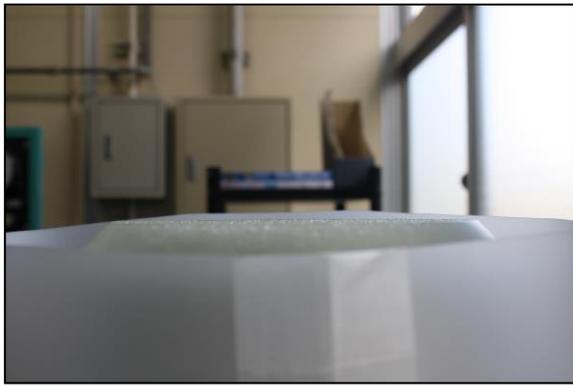


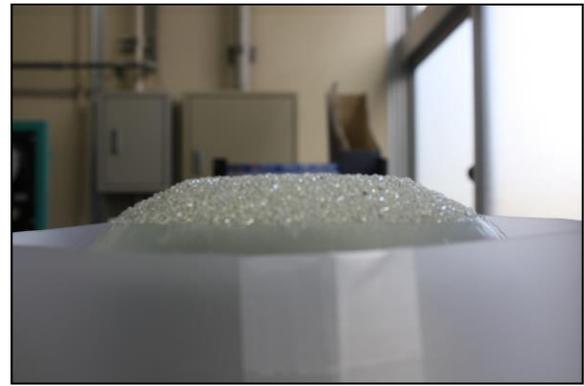
図-2 実験手順の概略図

3. 実験方法および安息角の定義

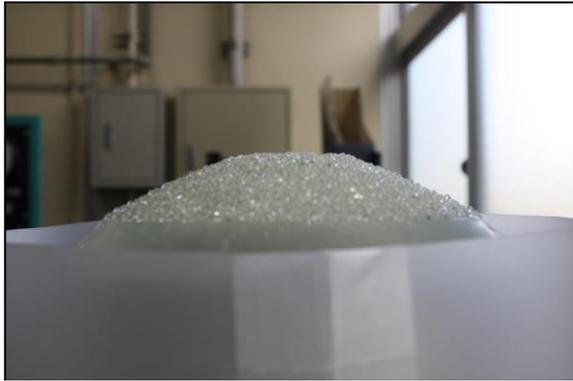
実験手順の概略を図-2に示す。実験はまず、容器底面からの高さが 100mm となるように可動式側壁の位置を調整し、粒子を投入する(図-2(a))。本実験には、球形のガラスビーズ 3 種類を用いた。ガラスビーズは、直径 10mm、3mm の単一粒径のものと、直径が最大 1.8mm、最小 0.3mm の複数の粒径からなるガラスビーズを用いた(以下、それぞれ、GB1、GB2、GB3 と称す)。次に、供試体上端面が可動式側壁の高さと同じになるようにストレートエッジを用いて表面を整え、平面になるように仕上げる(図-2(b))。その後、可動式側壁を所定の速度で下側に移動させ、粒子を流動させる(図-2(c))。可動式側壁が移動中、粒子が流動することによってできる安息角を、デジタルカメラを用いて所定の間隔で撮影し、撮影した画像からコンピュータを用いて安息角を求める(図-2(d))。得られた画像の一例を図-3に示す。図中の(a)から(e)は、ローマ字の若い順に実験開始時からの経時変化を示している。図からわかるように、側壁に近い粒子から徐々に流動が始まり、上端面のフラットな部分が少なくなり、やがて円錐型になっていく様子がわかる。安息角を定義する際には、砂山の底辺の端部と砂山頂点と底面の垂線を延長し、幾何学的に求める方法³⁾や、砂山を多方向から撮影し、コンピュータ上で 3 次的に合成し、砂山の下端および上端の何パーセントかを除外し、残った円錐台の斜辺を用いる方法⁴⁾など、研究者によって独自の定義がなされていることがしばしば見受けられる。本研究では、粒径および流動速度による安息角の違いを相対的に判断することを目的としており、かつ簡易的、人的誤差も小さいことから、図-3(f)に示すように底面の左右端から、形成された山の最も高い位置にある粒子の上端を通る様にそれぞれ直



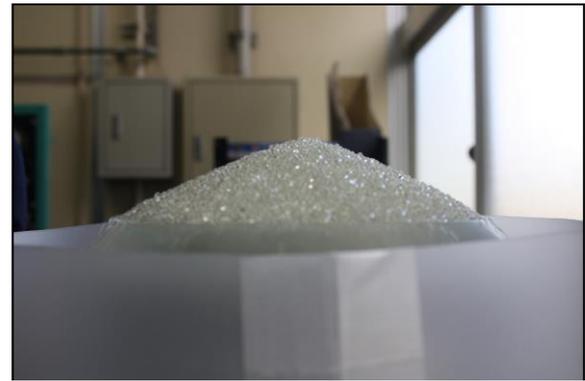
(a)



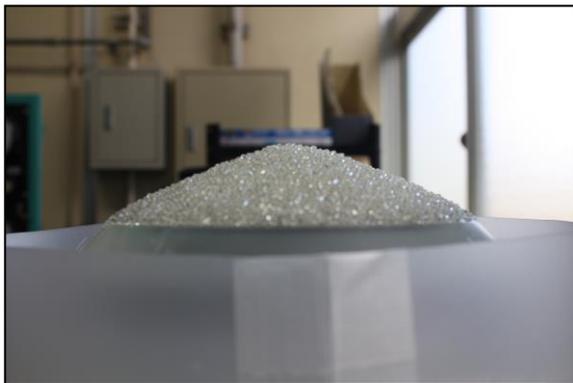
(b)



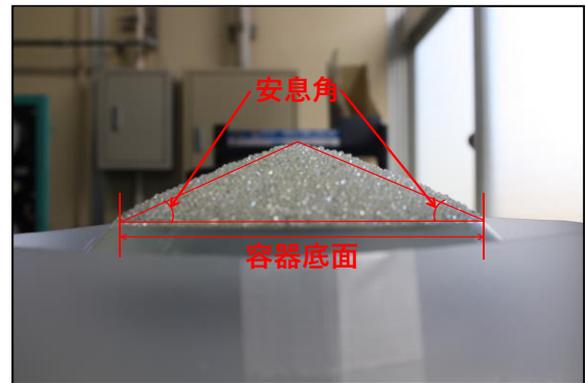
(c)



(d)



(e)



(f)

図-3 実験時の様子および安息角の定義

線を描き、これらと底辺が成す角度をそれぞれ安息角とした。つまり、一度の実験で得られた砂山の画像から、砂山を左右に分け、左右の安息角をそれぞれ独立した結果とみなし、一度の実験で2つの安息角を取得し、平均の安息角を求めた。先述の通り、境界条件によってもその値が変わる安息角について共通の認識を持つためには、境界条件の統一のみならず、安息角の測定方法や定義について厳密に規定することが今後必要になることが考えられる。

4. 実験結果

図-4 に、側壁の速度を 5mm/min および 30mm/min に制御して行った3回の実験から得られた平均安息角と容器底面直径 D に対する粒径 D_p との関係を示す。なお、各実験の安息角は側壁の高さが 50mm から 95mm まで変位した間に撮影した画像から得られた安息角を実験の平均安息角としている。また、粒径比はそれぞれ、GB1 が 16 倍、GB2 が約 53 倍、GB3 が 213 倍であり、GB3 については、平均粒径 0.75mm の点を用いて粒径比を求めている。図から、どちらの速度で壁を移動させた場合も、粒径比が小さくなるほど安息角が大きくなることが明らかとなった。また、異なる速度動同士で比較すると、どちらもほとんど同じ値を示していること

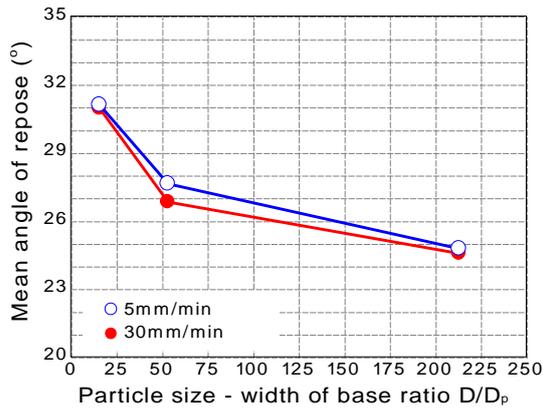


図-4 安息角の平均値と粒径比の関係

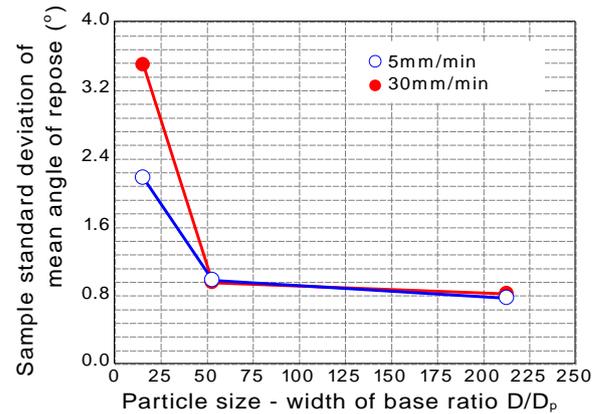


図-5 安息角の標本標準偏差と粒径比の関係

わかる。また、図-5 に安息角の標本標準偏差と粒径比 D/D_p の関係を示す。粒径比が大きくなるにつれ、標本標準偏差は小さくなることが分かった。また、側壁の移動速度を見ると、粒径比が 50 倍より大きくなると、速度の違いによらず標本標準偏差の値はほとんど同じになることが分かった。このことより、境界の移動速度による影響を小さくするためには、粒径比を一定以上確保する必要があることが推察される。これらの結果から、安息角は正規分布すると仮定して式(1)⁵⁾を用いて得られた結果の信頼性を評価するために必要なサンプルサイズを求めた。

$$\beta = t_{(n-1, \alpha)} s / (n - 1)^2 \quad (1)$$

ここで、 n はサンプルサイズ、 $t_{(n-1, \alpha)}$ は自由度 $n-1$ の t 分布における危険率 α の棄却限界、 s は標本標準偏差、 β は許容誤差である。本研究では危険率を 5%、許容誤差を 1.0 とした。表より、粒径比を 50 倍より大きくすることで、必要なサンプルサイズを 5 個程度にできることが明らかとなった。

5. 結論

本研究では、安息角を測定する実験での人的要因の差をできる限り排除するために、安息角測定装置を開発することとし、複数の試料に対して安息角を測定した。以下にその知見をまとめる。

- (1) 試料が投入された容器の側壁を電動で制御することで粒子を排出し安息角を測定できる粒子流動速度制御式安息角測定装置を開発できた。
- (2) 側壁の移動速度によらず粒径比が小さいほど平均安息角が高くなることが明らかとなった。
- (3) 粒径比が大きいほど標本標準偏差が小さくなり、粒径比が 50 倍より大きくなると、速度の違いによらず標準偏差の値はほとんど同じになることがわかった。
- (4) 粒径比を 50 倍より大きくすることで、必要なサンプルサイズを 5 個程度にできることが明らかとなった。

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, 社団法人地盤工学会, p.166, 2006. 2) 青木隆一: 粉塵の安息角および内部摩擦角の測定法, 粉体工学研究会誌 Vol.6 (1), pp.3-8, 1969. 3) Hiroshi Nakashima, Yasuyuki Shioji, Taizo Kobayashi, Shigeru Aoki, Hiroshi Shimizu, Juro Miyasaka, Katsuaki Ohdoi: Determining the angle of repose of sand under low-gravity conditions using discrete element method, Journal of Terramechanics, Vol.48, pp.17-26, 2011. 4) Artur Wójcik, Przemysław Kłapa, Bartosz Mitka, Jerzy Śladek, The use of the photogrammetric method for measurement of the repose angle of granular materials, Measurement, Vol.115, pp.19-26, 2018. 5) 浅井晃: 調査の技術, 日科技連出版社, pp.100-101, 1992.

表-1 試料ごとの安息角を推定するために必要なサンプルサイズ

	5mm/minの場合の サンプルサイズ (個)	30mm/minの場合の サンプルサイズ (個)
GB1	20	50
GB2	5	5
GB3	4	4