

大型安息角測定装置の開発および底面幅が砂の傾斜角に与える影響の評価

山口大学 正会員 ○梶山 慎太郎

山口大学 正会員 中田 幸男

1. まえがき

安息角は身近にかつ安易にせん断特性を得ることができる一方で、その結果には測定方法や装置、観測者による差があると考えられている。そして、その多くは安息角を実験することのメリットである、容易さの観点から小型の装置を使って測定されている。一方で、安息角が境界条件の影響を受けることは多く指摘されている(例えば1)。本研究では、安息角が境界から受ける影響の内供試体の底面幅に着目し、供試体の寸法を変化させることのできる可変型平面ひずみ安息角実験装置開発した。さらに、複数の試料に対して供試体寸法を変化させて砂山の傾斜角を測定して、安息角に与える境界の影響を底面幅を変えることで明らかにし、材料定数として装置によらない傾斜角を求めるための基礎的な検討を行った。

2. 実験装置の開発

本研究では、境界の影響を底面幅を変えることで明らかにするために、砂を対象とした安息角測定装置を、底面幅が最大 1000mm まで測定可能で、砂材料に対して底面幅の影響を 10 のべき乗オーダーで比較できる程度の大型安息角測定装置を開発した。また奥行きは可変できず、200mm となっている。本研究で開発した装置の概略図および砂山高さの計測方法を図-1 に示す。装置は、支柱等をアルミフレーム、壁面をアクリルで作製し、試料投入領域は可動式拘束板を移動することによって供試体の幅を可変することができる。また、可動式拘束板の対面には解放壁を有しており、解放壁制御ハンドルを用いて垂直に壁面を移動させることができ、排出口より砂を排出して砂山を作製することができる。解放壁および可動式拘束板に直行する側壁は、供試体が大きくなることにより側壁中央付近がはらみ出しが生じる。このはらみ出しに対する問題と、側方か

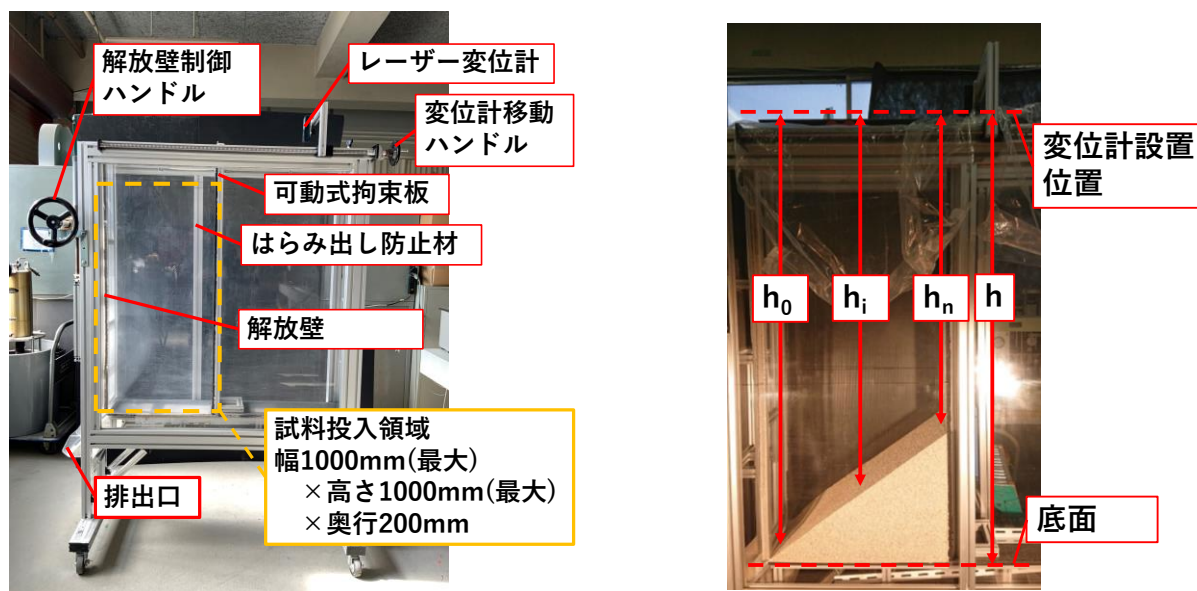


図-1 実験装置概略(左)と砂山高さの計測方法(右)

キーワード 安息角, 境界条件, 粒子形状

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

T E L 0836-85-9326

らの砂山の観察を両立するために、アルミフレーム上でスライドできるはらみ出し防止材を用いて図-1中の奥行き方向の変形を拘束する機構とした。

レーザー変位計は、図-1右図に示す様に装置上部に設置され、奥行き方向に100mm、つまり供試体中央の位置の、レーザー変位計先端部から砂山までの距離($h_0, \dots, h_i, \dots, h_n$)を測定し、レーザー変位計先端部から底板の距離(h)から除すことで砂山の高さを測定している。なお、砂山の高さは幅方向に変位計移動ハンドルを用いて5.0mm 間隔で測定しており、その分解能は0.1mm である。

3. 実験条件および手順

実験は、予めアクリル板に静電気除去スプレーを塗布し、はらみ出し防止のために中央にはらみ出し防止材を設置した後、任意の底面幅となるように可動式拘束板を固定する。なお、今回は供試体の高さは底面の幅と同一の大きさとした。直径60mm、先端の長さが500mm および1200mm の2種類の漏斗を用いて漏斗の先と排出した砂の上端面が離れないように砂を投入した。この際一度に投入する砂の量はおおよそ同量とし、四方の壁を沿うように漏斗を移動させ、供試体上端が平坦となるように作製した。所定の高さまで砂を投入した後、解放壁制御ハンドルを毎分140~160回の速さで手動で回転させて平均粒径のおよそ5倍の高さとなるまで上昇させて砂を流動させた。砂の流動が終息した後にレーザー変位計から砂山の高さを測定し、傾斜角を求めた。なお、供試体底面には耐水ペーパーを張り付けている。試料には、宇部珪砂特1号(以下、珪砂1号)、三河珪砂4号(以下、珪砂4号)および豊浦砂を用いた。試料の粒度分布および単粒子画像を図-2に示す。なお、図中には粒子の外接楕円の長軸を短軸で除した縦横比 A_r も併せて表記しており、その数値が大きいほど、長軸が短軸に対して長いことを示している。

4. 実験結果

本研究では供試体の幅の影響を調べるために、2種類の傾斜角を求めた。以降、安息角の定義に相当する砂

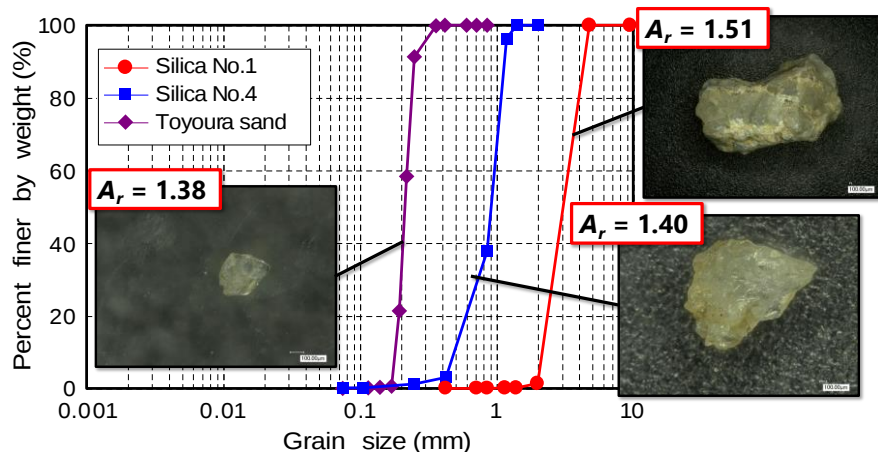


図-2 用いた試料の粒度分布および単粒子画像と縦横比

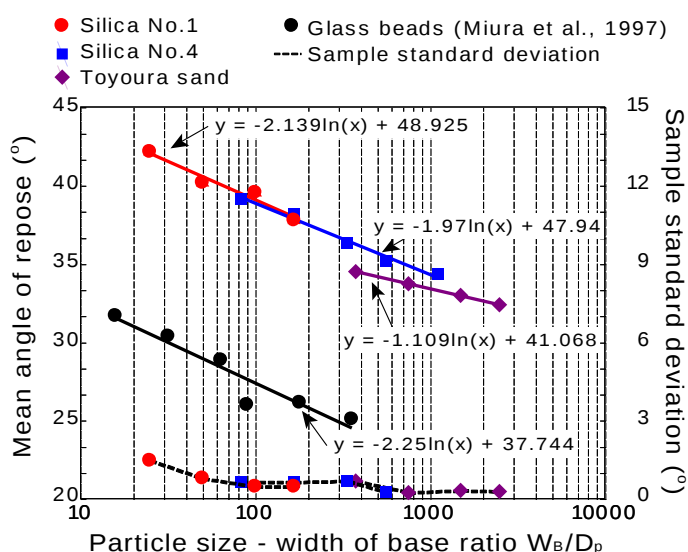


図-3 平均傾斜角および標本標準偏差と底面幅比の関係

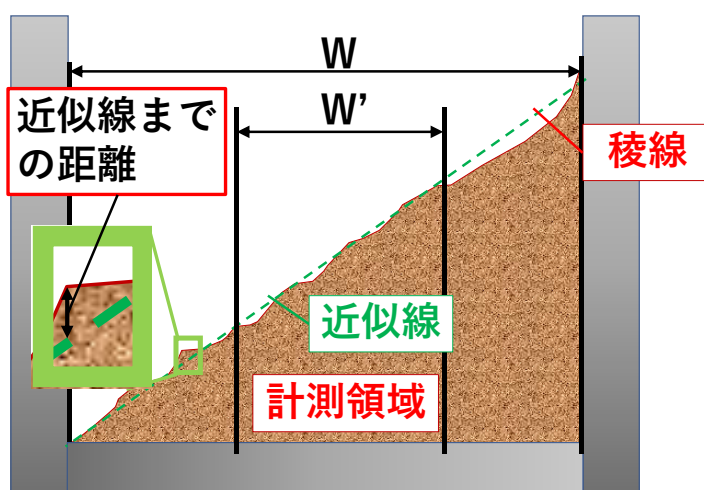


図-4 部分傾斜角の定義

山ののり尻 h_0 とのり肩 h_n を結んだ直線と水平面の成す角度を平均傾斜角，砂山の一部 h_i から h_{i+m} (m は任意の値) を結んだ直線と水平面の成す角度を部分傾斜角と称す。

図-3 に，6 回の実験から得られた平均傾斜角の平均値および標本標準偏差と平均粒径に対する底面幅比 W_B/D_p を示す。また図には，Miura ら³⁾が行ったガラスビーズの実験結果も併せて示している。なお，ガラスビーズの底面幅比は，容器底面を平均粒径で除して著者が加筆した。また，Miura らは円筒形の供試体を用いている。図より，既往の結果と同様に底面幅比に対して，いずれの試料においてもべき関数的に減少していることが確認された。また，本研究では，粒径比が 2500 倍においてもこの傾向が認められることが明らかとなった。これにより，いずれの試料においても，1 つの試料に対して複数の幅を持つ容器を用いることで，任意の幅の平均傾斜角を推定できることが示唆された。標本標準偏差は底面幅比が大きくなるほど小さくなることが明らかとなった。また図より，今回の実験で得られた平均傾斜角の近似線を描くと，傾きはガラスビーズ，1 号珪砂，4 号珪砂，豊浦砂の順に小さくなることが明らかとなった。一方，切片は 1 号珪砂，4 号珪砂，豊浦砂，ガラスビーズの順に小さくなることが明らかとなった。これらの結果より，形状が複雑なほど切片が高くなる，つまり底面幅比が小さい場合，形状の違いによる平均傾斜角の差が顕著となることが明らかとなった。一方，底面幅に対する平均傾斜角の減少量は必ずしも形状の複雑さと一致しないことが明らかとなった。

次にこれらの実験結果から，部分傾斜角を求めた。安息角に対して，境界の影響を無くすための工夫は，いくつか報告されている。Wójcik ら³⁾は，高さ方向に底面と頂点から一定の長さまでの稜線を見捨て，砂山の一部を用いて安息角を定義している。本研究の部分傾斜角についても，斜面中央が最も境界の影響が小さいと仮定し，図-4 に示す様に斜面中央を原点として砂山の稜線の近似線を描いた。さらに，この近似線と測定点の高さ方向の差を求め，平均粒径で除して近似線からの粒径比を求めた。例として，4 号珪砂の 500mm の結果を図-5 示す。図より，のり肩およびのり尻，つまり供試体の端における粒径比は，粒径比の絶対値が大きくなり，砂山の稜線が上に凸あるいは下に凸なる傾向が確認された。また，砂山を細かく分割すると砂山の稜線は，図-5 中の Sample No.6 の供試体中心からの水平方向の粒子数 100 個から 280 個の間で顕著に見られる様に，シノソイド曲線的に変化し，かつ初期位相の値が徐々に変化していく傾向が認められた。さらに，本実験条件では斜面中央から 1/3 は，振幅およびその中心が概ね等しい値をとっている領域が確認された。この傾向は，底面幅を変化させても同様の結果が認められた。また，他の試料においても同様の傾向が認められたため，斜面の中央から 1/3 を用いて部分傾斜角を求めた。

平均傾斜角および部分傾斜角と底面幅比の関係を図-6 に示す。図より，部分傾斜角においても，底面幅比に対してべき関数的に傾斜角が減少していることが明らかとなった。部分傾斜角の方が平均傾斜角より，近似線の勾配と切片が大きくなることが明らかとなった。また，標本標準偏差を比較すると，1 号珪砂では他の試料

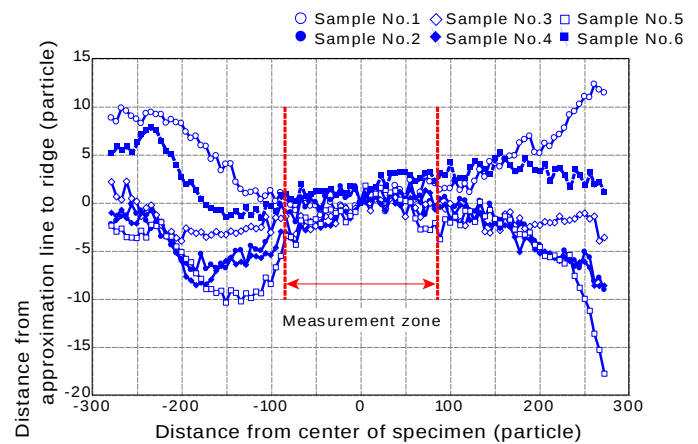


図-5 4 号珪砂の $W_B=500\text{mm}$ における近似線から稜線までの粒子数と供試体中心からの水平方向の粒子数の関係

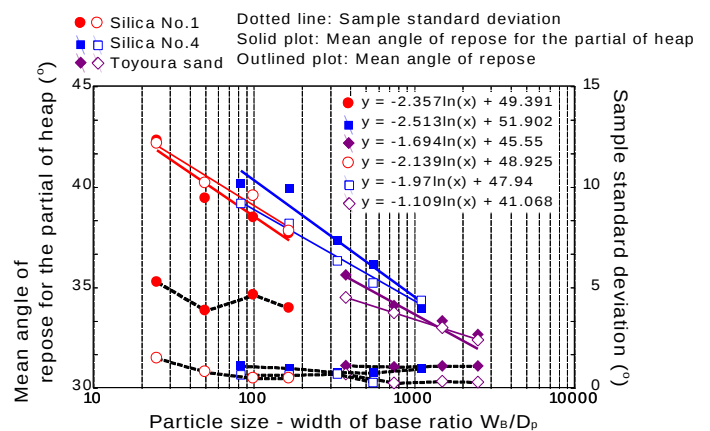


図-6 平均傾斜角および部分傾斜角と底面幅比の関係

と比較して大きいことから、標本標準偏差が大きいことが 1 号珪砂の材料特性である可能性はあるものの、部分傾斜角を求めるためにはより多くの試行回数が必要である可能性が示唆される。一方で 4 号珪砂と豊浦砂では同程度の標本標準偏差であり、これらの結果から、部分傾斜角においても形状が複雑な方が平均傾斜角が大きくなることが示唆された。この部分傾斜角は、供試体の端部からの影響を低減できるだけで無く、平均傾斜角と比較していずれの試料においても標本標準偏差が大きくなっていることから、平均傾斜角よりも材料特性が顕著に現れ、より精確に材料の傾斜角を評価できる可能性が示唆される。

最後に、4 号珪砂を用いた底面幅 1000mm の実験中の様子を図-7 に示す。なお、図は上の図から順に時間が経過している。図から分かる通り、実験中にのり尻側からのり肩に向かって砂山の一部だけが摺動する様子が確認された。また、この挙動が周期的な稜線の様子に対応付けられる。これらの挙動は、本研究では排出口の高さを粒径の 5 倍と規定し、単位時間当たりの砂の排出量を規制したことにより、壁面を持たない場合の砂の流動速度よりも砂の流動速度が遅くなったためにこのような挙動が生じたと考えられる。排出口の高さを変えて実験を行い、流動速度の影響を評価することで、供試体の大きさが平均傾斜角および部分傾斜角に与える影響をより明確にできると考えられる。

5. 結論 本研究では、供試体の寸法を変化させることのできる可変型平面ひずみ安息角実験装置開発し、複数の試料に対して供試体寸法を変化させて砂山の傾斜角を測定して、安息角に与える境界の影響を底面幅を変えることで明らかにし、材料定数として装置によらない傾斜角を求めるための基礎的な検討を行った。以下に知見を示す。

- 1) 底面幅が最大 1000mm まで測定可能で、砂材料に対して底面幅の影響を 10 のべき乗オーダーで比較できる程度の大型安息角測定装置を開発した。
- 2) 斜面中央の 1/3 を用いて求めた部分傾斜角の方が平均傾斜角より、近似線の勾配と切片が大きくなることが明らかとなった。この部分傾斜角は、供試体の端部からの影響を低減されていると考えられるため、平均傾斜角よりも材料特性が顕著に現れ、より正確に材料の傾斜角を評価できる可能性が示唆された。
- 3) 排出口の高さを変えて実験を行い、流動速度の影響を評価することで、供試体の大きさが平均傾斜角および部分傾斜角に与える影響をより明確にできると考えられる。

参考文献

- 1) Y.C.Zhou, B.H.Xu, A.B.Yu, P.Zullib : An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres, *Powder Technology*, 125(1) pp.45-54, 2002. 2) K. Miura K. Maeda and S. Toki : Method of measurement for the angle of repose of sands, *Soils and Foundations*, 37(2), 89-96, 1997. 3) Wójcik P. Klapa B. Mitka J. Śladek : The use of the photogrammetric method for measurement of the repose angle of granular materials. *Measurement*, 115, pp.19-26, 2018.

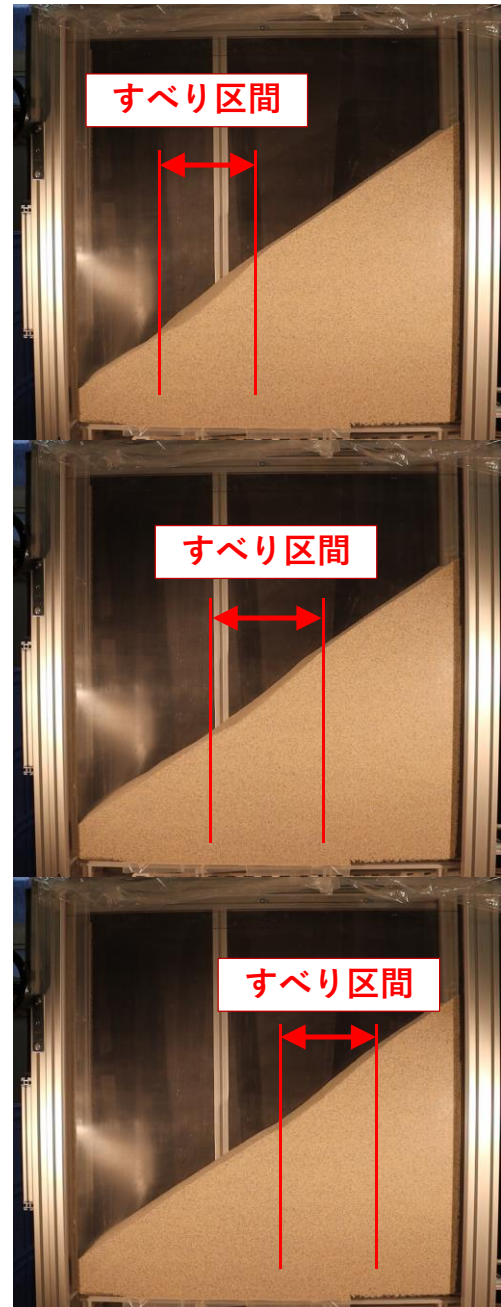


図-7 実験中の砂山の摺動挙動の様子