

側壁速度制御式円筒型安息角測定装置の開発および測定方法提案と精度検証

山口大学大学院	正会員	○梶山 慎太郎
山口大学大学院	正会員	中田 幸男
山口大学大学院	学生会員	田上 聖人

1. 背景および目的 地盤のせん断特性を調べるための身近な方法として、安息角が挙げられるが、安息角は、簡易的な装置で手軽に計測ができる一方でその値には差があるのが普通であるという認識がされている。また、試験方法そのものに関しても、アメリカではかつて ASTM にて試験方法が標準化されようとしたが、適用に限界があったため廃止された¹⁾。日本では、JIS によって工業規格として規定されている安息角の測定方法は、目開き 0.2mm のふるいを通したアルミナ粉末に対して適用範囲を限定して定められている²⁾。これは、対象の物質の粒径によって静電気力等の粒子に働く力と重力との力の大小関係が異なるためと考えられる。例えば、その力関係は時には静電気力などが重力を卓越する場合も存在する。地盤工学においては、温度湿度に言及していない研究も見受けられる^{3) 4)}。これは、対象とする主な粒径が粉体工学よりも大きいためと考えられる。粒径の増加に伴って、粒径に対して測定容器の大きさが相対的に小さくなり、地盤工学の分野では粒子間の相互作用力よりも、人的誤差や容器の大きさ、底面との摩擦といった境界条件の影響を大きく受けることが想定される。著者らは、各実験での人的要因の差をできる限り排除し、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側壁速度制御式円筒型安息角測定装置を開発⁵⁾した。一方で、この装置は、一方向のみ写真撮影を行っており、相対的な安息角は計測できるものの、3 次元的に安息角を評価することができなかった。

そこで本研究では、この装置を基に 3 次元的に安息角を測定できる装置を開発し、その装置を用いた安息角の測定方法を提案するとともに、その精度について検証した。

2. 実験装置の開発 装置の外観図を図-1 に、概略図を図-2 にそれぞれ示す。図-2 に示す様に、本実験装置は、直径 160mm、高さ 100mm の試料投入容器(a)に粒子を投入後、電動モーターおよび速度制御装置(b)によってスクリュージャッキ(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おり、リミッター(e)によって任意の高さで自動的に側壁を停止できる。また、容器底面(f)およびフレーム(g)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(h)から回収される。デジタルカメラ 1(i)およびデジタルカメラ 2(j)は直交する位置に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、コンピュータ(k)によるリモート撮影を行う。実験中の変位は変位計(l)によって測定され、変位計モニター(m)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ことが可能である。

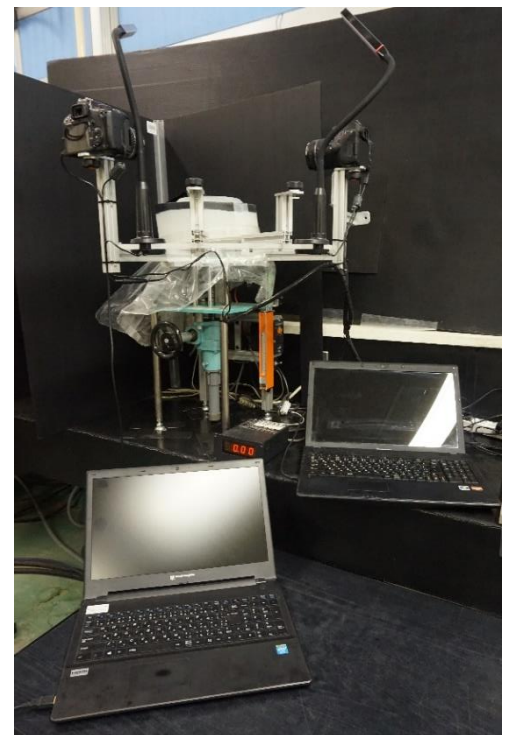


図-1 実験装置外観

キーワード 安息角, 装置開発, 精度検証

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 1-13-9

TEL 0836-85-9326

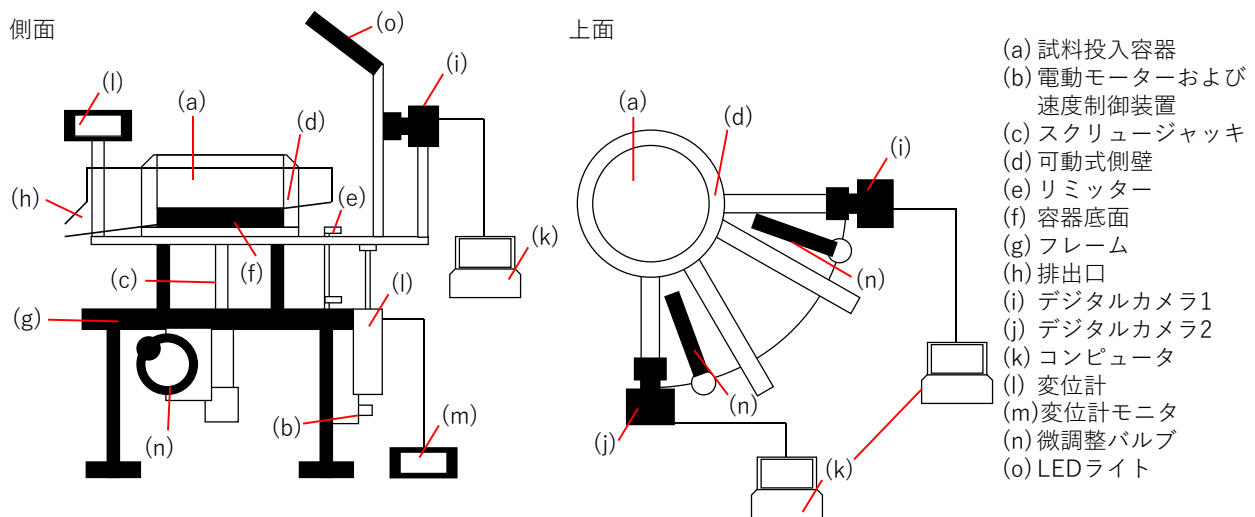


図-2 実験装置概略

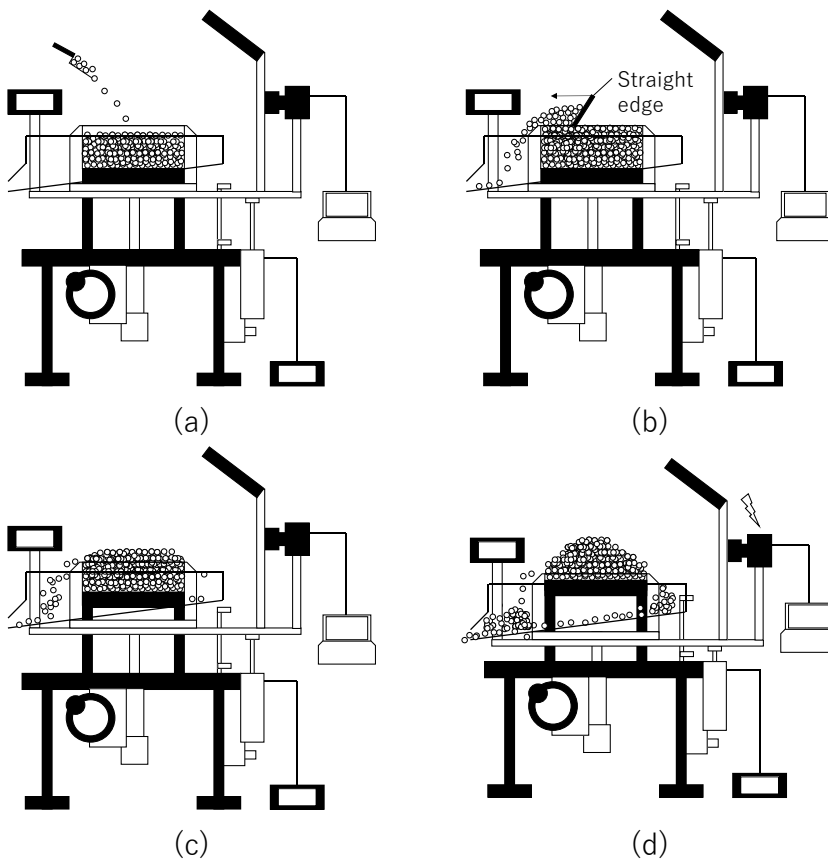


図-3 実験手順概略図



図-4 幾何補正用基準標点

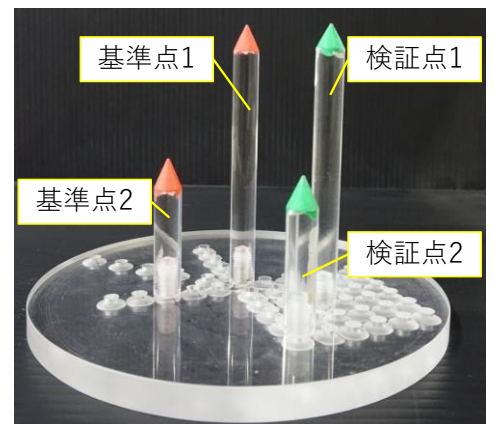


図-5 検証用供試体

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(n)も併せて設置されている。実験中は、砂山の稜線を明確にし、かつ取得した画像の輝度を一定にすることで画像解析を容易に行えるようにするために、LEDライト(o)を設置している。なお、解析が容易となる様に背景には黒色のプラスチック製の板を設置し、光の反射を防ぐために、画像上で供試体の背後に光の反射が写りこむ箇所にはスポンジシートを貼っている。

3. 安息角測定方法 安息角を測定する手順の概略図を図-3に示す。まず、試料投入容器に砂を投入する(図-3(a))。試料投入容器に砂を投入し終えた後、ストレートエッジを用いて供試体上面を整える(図-3(b))。可動式側壁を下降させ、砂を流動させて砂山を成形させる(図-3(c))。その後、任意の側壁の高さで直交する2台のカメラを使って砂山の画像を撮影し(図-3(d))、画像から安息角を測定する。一方、使用するカメラ画像はレンズによる影響を含んでいるため、正確な砂山の高さを計測するには、これを補正する必要がある。

そこで本装置では、図-4に示す様な格子の間隔が既知の基準標点を用いて幾何補正を行う。手順はまず、幾

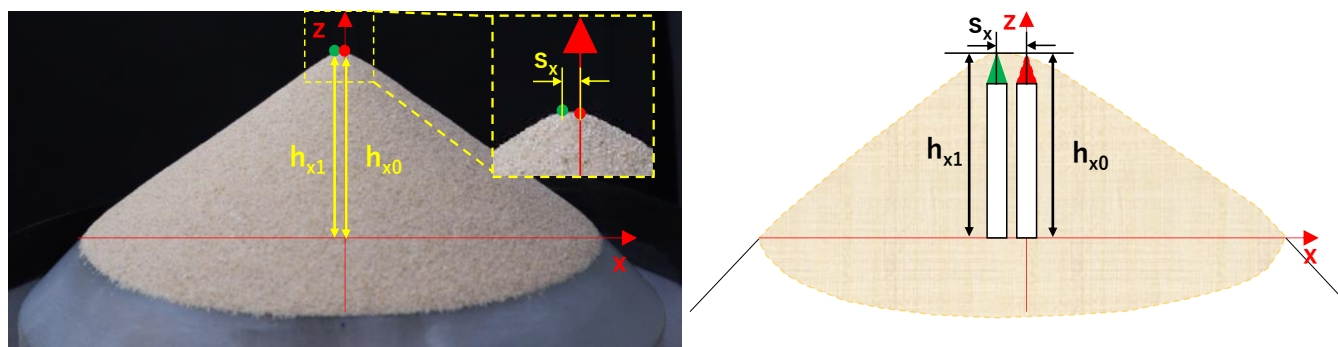


図-6 成形された砂山の一例(右)と検証用供試体で測定する諸量の概略図(左)

何補正用基準点をカメラのレンズに直行する様に容器底面に設置した。カメラの焦点を合わせ、基準標点の格子が画面上で水平および垂直となる様にカメラを調整し固定した。これを直交する2台のカメラそれぞれに対して行い、この状態で検証用の供試体を撮影した。また、幾何補正用基準標点の下部の赤色の部分は、円筒の直径にあたる160mmとなっており、安息角を用いるために必要な頂点の相対的な座標を取得するために用いている。

4. 実験装置の精度検証 この様に開発した装置および測定手法によって得られた砂山の安息角の精度を検証するために、検証実験を行い、その精度を検証した。

本装置の測定対象は砂山であるが、粒状体であるため、物理的に測ろうとすると、測定器具が砂山に触れてしまい砂が流動し、正確に測れないことが想定される。そこで、物理的に測定できる供試体を用いて、本装置の精度を検証することとした。図-5に検証用の供試体を示す。検証用供試体には、先端を円錐状にした長さが既知の亚克力棒を用いた。先端は、画像解析を行うため、赤色と緑色で着色した。ここで、赤色の棒は基準点(以下、基準点と記す)、緑色の棒は砂山頂点(以下、検証点と記す)を想定している。また、実際に成形される砂山の高さは一定では無いので、取りうる可能性のある砂山の高さを考慮し、約50mm、100mmの高さの亚克力棒を用いた(以下、約50mmで行った実験に使用した基準点、検証点を基準点1、検証点1、約100mmで使用したものを基準点2、基準点2とそれぞれ記す)。図-6に、カメラ1で撮影した成形された砂山の画像の一例と検証用供試体で測定する諸量の概略図を示す。図は垂直方向の座標をz軸、水平方向の座標をx軸で表している。図-6の右図の赤色の点は、供試体の中心のx座標、緑色の点は砂山頂点のxz座標を示している。図から分かる様に、砂山の頂点は常に供試体の中心に存在するわけではないため、垂直方向、水平方向の頂点座標の精度を検証するため、検証用供試体を用いて検証実験を行った。

検証方法は、図-6に示す様に長さが同じ基準点および検証点を用いる。基準点を供試体中心、検証点を既知の水平距離sに固定し、検証用供試体を回転させた後に無作為な位置で停止させることでカメラからの相対的な位置を変化させて、画像上の基準点および検証点のx座標、z座標が異なる複数枚写真を撮影した。なお、基準点と検証点の相対的な位置を変化させた結果に対しても検討を行った。基準点および検証点の高さと水平距離、試行回数を表-1に示す。なお、表-1中の1-1、2-2はそれぞれ基準点1と検証点1間、基準点2と検証点2間の距離を示している。なお、表-2、3中の1-1および2-2という表記も同じ距離を示している。

これら取得した画像に対して基準点および検証点を抽出し、幾何補正を行いカメラによる画像のひずみを補正した後に基準点および検証点のピクセル座標をそれぞれ求めた。その後、幾何補正用基準標点の下部赤色部

表-1 基準点および検証点の高さ(上)と水平距離s(中)の実測値および試行回数(下)一覧

(mm)	1	2
基準点	50.2	100.4
検証点	50	99.75

(mm)	CaseA	CaseB	CaseC	CaseD	CaseE
1-1	11.7	16.05	21.2	23.3	30.25
2-2	11.6	15.55	20.5	23.9	29.35

(回)	CaseA	CaseB	CaseC	CaseD	CaseE
1-1	6	6	6	6	6
2-2	5	5	6	6	6

分から画像上の供試体の端部と供試体下端のピクセル座標を求めた。最後に、各画像に x 軸方向と z 軸方向の画像倍率(mm/pixel)の平均値を乗じて各点の座標(mm)を求めた。また同時に、直交するカメラ 2 から画像を取得し、垂直方向を z 軸、水平方向を y 軸として、同様の手順で基準点および検証点の y 座標、 z 座標を求めた。以下、直交方向のカメラで撮影した画像上の基準点高さを h_{y0} 、検証点高さを h_{y1} 、基準点-検証点間の距離を s_y と記す。なお、平均画像倍率はカメラ 1 が 6.46×10^{-2} 、カメラ 2 が 8.86×10^{-2} であった。

それぞれのカメラから取得した画像は、図-7 に示す様に直交した画像となっていることから、上記の方法を用いて求めた 2 次元座標から 3 次元座標に変換した。なお、各点の高さ h_0 、 h_1 はそれぞれ $h_0 = (h_{x0} + h_{y0})/2$ 、 $h_1 = (h_{x1} + h_{y1})/2$ とした。また水平方向 s は $s = (s_x^2 + s_y^2)^{0.5}$ を求めた。この方法で求めた画像上の高さおよび距離と表-1 に示す実測値から誤差率を求めた。基準点と検証点および水平距離 CaseA から CaseE までの誤差率の平均値を表-2 に示す。表に示す様に、最も大きい誤差率で 3% 以下となる結果となった。また、基準点および検証点は 1 より 2 の方が誤差率が低いことが分かる。これは、2 の方が撮影した画像の中心により近いことから、補正量が小さかったためと推察される。これらの誤差率から、砂山の頂点が試料投入容器の中心にできたと仮定した場合の取り得る誤差から生じる最小の安息角と最大の安息角を求めた。結果を表-3 に示す。表より、最大値と最小値差は、1 で 1.15° 、2 で 0.83° ということが分かる。一般的に、安息角は 2° 程度の幅を持つ⁶⁾とされていることから、本研究で開発した装置は工学的に十分有意義な測定結果を示すことができる装置であると判断した。

5. まとめ 本研究では、既往の装置を基に 3 次元的に安息角を測定できる装置を開発し、その装置を用いた安息角の測定方法を提案するとともに、その精度について検証した。以下に知見をまとめる。

1. 3 次元的に安息角を測定する装置を開発した。
2. 開発した装置から、頂点の 3 次元座標を同定する解析方法を提案した。
3. 提案した分析を行った結果、高さ方向および距離の誤差率の最も大きな値は 3% 以下となった。また、これらの誤差によって取りうる最大安息角と最小安息角の差の最大値は 1.15° となった。

参考文献 1) ASTM International, Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders (Withdrawn 2005), <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C1444-00>, 2) JIS, R 9301-2-2, アルミナ粉末－第 2 部：物性測定方法-2：安息角，1999. 3) K. Miura, K. Maeda, S. Toki, Method of measurement for the angle of repose of sands, Soils and Foundations, 37 (2) pp.89-96, 1997. 4) Z. Chik, L. E. Vallejo, Characterization of the angle of repose of binary granular materials, Canadian Geotechnical Journal, 42 (2) pp.683-692, 2005. 5) 梶山慎太郎，中田幸男，粒子流動速度制御式安息角測定装置の開発および粒径に依存する安息角の評価，第 70 回土木学会中国支部研究発表会，pp.269-272, 2018. 6) J. Duran 著，中西秀，奥村剛共著，粉粒体の物理学：砂と粉と粒子の世界への誘い，吉岡書店，p.160, 2002.

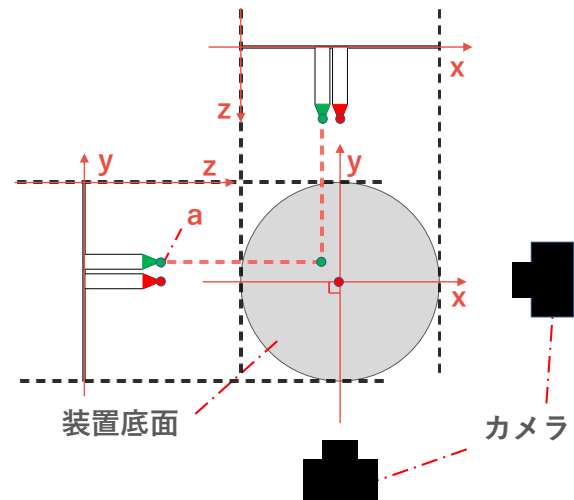


図-7 頂点の座標を 2 次元座標から 3 次元座標へ変換する方法の概略図

表-2 各諸量の誤差率の平均値

(%)	1	2
基準点	1.09	0.43
検証点	1.59	0.77
	1-1	2-2
水平方向	2.46	2.90

表-3 頂点が円の中心に位置すると仮定した時の、誤差によって取りうる最小安息角、最大安息角およびその差

(°)	最小	最大	差
1	32.58	31.43	1.15
2	51.76	50.92	0.83