

アルミ棒積層体の安息角実験を用いた DEM 数値モデルの粒子間摩擦係数の決定

山口大学大学院	学生会員	○郷司 航平
山口大学大学院	正会員	鈴木 素之
山口大学大学院	学生会員	呉屋 港
東京理科大学（元山口大学）	正会員	石丸 太一
広島市（元山口大学）	非会員	川野 拓未

1. 目的

近年、補強土壁工法においても、その変形性能に対する定量的評価が求められている。しかし、現時点で補強土壁に適した数値解析手法は一般化されていない。そこで著者らは、その予備的検討として、アルミニウム棒集合体に対して鋼製帯状補強材の引抜き実験の挙動を再現する数値モデルを開発している¹⁾。今回は、その数値モデルの再現性の向上のため、先行研究による模型実験²⁾と解析モデル³⁾を参考にして安息角の実験および個別要素法⁴⁾を用いたシミュレーションを行った。そして、模型実験と数値解析により得られた安息角を組み合わせ、適切な粒子間摩擦係数を得ることを目指した。

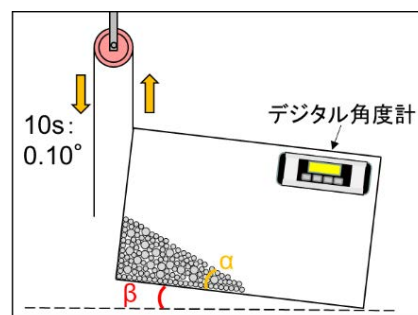


図-1 安息角模型実験装置の全体図

2. アルミ棒積層体を用いた安息角実験

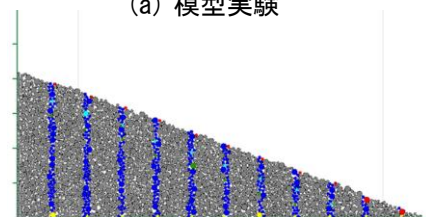
先行研究として恩田ら²⁾の実験があり、それらを参考にを行った。

(1) **実験装置および手順** 図-1 に安息角模型実験装置の全体図を示す。実験装置は長さ 450mm、高さ 250mm、奥行 80mm のアクリル製容器を使用した。アルミ棒の底面滑りを防ぐため、容器には底面および背面に直径 1.6mm のアルミ棒を一層貼り付けている。容器を初期斜面角度 α となるように傾け、直径 1.6mm と 3mm の 2 種類のアルミ棒（ともに長さ 80mm）を用いて、これら 2 種類のアルミ棒を重量比 3 : 2 でランダムに積層した。その後、容器を水平に戻し、初期角度 $\alpha = 20^\circ$ 、底辺 200mm となるような斜面を作製した。滑車を使用し、容器の左端を 10 秒間に 0.10° ずつ引き上げていき、斜面崩壊を確認した時点で引き上げを終了した。

(2) **実験結果** 本実験では α と上昇角度 β の和を「合成傾斜角」と定義している。安息角は斜面崩壊時の合成傾斜角により決定した。実験を 5 回行った結果、合成傾斜角の平均値は 26.6° となった。



(a) 模型実験



(b) 数値解析

図-2 模型実験（写真）と数値解析での斜面の形成

3. 数値解析を用いた安息角実験

先行研究として瀧上ら³⁾の実験があり、本実験はそれらを参考にしたモデルを使用している。本実験では、ITASCA 社がリリースする DEM 数値解析ソフトウェア PFC6.0 2D を用いた。

(1) **解析モデルおよび手順** 容器は模型実験を基に底辺 450mm、高さ 250mm の Wall 材にて再現した。粒子は、直径 1.6mm、3mm の円形粒子を面積比 3 : 2 となるように Ball 材を用いて生成した。斜面寸法は模型実験装置に合わせた。解析手順は先行研究の手順と同様に行い、引き上げは 0.50 deg/s で行った。

(2) **解析モデルパラメータとその決定方法** 解析パラメータは、アルミ棒積層体を用いた引抜き実験の解析モデ

キーワード 個別要素法, 安息角, 補強土工法

連絡先 〒755-8611 山口県山口市宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科 鈴木素之
TEL 0836-85-9303

表-1 安息角実験の解析モデルに用いた粒子間摩擦係数

摩擦角(deg)	5	10	12	14	16	18	19.8	25	30	40	45	50	—
粒子間摩擦係数	0.087	0.18	0.21	0.25	0.29	0.32	0.36	0.47	0.58	0.84	1.0	1.2	1000

ル¹⁾と同様の値を使用したが、粒子間摩擦係数に関しては適宜変更し検証した。解析モデルに用いた粒子間摩擦係数を表-1に示す。摩擦係数1000と限りなく大きい値を与え、解析を実施したケースには、物理的意味はなく、摩擦係数が安息角に与える影響を調べるために設定したにすぎない。

(3) 実験結果の整理方法 実験結果の整理方法を図-3に示す。まず、斜面生成時に底面1.7cmごとに地表面基準粒子と地中基準粒子を設置する。地表面基準粒子は斜面表面の粒子であり、地中基準粒子は地表面基準粒子より1cm下と1.7cm下の2箇所に設置した。設置箇所に関しては、³⁾の実験を参考に3分の1スケールに設定した。斜面の引き上げに伴い、2種類の粒子間に相対角度 γ が発生する。そこで、 γ の平均値が急上昇した時点での合成傾斜角を安息角と定義した。

(4) 実験結果 粒子間摩擦係数と安息角の結果を図-4に示す。実験結果より、粒子間摩擦係数と安息角の計算値の間には破線のような関係が認められる。粒子間摩擦係数が0.4より小さい領域では、粒子間摩擦係数の増加に伴い、安息角の計算値は単調に増加している。一方、粒子間摩擦係数が0.4以上の領域では安息角の増加は鈍化し、単調増加しなくなった。そのため、粒子間摩擦係数が0.4以上の領域では、それより小さい領域に比べて、粒子間摩擦係数が安息角の増加に与える影響が小さいことが考えられる。また、粒子間摩擦係数が1000の過大な値を与えた場合でも安息角は30°になるため、安息角が粒子間摩擦係数だけの影響を受ける場合では、安息角の上限が30°であることが分かった。以上より、粒子間摩擦係数が安息角に及ぼす影響の現れ方はある値を境にして異なることがわかった。本実験では、円柱状のアルミ棒を使用したため、粒子形状の影響は微少と仮定している。したがって、粒子間摩擦係数の影響が大きい範囲での値を用いることが適切と判断し、安息角が単調増加する範囲で摩擦係数を決定した。以上より、模型実験と同程度となった粒子間摩擦係数0.36(摩擦角19.8°)が適切であると判断した。

4. まとめ

本実験により、粒子間摩擦係数の決定には安息角実験が有効であり、アルミ棒積層体では粒子間摩擦係数0.36が適切である。今後は、他のパラメータを決定する模型実験とその数値シミュレーションの実施により、解析モデルの性能は更に向上していくと考えられる。

謝辞：本研究は日本テールアルメ協会との共同研究として実施したものである。関係各位に謝意を申し上げる。

参考文献

1) 郷司航平, 鈴木素之, 呉屋港: アルミニウム棒積層体を用いた鋼製帯状補強材の引抜き実験の数値モデル化, 第58回地盤工学研究発表会, 2023(投稿中).

2) 恩田裕一, 松倉公憲: アルミニウム丸棒積層体による安息角実験, 筑波大学水理学実験センター報告, No.13, pp.141-145, 1989.

3) 湊上幸宜, 國生剛治, 森二郎: 模型斜面の安息角の個別要素法による再現計算, 第55回地盤工学研究発表会, 21-1-5-06, 2020.

4) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.

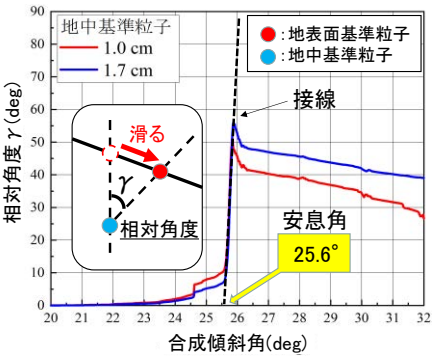


図-3 数値解析での安息角の決定方法

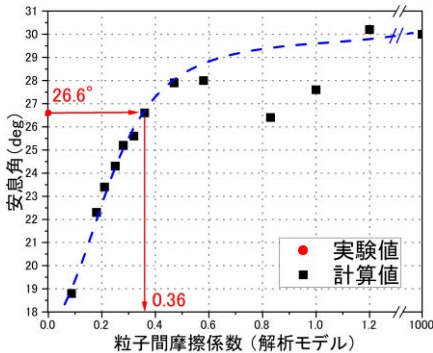


図-4 数値解析での粒子間摩擦係数と安息角の関係