

アルミ棒積層体を用いた鋼製帯状補強材の引抜き実験の
数値モデル化と補強材-粒子間の接触回数

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. はじめに

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、著者は、その予備的検討として、アルミニウム棒積層体に対して鋼製帯状補強材の引抜き実験を行うとともに、その実験をシミュレートする数値モデルを開発し、引抜き実験挙動の再現を目的として研究を進めている^{1),2)}。また、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³⁾と解析モデル⁴⁾を参考にして安息角の実験および個別要素法⁵⁾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た。一方、既往の研究においては、盛土材からの補強材の引抜き抵抗特性は施工現場や室内引抜き試験により数多く検討されている⁶⁾が、その内部の引抜き挙動については十分に検討されておらず、補強土壁内部では補強材が土粒子の動きに与える具体的な影響を可視化することはできない。そこで、改良した数値モデルを用いて、補強材と粒子の接触回数を測定し、耐引抜き性能との関係を検討した。

2. 引抜き実験条件および方法

写真-1 に本実験で用いたアルミ棒積層体の二次元引抜き実験装置を示す。本研究では、アルミ棒積層体を用いた補強材の引抜き実験において、直径 1.6mm と 3mm の 2 種類のアルミ棒 (ともに長さ 80mm) を用い、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。アルミ棒集合体を一次元圧縮後、アルミ棒積層体内に敷設した補強材を一定の速度で引き抜いた。さらに、個別要素法⁵⁾ (DEM) を用いて数値モデリングを行い、両方法により得られた引抜き抵抗 τ (引抜き力を補強材断面積の 2 倍で除したもの) と底面土圧の違いを比較した。今回は、両方法ともに上載圧 100kPa、応力集中低減カバーなしの条件で実施した。一方、引抜き速度は模型実験では 1mm/min で実施し、解析モデルでは解析時間を考慮して 600mm/min で解析している。また、模型実験の粒子数は約 46,600 本であり、数値解析では約 46,100 本である。

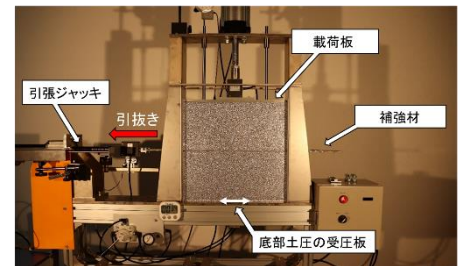


写真-1 アルミ棒積層体の二次元引抜き実験装置

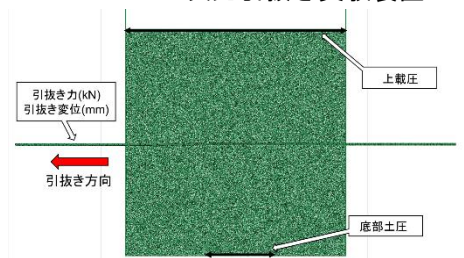


図-1 解析モデルの測定箇所

表-1 数値解析に用いたパラメータの一覧

接触パターン	粒子-粒子	補強材-粒子	壁面-粒子
初期摩擦係数 μ_0	0.36	0.26	0
圧密・引抜き時摩擦係数 μ_1			
法線弾性定数 k_N (N/m)		2.0×10^7	
接線弾性定数 k_s (N/m)		5.0×10^6	
法線粘性定数 b_N		0.2	
接線粘性定数 b_s		0.2	

3. 引抜き実験の数値解析モデル

本解析では ITASCA 社がリリースする DEM 数値解析ソフトウェア PFC6.0 2D を用いてシミュレーションを行った。実験手順は模型実験と同様だが、引抜き口は引抜き開始前に作成した。土槽モデルは Wall 材、補強材モデルは Clump 材、粒子モデルは Ball 材にて生成した。土槽モデルの底部は鉛直圧のデータ取得のため、模型実験装置に合わせて三分割し

キーワード 個別要素法, 引抜き試験, 補強土工法

連絡先 〒755-8611 山口県山口県宇部市常盤台 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

た. 中心部の幅 100mm の Wall 材を使用し, 鉛直圧のデータを取得した. 寸法に関しては, 模型実験装置の寸法と同じにしている. 粒子は 1.6mm と 3mm の円形粒子を面積比 3 : 2 となるように生成した.

(1)測定項目 測定項目は底部土圧の受圧面(Wall 材)に作用する圧力(受圧部の幅:100mm), 補強材(Clump 材)の引抜き力, 補強材(Clump 材)の引抜き変位, 載荷板(Wall 材)が与える上載圧を測定した. 補強材の引抜き力は, 補強材モデル表面にかかる x 方向の接触力の和として算出した. アルミ棒積層体引抜きシミュレーションにおいて測定した箇所を図-1 に示す.

(2)解析モデルパラメータとその決定方法 要素間の法線および接線方向の弾性定数と粒子間摩擦係数は, Esaki ら⁷⁾を参考に設定した. Esaki ら⁷⁾はアルミ棒積層体を DEM で数値モデル化しているため, パラメータが適していると考えた. また, 要素間の法線および接線方向の粘性定数は既往文献⁸⁾から球体を平面上に落下させた場合の反発係数と減衰定数の関係を基に設定した. 壁面-粒子間の摩擦係数は引抜き挙動に影響しないようにゼロに設定した. 補強材-粒子間の摩擦係数は現状適切な値を検討し設定した. 本解析に用いた解析モデルパラメータを表-1 にまとめている.

4. 引抜き模型実験の結果

(1)引抜き抵抗 図-2 (a) に模型実験から得られた τ と引抜き変位 δ の関係を示す. τ は $\delta=5\text{mm}$ まで単調増加し, その後は $\tau=20\sim 30\text{kPa}$ の間で $\pm 5\text{kPa}$ 程度で増減する挙動となった. τ が増減するのは, 補強材リブ周辺の積層体密度に偏りが存在することが原因と考えられる. 今回は, 積層体を 2 種類の粒径だけで作成したため, 密度に偏りが生まれやすいだけでなく, 引抜きに伴う補強材の位置の変化によって補強材リブ周辺の密度が変化している. リブ周辺が高密度であるほど τ が上昇すると考えられるため, δ の大きさによって τ に差が出たと考えられる.

(2)底部土圧 図-3 (a) に模型実験から得られた底部土圧と δ の関係を示す. 底部土圧は 95kPa 程度でほぼ一定で推移した. また, 底部土圧は, 粒子自重を含んだ圧力とした. 載荷板を介して上載圧を 100kPa 作用させているが, 底部土圧は 95kPa 程度である. その差はアルミ棒と前後壁との摩擦によって減じたものと考えられる.

5. 引抜き模型実験と数値解析の結果の比較

(1)引抜き抵抗 数値解析から得られた τ と δ の関係を図-2 (b) に示す. 両者の結果を比較すると, 最大引抜き抵抗は, 模型実験では 31.3kPa , 数値解析では 31.1kPa となった. 数値解析における最大引抜き抵抗, 引抜き挙動ともに模型実験のそれに近い結果が得られた. 一方, 数値解析の粒子数は模型実験のそれよりも約 500 本少なく, また, 引抜き口からの粒子流出が模型実験より多い傾向がみられた. そのため, 土槽内の密度の条件が等しくないことに注意する必要がある. この原因として, 粒子間摩擦係数等の解析パラメータの影響が大きいと考えられる.

(2)底部土圧 数値解析から得られた底部土圧と δ の関係をそれぞれ図-3 (b) に示す. 最大底部土圧は模型実験では 95.2kPa , 数値解析では 111.6kPa となり, 模型実験の方が 15kPa 程度低い結果となった. この差の原因として, 数値解析では壁面-粒子間の摩擦係数をゼロとした影響が現れていると考えられる. 壁面-粒子間の摩擦係数をゼロとしたことで, 上載荷重に対する反力が生じにくく, 力が分散せず底面に伝わり, 数値解析の底部土圧が過大に生じたと考える. また, 模型実験では補強材が引張ジャッキに繋がっているが, 数値解析では補強材が独立している. そのため, 数値解析では補強材の沈み込みが生じ, 底部土圧が模型実験よりも高く発生したと考える. 以上より, 解析上の都合によって底部土圧に差が生まれたと考えた.

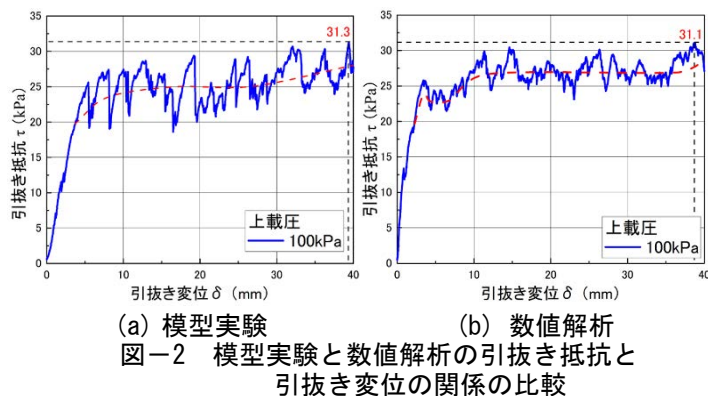


図-2 模型実験と数値解析の引抜き抵抗と引抜き変位の関係の比較

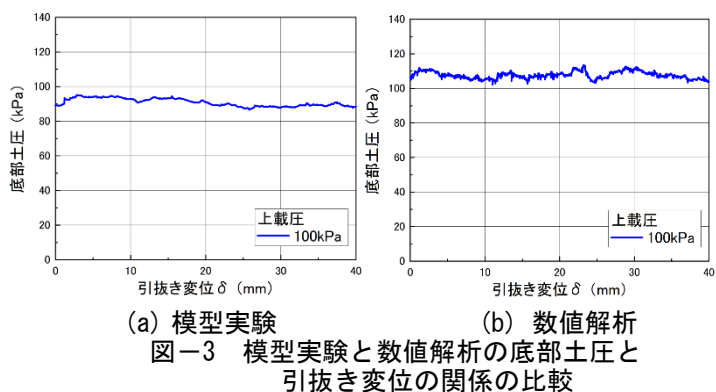


図-3 模型実験と数値解析の底部土圧と引抜き変位の関係の比較

6. 模型実験と数値解析を用いた安息角実験

6.1. 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³⁾の実験があり、それらを参考に行った。

(1) **実験装置および手順** 図-4 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。

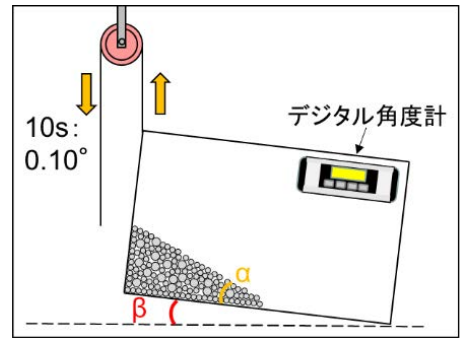


図-4 安息角模型実験装置の全体図

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。

6.2. 数値解析を用いた安息角実験

先行研究として瀧上ら⁴⁾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。

表-2 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

(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ル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-2 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。

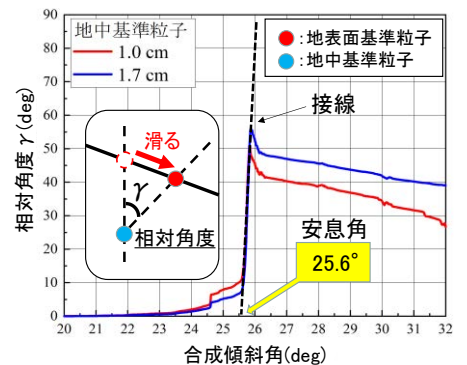


図-5 数値解析での安息角の決定方法

(3) **実験結果の整理方法** 実験結果の整理方法を図-5 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、瀧上ら⁴⁾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。

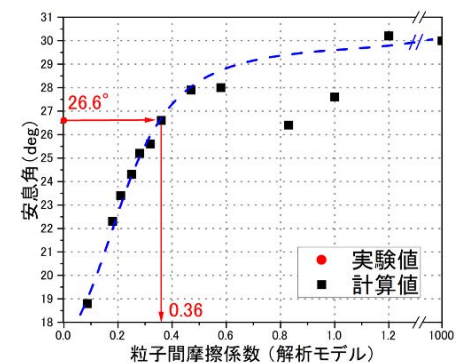


図-6 数値解析での粒子間摩擦係数と安息角の関係

(4) **実験結果** 粒子間摩擦係数と安息角の結果を図-6 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には、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小と仮定している。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。

7. 補強材と粒子の接触回数

引抜き実験の数値解析モデルにおける上載圧を 20, 40, 60, 80, 100kPa と変化した場合のアルミ棒積層体内の補強材と粒子の接触回数を図-7 に示す。また、各上載圧での τ と δ の関係を図-8 に示す。解析結果より、上載圧の上昇に伴い補強材と粒子の接触回数が増加することが分かる。また、解析モデルにおいて、上載圧の上昇に伴い引抜き抵抗が上昇する結果が得られたため、補強材と粒子の接触回数の増加が引抜き抵抗の上昇に影響していることが考えられる。次に、各上載圧での接触回数と引抜き変位の関係に着目すると、引抜き変位 5mm 以降では接触回数がほぼ一定となる挙動となっている。各上載圧での引抜き抵抗と引抜き変位の関係においても、引抜き変位 5mm 以降では引抜き抵抗がほぼ一定となるため、補強材と粒子の接触回数が引抜き抵抗に影響を与えていることが読み取れる。

8. まとめ

本研究で得られた結論を以下に要約する。

- (1) アルミニウム棒積層体を用いた補強材の引抜き実験から得られた、引抜き抵抗と引抜き変位の結果は DEM を用いた解析モデルにより概ね近似された。
- (2) 安息角の実験は DEM を用いた解析モデルにおける粒子間の摩擦係数を決定するのに有効である。
- (3) 引抜き実験では DEM を用いた解析モデルによる接触回数の測定が引抜き抵抗の評価に有効である。

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ます。

参考文献

- 1) 郷司航平, 鈴木素之, 呉屋港, 石丸太一, 川野拓末: 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, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, 2023 (投稿中)。
- 2) 郷司航平, 鈴木素之, 呉屋港, 石丸太一, 川野拓末: 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)。
- 3) 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.
- 4) 渕上幸宜, 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.
- 5) Cundall, P. A., Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 6) 小川憲保: 現場引抜き試験による帯鋼補強材と盛土材との摩擦特性, 土木学会論文集, No.568/III-39, pp.221-226, 1997.
- 7) Esaki, K., Akagi, H., Kiriyama, T., Sato, K.: DEM slope-failure analysis of the Minami-Aso / Tateno area during the 2016 Kumamoto earthquakes, *Proc. of the 6th International Conference on Particle-Based Methods, Fundamentals and Applications, PARTICLES 2019*, pp.359-369, 2019.
- 8) 前田健一, 森口周二, 松島亘志, 小山倫史, 中田幸男: 初級講座「地盤工学のための個別要素法」パラメータの設定と土と地盤の作り方その 1, *地盤工学会誌*, Vol.63, No.8, pp.71-77, 2015.

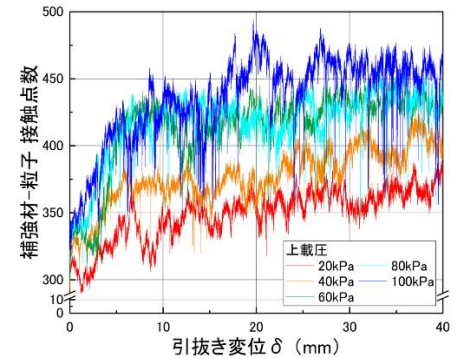


図-7 各上載圧での補強材-粒子間接触点数と引抜き変位の関係

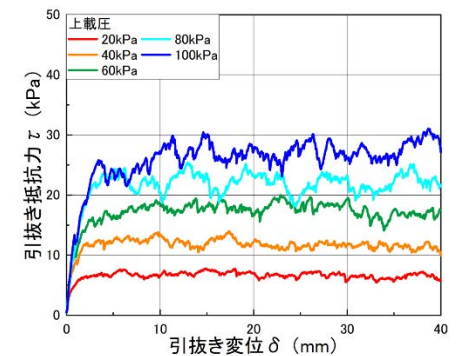


図-8 各上載圧での引抜き抵抗と引抜き変位の関係