

# 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リングと 接触力ー引抜き挙動の関係

Numerical Modeling of Pull-out Experiments on Steel Strip Reinforcement with Laminated Aluminum Rods  
and Relationship between Contact Force and Pulling Behavior

郷司 航平<sup>1)</sup>, 鈴木 素之<sup>2)</sup>, 呉屋 港<sup>3)</sup>, 新田 武彦<sup>4)</sup>, 松永 崇史<sup>5)</sup>, 志村 直紀<sup>6)</sup>, 永倉 秀典<sup>7)</sup>

- 1) Kohei GOHJI, 博士前期課程, 山口大学大学院創成科学研究科, d025veu@yamaguchi-u.ac.jp  
2) Motoyuki SUZUKI, 教授, 山口大学大学院創成科学研究科, msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp  
3) Minato GOYA, 博士前期課程, 山口大学大学院創成科学研究科, c022vew@yamaguchi-u.ac.jp  
4) Takehiko NITTA, 一般社団法人 日本テールアルメ協会, takehiko.nitta@terre-1.co.jp  
5) Takahumi MATSUNAGA, 一般社団法人 日本テールアルメ協会, t-matsunaga@hirose-net.co.jp  
6) Naoki SHIMURA, 一般社団法人 日本テールアルメ協会, n-shimura@hirose-net.co.jp  
7) Hidenori NAGAKURA, 一般社団法人 日本テールアルメ協会, hidenori.nagakura@terre-1.co.jp

本研究では、アルミ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、数値モデルを用いてその実験をシミュレートし、引抜き実験の力学的挙動の再現を試みた。その結果、補強材の引抜き変位ー引抜き抵抗の関係はおおむね近似できた。数値解析に用いた粒子間摩擦係数は、先行研究による模型実験と解析モデルを参考にして安息角実験と個別要素法を用いたシミュレーションを行い、適切な値を取得した。また、数値モデルを用いて接触力を測定し、アルミ棒積層体内部の粒子挙動と引抜き挙動について考察した。

キーワード：アルミ棒積層体、個別要素法、引抜き実験、補強土壁工法 (IGC : E-14)

## 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が、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棒積層体に対して鋼製帯状補強材の引抜き実験を実施している。既往の研究として、梅崎ら<sup>1)</sup>はアルミ棒積層体に対して二軸圧縮試験を実施し、積層体中に敷設された、アルミ棒を用いた補強材の引抜き実験を実施している。また、松岡ら<sup>2)</sup>はアルミ棒を用いた二次元土のうに対して、二軸圧縮試験と引張り試験を実施している。本模型実験では、既往の研究と比較し、一次元圧縮時の補強材の引抜きを実施しており、実構造物で使用する補強材を用いている。

また、模型実験に加えて、数値モデルを用いて引抜き実験をシミュレートし、引抜き実験挙動を再現することを目的とした研究を進めている。本実験にてアルミ棒積層体を用いたのは、土粒子よりも数値モデル化しやすいためである。今回、数値解析に用いた粒子間摩擦係数は、先行研究による模型実験<sup>3)</sup>と解析モデル<sup>4)</sup>を参考にして、安息角実験と個別要素法<sup>5)</sup>によるシミュレーションを行い、決定した。

また、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試験や室内引抜き試験により数多く検討されているが<sup>6)</sup>、引抜き抵抗に影響を及ぼす補強土壁内部の土の領域の大きさについては十分に解明されていない。今後、補強土壁の性能設計の一段の向上が求められることから、本研究は、「個別要素法を用いて補強土の性能を粒子レベルで定量的に評価する方法の確立」を最終目的とし、補強土壁背後の土の挙動を数値シミュレーションすることで、引抜き抵抗の発現および補強効果が及ぶ領域の解明が可能になると考えた。本論文では、現時点のアルミ棒積層体の解析モデルの再現状況を整理したうえで、同モデルにより再現された補強材一粒子の接触点数と粒子間接触力の関係から、アルミ棒積層体内部のマイクロな粒子挙動とマクロな引抜き挙動について考察した。

## 2. アルミ棒積層体を用いた補強材の引抜き実験

### 2.1 実験装置および手順

図-1、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種類の円形アルミ棒（ともに長さ80mm，密度2700kg/m<sup>3</sup>）を用いて，これら2種類のアルミ棒を質量比3：2でランダムに積層した．既往の研究より，前述の粒径および混合比を用いた積層体は粒径加積曲線が豊浦砂のそれと平行に近いことが分かっている．そのため，上記のアルミ棒積層体を用いることで，一般的な砂に似た引抜き挙動が得られると考えた．土槽は幅400mm，高さ450mmであり，積層体は幅400mm，高さ400mmとなるように積み上げた．アルミ棒の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最大引抜き変位が40mmに達するまで一定の速度1mm/minで引き抜いた．

本実験に使用した補強材は実構造物で使用するものと同じであり，リブがついている．補強材の厚さは4.5mm，長さは800mm，幅は80mmである．補強材のリブの幅は6mm，高さは3mmである．実構造物で使用する補強材を用いることで，補強土壁内部の挙動を解明することに繋がると考えられる．一方で，今回の模型実験では補強材寸法に対するアルミ棒の直径が大きい．豊浦砂の場合，その平均粒径D<sub>50</sub>=0.17mmに対して，リブの高さは17.6倍，幅は35.3倍となる．一方，アルミ棒の場合はD<sub>50</sub>=2.16mmと算定すると，それぞれリブの高さは1.4倍，幅は2.8倍となり，粒径の影響はあると考えられる．ただし，その影響の度合いはリブの形状に対する比として考慮できる．

補強材の引抜き口は，アルミ棒積層体の左右にある側壁に，土槽底面より200mm上に設けている．引抜き口の形状は長方形であり，高さ15mm，幅85mmである．今回は，補強材が土槽を貫通する条件，すなわち，土槽中の補強材の断面積が変わらない条件で実験を行った．

この模型実験では，引抜きによる引抜き口付近での粒子の高密度化とそれに伴う応力集中の低減を目的とした，応力集中低減カバー（幅：95mm，高さ：19mm，長さ：60mm）を設置することが可能である．今回は，模型実験と数値解析の比較がしやすいように，応力集中低減カバーを設置していない．

## 2.2 測定項目

測定項目は底部土圧の受圧面（幅：100mm，奥行：80mm）に作用する垂直荷重（容量：2kN），補強材の引抜き荷重（容量：10kN），補強材の引抜き変位δ（容量：200mm），載荷板の垂直変位（容量：50mm），上載荷重（容量：5kN）を測定した．

## 2.3 引抜き模型実験の結果と考察

模型実験では，上載圧100kPa，応力集中低減カバーはなしの条件で実施した．また，粒子数は約46,619本，積層体の密度は2242.5kg/m<sup>3</sup>，単位体積重量は22.0kN/m<sup>3</sup>，間隙比は0.204であった．また，引抜き口からの粒子流出は281本であった．

### 2.3.1 引抜き抵抗

図-2 (a) に模型実験から得られた引抜き抵抗τと引抜き変位δの関係を示す．模型実験では，鋼製帯状補強材の引抜き荷重を引抜き力Tとして，次式(1)より算出した．ここで，τ：引抜き抵抗（kPa），T：引抜き力（kN），A：補強材の敷設面積（m<sup>2</sup>）である．

$$\tau = \frac{T}{2A} \quad (1)$$

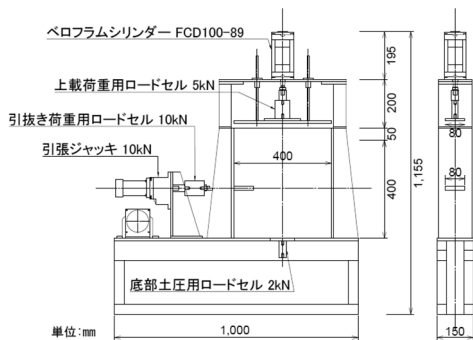


図-1 アルミ棒積層体の引抜き実験装置

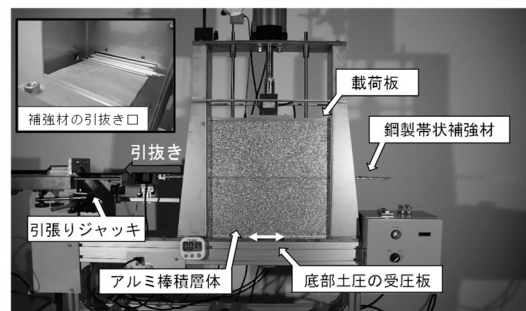


写真-1 アルミ棒積層体の引抜き実験装置

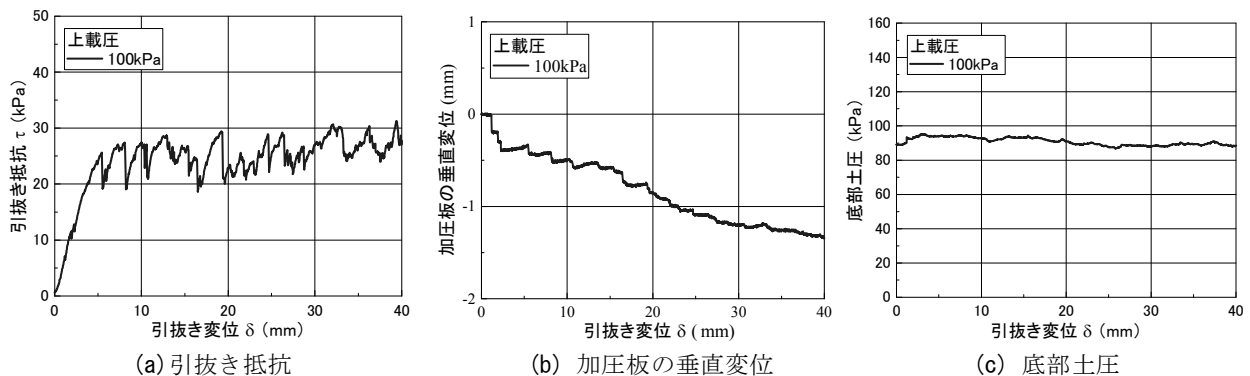


図-2 模型実験から得られた引抜き抵抗，底部土圧，加圧板の垂直変位および引抜き変位の関係

$\tau$ 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。 $\tau$ の増減が大きいのは、補強材リブに対する粒径が大きいことが原因と考えられる。 $\tau$ の増減は、アルミ棒がリブを乗り越える前後で発生すると考えられる。今回の実験のように、リブに対する粒径の比率が大きい場合、その影響が大きいと考えられる。

また、図-2 (b) に加圧板の垂直変位と $\delta$ の関係を示す。加圧板の垂直変位は $\delta$ の増加に伴い、減少する結果が得られ、粒子流出によって圧縮されていることが分かる。

### 2.3.2 底部土圧

図-2 (c) に模型実験から得られた粒子自重等を含む底部土圧と $\delta$ の関係を示す。今回、底部土圧を取得したのは、アルミ棒と積層体の側壁との間に発生する摩擦の影響を確認するためである。その結果、底部土圧は $95\text{kPa}$ 程度ではほぼ一定で推移している。今回、上載圧を $100\text{kPa}$ 作用させており、粒子自重と上載圧を含め、側壁とアルミ棒の摩擦等の影響がない条件で理論的に計算される底部土圧は $108.8\text{kPa}$ である。しかし、模型実験より得た底部土圧は粒子自重等を含めても $95\text{kPa}$ 程度である。その差はアルミ棒と積層体の側壁との摩擦によって減じたものと考えられる。また、補強材の左端が引張ジャッキに拘束されていることも、底部土圧の差の原因になっていると考えられる。

## 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。

### 3.1 解析モデルおよび手順

土槽モデルは Wall 材、補強材モデルは Clump 材 (図-3)、粒子モデルは Ball 材にて生成した。Wall 材は物質から力を受け、他に力を伝えない特性を持っている。Clump 材は、複数の Ball 材で構成される集合体であり、任意の形を再現することが可能で、Wall 材と違い、物質から力を受け、他に力を伝える特性を持っている。材料の密度は、補強材は $7850\text{kg/m}^3$ 、粒子は $2700\text{kg/m}^3$ と設定した。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た。中心部の幅 $100\text{mm}$ の Wall 材を使用し、鉛直圧のデータを取得した。粒子は直径 $1.6\text{mm}$ と $3\text{mm}$ の円形粒子を面積比 $3:2$ となるように生成した。

模型実験では、引抜き口は積層体の生成前より開けているが、数値解析では、解析の都合上、補強材の引抜き開始前に引抜き口を生成している。引抜き口の設置箇所は、模型実験と同様である。引抜き速度は、解析時間の都合上、 $600\text{mm/min}$ と設定した。また、全ての寸法に関

しては、模型実験装置の寸法と同じにしている。本実験での解析手順を以下に示す。

- (1) 解析領域を設定する。
- (2) 解析領域に重力加速度 $9.8\text{m/s}^2$ を与える。
- (3) 粒子生成時の解析モデルパラメータを設定する。
- (4) 壁面、底面を剛体要素として Wall 材で生成する。
- (5) 積層高さが $200\text{mm}$ となるように Ball 材で1層目を生成し、粒子の挙動の沈静化を行う。
- (6) 補強材を剛体要素として Clump 材で生成し、Clump 材と粒子の挙動の沈静化を行う。
- (7) 積層高さが $400\text{mm}$ となるように Ball 材で2層目を生成し、粒子の挙動の沈静化を行う。
- (8) 載荷板を生成する。
- (9) 圧縮と補強材の引抜きに用いる解析モデルパラメータを与える。
- (10) 載荷板を用いて、積層体を所定の上載圧にて一次元圧縮する。
- (11) 引抜き口 (高さ $15\text{mm}$ ) を生成する。
- (12) 所定の引抜き速度で補強材を引抜き、最大引抜き変位が $40\text{mm}$ に達したら終了する。

### 3.2 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: $100\text{mm}$ )、補強材 (Clump 材) の引抜き力 $T$ 、補強材 (Clump 材) の引抜き変位 $\delta$ 、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 $T$ は、補強材モデル表面にかかる、補強材の引抜き方向の接触力の和として算出した。また、Wall 材で補強材を押した時に Wall 材に発生する引抜き方向の反力を引抜き力として取得した解析条件とも比較したが、同様の解析結果が得られた。そのため今回は、模型実験では得られない微小な変化も測定可能と考えられる、前者の測定方法を選択した。

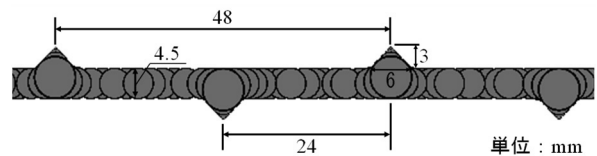


図-3 鋼製帯状補強材モデルの詳細図

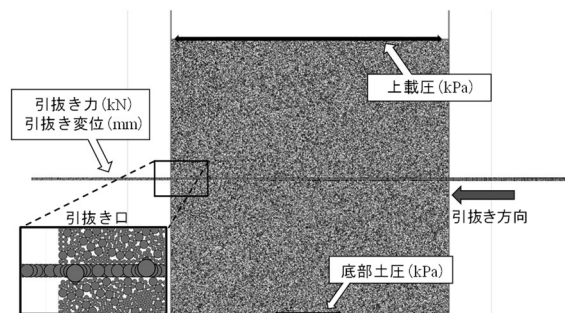


図-4 解析モデルの測定箇所

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 $\mu_0$	0.36	0.26	0
圧縮・引抜き時摩擦係数 $\mu_1$			
法線弾性定数 $k_n$ (N/m)		$2.0 \times 10^7$	
接線弾性定数 $k_s$ (N/m)		$5.0 \times 10^6$	
法線減衰定数 $h_n$		0.2	
接線減衰定数 $h_s$		0.2	

アルミ棒積層体からの補強材の引抜きシミュレーションにおける各測定箇所を図-4に示す。

### 3.3 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は Esaki et al.<sup>8)</sup>を参考に設定した。Esaki et al.<sup>8)</sup>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減衰定数は既往文献<sup>9)</sup>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。また、補強材-粒子間の摩擦係数に関しては、現状、初期的な検討であるため、上載圧 100kPa での  $\tau_{max}$  が模型実験の結果と同程度となるように調整し、決定した。壁面-粒子間の摩擦係数は、この摩擦係数が  $\tau$  の挙動および底部土圧に与える影響を確認するために、ここではゼロに設定した。粒子間摩擦係数に関しては、別途実施した模型実験と数値解析を用いた安息角実験により求めた。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。

#### 3.3.1 模型実験と数値解析を用いた安息角実験

##### (1) 模型実験装置および手順

先行研究として恩田らの模型実験<sup>3)</sup>があり、それを参考に行った。図-5に安息角模型実験装置の全体図を示す。模型実験装置は底辺 450mm、高さ 250mm、奥行 290mm のアクリル製容器を使用した。アルミ棒は直径 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種類のアルミ棒を質量比 3:2 でランダムに積層した。斜面は初期角度  $\alpha = 20^\circ$ 、底辺 200mm となるように作成した(図-6)。引上げには滑車を使用し、角度の計測に関してはデジタル角度計を用いた。斜面引上げは、10秒間に  $0.10^\circ$  ずつ引上げた。以下に模型実験手順を示す。

- (1) アルミ棒の底面滑りを防ぐため、容器の底面および背面に直径 1.6mm のアルミ棒を一層貼り付ける。
- (2) 容器を  $20^\circ$  傾け、表面が平らになるように、直径 1.6mm と 3mm の2種類のアルミ棒(ともに長さ 80mm)を質量比 3:2 でランダムに積層する。
- (3) 斜面が崩壊しないように徐々に水平に戻し、底辺 200mm、初期斜面角度  $\alpha = 20^\circ$  の斜面を生成する。
- (4) 滑車を使用し、容器の左端を 10 秒ごとに  $0.10^\circ$  ずつ上昇させる。
- (5) 上昇させていき、斜面崩壊を確認した時点で終了する。
- (6) 斜面崩壊時の上昇角度  $\beta$  より安息角を決定する。

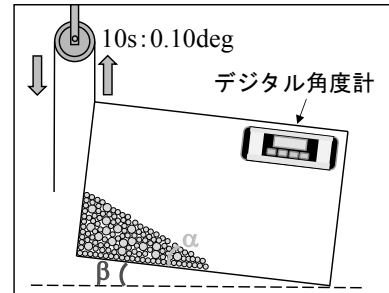


図-5 安息角模型実験装置(全体図)

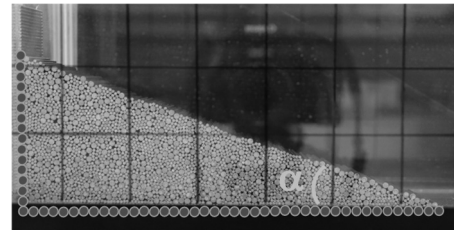


図-6 アルミ棒積層体を用いた斜面の形成

##### (2) 模型実験の結果

本模型実験では初期斜面角度  $\alpha$  と上昇角度  $\beta$  の和を「合成傾斜角」と定義している。斜面の崩れには、不安定な表層粒子が転がり落ちる Stage 1 とある深さをもった崩れが発生する Stage 2 が存在するが、今回は先行研究<sup>3)</sup>を参考に Stage 2 での崩れを斜面崩壊と定義している。安息角は斜面崩壊時の合成傾斜角により決定した。模型実験を 5 回行った結果、合成傾斜角の平均値は  $26.6^\circ$  (最大値:  $28.70^\circ$  , 最小値:  $24.85^\circ$  ) となった。

##### (3) 数値解析実験および手順

先行研究として瀧上らの数値解析実験<sup>4)</sup>があり、本数値解析はそれらを参考にしたモデルを使用している。また、数値解析ソフトは前述した PFC6.0 2D を用いた。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。先行研究<sup>4)</sup>を参考にした数値解析手順を以下に示す。

- (1) 壁面と底面を剛体要素として Wall 材で生成し、容器を作成する。
- (2) 底辺 200mm で初期斜面角度  $\alpha = 20^\circ$  の斜面寸法となるように Ball 材で粒子を生成し、粒子の挙動の沈静化を行う。

表-2 安息角実験の解析モデルに用いた粒子間摩擦係数

粒子間摩擦角(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

- (3) 安息角の数値解析に用いる解析モデルパラメータを与える。
- (4) Wall材の上でBall材が滑ることを防ぐため、Wall-Ball間の転がり摩擦係数に大きな値を与える。
- (5) 壁面と底面の交点を中心とした時計回りの回転移動を容器に与える。
- (6) 斜面崩壊しないように0.50 deg/sで回転移動を行い、底面が水平になった時点で終了する。
- (7) 斜面に地表面基準粒子（赤色）と地中基準粒子（水色・緑色）を設置する（図-7）。
- (8) 斜面角度が増加する方向の回転移動を容器に与える。回転速度は先行研究<sup>4)</sup>を参考に、0.50 deg/sで行い、上昇角度 $\beta=12^\circ$ に達したら終了した。

(4) 数値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（表-2）。これには解析モデルの粒子間摩擦係数が安息角に与える影響を明らかにする目的と、模型実験装置と解析モデルのそれぞれの結果を一致させる目的がある。粒子間摩擦係数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、粒子間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。また、粒子間摩擦係数0.087を与えたケースでは、斜面生成前に斜面が崩壊したため、初期斜面角度 $\alpha=15^\circ$ に変更し、再検証を行った。今回、Wall-Ball間の転がり摩擦係数に大きな値を与えたことで、斜面崩壊時の斜面底部および背面の粒子は、変位固定されていた。

(5) 数値解析結果の整理方法

まず、斜面生成時に、斜面の水平方向1.7cmごと（青色）に地表面基準粒子（赤色）と地中基準粒子（水色・緑色）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（水色）と1.7cm下（緑色）の2箇所に設置した。今回、模型実験と数値解析で用いた斜面は、先行研究<sup>4)</sup>で用いられた斜面と比較して、底辺の長さが3分の1である。そのため、基準粒子の設置箇所も、斜面寸法に合わせて、先行研究<sup>4)</sup>の3分の1スケールに設定した。斜面を引き上げていくにつれ、それぞれの地表面基準粒子は滑り、地中基準粒子との間に相対角度 $\gamma$ が発生する。 $\gamma$ の平均値が急上昇した時点で合成傾斜角を安息角と定義した（図-8）。

(6) 数値解析結果

粒子間摩擦係数と安息角の結果を図-9に示す。数値解析結果より、粒子間摩擦係数と安息角の計算値の間には

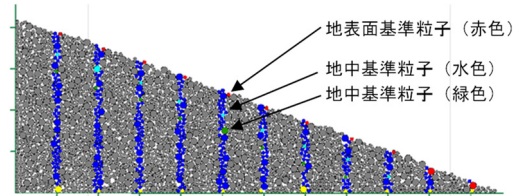


図-7 数値解析での斜面の形成

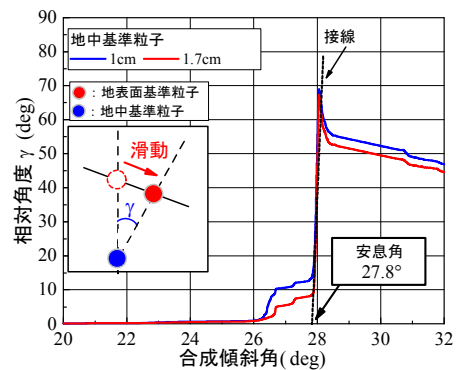


図-8 数値解析での安息角の決定方法

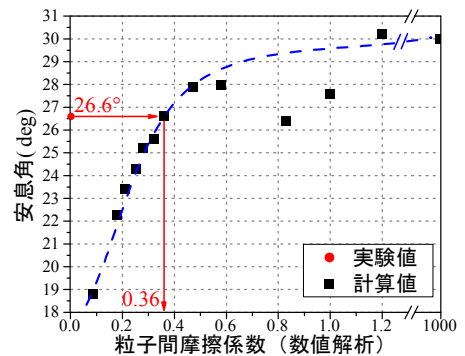


図-9 数値解析での粒子間摩擦係数と安息角の関係

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。また、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。さらに、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。これより、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

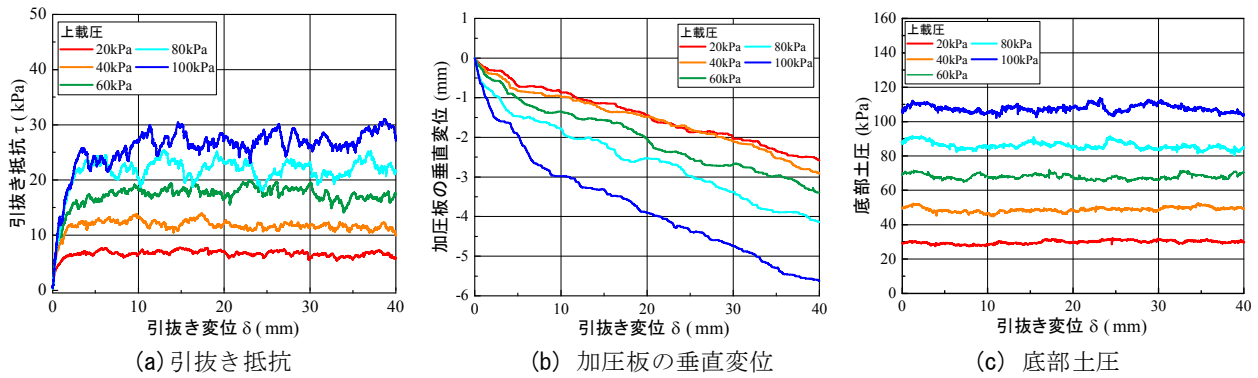


図-10 数値解析から得られた引抜き抵抗，底部土圧，加圧板の垂直変位および引抜き変位の関係

とがわかった。本模型実験では、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。よって、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粒子間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 が適切であると判断した。また、別途実施した模型引抜き実験<sup>10)</sup>より、アルミ棒積層体の引抜き摩擦強さと上載圧の関係での引抜き摩擦角は 19.4°であったため、模型装置と数値解析を用いた安息角実験で得られる粒子間摩擦係数は妥当であると考えられる。

### 3.4 数値解析を用いた引抜き実験の結果

数値解析では、応力集中低減カバーはなしの条件で、上載圧を 20, 40, 60, 80, 100kPa と変化させ、解析を実施した。また、粒子数は 46,097 本であり、粒子の流出は 20kPa の場合 260 本、40kPa の場合 311 本、60kPa の場合 336 本、80kPa の場合 457 本、100kPa の場合 624 本であった。

#### 3.4.1 引抜き抵抗

数値解析から得られた $\tau$ と $\delta$ の関係を図-10(a)に示す。 $\tau$ は式(1)より求めた。 $\tau$ は最初、単調増加し、その後は増減する挙動となり、上載圧が大きいほど $\tau$ が大きい結果が得られた。また、図-10(b)に加圧板の垂直変位と $\delta$ の関係を示す。粒子流出量および加圧板の垂直変位は、上載圧の上昇に伴い、増加した。

上載圧 100kPa での模型実験と数値解析の結果を比較すると、最大引抜き抵抗 $\tau_{max}$ は、模型実験では 31.3kPa、数値解析では 31.1kPa である。また、 $\tau$ の挙動は、概ね近似されている。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、加圧板の鉛直変位も数値解析の方が大きい傾向がみられた。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、粒子間摩擦係数や壁面-粒子間摩擦係数などの解析パラメータの影響があったと考えられる。

$\tau$ の再現性に関して、模型実験では補強材の左端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

しており、補強材の拘束条件が違う。そのため、数値解析では模型実験に比べて、圧縮による補強材のたわみが大きく、 $\tau$ が模型実験よりも高く発生している可能性がある。加えて、現状の補強材-粒子間の摩擦係数は調整した値に過ぎないため、補強材-粒子間の摩擦係数の決定方法の確立が必要である。

また、各上載圧での結果を、別途実施した応力集中低減カバーありでの模型実験<sup>10)</sup>と比較すると、数値解析では、上載圧の増加による $\tau$ の増加を表現できていることがわかる。

#### 3.4.2 底部土圧

数値解析から得られた粒子自重等を含む底部土圧と $\delta$ の関係を図-10(c)に示す。

上載圧 100kPa での模型実験と数値解析の結果を比較すると、底部土圧の挙動に関しては、模型実験に似た挙動が得られた一方で、最大底部土圧は模型実験では 95.2kPa、数値解析では 113.6kPa となり、数値解析の方が 15kPa 程度高い結果となった。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、前述した補強材の拘束条件の違いにより、圧縮による補強材のたわみが大きく生じ、底部土圧が大きく発生したと考えられる。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。

また、各上載圧での結果を、別途実施した応力集中低減カバーありでの模型実験<sup>10)</sup>と比較すると、数値解析では、上載圧の増加による底部土圧の増加を表現できているものの、前述の原因により、その値には差がある。

## 4. 解析条件が解析結果に与える影響

数値解析を用いた引抜き実験の再現性を向上させるために、解析条件が解析結果に与える影響を調べた。本章では、3章の引抜き実験で用いた解析モデルにおいて、条件を変更した。ただし、上載圧は 100kPa で実施した。

#### 4.1 補強材リブの有無

解析モデルにおいて、補強材リブの有無別の結果の比較検討を行った。 $\tau_{\max}$  は、リブありの条件では 31.1kPa、リブなしの条件では 26.7kPa となった。しかし、 $\tau$  の挙動はリブの有無により変化しなかった。これより、解析モデルにおいて補強材のリブが $\tau$  の増減に著しく影響していることが確かめられた。 $\tau$  の増加の原因として、リブの存在により、補強材と粒子との接触面積が増えた影響、補強材付近の粒子から引抜きに抵抗する方向に力を受けやすくなった影響等が考えられる。今後は、補強材のリブの数や位置による影響を検討する必要がある。

#### 4.2 引抜き口の有無

解析モデルにおいて、引抜き口の有無別の結果の比較検討を行った。今回、引抜き口無しの場合では、解析モデルの壁面と補強材間の接触力をゼロに設定することで、壁面と補強材が重なった状態での引抜きを可能とした。 $\tau_{\max}$  は、引抜き口ありの条件では 31.1kPa、引抜き口なしの条件では 35.4kPa となった。引抜き口なしの条件では、 $\delta=3\text{mm}$  で $\tau$  が一定状態に達しており、引抜き口ありの条件に比べて、強度の発現が早いことがわかった。これより、解析モデルにおいて、引抜き口は $\tau$  の発現に影響していることが分かる。 $\tau$  の上昇の原因として、引抜き口が無いことにより、引抜き方向に粒子が寄せ集められた影響、補強材と壁面間に粒子が挟み込まれた影響が考えられる。そのため、解析モデルにおいて引抜き口は必要であるものの、粒子流出量を調整する必要がある。

#### 4.3 引抜き速度

解析において引抜き速度を 600, 60, 10mm/min とした条件の結果を比較した。タイムステップは全ての条件で、 $5.5 \times 10^{-6}\text{s}$  とした。その結果、 $\tau_{\max}$  は、600mm/min の場合 31.1kPa、60mm/min の場合 30.0kPa、10mm/min の場合 30.3kPa となった。これより、数値解析での引抜き速度は $\tau$  の増減に多少なり影響することが分かる。一方で、数値解析での粒子流出は、600mm/min の場合 624 本、60mm/min の場合 838 本、10mm/min の場合 977 本となっており、引抜き速度の低下に伴って、粒子流出が多くなることが分かる。

また、模型実験においても引抜き速度を 10mm/min に変更して実施した。今回、 $\delta=25\text{mm}$  で粒子詰まりによる過大な $\tau$  が発生したため、 $\delta=0\sim 20\text{mm}$  での $\tau_{\max}$  を比較した。模型実験の結果より、10mm/min の場合では $\tau_{\max}=31.7\text{kPa}$ 、1mm/min の場合では $\tau_{\max}=29.4\text{kPa}$  であり、模型実験においても引抜き速度の影響が確認された。一方で、10mm/min での粒子流出は 327 本であり、模型実験では引抜き速度の低下に伴って、粒子流出が少なくなる傾向が見られた。

今後は、数値解析で粒子流出量を調整し、引抜き速度を改めて検証する必要がある。そして、引抜き挙動の評価に影響が出ない引抜き速度を調べることが必要である。

#### 4.4 初期粒子配置作成時の粒子間摩擦係数

初期粒子配置作成時の粒子間摩擦係数 $\mu_0$  を 0 と 1.00 にした条件での解析結果を比較した。圧縮時と引抜き時の粒子間摩擦係数 $\mu_1$  は、両ケースとも 0.36 に変更している。ここで $\mu_0$  だけを変更するのは、数値解析を用いた引抜き実験での粒子数を模型実験のそれと同程度にするためである。今回は、初期粒子配置作成時の粒子数を変化させた影響を調べた。

積層体の粒子数は、 $\mu_0=0$  の時 47,408 本、 $\mu_0=1.00$  の時 45,982 本である。 $\tau_{\max}$  は $\mu_0=0$  の場合 34.3kPa、 $\mu_0=1.00$  の場合 30.3 kPa となった。これより、 $\mu_0$  は、 $\tau_{\max}$  と積層体密度に影響していることが分かる。 $\mu_0$  が $\mu_1$  より小さい場合、パラメータ変更時に粒子同士の反発が大きくなり、粒子間に過大な接触力が働くと考えられる。今回の解析では、 $\delta=0.2\text{mm}$  の時に $\tau_{\max}$  となり、その後、 $\tau$  が 25kPa 程度で一定となる挙動になった。

一方、 $\mu_0$  が $\mu_1$  より大きい場合、 $\tau_{\max}$  が過大に発生せず $\tau$  の挙動も同程度であるが、粒子の配列が一度崩れる結果となる。これは、小さい $\mu_1$  に変更することにより、初期状態の粒子配列を保つことができず、粒子同士が滑ることによって発生する。そのため、初期状態と大きく密度が変わり、模型実験と同条件とみなせない。

以上より、 $\mu_0$  の変更によって積層体密度を調整可能であるが、引抜きに関する解析については、解析過程の全体を通して粒子間摩擦係数は一定とすることが適切であると考えられる。

#### 4.5 壁面ー粒子間の摩擦係数

壁面ー粒子間の摩擦係数 $\mu$  を $\mu=0$  と $\mu=1.00$  とした解析結果を比較した。粒子自重等を含む底部土圧の最大値は、 $\mu=0$  の場合 113.6kPa、 $\mu=1.00$  の場合 92.8kPa となった。また、 $\tau_{\max}$  は $\mu=0$  の場合 31.1kPa、 $\mu=1.00$  の場合 26.4kPa となった。これより、壁面ー粒子間の摩擦係数は底部土圧と $\tau$  に影響していることが分かる。底部土圧の差は壁面と粒子との摩擦の発生によって減じたものと考えられる。また、 $\mu=1.00$  の時、底部土圧は一定ではなく徐々に下がっていき、引抜き終了時には 68.5kPa となった。 $\tau$  も $\tau_{\max}$  に達した後、徐々に低下する挙動となった。今回、 $\mu=1.00$  の時、粒子流出が 384 本であり、 $\mu=0$  と比べて減った一方で、 $\tau$  および底部土圧の再現性が下がった。そのため、底部土圧と粒子流出の調整のために、過大な壁面ー粒子間の摩擦係数を与えるべきではないことが分かった。

#### 4.6 Clump 材の表面形状

前述したように Clump 材は複数の Ball 材で構成される集合体であるため、Clump 材の表面形状が Clump 内部の粒子密度によって変化し、 $\tau$  に影響を及ぼすことが考えられる。そのため、Clump 内の粒子密度を調整するために、滑らかさの角度の尺度 fdistance ( $0 \leq \text{fdistance} \leq 180$ ) を 130, 150, 170, 180 と変換して、 $\tau_{\max}$  との関係を検討した。fdistance とは重なり合う粒子間の距離を表しており、

180 に近づくほど粒子間の重なりが大きく、表面形状が滑らかになる。今回、 $fdistance=120$  以下では、 $clump$  内の粒子同士が接していない状態で形成されていたため、 $\tau$  を測定しなかった。また、現状の数値解析では解析効率を考慮し、 $fdistance=150$  としている。その結果、 $\tau_{max}$  は  $fdistance=130$  の場合 31.8kPa、 $fdistance=150$  の場合 31.1kPa、 $fdistance=170$  の場合 30.5kPa、 $fdistance=180$  の場合 30.3kPa となった。これより、 $clump$  材の表面形状が  $\tau$  に影響していることが分かる。今後は、表面形状を調整した際に補強材-粒子間の摩擦係数が  $\tau$  に与える影響を検討する必要がある。

### 5. 補強材と粒子の間の接触点数の追跡

3 章の解析条件を用いて、各上載圧でのアルミ棒積層体内の補強材と粒子の接触点数を取得した (図-11)。解析結果より、各上載圧での接触点数と  $\delta$  の関係に着目すると、 $\delta=5\text{mm}$  以降では接触点数がほぼ一定となる挙動となっている。各上載圧での  $\tau$  と  $\delta$  の関係においても、 $\delta=5\text{mm}$  以降では  $\tau$  がほぼ一定となるため、補強材と粒子の接触点数が  $\tau$  に影響を与えていることが読み取れる。これは、接触点数の増加によって、上載荷重が補強材に伝わりやすくなったためだと考えられる。ただし、 $\tau$  には接触点数だけでなく接触点に作用する力の大きさも影響することに注意が必要である。

また、上載圧と接触点数との関係に着目すると、上載圧が大きいほど、 $\delta$  の増加に伴う補強材と粒子の接触点数の増加量が大きいことが分かる。また、解析モデルにおいて、上載圧が大きいほど  $\tau$  は大きい。これより、上載圧の増加によって、補強材と粒子の接触点数が増え、補強材に荷重が伝わりやすくなっていると考えられる。

今後、接触点数が  $\tau$  に与える影響を明確にするためには、同じ上載圧下で接触点数を変化させた時の結果比較をする必要がある。また、補強材の引抜き中の積層体密度を模型実験と数値解析で同じにして検討する必要がある。

### 6. 粒子間接触力と引抜き挙動の関係

3 章の解析条件を用いて、上載圧 100kPa における各引抜き変位での粒子間接触力を取得した (図-12)。図には粒子を表示せず、粒子間の接触力だけを表示している。図-12 より、引抜き開始と同時に積層体全体の粒子間接触力が増加しており、特に補強材近傍で増加していることが見て取れる。粒子間接触力は補強材に近い粒子だけでなく、離れた場所でも増加していることから、補強材近傍以外の粒子間接触力も引抜き抵抗挙動に影響していると考えられる。また、粒子間接触力は、補強材リブの引抜き方向の後方粒子よりも引抜き方向の前方粒子の方が大きく、力線は引抜き方向に対して放射状に広がって

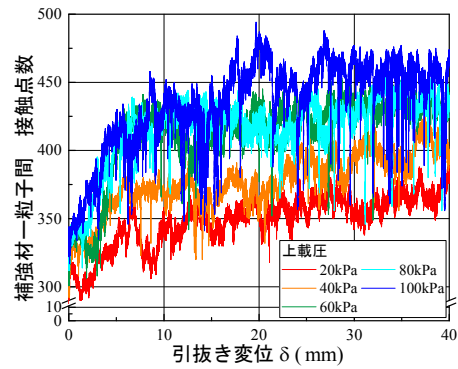


図-11 補強材-粒子間接触点数と引抜き変位の関係

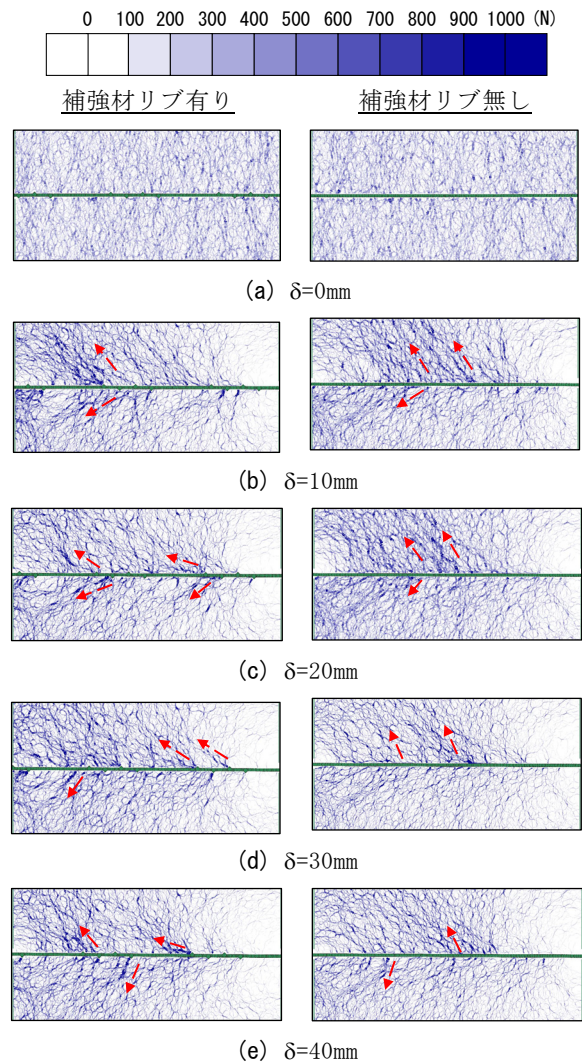


図-12 各引抜き変位での粒子間接触力(N)の変化

いる (図中の矢印)。補強材リブの有無による粒子間接触力を比較すると、リブ有りの方が引抜き方向に対して、より抵抗するように接触力を伝えていることが分かる。加えて、4.1 において、補強材リブの有無により  $\tau$  が変化したことより、粒子間接触力が  $\tau$  の挙動に影響していると考えられる。



## 7. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) アルミ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点数、粒子間接触力が引抜き抵抗の挙動に影響していると考えられる。

なお、密度および土圧の差異は、解析パラメータ等の解析上の問題点により再現性が低くなっていると考えられる。今後は、適切な解析条件を検討すべきである。また、引抜き抵抗等の再現精度は、引抜き速度が模型実験の 600 倍であるため、引抜き速度と引抜き力の関係を改めて検証する必要がある。

今後、数値解析手法の確立によって、補強材の引抜きによる粒子への影響を定量的に評価することが可能となり、補強土の性能評価に繋がると考えられる。一方で、実際の補強土壁は 3 次元であるため、現状の 2 次元数値解析では奥行方向への粒子移動を評価することができない。今後は 2 次元解析と 3 次元解析の比較検討が必要である。

## 謝辞

本研究は山口大学と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) 梅崎健夫, 河村隆, 三村大輔: 二軸圧縮試験装置を用いた補強材の土中引抜き挙動の定量評価, ジオンシステマックス論文集, 第 18 巻, pp.139-146, 2003.

- 2) 松岡元, 劉斯宏, 長谷部智久, 島尾陸: 土のう積層体の変形・強度特性と設計法, 土木学会論文集 No.764 /III-67, pp.169-181, 2004.
- 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) 淵上幸宜, 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) 菊本統, 中井照夫, 張鋒, ホサインシャヒン: アルミ棒積層体を用いた 2 次元模型実験, 地盤工学会誌 56-10 (609), pp.12-15, 2008.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 呉屋港, 鈴木素之, 郷司航平, 石丸太一, 川野拓未: アルミ棒積層体に対する帯鋼補強材の引抜き特性, 第 58 回地盤工学研究発表会, 13-3-4-05, 2023.

(2023 年 6 月 19 日 受付)