

アルミ棒積層体に部分敷設した鋼製帯状補強材の 引抜き実験の数値シミュレーションと粒子挙動の可視化

Numerical Simulation of Pull-out Experiments of Steel Strip Reinforcement Embedded in
Aluminum Rod Stacks and Visualization of Particle Behavior during Pull-out Test

前田 祐美¹⁾, 鈴木 素之²⁾, 郷司 航平³⁾, 軸屋 雄太⁴⁾

1) Yumi MAEDA, 博士前期課程, 山口大学大学院創成科学研究科, e032vev@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) Kohei GOJI, 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

4) Yuta JIKUYA, 助教, 山口大学大学院創成科学研究科, yuta-j@yamaguchi-u.ac.jp

アルミ棒積層体に部分敷設した鋼製帯状補強材の引抜き実験を行うとともに、その挙動を再現する数値モデルの作成を試みた。数値解析において、引抜き速度、引抜き口の有無、壁面-粒子間摩擦係数の影響を検討することで、引抜き実験と同様の粒子数や間隙比などの状況を良好に再現できた。さらに、引抜き抵抗、底部土圧および載荷板の垂直変位と引抜き変位の変動について、引抜き実験結果の傾向をおおよそ再現できた。また、作成した数値モデルによる解析結果に基づいて粒子挙動を可視化した結果、粒子の水平変位量と回転量の鉛直分布を明らかにできた。

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

頻発化・激甚化が進む異常気象や大地震に加え、構造物の老朽化など社会インフラの防災・減災や維持管理における課題は多い。とりわけ、災害発生時の避難や物流経路の確保に関わる橋梁やトンネルなどの重要構造物については、重要物流道路制度の創設も相まって、変形に対する性能の明示が求められており、有限要素法 (FEM) や有限差分法を用いた変形性能を評価するための数値解析手法が一般化されつつある^{1), 2)}。一方、補強土壁工法を適用した土木構造物の建設もまた盛んであり、それら土構造物において変形性能の定量的な評価が要求されている。帯鋼補強土壁工法に限ると、それに対する数値解析の検討に関しては、FEM などを用いた従来手法の適用が試みられている。Damians et al.³⁾は、アメリカで建設された帯鋼補強土壁について FEM を用いて再現し、数値結果は壁のつま先で仮定された境界条件に敏感であること等が示されている。

また、実験的検討に関しては、梅崎ら⁴⁾がアルミ棒積層体を用いた二軸圧縮・引抜き試験装置を開発し、積層体内に敷設された補強材の引抜き実験を実施し、その挙動を可視化している。さらに、帯鋼補強材を用いた土中引抜き試験⁵⁾や様々な盛土材に対する補強材の引抜き試験^{6), 7)}が実施され、それらの引抜き特性が明らかにされ

ている。また、Kido et al.⁸⁾は、三軸引抜き試験装置において等方圧下で補強材の引抜きを行い、補強材周辺の土の動きを、X線マイクロCTを用いて観察している。その結果、リブ傾斜角が大きいほど、引抜きの初期段階で高い引抜き抵抗が得られ、これはリブ上部の土の緻密化によることなどを明らかにしている。また、著者らの先行研究⁹⁾では、アルミ棒積層体を用いた模型実験とDEMによる数値解析の結果から、解析モデルによる接触点数や粒子間接触力が引抜き抵抗の挙動に影響していることを明らかにした。

本研究では、補強土壁の性能を粒子レベルで定量的に評価できる手法の確立に向けて、アルミ棒積層体に部分敷設した帯鋼補強材の二次元引抜き模型実験および個別要素法 (DEM) を用いた数値解析を実施した。引抜き実験では、土粒子に比べてモデル化が容易であり、基礎的な検討を行う目的からアルミ棒を使用し、二次元下の一軸引抜き試験装置を使用して補強材の引抜きを行った。また、数値解析では、引抜き速度、引抜き口の有無、壁面-粒子間摩擦係数の影響を検討することにより、引抜き模型実験の再現を試みた。さらに、数値解析の結果を用いて粒子変位や粒子回転量を可視化することで、補強効果の及ぶ領域について考察した。

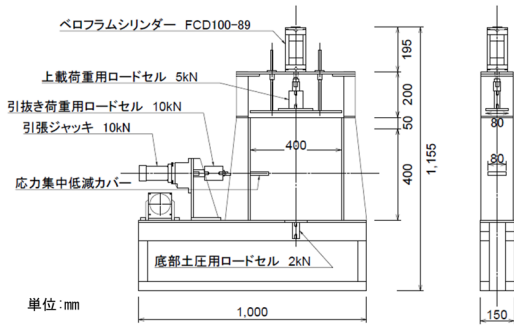


図-1 アルミ棒積層体の引抜き実験装置

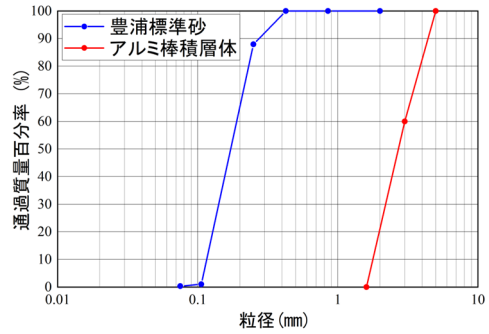


図-2 豊浦標準砂とアルミ棒積層体の粒径加積曲線

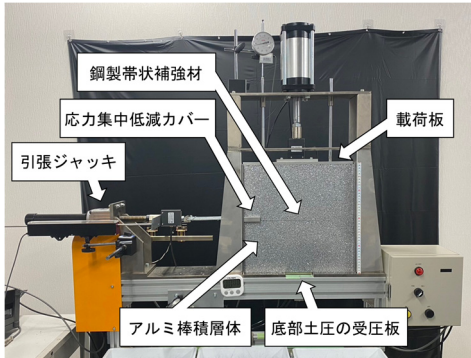


写真-1 アルミ棒積層体の引抜き実験装置の外観



写真-2 応力集中低減カバー (単位: mm)

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

図-1、写真-1に本研究で用いたアルミ棒積層体に対する帯鋼補強材の引抜き実験装置を示す。この装置は、応力集中低減カバーの有無、補強材の敷設位置に加え、上載圧や引抜き速度等の条件を任意に変更でき、引抜き速度は1~10 mm/minの範囲内で設定できる。

アルミ棒積層体は、直径1.6 mmと3.0 mmの2種類の円形アルミ棒(ともに、長さ80 mm、密度2.700 Mg/m³)を質量比3:2で十分に混合し、積層することで作製した。ここで、上述の直径および混合比を用いた積層体は、図-2に示すように粒径加積曲線が豊浦砂のものと平行に近いことがわかっている¹⁰⁾。そのため、今回作製した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予想される。

実験装置の土槽は幅400 mm、高さ450 mmであり、アルミ棒積層体は幅400 mm、高さ400 mmとなるように積み上げた。土槽の引抜き側前方と後方にある側壁には引抜き口があり、土槽底面より200 mm上に設けている。引抜き口の形状は長方形で、高さ15 mm、幅85 mmである。補強材の全面敷設の場合、後方引抜き口からの粒子の流出が不可避であるため、今回は粒子変位をより精密に測定ができるよう、補強材が土槽を貫通しない条件である部分敷設で実験を行った。そのため、図-1の土槽右側の側壁後方の引抜き口は閉じ、左の側壁にある前方引抜き口は実験開始時から開けた状態で実験を行った。

本実験で用いた帯鋼補強材は実構造物で使用するものと同じであり、厚さは4.5 mm、長さは500 mm、幅は80

mm、リブの幅は6 mm、高さは3 mmである。また、密度は7.850 Mg/m³である。実構造物で使用する補強材を用いることで、現場引抜き試験に近い実験が可能になり、補強土壁内部の挙動の解明に繋がると考えられる。補強材寸法に対する盛土材の粒径の比率を比較すると、今回の実験では補強材寸法に対してアルミ棒の直径が大きい。豊浦砂の場合、その平均粒径 $D_{50} = 0.17$ mmに対し、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、 $D_{50} = 2.16$ mmに対し、リブの高さは1.4倍、幅は2.8倍となり、粒径の違いによる影響が考えられる。ただし、その影響の度合いはリブの大きさに対する粒径の比として考慮できる。補強材の敷設位置は土槽の左端から333 mmの位置であり、補強材の引抜きに伴い土槽中の補強材の断面積が変化することに留意する必要がある。

本実験では、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を設置した(写真-2)。応力集中低減カバーの幅は95 mm、高さは19 mm、長さは58 mmである。コの字型の板を2つ組み合わせることで箱状にしている。応力集中低減カバー内のアルミ棒には上からの応力が伝わらなくなることで、応力集中を低減している。また、本実験での初期の補強材敷設長 L は、土槽左端から補強材右端の長さから応力集中低減カバーの長さを引いた275 mmである。

2.2 実験手順および測定項目

実験手順を以下に示す。

- (1) 直径1.6 mmと3.0 mmのアルミ棒を質量比3:2で混合する。
- (2) 混合したアルミ棒を高さおおよそ200 mmに積み上げ、1層目を構築する。
- (3) 1層目の上に応力集中低減カバーと補強材を敷設し、

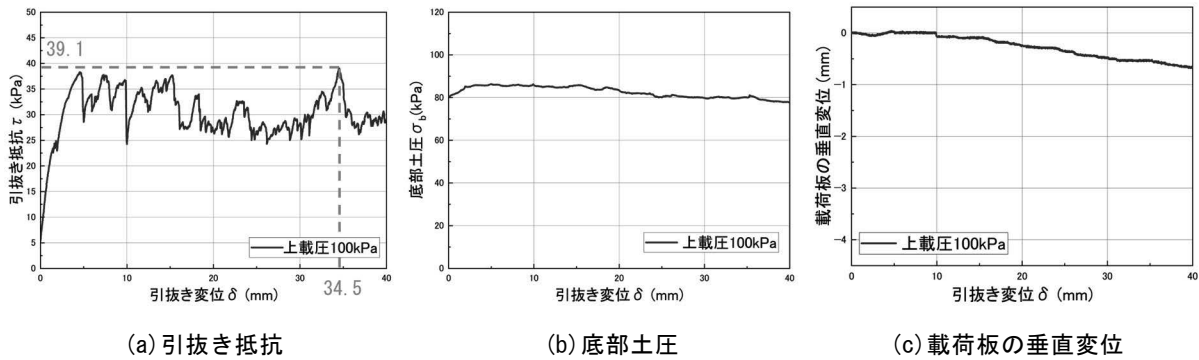


図-3 模型実験から得られた引抜き抵抗, 底部土圧および載荷板の垂直変位と引抜き変位の関係

- 補強材の端部を引張ジャッキの治具に取り付け、剛結する。
- (4) 補強材の上に混合したアルミ棒を高さ 400 mm まで積み上げ、上部を平坦に成形する。
 - (5) 載荷板を用いてアルミ棒を上載圧 100 kPa で 20 分間一次元圧縮する。
 - (6) 引抜き速度 1 mm/min で補強材を引き抜く。
 - (7) 最大引抜き変位が 40 mm に達した時点で引抜きを終了する。

本実験では、底部土圧の受圧面（幅 100 mm，奥行き 80 mm）に作用する垂直荷重，補強材の引抜き荷重 T ，補強材の引抜き変位 δ ，載荷板の垂直荷重，載荷板の垂直変位を測定した。

2.3 実験結果と考察

積層体の粒子数は 46,119 本，積層体の密度は 2.204 Mg/m³，単位体積重量は 21.6 kN/m³，間隙比は 0.22 であった。また，引抜き口からの粒子流出は 32 本程度であった。以下に，引き抜き抵抗 τ ，底部土圧 σ_b ，載荷板の垂直変位の計測結果を考察する。

2.3.1 引抜き抵抗

実験から得られた補強材の引抜き荷重を T (kN) として，引抜き抵抗 τ (kPa) を次式により算定した。

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

$$A = \frac{(L - \delta) \times 80}{1000} \quad (2)$$

ここに， A ：補強材の敷設面積 (m²)， L ：初期の補強材敷設長(mm)， δ ：補強材の引抜き変位(mm)，80 mm は補強材幅である。なお，式(2)に示す A は補強材の引抜きに伴う補強材面積の減少を考慮したものである。

図-3(a)に模型実験から得られた τ と δ の関係を示す。 τ は $\delta = 5$ mm まで単調増加し，その後は $\tau = 25 \sim 40$ kPa の間で増減を繰り返す挙動を呈した。 $\delta = 34.5$ mm のとき最大引抜き抵抗 $\tau_{\max} = 39.1$ kPa となった。 τ の増減が大きくなった原因として，補強材リブの寸法に対して粒径が大きいたことが考えられる。また， τ 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，補強材リブに対する粒径の比率が大きいた場合には， τ にも大きく影

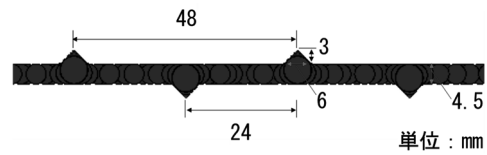


図-4 帯鋼補強材モデルの詳細図

響を及ぼすものと考えられる。

2.3.2 底部土圧

図-3(b)に模型実験から得られた σ_b と δ の関係を示す。ただし， σ_b は粒子自重や補強材自重を除いたものである。今回，上載圧を積層体上面に 100 kPa 作用させているため，土槽の側壁とアルミ棒の摩擦などの影響がない仮定で理論的に計算される σ_b は，100 kPa にアルミ棒の自重を加えた値となる。しかし，模型実験より得られた σ_b は 80 kPa 程度であり，その差はアルミ棒と土槽の側壁との摩擦によって減じたものと考えられる。また， σ_b が補強材の引抜きに伴い低減しているが，これは補強材の引抜きに伴い土槽内の粒子間隙量の分布が変化する，すなわち疎密の差が生まれることで，力の伝達経路が変わり，底部中央にある受圧板に作用する荷重が減少したためと考えられる。

2.3.3 載荷板の垂直変位

図-3(c)に模型実験から得られた載荷板の垂直変位と δ の関係を示す。補強材の引抜きに伴い垂直変位はわずかに下がっている。この原因として，補強材の引抜きにより補強材敷設長が短くなることや，粒子が前方引抜き口から流出したことが考えられる。

3. DEM によるアルミ棒積層体に対する引抜きシミュレーション

本解析では，DEM 数値解析ソフトウェア PFC6.0 2D (ITASCA 社) を使用した。

3.1 解析モデル

土槽モデルは Wall 材，補強材モデルは Clump 材 (図-4)，粒子モデルは Ball 材で生成した。Ball 材，Wall 材，Clump 材ともに平行移動と回転ができる要素である。

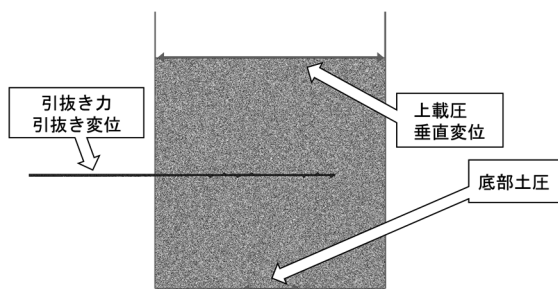


図-5 解析モデルの測定箇所

Wall材は質量が与えられておらず運動方程式に従わないが、Ball材とClump材は運動方程式に従って運動するモデルである。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ある。

土槽モデルの底部は実験に合わせ、中心部の幅100mmのWall材を使用して、底部土圧のデータを取得した。引抜き口は幅15mmであり、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た。補強材に関しては、模型実験と同様に、密度を7.850 Mg/m³と設定している。また、粒子は直径1.6mmと3.0mmの円形粒子を面積比3:2になるように生成し、自由落下させることで粒子の初期配置を決定した。模型実験では応力集中低減カバーを設置したが、解析モデルを簡素化するため、数値解析では応力集中低減カバーなしの条件で行った。そのため、L=333mmである。

測定項目は、底部土圧の受圧面(Wall材)に作用する圧力 σ_b (受圧面の幅100mm)、補強材(Clump材)の T 、補強材(Clump材)の δ 、載荷板(Wall材)が与える上載圧、載荷板(Wall材)の垂直変位であり、各測定箇所を図-5に示す。補強材を引抜く 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。

3.2 解析方法

本実験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 m/s²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200mmとなるようにBall材で粒子の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材と粒子の沈静化を行う。
- (7) 積層高さが400mmとなるようにBall材で粒子の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パラメータを与える。
- (10) 載荷板を用いて積層体を100kPaにて一次元圧縮する。
- (11) 引抜き速度600mm/minで補強材を引抜き、最大引

表-1 数値解析に用いたパラメータ

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	0.90
圧縮・引抜き時摩擦係数 μ_1			
法線ばね定数 k_N (N/m)	2.0×10^7		
接線ばね定数 k_S (N/m)	5.0×10^6		
法線減衰定数 h_N	0.2		
接線減衰定数 h_S	0.2		

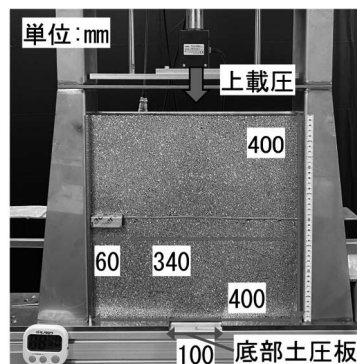


写真-3 引抜き速度を検討したときの引抜き実験の状況

抜き変位が40mmに達した時点で引抜きを終了する。

3.3 解析パラメータの影響の検討

本解析に用いたパラメータを表-1に示す。要素間の法線および接線方向のばね定数は、Esaki et al.¹¹⁾を参考に設定した。Esaki et al.¹¹⁾はアルミ棒積層体をDEMで数値モデル化しており、計算の安定性を考慮して行った試算により決定している。要素間の法線および接線方向の減衰定数は、既往研究における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¹²⁾に基づき設定した。補強材-粒子間摩擦係数は、既往文献⁹⁾より、上載圧100kPaでの τ_{max} が模型実験の結果と同程度となるように調整した値を用いた。粒子間摩擦係数は、既往研究における安息角実験から決定した値⁹⁾を使用した。以下に引抜き速度、引抜き口の有無、壁面-粒子間摩擦係数について検討した。

3.3.1 引抜き速度の検討

模型実験、数値解析ともに、引抜き速度を変化させた条件で補強材の引抜きを行うことで、引抜き速度の影響を検討した。模型実験では、引抜き実験装置の土槽、アルミ棒については、2章と同様のものを使用している。応力集中低減カバーは幅95mm、高さ19mm、長さ60mmである。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(全面敷設)にて行った(写真-3)。模型実験の手順は、2.2節の実験手順の(1)~(4)と同様であり、それ以降の手順について以下に示す。

- (5) 載荷板を用いて、アルミ棒積層体を上載圧3kPaで一次元圧縮する。
 - (6) 20分圧縮後、引抜き速度1, 5, 10mm/minの3パターンで補強材を引抜き、最大引抜き変位が10mmに達した時点で補強材の引抜きを終了する。
- 低い上載圧下で検討した理由は、粒子間の拘束力が弱い

条件の方が、引抜き速度の影響が現れやすいと考えたためである。ただし、上載圧が高くなると、引抜き速度の影響の現れ方が異なる可能性がある。

数値解析の手順は、3.2 節の解析手順の(1)~(9)と同様であり、それ以降の手順について以下に示す。

- (10) 載荷板を用いて積層体を 3 kPa にて一次元圧縮する。
- (11) 引抜き口を生成する。
- (12) 所定の引抜き速度 (5, 10, 100, 600, 1000 mm/min の 5 パターン) で補強材を引抜き、最大引抜き変位が 10mm に達した時点で引抜きを終了する。

模型実験の L は 340 mm であり、数値解析は応力集中低減カバーを再現していないので L = 400 mm である。

図-6 に引抜き速度を変化させたときの τ_{max} の変化を示す。実験値では、引抜き速度が高いほど τ_{max} がわずかに大きくなる傾向がある。しかし、模型実験結果において引抜き速度を変化させたときの τ_{max} の変化はたかだか 1

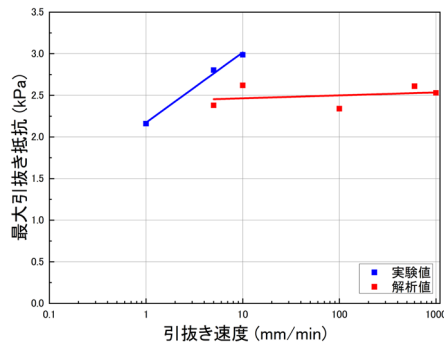


図-6 最大引抜き抵抗と引抜き速度の関係

kPa 程度であり、引抜き速度が 1 ~ 10 mm/min の範囲内では引抜き速度は τ に大きな影響は与えないことがわかる。解析値では、引抜き速度の大きさに依らず、 τ_{max} は 2.25 ~ 2.75 kPa の間であり、 τ_{max} に及ぼす引抜き速度の影響は大きくない。したがって、今回の解析では、計算時間等も考慮して、引抜き速度は 600 mm/min を採用した。本検討では上載圧が 3 kPa と小さいことから、応力集中の影響はあまり大きくは見られなかった。引抜き速度を変化させることで粒子回転量や変位に与える影響については今後検討が必要であると考えます。

3.3.2 引抜き口の有無の検討

数値解析での補強材の引抜き実験では粒子流出が多いため、引抜き口の有無の影響の検討を行った。数値解析の手順は、3.2 節と同様であり、引抜き口ありの場合には、補強材の引抜きの開始直前に引抜き口を生成する。

図-7 に引抜き口の有無に応じた補強材引抜き後の解析モデルをそれぞれ示す。引抜き口ありの場合、粒子流出数は 421 本となり、模型実験の粒子流出数の 32 本より多くなった。一方、引抜き口なしの場合、粒子流出数は 0 本となった。引抜き口ありの数値解析の方が模型実験よりも粒子流出が多くなった理由として、数値解析では応力集中低減カバーを再現していないことが挙げられる。模型実験では応力集中低減カバーがあることで、引抜き口周辺のアルミ棒が密集することが抑制されたと考えられる。逆に、応力集中低減カバーがないと、アルミ棒は引抜き側に引き寄せられたうえで、周囲から力を受けて動きうるため、引抜き口からの流出が多くなると考えられる。引抜き口ありの数値解析ではこの粒子の動きを再現していないことで、模型実験の粒子流出数よりも多く

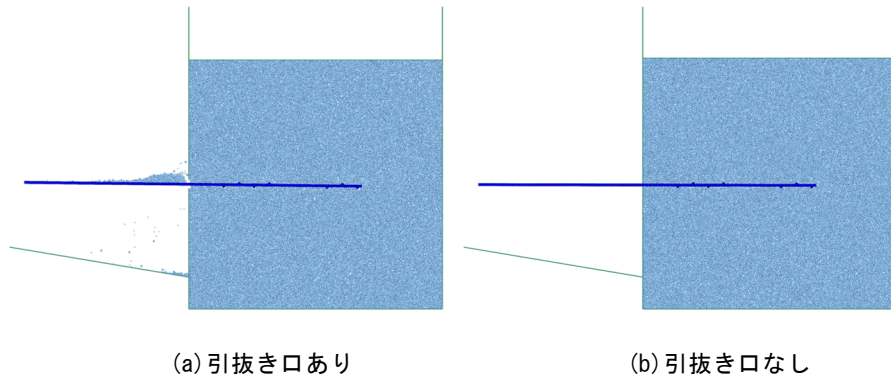


図-7 引抜き口の有無別の数値解析モデル

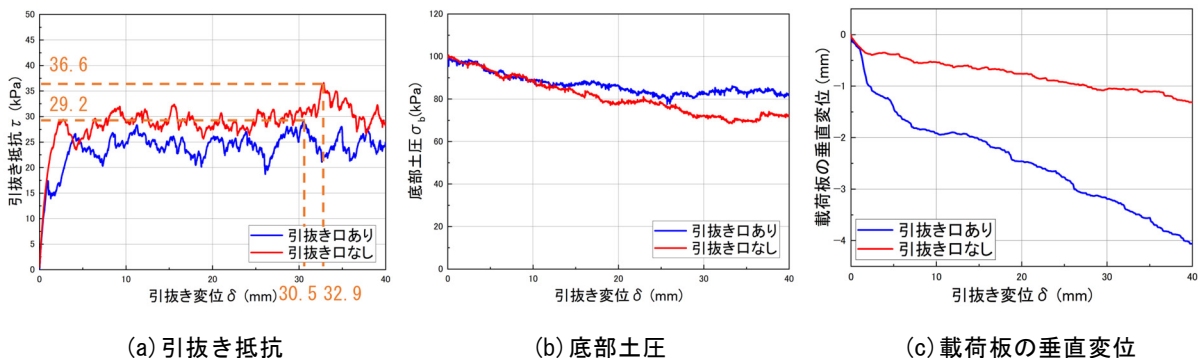


図-8 引抜き口の有無別の引抜き抵抗、底部土圧および載荷板の垂直変位と引抜き変位の関係

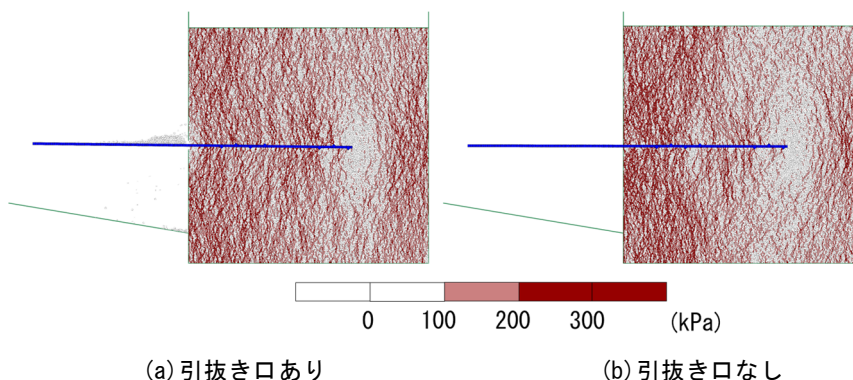


図-9 引抜き口の有無別の鉛直方向の土圧分布

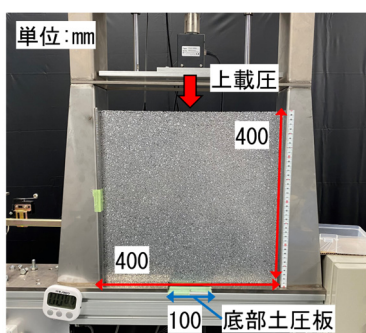


写真-4 壁面-粒子間摩擦係数を検討したときの引抜き実験の状況

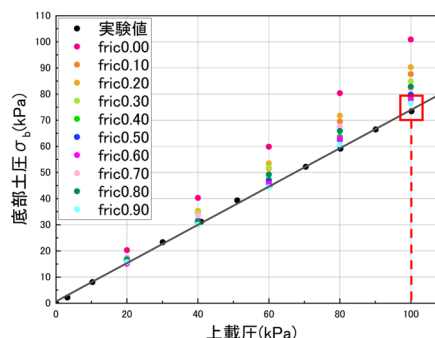


図-10 壁面-粒子間摩擦係数を変更したときの底部土圧と上載圧の関係

なつたと考えられる．ここで、引抜き口の有無別の τ と δ の関係を図-8(a)に示す．引抜き口の有無による違いを比較すると、引抜き口なしの方が τ は大きい．これは、粒子の流出がないことで、引抜きに伴い補強材付近の粒子の密度が上昇し、 T が大きくなったためと考えられる．

図-8(b)に引抜き口の有無別の σ_b と δ の関係を示す．粒子の流出を考慮すると、引抜き口ありの方が引抜き口なしよりも底部土圧が小さくなると予想されたが、実際には引抜き口なしの方が底部土圧は小さくなった．これについて、図-9に示す引抜き口の有無別の鉛直方向の土圧分布に基づき考察する．引抜き口の有無に関わらず補強材右側の土圧が小さくなっているが、引抜き口なしの場合、引抜き口ありの場合よりも土槽左側の土圧が大きくなっている．したがって、引抜き口なしの場合では、土槽左側の粒子が高密度になったことが考えられ、底部土圧の受圧板は長さ 400 mm の底面中央部の 100 mm であり、その部分の密度が低下したため、底部土圧は小さくなったと考えられる．

図-8(c)に引抜き口の有無別の載荷板の垂直変位と δ の関係を示す．引抜き口の有無に関わらず、垂直変位は徐々に大きくなっている．引抜き口ありの場合では粒子流出が引抜き口なしの場合よりも多く、これが原因で垂直変位が大きくなっていると考えられる．

模型実験結果(図-3)と比較した場合、引抜き口なしの方が引抜き開始直後に τ が増加する挙動が表現できており、これは引抜き口がないことで引抜き口周辺の粒子

が密になり、粒子と補強材の摩擦が大きくなったためと考えられる．また、 σ_b 、載荷板の垂直変位についても実験結果に近い挙動が得られたことから、数値解析では引抜き口なしの方が模型実験結果を再現できると考えた．

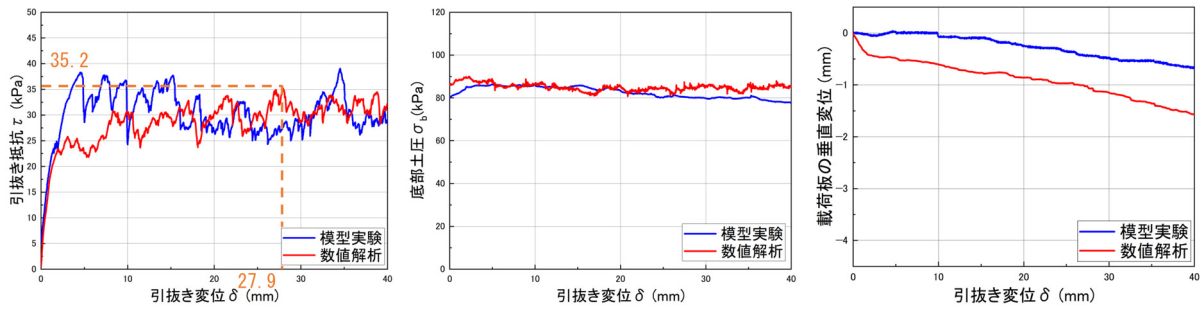
3.3.3 壁面-粒子間摩擦係数の検討

模型実験の結果を基に、数値解析に用いる壁面-粒子間摩擦係数を検討した．この検討を行う理由としては、壁面-粒子間摩擦係数が粒子の動きの傾向などに影響を与えず、主に上載圧を減じる役割を担っているためだ．なお、本検討では補強材は使用せず、アルミ棒のみを積層し、そのときの σ_b を測定した(写真-4)．数値解析では同様にアルミ棒を積層する状況を再現し、壁面-粒子間摩擦係数を変更し、それぞれ σ_b を取得した．それぞれの条件下で得られた σ_b を比較することで、適切な壁面-粒子間摩擦係数を決定した．

模型実験の手順は、2.2節の実験手順の(1)と同様であり、それ以降の手順を以下に示す．

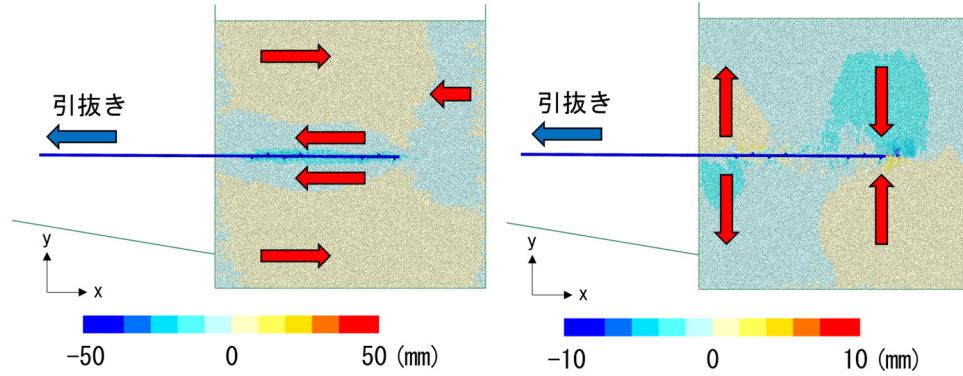
- (2) 混合したアルミ棒を高さおおよそ 400 mm に積み上げ、上部を平坦に成形する．
- (3) 載荷板を用いて、アルミ棒積層体を所定の上載圧(10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 kPa) で一次元圧縮する．
- (4) 各上載圧での σ_b を計測する．

数値解析の手順は、3.2節の解析手順の(1)~(4)と同様であり、それ以降の手順を以下に示す．



(a) 引抜き抵抗 (b) 底部土圧 (c) 載荷板の垂直変位

図-11 数値解析から得られた引抜き抵抗，底部土圧および載荷板の垂直変位と引抜き変位の関係



(a) 水平変位 (b) 鉛直変位

図-12 粒子の変位挙動

- (5) 積層高さが 400 mm 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。
- (6) 載荷板を生成する。
- (7) 載荷板を用いて積層体を所定の上載圧 (20, 40, 60, 80, 100 kPa) にて一次元圧縮する。

この手順において，壁面-粒子間摩擦係数を 0.00 ~ 0.90 まで 0.10 ずつ変更し，各上載圧での σ_b を計測した。

図-10 に模型実験における各上載圧における σ_b と数値解析における壁面-粒子間摩擦係数を変更したときの各上載圧における σ_b を示す。ここで，壁面-粒子間摩擦係数を fric と表記する。上載圧が小さいときは fric が σ_b に与える影響が小さいが，上載圧が大きくなるほどその影響は大きく発現される。本研究では，上載圧 100 kPa における模型実験と数値解析の結果を比較するので，上載圧 100 kPa のときの σ_b が実験値に最も近い $\text{fric}0.90$ を用いることにした。 fric が 0.90 と大きい値とした理由として，壁面付近のアルミ棒は，引抜き方向に引き寄せられて高密度化するため，壁面に接したアルミ棒の動きは拘束されるためと考えた。なお，青山ら¹³⁾によると，アルミニウム合金ダイカストと鋼材の間の摩擦係数は表面が粗くなるほど大きくなる傾向があり，摩擦係数が 1.0 を超えることが示されている。このことから，本解析で用いた値は物理的にあり得ない値ではないと考える。

3.4 数値解析の結果と考察

粒子数は 46,191 本，間隙比は 0.22 であった。また，

引抜き口はなしの条件で解析を実施したため，引抜き口からの粒子流出は 0 本であった。以下に， τ ， σ_b および載荷板の垂直変位と δ の関係について考察する。

3.4.1 引抜き抵抗

図-11(a) に数値解析から得られた τ と δ の関係を示す。模型実験では $\delta = 5$ mm 程度までは τ は単調増加し，数値解析では $\delta = 3$ mm 程度まで τ は単調増加しており，引抜き開始直後の τ が模型実験のそれよりも小さい。しかし，模型実験，数値解析ともに， δ が 10 mm を超えたあたりから， τ は 30 kPa あたりで増減するようになり，模型実験の挙動を再現できていると考える。引抜き開始直後の引抜き抵抗に差が生じた原因として，粒子の回転に違いがあることが考えられる。

3.4.2 底部土圧

図-11(b) に数値解析から得られた σ_b と δ の関係を示す。模型実験では $\delta = 2$ mm 程度までは σ_b がわずかに増加し，その後 σ_b は若干低下している。数値解析の結果もそれに類似した挙動を示している。このことから，底部土圧は模型実験の挙動を数値解析で十分に再現できていると考える。

3.4.3 載荷板の垂直変位

図-11(c) に数値解析から得られた載荷板の垂直変位と δ の関係を示す。数値解析では，垂直変位が補強材の引抜きに伴い増加し，積層体が収縮する傾向は再現できている。しかし，その変位量については，模型実験より数値解析の方が大きくなっている。引抜き抵抗と同様に，

模型実験と数値解析で粒子の回転に違いが生じたことで、載荷板の垂直変位の変位量に差が生じたと考えられ、今後転がり抵抗を導入するなど、パラメータの検討が必要であると考えられる。

4. 補強土壁背面の粒子挙動の可視化

4.1 粒子変位の挙動

図-12(a), (b)にそれぞれ補強材を40 mm引き抜いた後の粒子の水平および鉛直変位を示す。ここでは補強材の引抜き前後の変位の差を取ることで、水平および鉛直変位を算出した。図-12(a)より、粒子の水平変位は補強材の引抜きに伴い、補強材周辺では左側(補強材の引抜き方向)に移動し、土槽の上部と下部では右側に移動し

ていることがわかる。また、土槽の右側では粒子の一部が左に移動している。これは、補強材の引抜きにより土槽内に空隙ができ、それを埋めるように粒子が移動したためと考えられる。図-12(b)より、粒子の鉛直変位は補強材の引抜きに伴い、補強材の右端では補強材側へ移動し、土槽左側では補強材から離れる向きに粒子が移動していることがわかる。

次に、粒子の水平変位と補強材からの鉛直距離の関係について可視化した。ここでの水平変位は土槽の高さを粒子の最大粒径である3 mmごとに分割し、その範囲内にある全粒子の水平変位の絶対値を平均することで算出した。このとき、①土槽左側から土槽右側までの範囲を計測したもの(図-13(a)), ②土槽左側から補強材の右端までの範囲を計測したもの(図-13(b))の2ケースで可視化した。図-14(a), (b)にそれぞれ①および②のケースの粒子の水平変位と補強材からの鉛直距離の関係を示す。両ケースとも補強材付近で水平変位が大きくなり、補強材から±50 mm離れた位置と±200 mm離れた位置で水平変位が小さくなっている。また、②の結果は、①と同様であるが、補強材付近での粒子の水平変位は②の方が大きくなっている。この結果より、補強材が敷設されている位置かつ補強材からの鉛直距離に近いほど水平変位が大きくなり、補強材近傍での粒子の変位が非常に大きくなること示唆される。

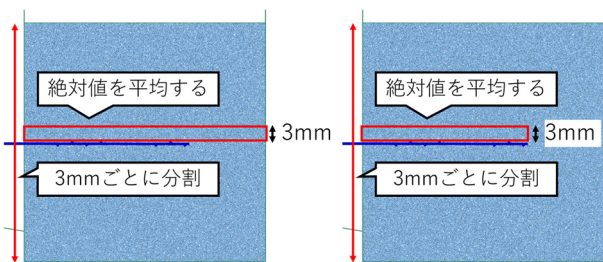


図-13 粒子の水平変位と回転量の計測範囲

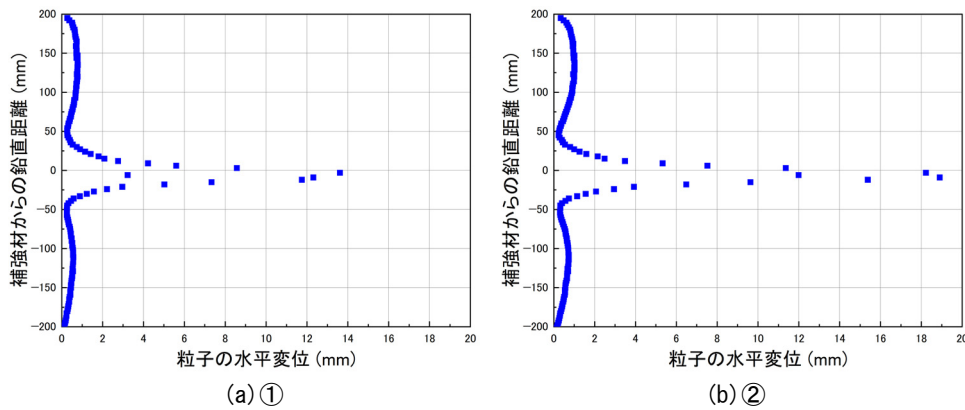


図-14 計測範囲が①および②における粒子の水平変位の鉛直分布

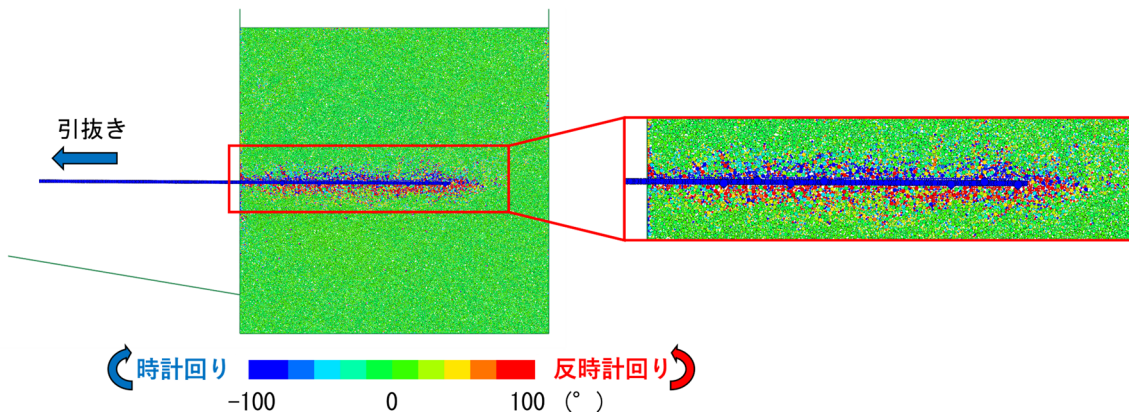


図-15 粒子回転量

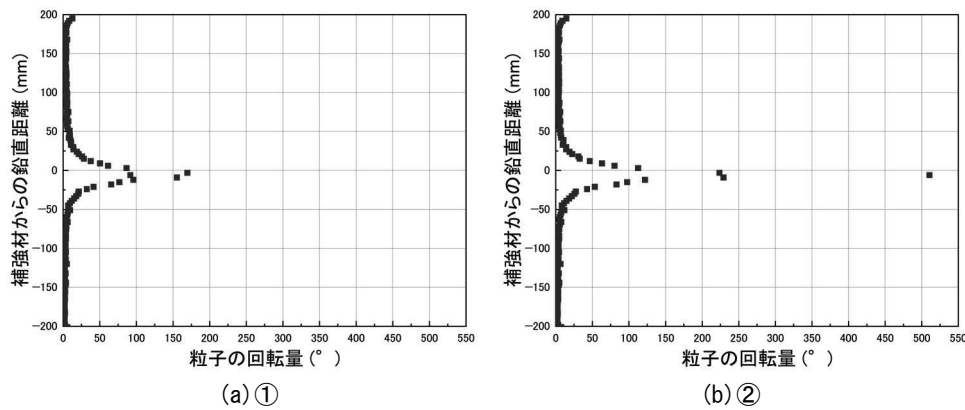


図-16 計測範囲が①および②における粒子の回転量の鉛直分布

4.2 粒子回転量の挙動

図-15に補強材を40 mm引き抜いた後の粒子回転量を示す。ここでは、反時計回りの回転を正としている。補強材の引抜きに伴い、補強材周辺の粒子が回転している。補強材上は時計回り、補強材下は反時計回りに回転する傾向にある。補強材の右側も粒子が回転しており、これは補強材の引抜きにより、土槽内に生じる空隙を粒子が埋めるように回転しながら移動したためと考えられる。

粒子回転量と補強材からの鉛直距離の関係について、粒子の水平変位と同様に、①土槽左から土槽右までの範囲を計測したもの(図-13(a))、②土槽左から補強材の右端までの範囲を計測したもの(図-13(b))の2ケースで可視化した。両ケースともに回転量の算出方法は粒子の水平変位と同様であり、回転量の絶対値を平均することで算出した。図-16(a)に①のケースの粒子回転量と補強材からの鉛直距離の関係を示す。補強材からの鉛直距離が±50 mmを超えるあたりから粒子回転量が少なくなる。また、補強材からの鉛直距離が175 mmを超えるあたりから粒子回転量が増えているが、これは載荷板と粒子の摩擦があるためと考えられる。また、図-16(b)に②のケースの粒子回転量と補強材からの鉛直距離の関係を示す。この結果は①と同様であるが、補強材付近での粒子回転量は①よりも大きくなっている。

以上のことより、補強材周辺で粒子の水平変位が大きく、かつ、回転量も多くなっていることがわかる。全体的な傾向としても、水平変位と回転量で近い挙動が得られ、水平変位と回転量に関連があることが確認できた。

5. 結論

本研究では、アルミ棒積層体に部分敷設した鋼製帯状補強材の引抜き実験を行うとともに、DEMを用いてその挙動を再現するモデルを作成した。また、数値解析において、引抜き速度、引抜き口の有無、壁面-粒子間摩擦係数の決定方法を示した。作成した数値モデルから、補強土壁背面の粒子挙動を可視化し、補強材と土粒子の影響範囲について考察した。本研究で得られた結論を以

下に示す。

- (1) 引抜き速度、引抜き口の有無、壁面-粒子間摩擦係数の影響を検討することで、土槽内部の状況を再現することができた。
- (2) 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、底部土圧および載荷板の垂直変位と引抜き変位の結果は数値解析により概ね近似された。
- (3) 補強土壁背面の粒子の可視化により、補強材周辺で粒子の変位と回転が顕著にみられ、粒子の水平変位と回転量の間に関連があることが確認できた。
- (4) 粒子の水平変位および粒子の回転量と補強材からの鉛直距離の関係は、ともに補強材からの鉛直距離が近いほど大きくなり、計測範囲を変更した場合でも同様の傾向となった。

謝辞

本研究にあたり、呉屋港氏(元山口大学大学院生)には、実験および解析にご助力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 永井哲夫, 張玉軍, 小谷野康之: 有限要素法によるトンネル掘削解析における掘削および地山のモデル化について, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第7巻, pp.99-104, 1997.
- 2) 淡路動太, 砂金伸治, 河田皓介, 真下英人: 早期断面閉合を行った山岳トンネルの変形挙動, 土木技術資料, 第56巻, 5号, pp.22-25, 2014.
- 3) Damians, I.P., Bathurst, R.J., Josa, A., Lloret, A.: Numerical analysis of an instrumented steel reinforced soil wall, *ASCE International Journal of Geomechanics*, Vol.15, No.1, 04014037, 2015.
- 4) 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, ジオシンセティックス論文集, 第18巻, pp.139-146, 2003.
- 5) 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.
- 6) 齊藤紀明, 太田均, 酒井茂賀, 永倉秀典: テールアルメにおける様々な盛土材料の適用事例と適否判定手法, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.595-596, 2007.
 - 7) 田坂行雄, 鈴木素之, 米田修, 志村直紀, 杉山洋介: 固化処理土を適用した帯鋼補強土壁における補強材の引抜き抵抗特性と補強材長の設計, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.3, pp.516-529, 2010.
 - 8) Kido, R., Sawamura, Y., Kimura, K., Kimura, M.: Investigation of soil deformation characteristics during pullout of a ribbed reinforcement using X-ray micro CT, *Soils and Foundations*, Vol.61, No.3, pp.642-657, 2021.
 - 9) 郷司航平, 鈴木素之, 呉屋港, 新田武彦, 松永崇史, 志村直紀, 永倉秀典: 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-引抜き挙動の関係, 地盤と建設, Vol.41, No.1, pp.25-33, 2023.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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.71-78, 2015.
 - 13) 青山俊三, 砂田昌弘, 坂本勝美, 梅村晃由: アルミニウム合金ダイカストの鋳物と金型間の摩擦係数, 軽金属, Vol.41, No.6, pp.412-418, 1991.

(2024 年 6 月 24 日 受付)