

等方圧縮条件下での補強材引抜き抵抗特性に関する三次元 DEM 解析

玉置 尊¹⁾, 木戸 隆之祐²⁾

1) 修士課程, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, m251083@hiroshima-u.ac.jp

2) 准教授, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, rkido@hiroshima-u.ac.jp

帯鋼補強土壁の性能評価においては, 変形レベルに応じた補強材の引抜き抵抗特性の変化とその発生メカニズムの把握が重要である. 本研究では, 三次元 DEM を用いて等方圧縮状態を考慮した補強材の引抜き解析モデルを構築し, 補強材の引抜き特性の解明を試みた. その結果, 引抜き変位の進行に伴い, 引抜き抵抗力に寄与する接触力の作用位置が, リブ側面からリブ直上へと遷移することが明らかとなった. また, リブ直上に形成されるくさび型の高密度領域は, 引抜きに伴い補強材と一体的に挙動することが確認され, 最終的にリブ傾斜角が異なる補強材であっても, 同じ角度のリブを持つ補強材のように挙動するため, 最終的な引抜き抵抗力が同程度になることが明らかとなった.

キーワード: 補強材引抜き, 三次元 DEM, 等方圧縮, 引抜き抵抗力 (IGC: E-12, E-13)

1. はじめに

帯鋼補強土壁工法は, コンクリート製または鋼製の壁面材と鋼製の帯状補強材を用いることで, 鉛直に近い壁面を有する盛土を構築可能な工法である. 本工法は, 都市部や山岳部などの用地制約がある地域において, 鉛直に近い勾配の法面または壁面を持つ盛土の構築を可能とし, 高い耐震性を有する点が特徴である¹⁾.

本工法においては, 壁面に作用する土圧に対し, 盛土材内に敷設された補強材と土との相互作用による周面摩擦力が引抜き抵抗力となって構造物の安定性および強度が確保されている²⁾. このため, 帯鋼補強土壁の性能評価にあたって, 変形レベルに応じた補強材の引抜き抵抗特性の変化とその発生メカニズムの把握が重要である.

補強材の引抜き抵抗特性は, 補強材 1 本を用いた引抜き試験によって評価されてきた. 例えば小川³⁾は, リブ付きおよびリブなしの 2 種類の帯鋼補強材を用いた現場引抜き試験を実施し, リブ付き補強材はリブの存在によりせん断面積が増加し, 摩擦抵抗力が大きくなることを明らかにした. しかし, 従来の引抜き試験では引抜き変位と引抜き抵抗力の測定に留まり, 詳細な引抜き抵抗メカニズムが不明である点が課題であった.

これに対して, 近年は地盤内部の可視化技術を併用した補強材の引抜き試験が行われている. 例えば, 呉屋ら⁴⁾はアルミ棒積層体を用いて引抜き試験を行い, その様子に対して PIV 解析を実施することで, 補強材の引抜きに伴う粒子挙動の可視化を行い, 補強材の引抜き特性を調査している. その結果, 補強材の引抜きに伴う粒子移動は補強材周辺で顕著であり, 特にリブ周辺で粒子の変位量が相対的に大きいことが明らかとなった. また, Kido et al.⁵⁾は, リブ付き補強材モデルを用いた等方圧密条件下で

の引抜き試験と X 線 CT 撮影を行い, 引抜き抵抗特性と地盤変形挙動の関係を調査した. その結果, リブの高さや傾斜角が引抜き初期および破壊時における引抜き抵抗力や地盤変形挙動に大きく影響することを明らかにした.

補強土壁工法には, リブ付き補強材と同様にジオグリッド補強材も広く用いられており, 土との相互作用の解明が進められている. 例えば, 樋口ら⁶⁾は大型模型土槽実験により, ジオグリッド補強によって土圧が減少し, 補強土壁全体の安定性が向上することを示している. 野々山ら⁷⁾は透明土と PTV 画像解析を用いてジオグリッド補強基礎地盤の支持力メカニズムを可視化し, 補強効果の評価にはジオグリッドの張力や剛性といった補強材の局所的な力学特性を考慮する必要があると説明している. さらに, 弘中ら⁸⁾は X 線 CT スキャナを用いて土とジオグリッド間の引抜き過程を可視化した結果, ジオグリッド間の土の拘束が隣接するジオグリッドの局所的な形状に影響され, すべり面の進行を遮断することによって補強土壁全体の安定性に寄与することを明らかにしている. これらのジオグリッドに関する先行研究の知見は, 補強材の局所的な形状や剛性といった特性が, 土圧低減⁶⁾やすべり面遮断⁸⁾といった補強土壁全体の安定性・破壊挙動に強く影響することを示している. したがって, リブ付き補強材も同様に, リブ周辺の土と補強材の相互作用が全体の性能を支配していると考えられる.

以上を踏まえると, 帯鋼補強土壁全体の安定性に寄与するリブ付き補強材の引抜き抵抗特性には, とりわけ土とリブにおける局所的な相互作用が重要な力学役割を果たすと想定される. すなわち, 土と補強材の相対変位量の増加に伴い, 土とリブの間に生じる摩擦抵抗や支圧抵抗がどのように変化するかを解明できれば, 補強材の引抜き抵抗メカニズムを理解し, 例えば変形レベルに応

じた補強材の抵抗力変化を考慮した補強土壁の性能評価法の高度化や設計法の合理化に寄与すると考えられる。しかし、PIV 画像解析や X 線 CT は土の幾何学的な構造変化の可視化に留まり、力学的観点からの議論は不足している。

このような課題解決には力学的相互作用を可視化できる数値解析的アプローチが有効であり、本研究では個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) ⁹⁾ に着目する。DEM は、粒子や多角形要素でモデル化した物体の運動を追跡する数値解析法であり、要素間の法線方向および接線方向に弾性バネとダッシュポットを配置し、接線方向にはこれに加えてスライダーを配置することで、接触力や粒子の運動を計算する。これにより、実験では計測が困難な粒子レベルの微視的挙動を可視化できる。補強材引抜き時の地盤のひずみ場や応力分布など巨視的な挙動の評価には有限要素法 (Finite Element Method, FEM) が有効であるが、本研究のように引抜き抵抗メカニズムの解明を主目的とする場合、補強材周辺の粒子の運動や接触力の伝達過程を直接可視化できる DEM が有効と言える。これまでの補強材の引抜き挙動に関する先行研究として、例えば郷司ら ¹⁰⁾ は、アルミ棒積層体を用いた鋼製帯状補強材の引抜き試験と、二次元 DEM を用いた引抜きシミュレーションを行い、接触点数や粒子間接触力が引抜き抵抗の挙動に影響を与えていることを明らかにした。一方、リブ近傍の相互作用に着目して補強材の引抜き抵抗メカニズムを解釈した数値解析事例はない。

そこで本研究では、Kido et al.⁵⁾ が実施した等方圧縮条件下での補強材引抜き実験を参考に、三次元 DEM 解析モデルを構築し、補強材全体およびリブ直上での引抜き変位・引抜き抵抗力関係を明らかにするとともに、粒子の変位・回転などの微視的挙動の分析を通じて、補強材の引抜き特性の解明を試みた。

2. 解析方法

本研究では、三次元 DEM オープンソースソフトウェアである YADE (Yet Another Dynamic Engine) ¹¹⁾ を用いた。本ソフトは、補強材のような非球形の物体形状を表現するための要素選択、境界条件 (応力制御、ひずみ制御、周期境界など)、接触モデルの設定において自由度が非常に高く、ユーザー独自の解析モデルを柔軟に実装、拡張できる。

YADE では Sweep and prune algorithm⁸⁾ を用いて接触判定を行う。この手法は、粒子を軸方向境界ボックス (Axis-aligned bounding box, Aabb) で三次元的に囲み、各軸において Aabb の区間が交差している場合、接触していると判定される。また、補強材モデルと粒子の接触判定についても、同様に幾何学的な重なりに基づいて行われる。

2.1 解析モデルと解析手順

解析モデルを図-1 に示す。一般的なリブ付き補強材は帯状であるが、Kido et al.⁵⁾ の実験では X 線 CT 撮影において帯状の場合にアーティファクトが発生する可能性を考慮して円柱状の補強材を使用している。本研究ではそれと同様の補強材モデル (直径 3 mm, 長さ 74 mm) を、三角形面要素 (Facet) によって構築した。また、実験ではメンブレンで豊浦砂を包んだ円柱供試体 (直径 70 mm, 高さ 140 mm) を使用しているが、本研究ではより単純な境界条件として壁要素 (Wall) を 6 つ用いて立方体状の空間を作成し、その内部に球形粒子を充填することとした。初期状態は図-1(a) に示す通り、壁要素と補強材モデルに接触しないように球形粒子を密に生成した。なお、補強材モデルと壁要素は接触判定を行わず、接触力計算を行わないように設定した。各物体の接触モデルは、一般的に用いられるフォークトモデルを用いた。Kido et al.⁵⁾ の実験の定量的な再現には、転がり摩擦の導入や非球形粒子の使用が重要と考えており、今後の課題である。

解析手順を以下に示す。なお、すべての手順は重力加速度 9.8 m/s^2 が作用しない無重力場において実施した。

- ① 6 つの壁要素で囲まれた空間の中央に補強材を設置した上で、球形粒子を約 38000 個生成した。
- ② それぞれの壁要素に 100 kPa を作用させ、静的平衡状態に達するまでステップ計算を繰り返す。このとき、YADE 内の関数である unbalancedForce (粒子同士の接触力の総和に対する、外力や重力による各粒子への力の総和の比率) が 1×10^{-3} 未満に達した場合に粒子系が静的平衡状態、すなわち 100 kPa の等方圧縮状態に達したと判断した。供試体は最終的に図-1(b) のようになった。
- ③ 応力制御していた壁要素をひずみ制御に切り替え、壁要素の位置を固定する。100 kPa の応力制御のまま以降の解析を行うと、補強材の引抜きに伴う粒子の再配列に追従して壁要素も移動する現象が見られたためである。
- ④ 補強材を鉛直方向に引抜き速度 10 mm/s で 2 mm 引抜き解析を行った。所定のステップ数において、引抜き変位量、補強材と粒子との接触点数および接触力を記録した。

なお、供試体寸法は表-1 となり、Kido et al.⁵⁾ に比べて高さは 10 分の 1、幅と奥行きは 5 分の 1 程度と小さい。これは、本研究の目的がリブ周辺の粒子挙動と力学的な相互作用に着目することであり、補強材引抜き時の粒子挙動に対する境界の影響が小さく、計算時間が 1 日程度で終了する条件として設定した。

表-1 供試体寸法

	高さ [mm]	幅 [mm]	奥行 [mm]
Case1	12.3	12.9	12.9
Case2	12.5	12.7	12.7
Case3	12.8	12.6	12.6
Case4	11.3	13.6	13.5

2.2 解析ケースとパラメータ

図-2 に、補強材モデルおよび解析ケースを示す。リブ幅 7.0 mm およびリブ高さ 2 mm を共通条件とし、リブ傾斜角を 90 度、60 度、30 度の 3 通り設定した。リブ傾斜角 90 度は、リブ幅 10 mm、リブ高さを 3.5 mm としたケースも追加し、計 4 ケースの解析を実施した。これらの解析ケースは Kido et al.⁵⁾の試験ケースと一致させた。

本研究で用いた粒子の粒径分布と、Kido et al.⁵⁾が実験で使用した豊浦砂の粒径加積曲線を図-3 に示す。使用した粒子サイズは、現在の解析環境において現実的な解析時間内で処理可能な最小粒径として、約 38000 個の直径 0.36~0.44 mm の範囲で生成したものである。

本研究で用いたパラメータを表-2 に示す。粒子および補強材の密度は、Kido et al.⁵⁾が使用した豊浦砂および補強材の密度に合わせて設定した。ヤング率については、過度に大きな値を設定すると、数値安定性の観点から critical time step が極端に小さくなり、所定の引抜き変位に達するまでに必要な解析時間が大幅に増加する。そのため、本解析では準静的な引抜き挙動を対象とすることを踏まえ、ヤング率を $5.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ に設定した。

3. 解析結果

3.1 補強材全体の引抜き抵抗—引抜き変位関係

図-4 に引抜き初期における引抜き抵抗—引抜き変位関係を、図-5 に補強材全体の引抜き抵抗—引抜き変位関係を、図-6 に Kido et al.⁵⁾の補強材全体の引抜き抵抗—引抜き変位関係をそれぞれ示す。

まず、引抜き初期に着目する。図-4 は、引抜き初期 0.1 mm に焦点を当てた図である。リブ高さが大きいほど引抜き抵抗の上昇率（勾配）が増加する傾向が確認された。また、リブ傾斜角が大きいほど抵抗の上昇率は大きくなる傾向があることも明らかとなった。次に、引抜き最終に着目すると、図-5 より、リブ高さの増加に伴い引抜き抵抗も増加する傾向が見られた。一方で、全ケースで引抜きに伴い引抜き抵抗の推移は鈍化していき、特にリブ傾斜角が異なる Case1, Case2, Case3 においては、引抜き変位が大きくなるにつれて抵抗の上昇率が低下し、引抜き変位 2 mm での引抜き抵抗は同程度に収束する傾向が見られた。

しかし、Kido et al.⁵⁾の実験結果（図-6）から、Case4 の最大引抜き抵抗は約 310 N であり、Case1, Case2, Case3 は約 260 N となっており、引抜き抵抗において定量的に差があることが確認された。今回の解析モデルはリブ近傍の相互作用に着目してモデルを構築したため、シャフト全体を等方圧縮した状態で解析を行えなかったことが考えられる。また、引抜き変位 2 mm の時点では、Case1 と Case2 の間で引抜き抵抗に約 10 N の差があり、本研究の解析結果が定量的に一致しないことが確認された。この要因として、今回の解析モデルで設定した引抜き速

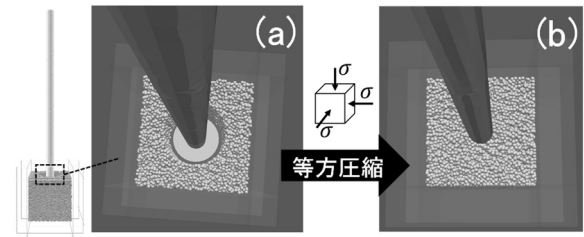


図-1 解析モデル：(a) 生成初期、(b) 等方圧縮状態

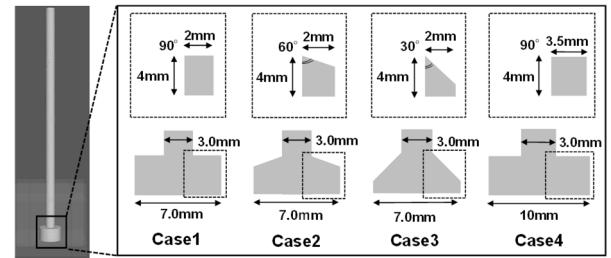


図-2 補強材模型と解析条件

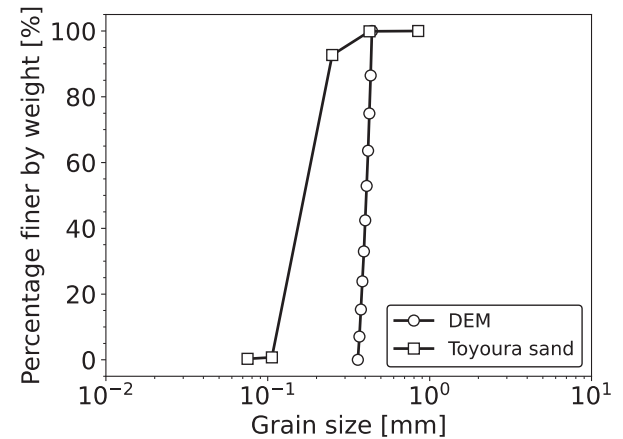


図-3 粒径加積曲線

表-2 解析パラメータ

粒子密度 [kg/m ³]	2640
補強材密度 [kg/m ³]	1150
ヤング係数 [N/m ²]	5×10^6
粒子間摩擦角 [°]	30
減衰係数	0.2

度は、現実的な解析時間で解析を行うため、Kido et al.⁶⁾の引抜き速度（0.5 mm/min）よりも 1200 倍速い 10 mm/s で解析を行ったためであると考えられる。しかしながら、最終的な引抜き変位量に違いはあるが、上述した各ケースの抵抗の違いは Kido et al.⁵⁾の実験結果と傾向が定性的に一致しているため、解析に一定の妥当性があるといえる。

3.2 部位別の引抜き抵抗—引抜き変位関係

図-7 に部位別の引抜き抵抗—引抜き変位関係を示す。図中の赤線はシャフト部における引抜き抵抗、青線はリブ直上、緑線はリブ側面における引抜き抵抗を

表す。また、黒線はこれらの合計である全体の引抜き抵抗を示す。

引抜き初期においては、Case1, Case2, Case4 においてリブ直上の引抜き抵抗よりも、シャフトおよびリブ側面における抵抗、すなわち周面摩擦が大きくなっている。その後、これらの抵抗は概ね一定に推移し、最終的には全ケースにおいてリブ直上の抵抗が最も大きくなっていることがわかる。以上の結果から、引抜き初期においては周面摩擦が引抜き抵抗に対して作用し、変位が進行するにつれてリブ直上の抵抗の寄与が増大することが分かった。このような補強材各部と粒子との相互作用に基づく部位別の引抜き抵抗の定量化は、Kido et al.⁵⁾の実験では観察されておらず、本研究で行った DEM 解析によって初めて詳細な議論が可能となった。

3.3 補強材と粒子の接触点数関係

図-8 に補強材全体の補強材と粒子の接触点数関係を示す。解析結果より、リブ高さが大きいほど接触点数が増加することが確認された。また、リブ傾斜角が大きいほど、接触点数も増加する傾向が見られた。

さらに、図-9 にリブ直上における補強材と粒子の接触点数を、リブ直上の表面積で除した結果を示す。これは、リブ直上 1 mm^2 あたりに接している粒子数を示している。結果より、ばらつきはあるものの、引抜き初期および引抜き最終のいずれにおいても、リブ傾斜角に依存せずおよそ同程度の値を示すことが確認された。このことから、図-5 の Case1, Case2, Case3 について、引抜き最終における引抜き抵抗がリブ傾斜角に依らずほぼ同程度となった要因の一つは、リブの単位面積あたりの粒子との接触密度がほぼ同等であることと考えられる。

3.4 補強材と粒子の傾向分析

図-10 に各粒子の引抜き方向の累積変位量の絶対値とその確率密度の関係を示す。ここで、 x 軸は各粒子の鉛直方向の累積変位量を、 y 軸はその確率密度を表す。確率密度は、各変位区間に含まれる粒子数を全粒子数で除することで正規化しており、値が大きいほど、その変位範囲に属する粒子数が多いことを意味する。

図-10(a) は引抜き初期に焦点を当てた結果であり、図-4 の引抜き変位 0.1 mm 時点で、各粒子が鉛直方向にどれだけ移動する傾向であるかを表している。結果から、リブ高さが大きいほど累積変位量大きい粒子の割合が大きくなる傾向が確認された。一方で、リブ傾斜角の小さい Case2 と Case3 では、粒子の累積変位量分布が Case1 よりも広範囲であり、比較的大きな変位量を示す粒子の割合が大きい傾向が見られた。この要因として、Case2 および Case3 においては、リブ直上に粒子が安定して乗りにくく、引抜きに伴いリブの傾斜面に沿って粒子が下方に移動・落下しやすくなるため、リブ周辺の粒子に顕著な変位が生じたものと推察される。

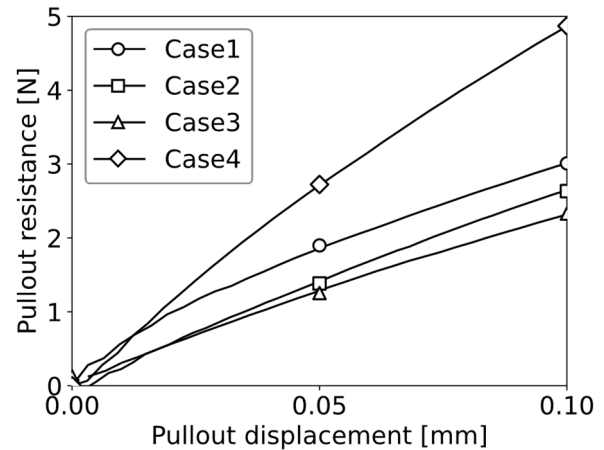


図-4 引抜き初期の引抜き抵抗—引抜き変位関係

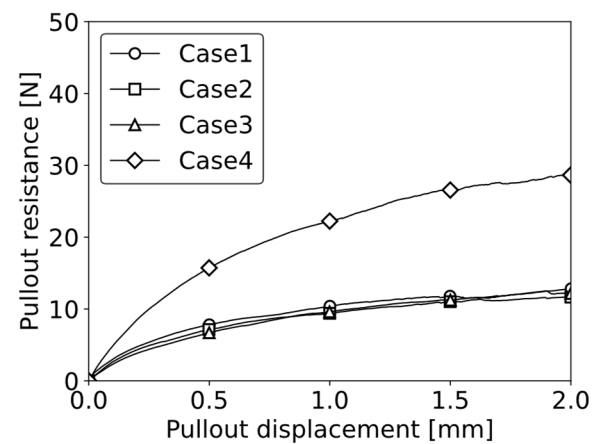


図-5 補強材全体の引抜き抵抗—引抜き変位関係

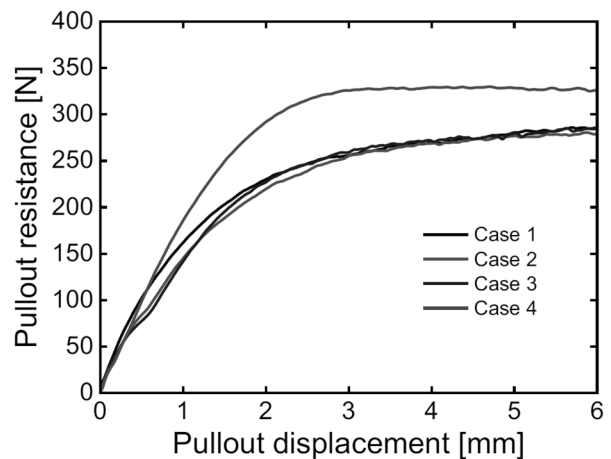


図-6 補強材全体の引抜き抵抗—引抜き変位関係
(Kido et al.⁵⁾)

一方、図-10(b) に示す引抜き変位 2.0 mm 時点の結果では、リブ傾斜角の違いによる変位量の差は小さく、ほぼ同程度の分布を示した。この結果から、引抜き終盤においては、粒子の挙動がリブ傾斜角に依存せず類似したものになる傾向があると考えられる。

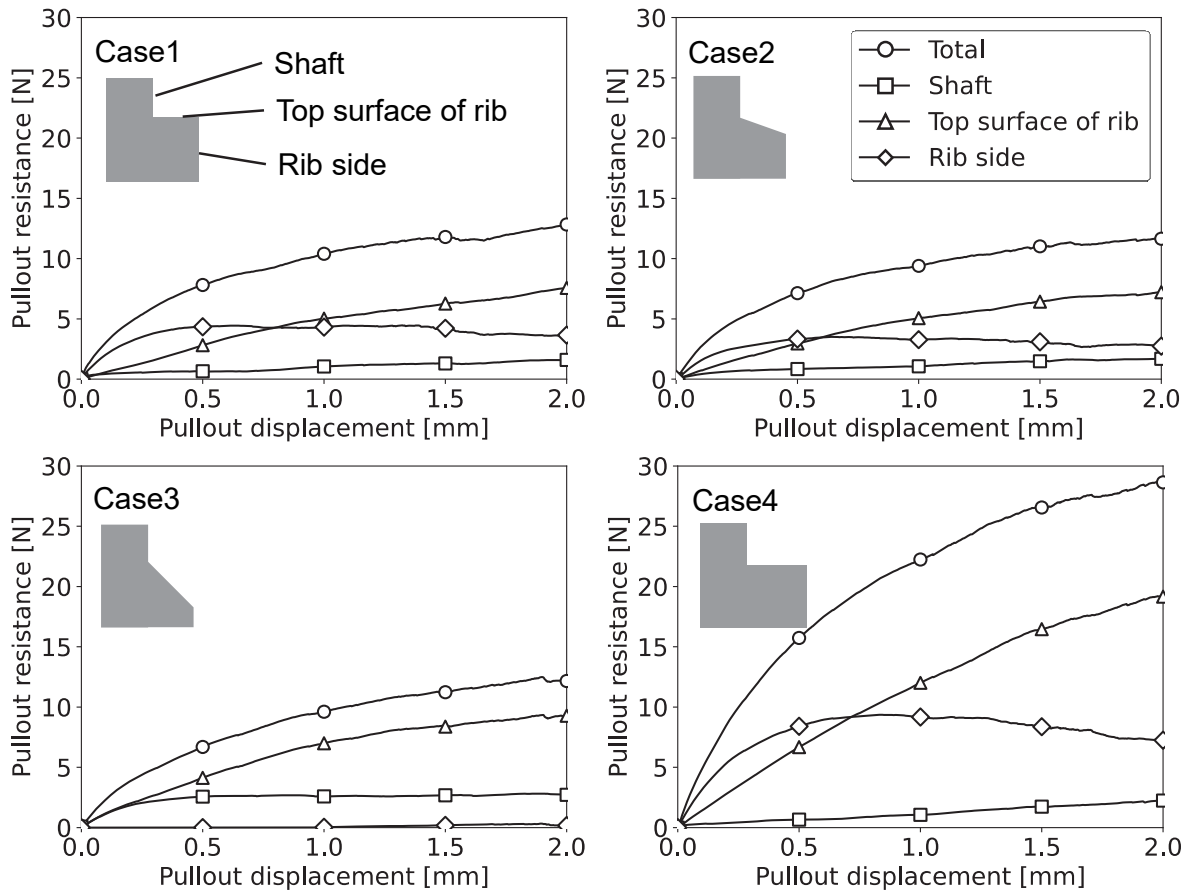


図-7 部位別の引抜き抵抗力—引抜き変位関係

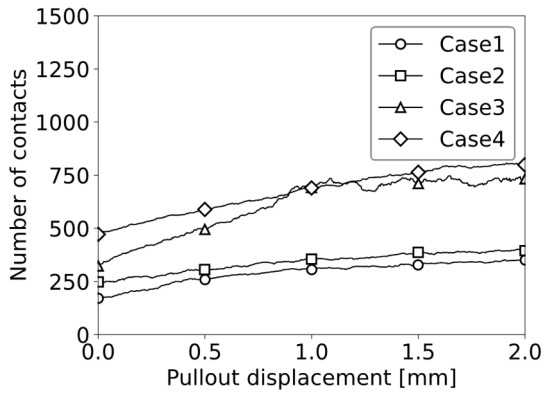


図-8 補強材全体の補強材と粒子の接触点数関係

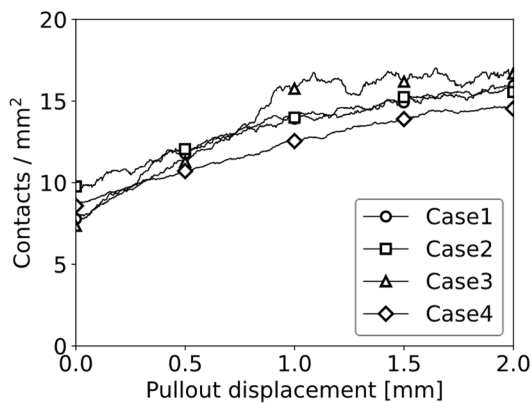


図-9 リブの単位面積あたりの粒子の接触密度

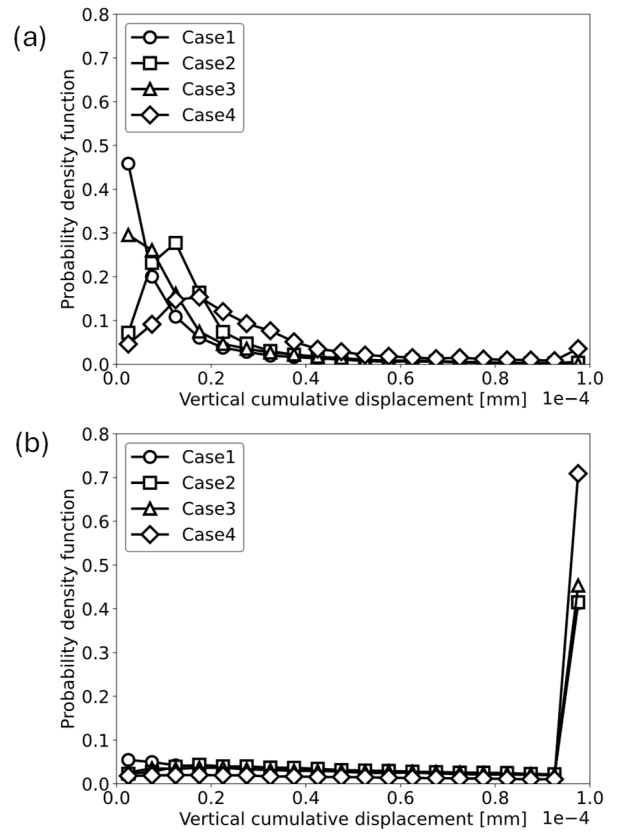


図-10 引抜き変位における粒子の分布：

(a) 引抜き変位 0.1 mm, (b) 引抜き変位 2.0 mm

3.5 コンター図による傾向分析

3.5.1 粒子速度コンター図

図-11 に各ケースの粒子速度コンター図を示す。まず、引抜き変位が 0.1 mm の時点に着目すると、いずれのケースにおいてもリブ直上の粒子が赤く表示されており、同部において粒子速度が高くなっていることが確認された。さらに、引抜き変位が進行するにつれて、Case1, Case2, Case4 では、リブ直上にくさび状の領域が形成されていることが確認された。一方、Case3 ではそのようなくさび状の速度分布は見られず、リブ傾斜角に沿って粒子が移動している様子が見受けられた。

3.5.2 角速度コンター図

図-12 に各ケースの角速度コンター図を示す。引抜き変位 0.1 mm の時点では、すべてのケースにおいてシャフトに接触している粒子の角速度が大きく、リブ直上の粒子の角速度は小さいことが確認された。引抜き変位が 2 mm に達すると、Case1, Case2, Case4 においては、リブ直上にくさび状の領域が形成され、その領域内の粒子角速度は小さく保たれていた。一方、Case3 では、リブ傾斜角に沿って粒子が回転運動しており、リブ周囲の粒子の角速度が大きくなる傾向が確認された。

図-13 には各ケースのリブ直上に着目した拡大図と、Case3 のリブ傾斜角 (30 度) と一致する勾配を持つ補助線を全ケースに付加しており、図-13 (a) は本研究の解析結果、図-13 (b) は Kido et al.⁵⁾ の結果である。Case1 および Case2 では、リブ直上に形成されたくさび状の領域の外側において粒子の角速度が大きくなっていることが確認された。これは、せん断帯内の粒子が顕著な回転を示すという既往研究¹²⁾と一致する。そのため、今回の解析結果から得られた角速度の傾向を踏まえると、くさび状の領域の外側にせん断帯が形成されていると推察される。加えて、Case4 では、Case1 および Case2 に比べてより広範囲にわたりせん断帯が形成されている。このせん断帯の傾斜角は、Case3 のリブ傾斜角と一致する 30 度であることが確認された。これらの結果は Kido et al.⁵⁾ の結果と傾向が一致した。

以上の結果から、Case1, Case2, Case4 において引抜き変位が進行するにつれて、リブ直上のくさび型領域は、引抜き変位 2 mm の範囲において、補強材と一体的に剛体として挙動する領域を形成し、ともに移動しているといえる。

3.5.3 接触力コンター図

図-14 に引抜き方向の接触力コンター図を示す。解析結果より、引抜き変位が 0.1 mm の時点では、Case1, Case2, Case4 においてリブ直上には顕著な接触力は確認されず、主にリブ側面において接触力が増大していることが明らかとなった。この結果は、図-7 に示したリブ側面の抵抗力が引抜き初期に最も大きくなっていることと整合しており、引抜き初期においてリブ側面の摩擦抵抗の作用が顕著と考えられる。一方、引抜き変位が 2.0 mm に達

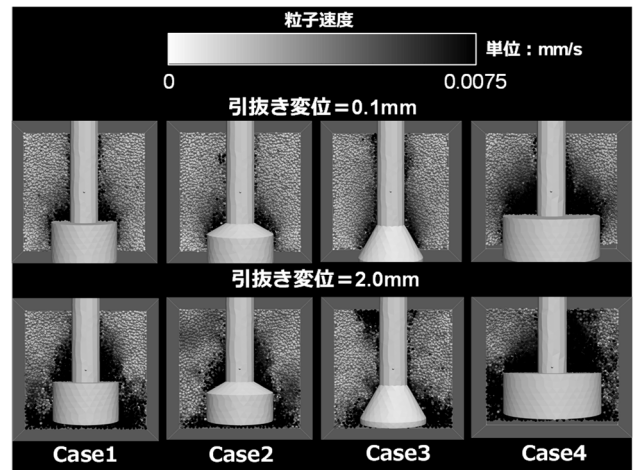


図-11 粒子速度コンター図

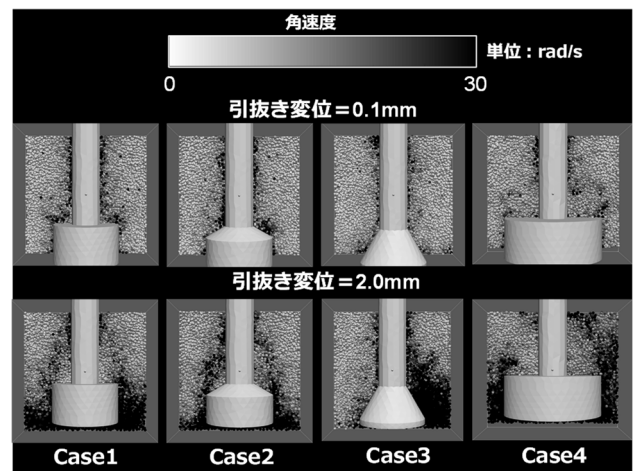


図-12 角速度コンター図

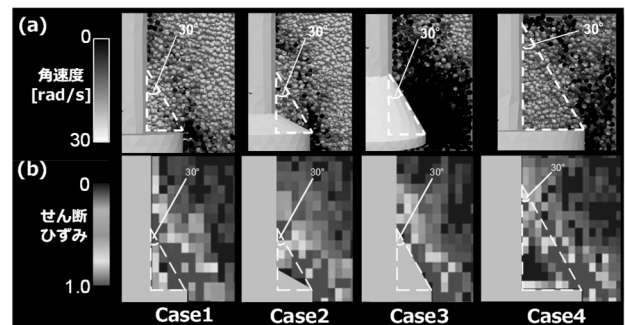


図-13 リブ直上の高密度領域の傾斜角度と Case3 のリブ傾斜角の比較：(a) 本研究，(b) Kido et al.⁵⁾

した時点では、すべてのケースにおいてリブ直上に接触力が集中している様子が観察された。この傾向は、図-7 に示されたリブ直上での支圧抵抗が引抜き後期において最も大きくなっているという結果とも一致している。つまり、引抜きの進行に伴い、引抜き抵抗力に寄与する主要な接触力成分およびその作用位置が、リブ側面からリブ直上へと遷移していると考えられる。

このような接触力の空間的遷移から、帯鋼補強土壁の安定性に対する補強材リブの力学的役割を解釈できる。

すなわち、壁高に対して変位が微小な段階では、リブの支圧抵抗は十分に発現せず、ある程度の変形を伴って初めてリブの支圧抵抗が顕在化すると言える。これは、多少変形を許容して力学的に安定する帯鋼補強土壁ならではの安定化原理を裏付ける微視的な特性と考えられる。

一方、本研究では、特にリブの力学的役割に焦点を置くために最小限の粒子数で解析を行ったが、実際はシャフト（実際の帯状補強材では平滑部分）の全域に粒子が接触した条件で解析することが望ましい。この場合、引抜き抵抗力に対するシャフトの摩擦抵抗の寄与度が相対的に大きくなるため、このような条件においてもリブの力学的役割が見られるかは今後検討していく必要がある。

4. 考察

以上の結果に基づき、リブ付き補強材におけるリブ高さおよびリブ傾斜角が引抜き抵抗特性に与える影響について考察を行う。図-15 に引抜き抵抗力の発現メカニズムの模式図を示す。リブ傾斜角に関する考察はリブ傾斜角が最も大きい Case1 と最も小さい Case3 を用いた。

4.1 リブ高さが引抜き抵抗特性に与える影響

はじめに、図-15(1)に示す引抜き初期に着目する。図-7 に示される部位別の引抜き抵抗力の内訳より、リブ側面における周面摩擦力が引抜き抵抗性に大きく寄与する。さらに、図-14 の接触力コンター図において Case4 はリブ側面の表面積が Case1 よりも大きいため、接触力の分布も広がり、それに伴いリブ側面の引抜き抵抗性も増大していることが確認された。このことから、補強材全体の引抜き抵抗性も大きくなる。

次に、図-15(2)に示す引抜き最終に着目すると、図-7 よりリブ側面の引抜き抵抗性は引抜き変位に対してほぼ一定で推移する一方、リブ直上の抵抗力が増加していることが確認される。これにより、引抜き最終ではリブ直上の引抜き抵抗性がより寄与する。また、図-12 に示す角速度コンター図では、Case1 および Case4 においてリブ直上にくさび型の高密度領域が形成されており、これらの領域が剛体的に補強材とともに移動する様子が観察された。この挙動により、リブ直上における引抜き抵抗性が一層増大する。加えて、図-14 の接触力コンター図からも、Case4 ではリブ側面の表面積が大きいこと、リブ直上の接触力の分布も広範囲となり、それに伴ってリブ直上の引抜き抵抗性が大きくなり、結果として補強材全体の引抜き抵抗性が Case1 に比べて大きくなる。

4.2 リブ傾斜角が引抜き抵抗特性に与える影響

はじめに、図-15(1)に示す引抜き初期に着目する。図-14 に示す接触力コンター図において、Case1 はリブ側面の高さが Case3 よりも大きいため、接触力の分布がより広範囲に及んでいることが確認された。また、図-7 に示す

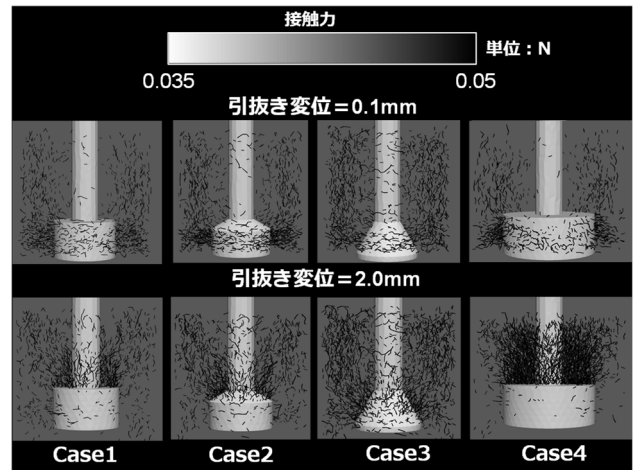


図-14 接触力コンター図

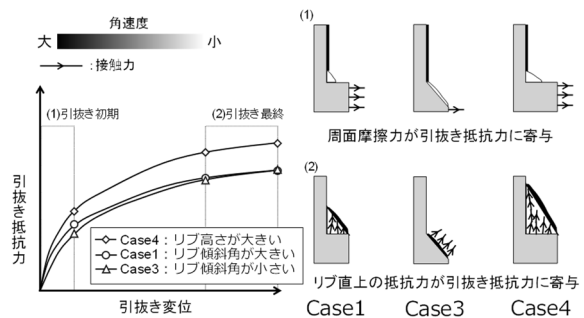


図-15 引抜き抵抗力の発現メカニズムの模式図

部位別の引抜き抵抗性の結果より、Case1 におけるリブ側面の引抜き抵抗性が Case3 よりも大きいことが明らかとなっている。これらの結果から、引抜き初期においてはリブ側面の摩擦力の寄与が大きく、補強材全体としての引抜き抵抗性が高くなる。

次に、図-15(2)に示す引抜き最終に着目する。図-12 の角速度コンター図から、Case1 ではリブ直上にくさび型の高密度領域が形成されていることが確認されたのに対し、Case3 では粒子がリブ傾斜角に沿って回転運動を示す傾向が見られた。さらに、図-13 に示すリブ直上の高密度領域の傾斜角を Case3 のリブ傾斜角と比較すると、Case1 の高密度領域の傾斜は、Case3 のリブ傾斜角と一致していた。このことから、Case1 における高密度領域は引抜きの進行とともに、補強材の一部のように挙動し、結果的に補強材全体の幾何形状が Case3 と類似する。

したがって、引抜き最終においては、リブの傾斜角による差異が緩和され、補強材全体の引抜き抵抗性は傾斜角に依らず同程度になる。

5. 結論

本研究では、リブ近傍の相互作用に着目し、Kido et al.⁵⁾ が実施した等方圧縮条件下での補強材引抜き実験を参考に、三次元 DEM 解析モデルを構築し、補強材の引抜き

特性を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 引抜き初期はリブ側面の周面摩擦力に基づく抵抗力が、引抜き最終はリブ直上の引抜き抵抗力が補強材全体の引抜き抵抗力に対してより寄与する。
- (2) リブ傾斜角が大きい補強材は、引抜きの進行に伴い、リブ直上に剛体の高密度領域が形成され、補強材の一部のように挙動するため、補強材全体の幾何形状がリブ傾斜角に依らず類似するため、最終的な引抜き抵抗力は同程度になる。
- (3) 引抜きの進行に伴い、接触力の主たる作用位置がリブ側面からリブ直上へと遷移していることが確認された。したがって、リブの支圧抵抗は引抜き初期段階では十分に発現せず、ある程度の変形を伴って初めて顕在化すると考えられる。これは、多少変形を許容して力学的に安定する帯鋼補強土壁ならではの安定化原理を裏付ける微視的な特性と考えられる。

また、本研究によって得られたリブ付き補強材の引抜き抵抗特性に関する微視的な知見は、従来の試験では困難であったリブ周辺の力学的メカニズムを解明することができた。そのため、本研究結果は帯鋼補強土壁の性能評価法の高度化と設計法の合理化に寄与する重要な基礎データになると期待される。

一方で、本研究は、Kido et al.⁵⁾が実施した実験を参考に、補強材一本のみを対象とした解析モデルを構築したが、現実の補強土壁では、補強材が水平方向に複数敷設している。したがって、今後は水平方向に複数の補強材を敷設した条件下での引抜き解析を行う必要がある。また、非球形粒子の使用や転がり摩擦の導入など、実際の粒子と補強材の相互作用をより厳密なモデル化を行う必要がある。

参考文献

- 1) Kuwano, J., Miyata, Y., and Koseki, J.: Performance of reinforced soil walls during the 2011 Tohoku earthquake, *Geosynthetics International*, Vol.21, No.3, pp.179-196, 2014.
- 2) 公益社団法人地盤工学会：補強土入門，丸善出版，1999.
- 3) 小川憲保：現場引抜き実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，pp.221-226，1997.
- 4) 呉屋港，鈴木素之，郷司航平，新田武彦，松永崇史，志村直紀，永倉秀典：アルミ棒積層体に対する帯鋼補強材の引抜き特性と引抜きに伴う粒子挙動の観察，*公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集地盤と建設*，Vol.41，No.1，2023.
- 5) Kido, R., Sawamura, Y., Kimura, K., and 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.
- 6) 樋口貴也，青木恒，石原研而，塚本良道，榊尾孝之：大型可動壁模型土槽におけるジオグリッド補強砂の補強効果，*土木学会論文集*，III-47，No.624，pp.135-144，1999.
- 7) 野々山栄人，宮田吉壽，福本一真：透明土を用いたジオグリッド補強基礎地盤の支持力可視化実験と考察，*ジオシンセティックス論文集*，Vol. 19，pp.231-236，2004.
- 8) 弘中淳市，平井貴雄，大谷順：X線CTスキャナを用いた土-ジオグリッド間の相互メカニズムに関する検討，*ジオシンセティックス論文集*，第35巻，pp.129-134，2020.
- 9) Cundall, P. A., and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 10) 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，*公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集地盤と建設*，Vol.41，No.1，2023.
- 11) Smilauer, V., Angelidakis, V., Catalano, E., Caulk, R., Chareyre, B., Chèvremont, W., Dorofeenko, S., Duriez, J., Dyck, N., Elias, J., Er, B., Eulitz, A., Gladky, A., Guo, N., Jakob, C., Kneib, F., Kozicki, J., Marzougui, D., Maurin, R., Modenese, C., Pekmez, G., Scholtès, L., Sibille, L., Stransky, J., Sweijen, T., Thoeni, K., and Yuan, C.: Yade documentation, in *The Yade Project*, 3rd ed., 2021, <http://yade-dem.org/doc/>.
- 12) Ando, E., Hall, S.A., Viggiani, G., Desrues, J. and Besuelle, P.: Grain-scale experimental investigation of localised deformation in sand: a discrete particle tracking approach, *Acta Geotechnica*, Vol.7, pp.1-13, 2012.

(2025年6月17日 受付)

Three-Dimensional DEM Analysis of Pullout Resistance Characteristics of Reinforcements under Isotropic Compression Condition

Takeru TAMAOKI¹, Ryunosuke KIDO²

1 Master's students, Hiroshima University, Civil and Environmental Engineering

2 Associate Professor, Hiroshima University, Civil and Environmental Engineering

Abstract

In evaluating the performance of reinforced soil walls using steel strips, it is essential to understand the variation in pullout resistance characteristics and their underlying mechanisms according to the deformation level. In this study, a three-dimensional discrete element method (DEM) model was developed to simulate pullout behavior of reinforcement under isotropic compression conditions. The results revealed that, as the pullout displacement progressed, the location of the contact forces contributing to pullout resistance transitioned from the rib sides to the area directly above the ribs. Furthermore, it was confirmed that the high-density zone formed above the ribs behaved integrally with the reinforcement during pullout, and ultimately, the overall geometric configuration of the reinforcement became similar regardless of differences in rib inclination angles.

Key words: reinforcement pullout, 3D-DEM, Isotropic Compression Condition, pullout resistance