

## 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

Pull-out Characteristics of Strip Steel Reinforcement against Aluminum Bar Laminates and  
Observation of Associated Particle Behavior

呉屋 港<sup>1)</sup>, 鈴木 素之<sup>2)</sup>, 郷司 航平<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) 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

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 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

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

帯鋼補強土壁におけるリブ付き補強材の補強効果とその範囲を定量的に把握するには、補強材の引抜き特性とそれに伴う土粒子挙動を可視化することが重要である。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装置を開発したうえで、補強材の引抜き特性について調べた。また、引抜き試験中のアルミ棒積層体に対して PIV 解析を試み、補強材の引抜きに伴う粒子挙動の可視化を行った。結果として、引抜き力、引抜き抵抗は引抜き変位が約 10mm に達するまで急激に上昇し、その後ほぼ一定になること、底部土圧は上載圧に比べて低い値が測定されること、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、リブ周辺で粒子の変位量が相対的が大きかったこと等がわかった。

キーワード：帯鋼補強材、引抜き特性、アルミ棒積層体、PIV、粒子変位 (IGC : E-02, E-12)

### 1. はじめに

近年、社会基盤設備は土木構造物・施設の老朽化、巨大地震や異常気象への防災対策等の問題に対峙している。それを受けて、現在、土木構造物の変形性能の定量的な評価を求める動きが加速している。そのなかで、補強土工法の一つの帯鋼補強土壁は護岸、橋台、河川等の土留めとして供用されている。帯鋼補強土壁工法は、壁面工に作用する土圧合力に対して盛土材内に敷設した補強材の引抜き抵抗力によってつり合いを保ち、土留め壁の効果を発揮するものである<sup>1)</sup>。帯鋼補強材を用いた土中引抜き試験は数多く行われており、種々の盛土材に対する補強材の引抜き特性が明らかにされている<sup>2)3)</sup>。また、帯鋼補強土壁工法が導入後、着実に使用実績が積み上げられ、信頼度の高い工法<sup>4)</sup>として認知されてきた。一方、近年、数値シミュレーションや画像解析の技術が発達してきたにもかかわらず、土と補強材の相互作用による補強効果が発揮される範囲などは必ずしも解明されていないのが現状である。今後、性能設計のさらなる追求や維持管理ならびに災害復旧の際に構造物を修復あるいは強

化するケースが想定されるため、上記のことはもとより、補強材の引抜き挙動とそれに伴う土粒子挙動を可視化して、そのメカニズムを定量的に把握しておくことが重要である。

そのことをふまえて、研究の状況を鑑みると、従来の土中引抜き試験では土層内の様子を観察することは困難なため、補強材の引抜きによる土粒子の挙動は明らかにされていない。地盤模型実験では X 線マイクロ CT<sup>5)</sup>、画像解析、PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法) が用いられている。古くは、梅崎ら<sup>6)</sup>により補強材の 2 軸圧縮・引抜き試験の画像解析が行われ、補強材の引抜き中のアルミ棒粒子の変位挙動が明らかにされている。また、最近では船橋ら<sup>7)</sup>によりアルミ棒積層体からなる基礎の支持力実験で PIV を用いた変形解析が行われている。

そこで、本研究では土粒子中の補強材の引抜き特性ならびに引抜きに伴う土粒子挙動を明らかにすることを目的として、土粒子に見立てたアルミ棒積層体に対する帯鋼補強材の引抜き実験を行い、得られた結果に基づいて、アルミ棒積層体に対する補強材の引抜き特性を検討した。

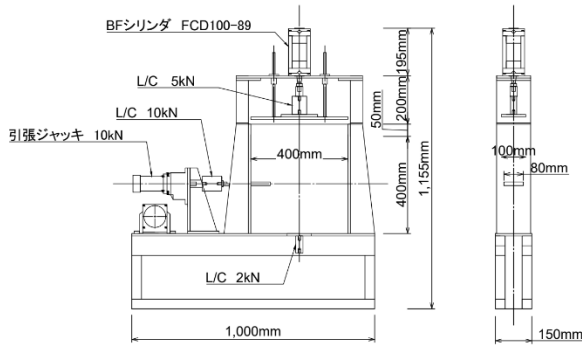


図-1 アルミ棒積層体引抜き実験装置 (断面図)

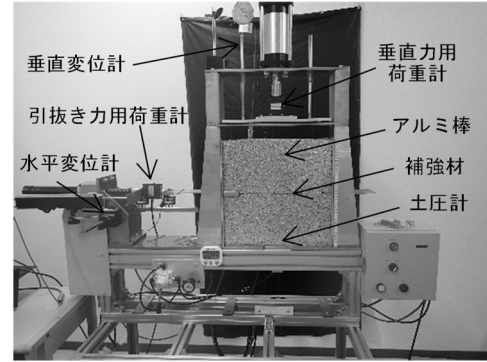


写真-1 アルミ棒積層体引抜き実験装置 (全体)

また、引抜き実験中に撮影したアルミ棒積層体内の画像を用いて PIV 解析を行い、補強材の引抜きに伴う粒子挙動の定量的評価を行った。本文では、その結果と考察について述べる。

## 2. 試験方法

### 2.1 引抜き試験装置

本研究では新たに開発したアルミ棒積層体に対する帯鋼補強材の引抜き試験装置を用いた。実験装置を図-1に、その全体写真を写真-1に示す。本装置は、コンプレッサーに接続したペロフラムシリンダーを介して、任意の上載圧を載荷し、同時に引張ジャッキにより最大10mm/minまでの任意の引抜き速度で、一次元圧縮条件下で補強材を引き抜くことが可能である。本実験装置は土槽（長さ400mm、奥行100mm、高さ400mm）、補強材、引抜き力および垂直力載荷装置、応力集中低減カバー（長さ60mm、幅95mm、高さ19mm）（写真-2）、各計測器、データロガー等から構成される。本装置は二次元補強材引抜き試験装置ともいえる、正面を常時開放とし、背面はアルミ棒敷き詰め作業のために取り外し可能な抑え板を設置している。引張ジャッキと補強材の結合部に引抜き力用荷重計と水平変位計を設置している。ペロフラムシリンダーに取り付けた載荷板により、積層体上面に上載圧を一樣に載荷し、垂直力用荷重計で垂直力を測定する。また、載荷板の垂直変位を測定するために垂直変位計を設置している。土圧計（長さ100mm、幅80mm）を底面中央に設置し底面土圧を測定する。本装置の特徴をまとめると以下のとおりである。

- (1) 写真-1に示すようにアルミ棒を盛土内の土粒子に見立て、土槽内に約46,600本敷き詰める。アルミ棒積層体地盤内の単位体積質量は約2240 kg/m<sup>3</sup>である。
- (2) 積層体上部の載荷板はペロフラムシリンダーに接続されており、アルミ棒積層体の変形により、垂直方向に変位する。
- (3) 補強材は積層体の中央（底面から高さ200mm）に水

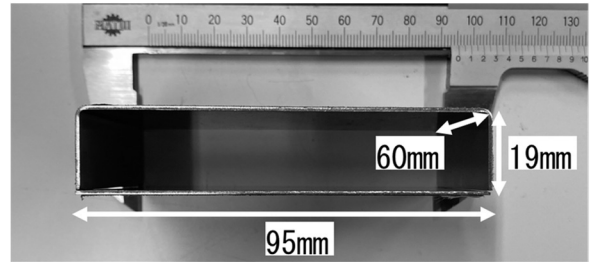


写真-2 応力集中低減カバー

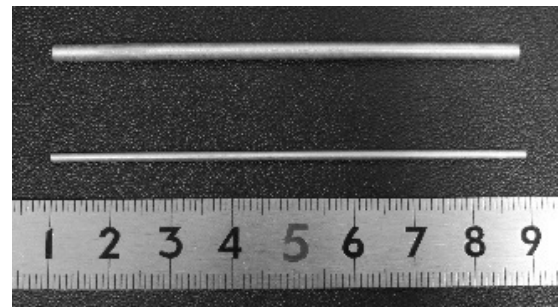


写真-3 直径1.6mm（下）と3.0mm（上）のアルミ棒

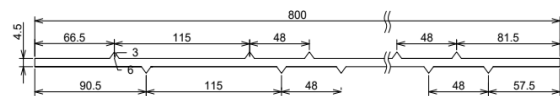


図-2 補強材の寸法

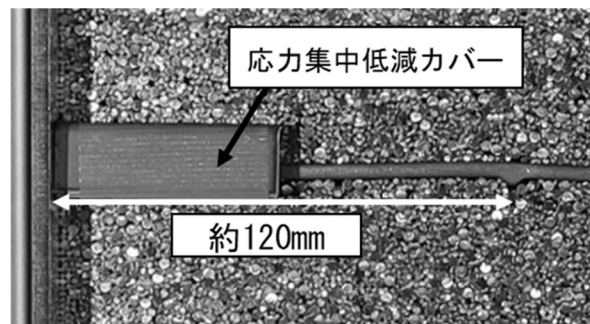


写真-4 補強材と応力集中低減カバーの敷設状況

平に敷設される。補強材は土槽側面の補強材の引抜き口から引き出され、スクリージャッキに剛結して、モーターにより変位制御により引き抜かれる。なお、引抜き口は前方と後方の2箇所あり、実験に使用する補強材長に応じて後方引抜き口を開放するか、締め切るかによって、補強材の全面もしくは部分敷設の条件で実験が可能である。

- (4) 計測項目は引抜き力、垂直力、水平引抜き変位、垂直変位、底面土圧である。各計測器はデータロガーに接続されており、1秒ごとに測定、記録することが可能である。
- (5) 応力集中低減カバーは、引抜きに伴う引抜き口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て設置したものである。上下の蓋を合わせて箱状にし、土槽内の前方引抜き口に補強材を挟むように設置した。

## 2.2 アルミ棒および補強材

本研究で使用したアルミ棒を写真-3に示す。アルミ棒は長さ8.0 mm、直径1.6 mmおよび3.0 mmの2種類がある。アルミ棒積層体に粒径加積曲線が豊浦砂の粒径加積曲線と平行になるように直径1.6 mm、3.0 mmの2種類を質量比で3:2の割合で混合して使用した<sup>7)</sup>。

本実験で使用したリブ付き補強材を図-2に示す。補強材の寸法は厚さ4.5 mm、長さ800 mmで、リブ幅6 mm、高さ3 mmである。また、本実験は全面敷設条件で行った。アルミ棒積層体を用いる利点<sup>8)</sup>として、以下に示すことがあげられる。

- (1) アルミ棒を積層しても、その側面部は壁面で支えることなく自立するため、試料と壁面体の摩擦が皆無である。
- (2) 側面からアルミ棒を容易に観察できるため、PIVなどの画像解析手法を利用した土槽内の変位・変形挙動の観察が可能である。
- (3) アルミ棒はマスとして中密な砂に似た強度・変形特性を呈するため、一般的な土の二次元モデルとみなすことができる。
- (4) 実験を繰り返し行っても粒度特性が変化しない、すなわち、破碎や細粒分の流出がない。また、実験の再現性を確保するため、アルミ棒を実験ごとに積みなおし密度の偏りがないように配慮した。

## 2.3 実験手順

実験手順は次のとおりである。

- (1) 直径1.6 mmと3.0 mmのアルミ棒を質量比3:2の割合で混合する。
- (2) 混合したアルミ棒を土槽高さ中央付近まで敷き詰める。
- (3) 応力集中低減カバーと補強材を敷設する。その際に、補強材のリブが応力集中低減カバーおよび引抜き口に触れないようアルミ棒を敷き詰めて補強材敷設高

表-1 実験条件

補強材	鋼製帯状補強材
盛土材	アルミ棒
敷設方法	全面敷設
補強材敷設長	340 mm
アルミ棒直径	1.6 mm, 3.0 mm
アルミ棒質量比	1.6 mm:3.0 mm=3:2
引抜き速度	1 mm/min
最大引抜き変位	40 mm
上載圧	20, 40, 60, 80, 100 kPa



写真-5 撮影環境



写真-6 撮影の状況

さを調整する。また、可能な限り補強材と積層体の隙間をなくす。補強材は、土槽内のリブの数が変化しないように、一つ目のリブの位置が引抜き口から約120 mmの位置に来るように敷設する(写真-4)。

- (4) 補強材の上にアルミ棒を積層体高さ400 mmまで再度敷き詰める。また、積層体上面が平坦になるように均す。
- (5) 押さえ板を外し、密詰め後の積層体に対して $\sigma_v=3$  kPa程度で予備圧縮し、これを初期状態として各測定項目の値を記録する。
- (6) 所定の $\sigma_v$ の値まで10 kPaごとに上昇し、そのときの載荷板の垂直変位dを記録する。
- (7) 所定の $\sigma_v$ を載荷し、20分間一次的に圧縮する。
- (8)  $\sigma_v$ を載荷した状態で、引抜き速度1 mm/minで補強材



を引き抜く。

- (9) 補強材の引抜き変位  $\delta$  が 40 mm に達した時点で引抜きを終了する。

## 2.4 実験条件

実験条件を表-1 にまとめている。補強材の敷設方法は全面敷設で、補強材敷設長は土槽長さから応力集中低減カバーの長さ 60 mm を差し引いた 340 mm である。アルミ棒は直径 1.6 mm, 3.0 mm の 2 種類で行い、アルミ棒質量比 3 : 2 の割合で混合し、土層に充填する。引抜き速度は 1 mm/min とし、最大引抜き変位は 40 mm である。上載圧は 20, 40, 60, 80, 100 kPa の 5 パターンで引抜きを行う。

## 2.5 PIV 解析

### 2.5.1 撮影方法

撮影環境を写真-5 に、撮影の方法を以下に示す。

- (1) 土槽背後および側面からの光の影響を低減するために土層背面、実験室内の窓に暗幕を設置する。
- (2) 引抜き試験における圧縮終了後、実験室内を消灯し、暗幕で遮光した状態で照明を点灯する。このとき土層に影がかからないようにする。
- (3) 一眼レフカメラ (Canon EOS Kiss X10i : 記録画素数 2400 万 (6000×4000) pixel) を三脚に据え付け、水平に設置する。
- (4) 写真-6 に示すように、レンズ外側のゆがみの影響を

小さくするため、図に示すように撮影画面を 9 分割にした中央部分に土層がおさまるようにカメラの位置を(装置前面から水平距離: 約 1.6 m, 高さ: 約 1.2 m)に調整し、カメラのピントを合わせる。

- (5) カメラのスタビライザーを OFF にし、撮影条件をマニュアルフォーカス, F 値=4.0, ISO 感度=100, シャッター速度=1/125, 撮影間隔を 1 分間, 撮影時間を 40 分間とする。
- (6) 撮影時のカメラ操作による手ぶれを回避するため、パソコンによるリモート撮影を行う。
- (7) 引抜き開始前の画像を 1 枚撮影し、合計 41 枚の写真を撮影する。

### 2.5.2 PIV 解析手順

本研究では, MathWorks 社がリリースする MATLAB の画像解析ソフトウェア PIVlab を用いて PIV 解析を行った。PIV 解析手順を次に示す。

- (1) 引抜き実験の写真を 41 枚選択し、画像内の解析範囲を指定する。
- (2) 補強材と応力集中低減カバーの部分にマスクをかけて解析範囲から除外する。
- (3) 検査領域を設定 (64=8×8 pixel) し、すべての画像に対して解析を開始する。
- (4) 画像内のメジャーの長さからピクセルサイズを測定する。1 pixel=0.28 mm である。
- (5) アルミ棒の移動速度の範囲設定により誤ベクトルの

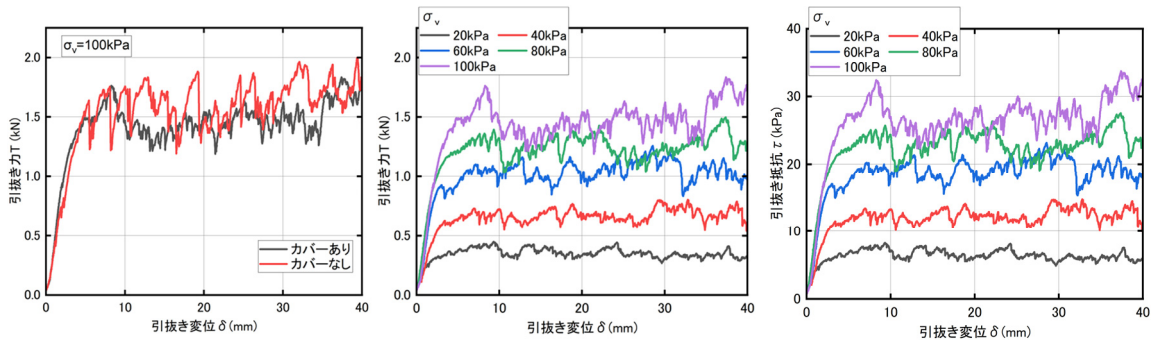


図-3 応力集中低減カバー有無による引抜き力の違い

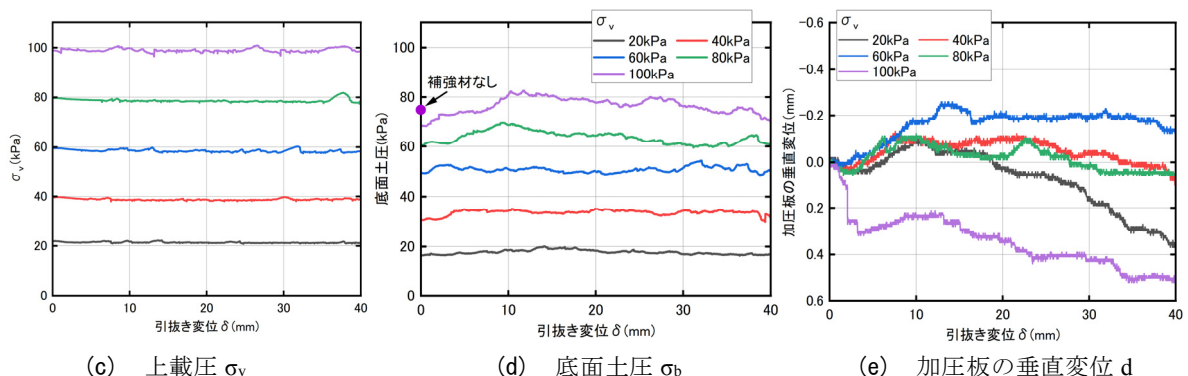


図-4 アルミ棒積層体に対する補強材の引抜き特性

除去を行う。粒子の移動速度は補強材の引抜き速度である 1 mm/min (=0.016 mm/s) を最大とする。

### 3. 引抜き実験結果と考察

#### 3.1 応力集中低減カバーの有無の影響

図-3 に応力集中低減カバーの有無による引抜き挙動の比較を示す。応力集中低減カバーは、引抜きに伴ってアルミ棒が前方引抜き口に寄せ集まり、粒子密度の増加とそれに伴う過剰応力の発生を防ぐ目的で設置したものである。図の縦軸に引抜き力  $T$ 、横軸に引抜き変位  $\delta$  を取っている。この実験は  $\sigma_v=100$  kPa の下で実施した。応力集中低減カバー無しの場合では  $T$  が急激に低下する挙動がみられた。これは前方引抜き口にアルミ棒が引っ掛かったため  $T$  が上昇し、その引っ掛かりが解消されて、 $T$  が急激に減少したものと考えられる。応力集中低減カバーを敷設すると、前方引抜き口にかかる応力アルミ棒の引っ掛かりがほとんどなくなり、 $T$  が安定した。

#### 3.2 アルミ棒積層体に対する補強材の引抜き特性

図-4 (a)~(e) にアルミ棒積層体に対する補強材の引抜き挙動を示す。図-4 (a) は各  $\sigma_v$  に対する  $T$  と  $\delta$  の関係である。 $\sigma_v=20$  kPa のケースでは  $\delta=9$  mm で最大引抜き力  $T_{\max}=0.5$  kN となった。また、ピーク後はほぼ横ばいの挙動を示している。 $\sigma_v=40$  kPa のケースでは  $\delta=3$  mm まで  $T$  が急激に上昇し、 $T=0.6$  kN となり、 $T_{\max}=0.8$  kN となった。 $\sigma_v=60$  kPa のケースでは  $\delta=3$  mm まで  $T$  が急激に上昇し、 $T=0.9$  kN となり、 $T_{\max}=1.3$  kN であった。 $\sigma_v=80$  kPa のケースでは  $\delta=5$  mm で  $T=1.2$  kN となり、 $T_{\max}=1.5$  kN であった。 $\sigma_v=100$  kPa のケースでは  $\delta=5$  mm で  $T=1.5$  kN となり、 $T_{\max}=1.8$  kN となった。全てのケースで、 $\delta=5$  mm 以下で  $T$  が急激に上昇し、その後は変動しながらほぼ一定を保った。また、 $\sigma_v$  が大きいほど  $T$  が大きくなることが示された。

図-4 (b) は各  $\sigma_v$  に対する引抜き抵抗力  $\tau$  と  $\delta$  の関係である。 $\tau$  は  $T$  を補強材上下面積 (全面積法) で除したものであり、以下の式で表される。

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

ここに、 $A$ : 補強材面積である。 $\tau$  は  $T$  と同様の挙動をとる。全てのケースにおいて、 $\delta=5$  mm までで  $\tau$  のピーク値  $\tau_{\max}$  (これを引抜き摩擦強さと称す) を示し、小さな引抜き変位で  $\tau$  を発揮した。 $\tau_{\max}$  は  $\sigma_v=20$  kPa から  $\sigma_v$  の大きさ順に 8.7 kPa, 14 kPa, 23 kPa, 28 kPa, 34 kPa となった。

図-4 (c), (d) は上載圧  $\sigma_v$ - $\delta$  関係、底面土圧  $\sigma_b$ - $\delta$  関係である。 $\sigma_v$  はすべてのケースでほぼ一定に載荷されたことが確認できる。引抜き中の  $\sigma_b$  を平均した値は  $\sigma_v=20$  kPa から  $\sigma_v$  の大きさ順に 18 kPa, 34 kPa, 50 kPa, 63 kPa, 74 kPa となり、 $\sigma_v$  に比べて低い値となった。補強材と応力低減カバーを敷設せずに  $\sigma_v=100$  kPa を載荷した場合 (図

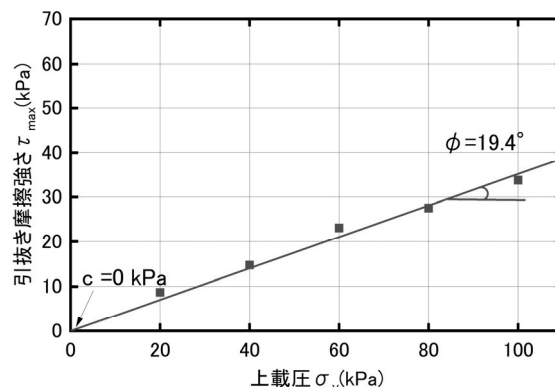


図-5 引抜き摩擦強さと上載圧の関係

中の●) でも、 $\sigma_b=73$  kPa で補強材敷設時の  $\sigma_b$  と変わらないことから、粒子と壁面の間の摩擦や粒子間のアーチ効果によって土圧が軽減されたと考える。 $\sigma_b$  と  $\sigma_v$  の比は  $\sigma_v$  が大きいほど小さくなっている。これはアルミ棒と壁面の間に生じる摩擦力に起因し、 $\sigma_v$  が大きいほどアルミ棒粒子と壁面の接触面に垂直に作用する力が大きくなり、摩擦力が大きくなることを示唆している。

図-4 (e) は加圧板の垂直変位  $d$ - $\delta$  関係である。 $\sigma_v=20$  kPa のケースでは、 $d$  は減少 (膨張) したが、 $\delta=10$  mm から収縮に転じている。なお、 $d$  に関しては、収縮を正としている。 $\sigma_v=40$  kPa では一度膨張し、引抜き終了までに徐々に収縮する挙動を取った。 $\sigma_v=60$  kPa のケースは他のケースに比べて最も膨張する挙動を取ったが、引抜き終了付近で収縮側に変位している。そのため、他のケース同様に引抜きに伴う収縮するものと考えられる。 $\sigma_v=80$  kPa では、 $\delta=25$  mm で膨張したが、 $\sigma_v=40$  kPa とおむね同様の挙動を示した。 $\sigma_v=100$  kPa では、 $\delta=3$  mm で約 0.3 mm 収縮した。この理由として、土層後方の引抜きに伴うアルミ棒の流出によるものだと考える。その後  $\delta=10$  mm まで約 0.1 mm 膨張し、その後引抜きに伴い収縮した。

#### 3.3 引抜き摩擦強さと上載圧の関係

図-5 に  $\tau_{\max}$  と  $\sigma_v$  の関係を示す。 $\tau_{\max}$  と  $\sigma_v$  の間には、 $\sigma_v=20 \sim 100$  kPa では相関が認められる。粘着力  $c$  をゼロとしたとき、引抜き摩擦角  $\phi$  は  $19.4^\circ$  (摩擦係数 0.352) となった。

### 4. PIV 解析結果と考察

#### 4.1 引抜きに伴う粒子移動速度の変化

図-6 (a)~(c) に  $\sigma_v=20, 60, 100$  kPa の場合の引抜きに伴い、1 分前の位置から算出した粒子移動速度の大きさを示す。図中の白丸 (○) は補強材リブ位置を示している。引抜き開始直後 ( $\delta=2$  mm, 3mm) と引抜き途中 ( $\delta=14$  mm, 30 mm, 38 mm) の粒子ベクトルである。応力集中低減カバーと補強材部分にかけたマスク部分は赤で示されている。いずれの  $\sigma_v$  においても、引抜き開始直後は、

粒子の移動範囲は広く、その範囲は補強材を中心に層状に広がっていることがわかる。上面の約 5 cm の位置で粒子が約 0.36 mm 移動していることがわかる。また、 $\delta=2 \sim 4$  mm において、土層上部の後方で、粒子が大きく変位していることがわかる。これは、引抜きに伴い、後方引抜き口からの粒子の抜け落ちによって上部後方で粒子が移動したためと考えられる。引抜きが進行するにつれて、粒子の移動は補強材周辺に限定され、リブ周辺での粒子変位が比較的大きいことがわかった。このことから、リブは引抜き抵抗力の発現寄与があることが確かめられた。また、補強材周辺の粒子移動は引抜き終了時まで続いた。

#### 4.2 引抜き前後の PIV 解析結果

図-7(a)~(c)、図-8(a)~(c) にそれぞれ引抜き前後の  $\sigma_v=20, 60, 100$  kPa の PIV 結果を示す。これは引抜き開始時から引抜き終了時のベクトルの総和で示される。矢印は粒子の移動方向を表し、見やすさのためにベクトルサイズは 8 倍に拡大している。図-7(a)~(c) は水平成分の移動量を表現したコンター図である。青~緑が引抜き方向の移動を、黄~赤は引抜きと反対方向の移動を表している。補強材周辺では粒子は引抜き方向に移動しているが、 $\sigma_v$  が高いほど、補強材上面側の後方部では引抜き方向と反対の方向に移動していた。これは後方引抜き口からアルミ棒が抜け落ちたためと考えられる。また、補強材下

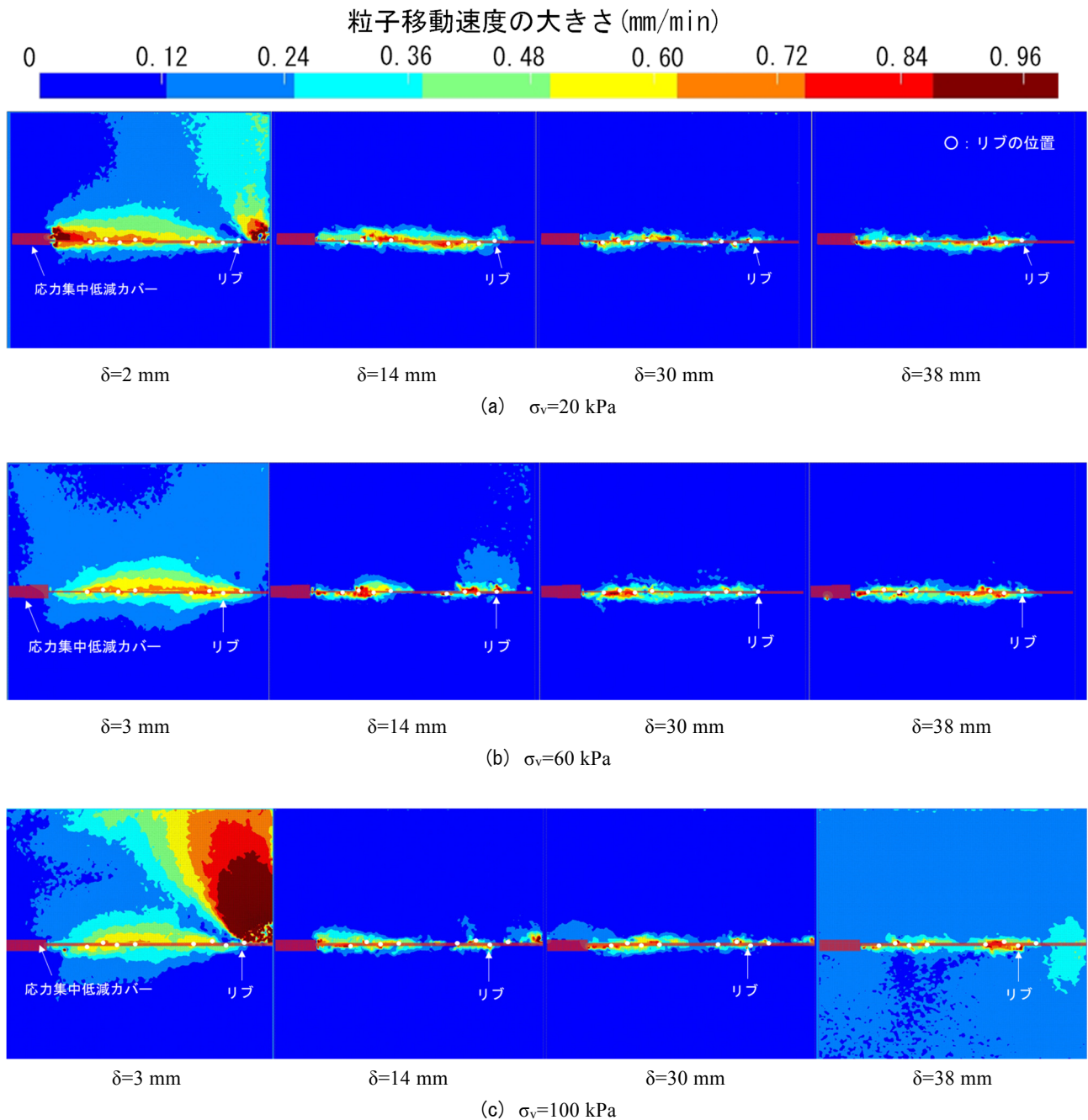


図-6  $\sigma_v=20, 60, 100$  kPa の 1 分間隔の PIV 解析結果



面側では、 $\sigma_v$ が高いほど、引抜き方向と反対方向に移動していた。これは補強材周辺の粒子が引抜きに伴い前方に移動し、それに押される形で下側の粒子が後方へと移動したためと考える。 $\sigma_v$ が高いほど、その傾向が顕著なことから、補強材周辺の粒子移動が大きいことみられる。

図-8(a)~(c)は鉛直成分の移動量を表現したコンター図である。青~緑が上方の移動、黄~赤は下方の移動を表している。補強材の上面側では粒子は後方でアルミ棒の抜け落ちによって下方に移動しており、前方部で上方に移動している。補強材の下面側において、図-8(a)の $\sigma_v=20$  kPa では場所によらず粒子は上方に移動しているが、図-8(b), (c)の $\sigma_v=60, 100$  kPa では粒子は後方部で上方に、前方部で下方に移動していた。前方引抜き部では、粒子が上方に移動しており、引抜きに伴って補強材周辺の粒子に押されて移動したためと考えられる。また、図-8(a)~(c)の上面側の前方部の青色の増加より、 $\sigma_v$ が高いほど、前方部上方へと移動する粒子数が増えていた。こ

れは補強材周辺の粒子移動により、押し上げられたためと考えられる。図-7(c)と同様に、上載圧が高いほど、補強材周辺の粒子移動が大きいとみられる。土層上部後方で粒子の抜け落ちは模型実験特有のものと考えられる。これにより土層上部後方で粒子密度が低下し、抜け落ちが起きない状態に比べ引抜き力が低下している可能性がある。

## 5. 結論

本研究では、アルミ棒積層体に対する帯鋼補強材の引抜き試験を実施し、補強材の引抜き特性を検討した。また、補強材の引抜きに伴う粒子挙動を観察し、PIVによる画像解析を行った。本研究から得られた知見を以下に示す。

(1)  $\sigma_v=100$  kPa において、応力集中低減カバーを設置し

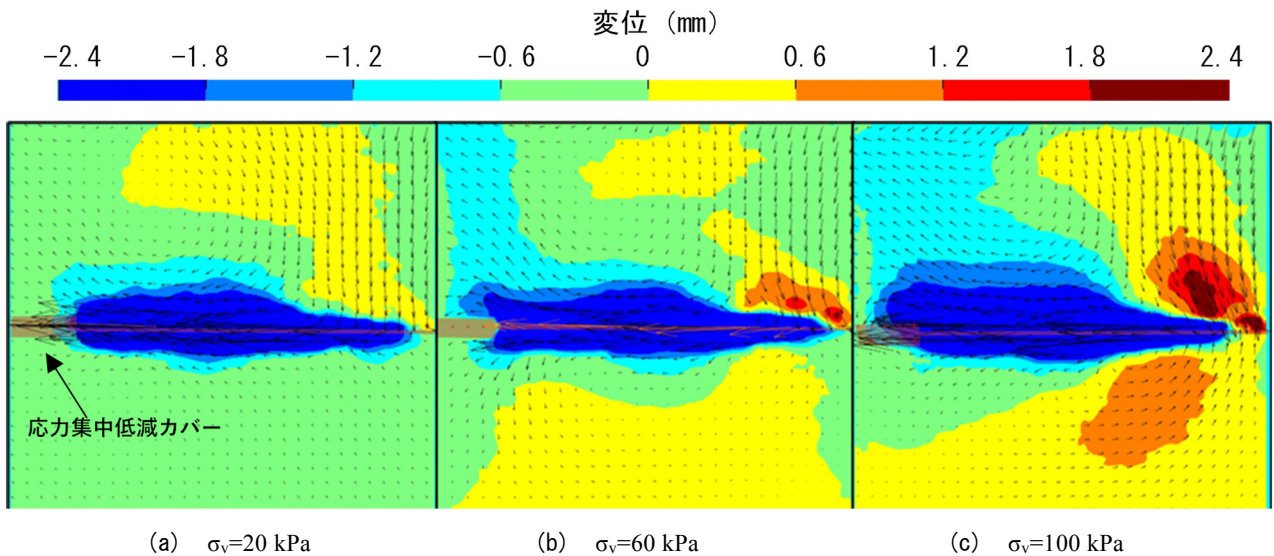


図-7  $\sigma_v=20, 60, 100$  kPa の引抜き前後の PIV 解析結果 (水平成分コンター)

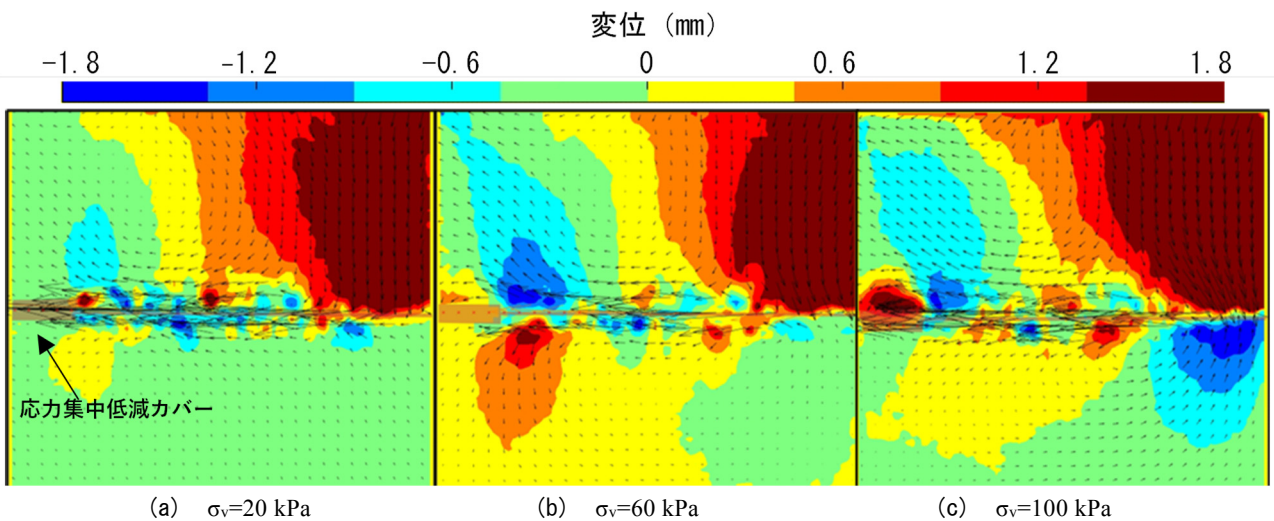


図-8  $\sigma_v=20, 60, 100$  kPa の引抜き前後の PIV 解析結果 (鉛直成分コンター)

たことにより、補強材の引抜きに伴う前方引抜き口でのアルミ棒の引っ掛かりが解消され、引抜き力が安定した。

- (2) 引抜き力および引抜き抵抗は、 $\sigma_v=20 \sim 100 \text{ kPa}$  のすべてのケースで、 $\delta=5 \text{ mm}$  以下で急激に上昇し、その後は変動しながらほぼ一定を保ったことから、小さい引抜き変位で引抜き抵抗は最大値を示すことがわかった。
- (3) アルミ棒積層体の引抜き摩擦強さと上載圧の関係には直線関係が認められ、粘着力をゼロとしたとき、引抜き摩擦角は  $19.4^\circ$  (摩擦係数 0.352) となった。
- (4) PIV 解析により、補強材の引抜きに伴う粒子挙動の定量評価を行った。すべてのケースで  $\delta=2 \sim 4 \text{ mm}$  において、後方引抜き口からの粒子の抜け落ちにより土層上部後方の粒子が大きく変位していた。また、引抜き開始直後は粒子の移動範囲は広く、補強材から楕円状に広がり、引抜きが進行すると粒子移動はほとんど補強材周辺に限定され、特にリブ周辺での移動が比較的大きいことがわかった。これはリブが引抜き力の増加に寄与したためと考えられる。
- (5) 引抜き前後の PIV 解析より、粒子は補強材周辺では引抜き方向に移動している。また、補強材下面側での粒子は、補強材周辺の粒子移動に押される形で引抜き方向と反対の方向に移動していた。補強材上面側での粒子は補強材周辺の粒子移動に押し上げられる形で上方へ移動していた。上載圧が高いほど、その傾向が顕著といえる。

#### 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の一環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次第である。

#### 参考文献

- 1) 地盤工学会編：地盤工学用語辞典，pp.418-419，2006.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 小川憲保：補強土壁工法 FAQ50 理工図書，pp.6-7，2004.
- 5) Kido, R., Sawamura, K., 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.
- 6) 梅崎健夫，河村隆，落合英俊：補強材の引抜きに伴う拘束圧の増加特性と補強メカニズムのモデル化，ジオシンセティックス論文集，第 20 巻，pp.241-248，2005.
- 7) 船橋知希，赤木寛一，桐山貴俊，齋藤亮，今田耕太郎，江崎晃一，佐藤慶太：PIV を用いたアルミ棒積層体地盤における基礎の支持力実験に関する大変形解析，第 15 回地盤工学会関東支部研究発表会，2018.
- 8) 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.

(2023 年 6 月 19 日 受付)