

アルミ棒積層体に対する帯鋼補強材の引抜き特性と
PIVを用いた上載圧変化による粒子挙動の観察

山口大学大学院 学生会員 ○呉屋 港
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 郷司 航平
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

帯鋼補強土壁におけるリブ付き補強材の補強メカニズムを深く理解するには、補強材の引抜き挙動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。著者らは、アルミ棒積層体を用いた補強材の引抜き実験方法を開発したうえで、帯鋼補強材の引抜き特性について検討している¹⁾。また、引抜き試験中の画像に対して Particle Image Velocity (以下、PIV とする) 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ている²⁾。本文では、これら^{1,2)}に新しい結果を加えて考察した。

2. 実験装置および試験手順

アルミ棒積層体引抜き実験装置を図-1 に示す。本装置は土槽(長さ400 mm, 奥行100 mm, 高さ400 mm)、補強材、引抜き荷重および上載荷重装置、応力集中低減カバー(長さ60 mm, 幅95 mm, 高さ19 mm)、各計測器、データロガー等から構成されている。帯鋼補強材を図-2 に示す。補強材寸法は、厚さ4.5 mm, 長さ800 mm, 幅80 mmで、リブ幅6 mm, リブ高さ3 mmである。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。本実験では直径1.6 mm, 3.0 mm の2種類を重量比で3:2の割合で混合して使用した³⁾。

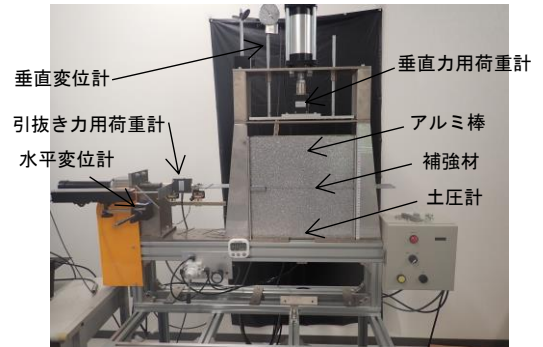


図-1 アルミ棒積層体引抜き実験装置

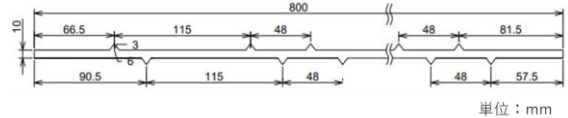


図-2 補強材の寸法

表-1 実験条件

補強材	帯状鋼製補強材
盛土材	アルミ棒
敷設方法	全面敷設
補強材敷設長	340mm
アルミ棒直径	1.6mm, 3.0mm
アルミ棒重量比	1.6mm:3.0mm=3:2
引抜き速度	1mm/min
最大引抜き変位	40mm
上載圧	20, 40, 60, 80, 100kPa
計測項目	引抜き力, 垂直力, 水平引抜き変位, 垂直変位, 底面土圧



図-3 撮影環境

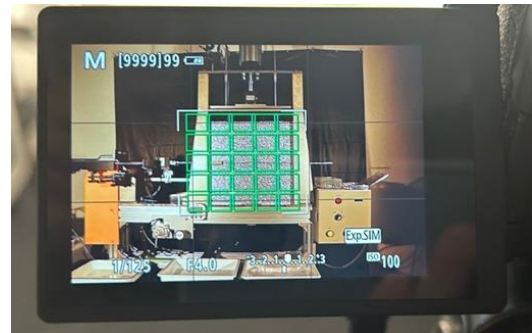


図-4 撮影の状況

キーワード 補強土工法, 引抜き試験, アルミ棒
連絡先 〒755-8611 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

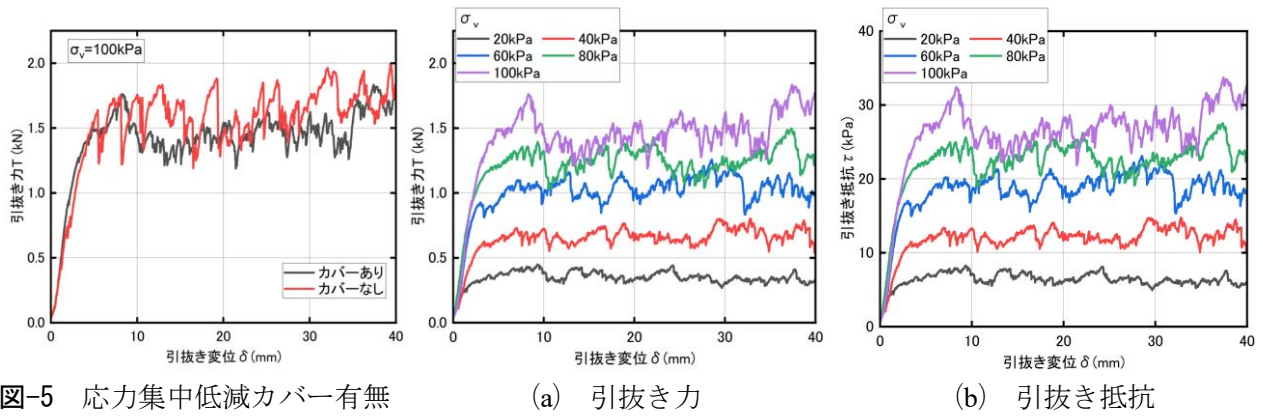


図-5 応力集中低減カバー有無による引抜き力の違い

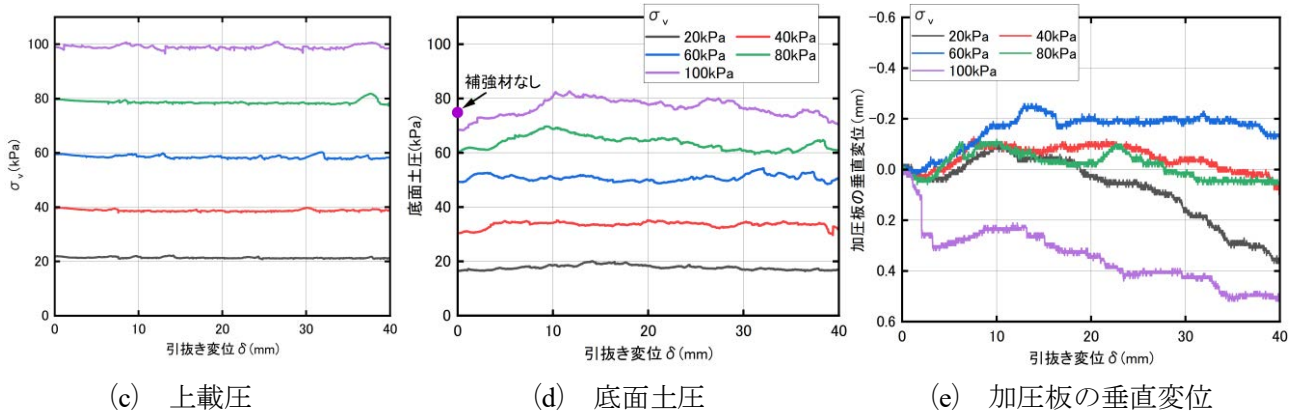


図-6 アルミ棒積層体に対する補強材の引抜き特性

実験手順は次のとおりである。①アルミ棒を上述のとおり混合する。②混合したアルミ棒を土槽高さ中央まで敷き詰める。③応力集中低減カバーと補強材を敷設する。④アルミ棒を土槽高さ 400 mm まで敷き詰める。⑤所定の上載圧 σ_v を載荷し、20 分間一次的に圧密する。⑥ σ_v を載荷した状態で、引抜き速度 1 mm/min で補強材を引き抜き、引抜き変位が 40 mm に達した時点で引抜きを終了する。

実験条件を表-1 にまとめている。補強材の敷設長は土槽長から応力集中低減カバーの長さを差し引いた 340 mm である。 σ_v は 20, 40, 60, 80, 100 kPa の 5 パターンで引抜き試験を行った。計測項目は表-1 に記載のとおりである。

撮影環境を図-3 に示す。引抜き試験における圧密終了後、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。このとき土槽内に影がかからないようにする。一眼レフカメラを三脚に据え付け、水平に設置する。レンズ外側のゆがみの影響を小さくするため、図-4 に示すように、撮影画面を 9 分割にした中央部に土槽が収まるようにカメラの位置を調整し(装置前面から水平距離：約 1.6 m、高さ：約 1.2 m)、ピントを合わせる。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、シャッタースピード=1/125、撮影間隔を 1 分間、撮影時間を 40 分間とした。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った。

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による引抜き力の違い

図-5 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。図の縦軸に引抜き力 T、横軸に引抜き

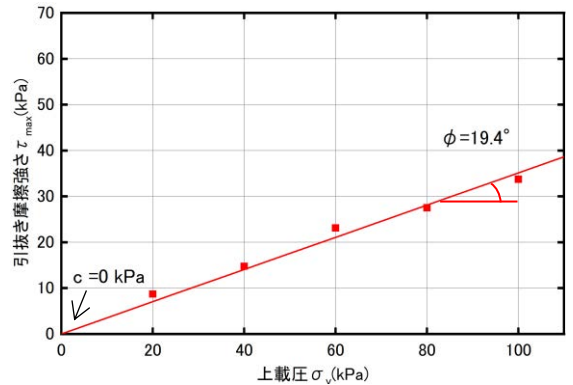
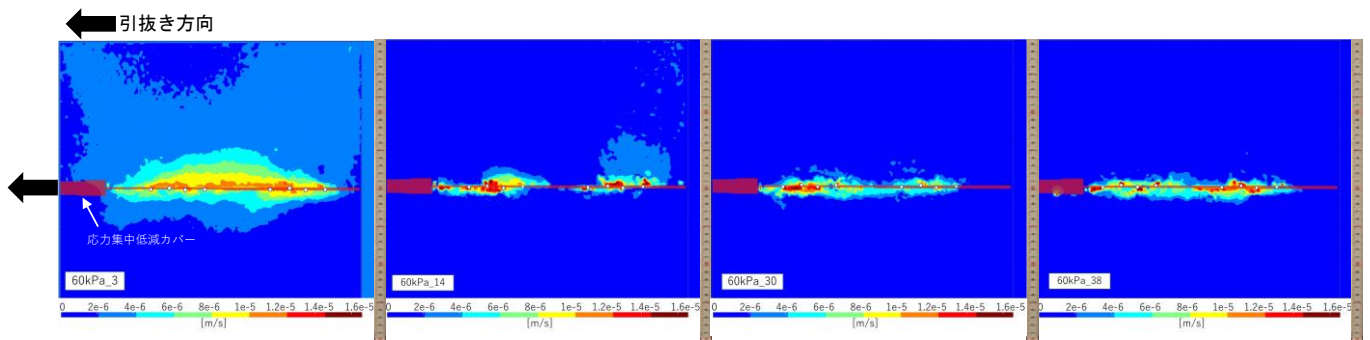


図-7 引抜き摩擦強さと上載圧の関係

変位 δ 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引抜き口にアルミ棒が引っ掛かり T が上昇し、その引っ掛かりが解消されたときに T が急激に減少する挙動を示した。応力集中低減カバーを敷設したところ、アルミ棒の引っ掛かりがほとんどなくなり、引抜き力が安定した。

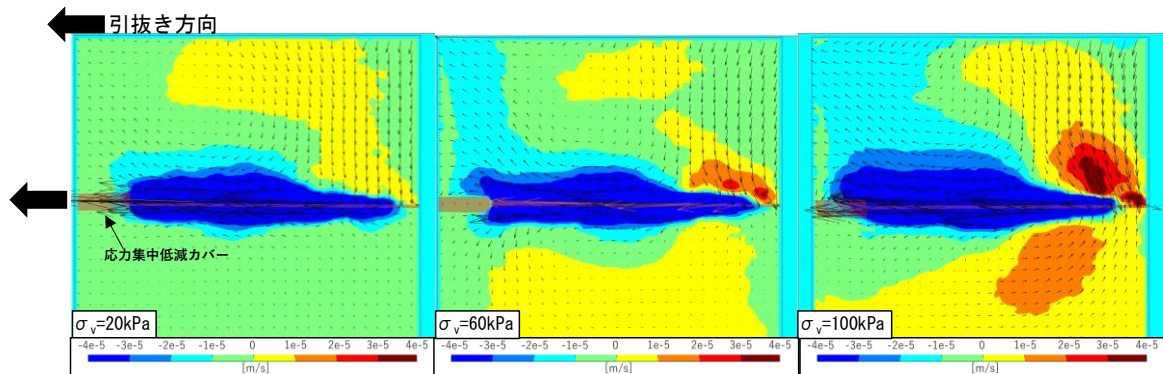
3.2 アルミ棒積層体に対する鋼製帯状補強材の引抜き特性

図-6(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-6(a), (b)より、T および引抜き抵抗 τ (T を補強材断面積の2倍で除したもの) は、引抜き開始後急上昇し、 δ が約 10 mm 以上になると変動しながら横ばいになっていることがわかる。また、T- δ 関係、 τ - δ 関係はともに σ_v が高いほど上位にくる。図-6(c)より、 σ_v はほぼ一定に载荷していることがわかる。図-6(d)の底面土圧は各 σ_v の 80%程度の高さであった。補強材がない場合での底面土圧は補強材がある場合よりもいくぶん高い(図中の●)ことから、粒子と壁面と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ためと考える。図-6(e)より、加圧板の垂直変位は $\sigma_v=20\sim 80$ kPa の4ケースでは引抜きに伴い収縮した。



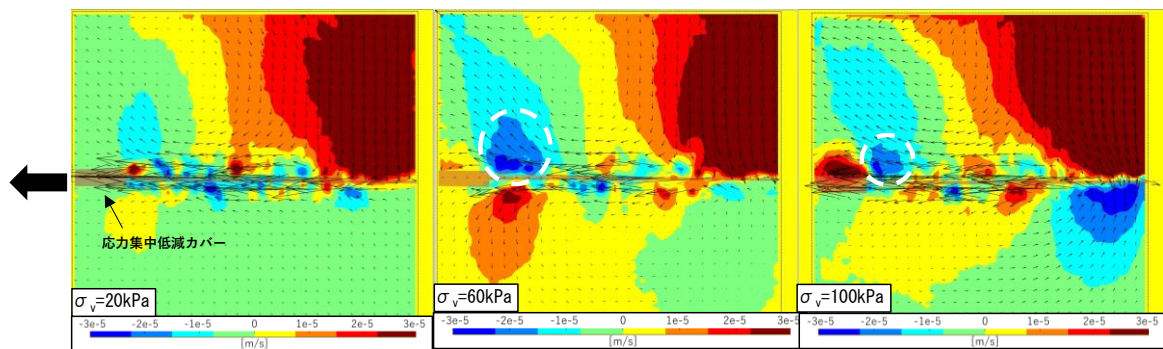
(a) 3 mm 引抜き時 (b) 14 mm 引抜き時 (c) 30 mm 引抜き時 (d) 38 mm 引抜き時

図-8 上載圧が 60 kPa のケースの 1 分間隔の PIV 結果



(a) $\sigma_v=20$ kPa (b) $\sigma_v=60$ kPa (c) $\sigma_v=100$ kPa

図-9 $\sigma_v=20, 60, 100$ kPa のケースの引抜き前後の PIV 結果 (水平成分コンター)



(a) $\sigma_v=20$ kPa (b) $\sigma_v=60$ kPa (c) $\sigma_v=100$ kPa

図-10 $\sigma_v=20, 60, 100$ kPa のケースの引抜き前後の PIV 結果 (鉛直成分コンター)

3.3 引抜き摩擦強さと上載圧の関係

図-7に引抜き摩擦強さ τ_{\max} と σ_v の関係を示す。 τ_{\max} は各 σ_v 時の最大引抜き抵抗として、 σ_v が高くなるほど大きくなった。粘着力 c をゼロとすると、引抜き摩擦角 ϕ は 19.4° (摩擦係数 0.352) となった。

4. PIV 解析結果

4.1 引抜きに伴う粒子移動の経時変化

図-8に $\sigma_v=60$ kPa のケースにおける1分間隔の補強材引抜きに伴う粒子移動のPIV結果を示す。図-8(a)より、引抜き開始直後、粒子の移動範囲は広く、その範囲は補強材から楕円状に広がり、上面では約5cmの位置で0.36mmほど移動していることがわかる。また、図-8(b)~(d)より、リブ周辺の粒子の移動が相対的に大きいことから、リブによる引抜き力の増加に寄与したものと考えられる。なお、補強材周辺の引抜きによる粒子移動は引抜き終了まで発生していた。

4.2 引抜き前後のPIV解析結果

図-9、図-10に $\sigma_v=20, 60, 100$ kPa の引抜き前後のPIV結果を示す。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-9(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、 σ_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方向に移動していた。図-10(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部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-10(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-10(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(図中の破線の円)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ていると考えられる。また、図-10(a)~(c)の上面側の前方部の青色の増加より、 σ_v が高いほど前方部上方へと移動する粒子数が増えたことがわかった。

5. まとめ 本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

①応力集中低減カバーの設置により、引抜き口でのアルミ棒の引っ掛かりによる影響が低減し、引抜き力が安定した。②引抜き力、引抜き抵抗は引抜き変位が約10mmまで上昇し、その後変動しながらほぼ横ばいになり、底面土圧は上載圧に比べて低い値が計測された。③アルミ棒積層体の引抜き摩擦強さと上載圧の間には直線関係が認められ、引抜き摩擦角は 19.4° (摩擦係数 0.352) となった。④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、リブ周辺での変位量が比較的大きかった。⑤粒子は、補強材周辺では引抜き方向に移動しているが、補強材上面側の後方部では引抜きと反対方向に移動した。⑥粒子は、補強材上面側では前方部で上方、後方部で下方に移動し、 σ_v が高いほど前方部上方へと移動する粒子数が増えた。

謝辞: 本研究は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) 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, 2023(投稿中).
- 2) 呉屋港, 鈴木素之, 郷司航平, 石丸太一, 川野拓未: PIVを用いたアルミ棒積層体に対する鋼製帯状補強材の引抜きに伴う粒子挙動の観察, 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).
- 3) 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, Vol.56, No.10, pp.12-15, 2008.