

論文 Original Paper

鉄筋挿入工と柱状構造体を組み合わせたバットレス工法の
引抜抵抗に関する検討前田和徳*¹・橋本隆雄*²・岩津雅也*³Study on the pull-out resistance of the buttress construction method
combining soil nails and columnar structuresKazunori Maeda*¹, Takao Hashimoto*² and Masaya Iwatsu*³

Abstract: Soil nails are widely used to strengthen slopes and to reinforce existing retaining walls to prevent the sliding of moving soil blocks in the event of relatively shallow sliding on slopes. However, when applying soil nails to reinforce an existing retaining wall, the existing structure is often adjacent to the retaining wall, and the reinforcing material inserted into the ground crosses the private land boundary line, so it is difficult to install soil nails. There may be restrictions. Therefore, the authors devised a new composite construction method that combines soil nails and columnar structures to enhance the deterrent effect. In this study, we conducted a pull-out experiment using a composite construction method and found that it has a very high deterrent effect.

Key words: masonry retaining wall, soil nailing, columnar structure, embankment, Pull-out test

1. はじめに

地山補強土工法における鉄筋挿入工は、比較的短い（補強材長は一般的に2～5m程度）棒状補強材を地山に多数挿入する。補強材の周囲にはモルタルやセメントミルクを充填して、地山と補強材の相互作用によって斜面の安定性を高めるものである。

鉄筋挿入工は、斜面の比較的浅いすべりに対して移動土塊の滑動を抑止する斜面補強や既設の擁壁補強等¹⁾で広く適用されている。しかし、既設擁壁の補強として鉄筋挿入工を適用する場合は、写真-1に示すように既設の建造物が隣接している場合が多く、地山に挿入する補強材が図-1のように民地境界線を越えるため、設置条件に制限を受けることがある。そこで、筆者らは地山側に挿入する補強材が挿入制限を受ける場合に対して、鉄筋挿入工と柱状構造体を組み合わせ、抑止効果を高めた新たなバットレス工法を考案した。本研究はバットレス工法の性能照査のため石積擁壁の石材背面地山の補強を想定して、造成した盛土で鉄筋挿入工とバットレス工法の抑止効果を比較検証するため、引抜実験を行った。この結果、バットレス工法が非常に高い抑止効果²⁾がある

ことが明らかとなった。引抜抵抗力に関しては、補強材と柱状構造体との接合部に局所的な引抜力が発生し、柱状構造体の保護管の強度依存も高いことがわかった。

2. バットレス工法

柱状構造体は、図-2に示すように石積擁壁の天端から地山側へ民地境界線を越えない一定の距離を有した位置から鉛直方向に直径φ100～200mmの孔を空けて形成する。ただし、掘削時には孔壁が崩れる可能性があるため保護管を設置し、石積擁壁側から補強する鉄筋挿入後に孔内に鉄筋を挿入してセメント系グラウト材を充填する。この補強材は図-3に示すように地山挿入側先端



写真-1 民地境界線の制限

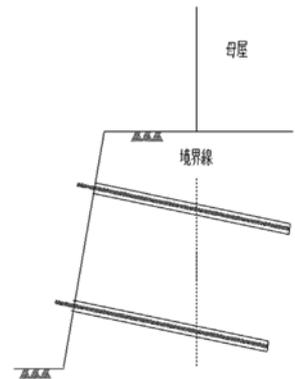


図-1 補強イメージ

*¹岡部株式会社所属 技術開発部土木・仮設G部長*²国士館大学 理工学部まちづくり学系 特任教授*³フリー工業株式会社 東京支店 技術営業部長

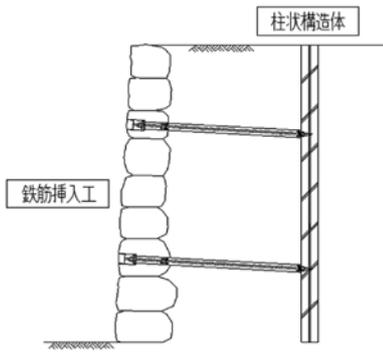


図-2 バットレス工法概要

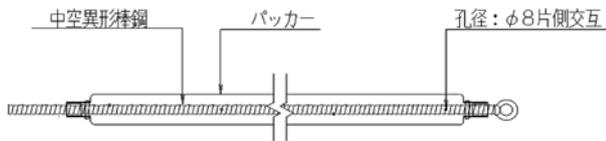


図-3 鉄筋挿入工の補強材 (バットレス工法)

にリング状の部材を有し、柱状構造体に挿入する鉄筋をリング内を通し、柱状構造体と鉄筋挿入工の補強材が結合させる構造である。これにより、擬似的擁壁³⁾が構築され、鉄筋挿入工の補強材長さを短くした石積擁壁の補強が可能となる。

3. 引抜実験概要

3.1 土質試験と地盤支持力

実験地盤として現地で掘削した火山灰質粘性土を用い、写真-2に示す斜面勾配1:0.6の盛土を造成した。

現地採取試料の土質試験結果を表-1、粒径加積曲線を図-4に示す。盛土後の乱さない試料での三軸圧縮試験の結果は、図-5に示すように内部摩擦角 $\phi = 15.6^\circ$ 、粘着力 $C = 35.3\text{kN/m}^2$ である。地盤支持力は図-6のり面平坦部(1から4の位置)において、簡易動的貫入試験を実施し、結果は図-7に示すように換算N値2.8程度である。

3.2 施工手順

本実験は石積擁壁を想定しているため鉄筋挿入工の補強材打設角度は水平に近い場合が多く、鉄筋挿入工のグラウトが充填できない可能性があることから、補強材にパッカー方式を採用した。バットレス工法の施工は、柱状構造体を削孔した後、孔壁が崩れないように保護管を設置する。保護管にはあらかじめ補強材が挿入できるように開口部を有した鋼製ワインディングパイプを用いた。鉄筋挿入工の位置出しは、柱状構造体と直線状になるように目視により行い、削孔した後、補強材を挿入した。補強材の先端には接合されているリング部材に貫通するように、柱状構造体側に鉄筋を挿入する。次に、鉄筋挿入工側のパッカー内にグラウトを注入して削孔した

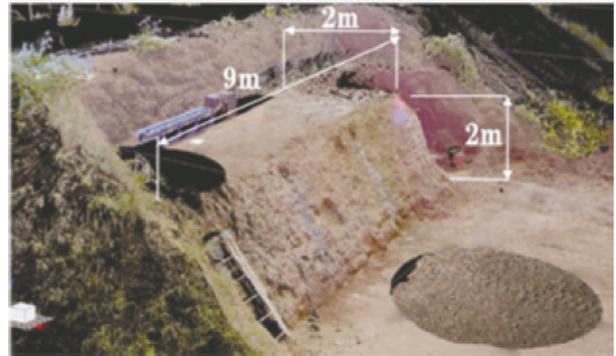


写真-2 実験盛土 (UAVによる撮影)

表-1 土質試験結果

湿潤密度	ρ_t	g/cm^3	1.506
乾燥密度	ρ_d	g/cm^3	0.9722
土粒子の密度	ρ_s	g/cm^3	2.844
自然含水比	ω_n	%	55
間隙比	e		1.93
飽和度	Sr	%	81.1
礫分		%	34.3
砂分		%	15.3
シルト分		%	28.3
粘土分		%	21.5
最大粒径		mm	37.5

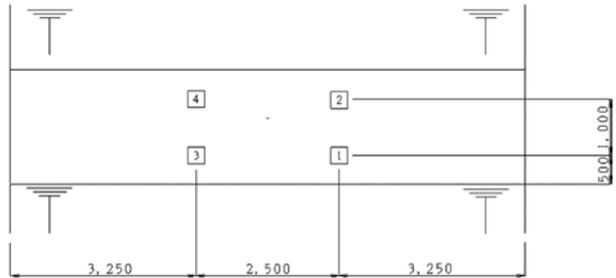


図-6 地盤支持力調査位置 (のり面平坦部)

孔を塞ぎ、グラウトが斜面側から流出するのを防いだ後、柱状構造体側にグラウトを注入する。施工手順を表-2に示す。

3.3 引抜実験

所定期間養生後、極限引抜実験を実施した。引抜実験の比較対象として、図-8のバットレス工法の下部鉄筋挿入工と同位置に施工した従来型の鉄筋挿入工とした。

柱状構造体側鉄筋にはあらかじめ図-9に示すように鉄筋挿入工と結合する周辺部に歪みゲージを取り付け、荷重段階ごとの歪みを測定した。引抜実験は写真-3、図-10に示すように、斜面側地表面の引抜による影響範囲を考慮し、鉄筋挿入工中心から半径1m程度離れた位置に反力体を設置し、センターホールジャッキにより荷重した。荷重保持時間は5分とし、5kNごと荷重が安定す

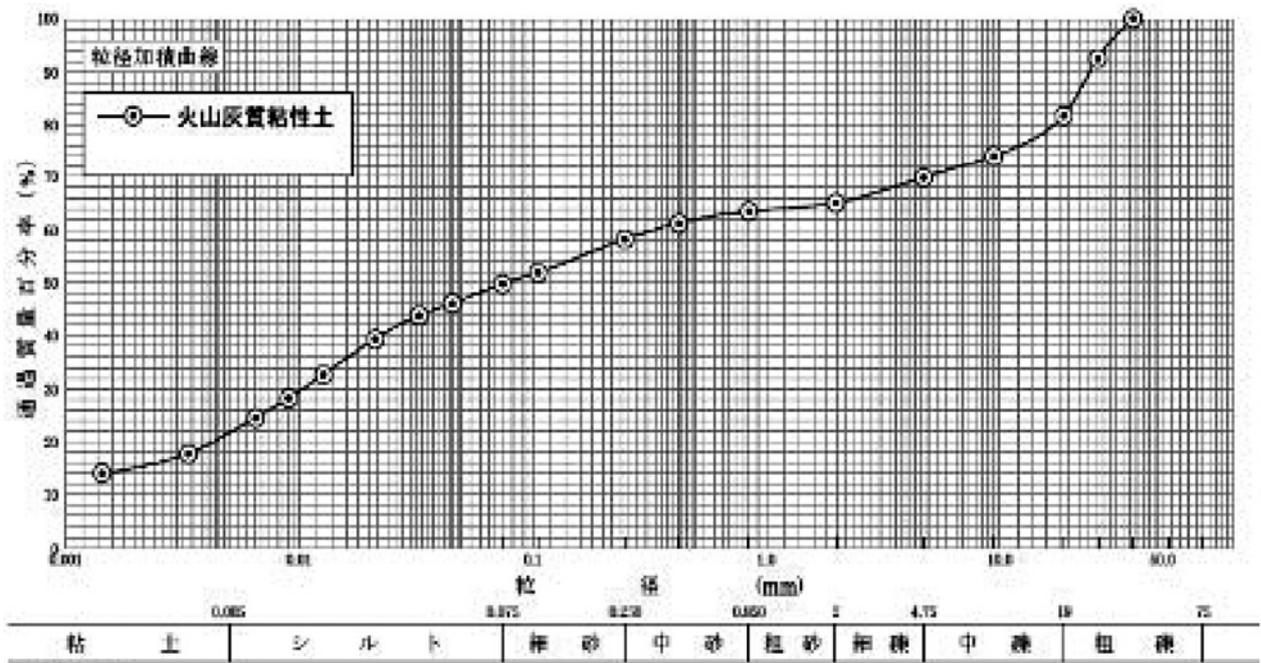


図-4 粒径加積曲線

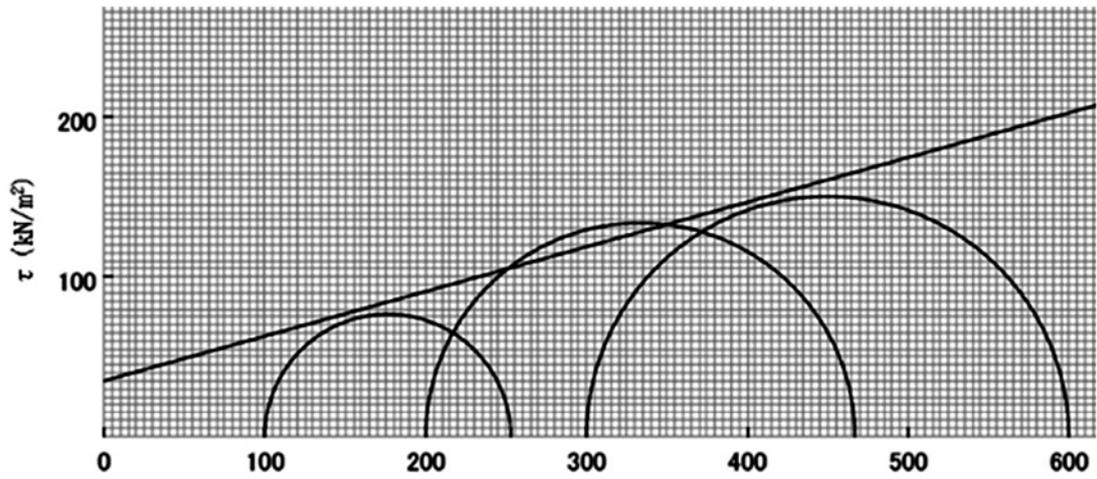
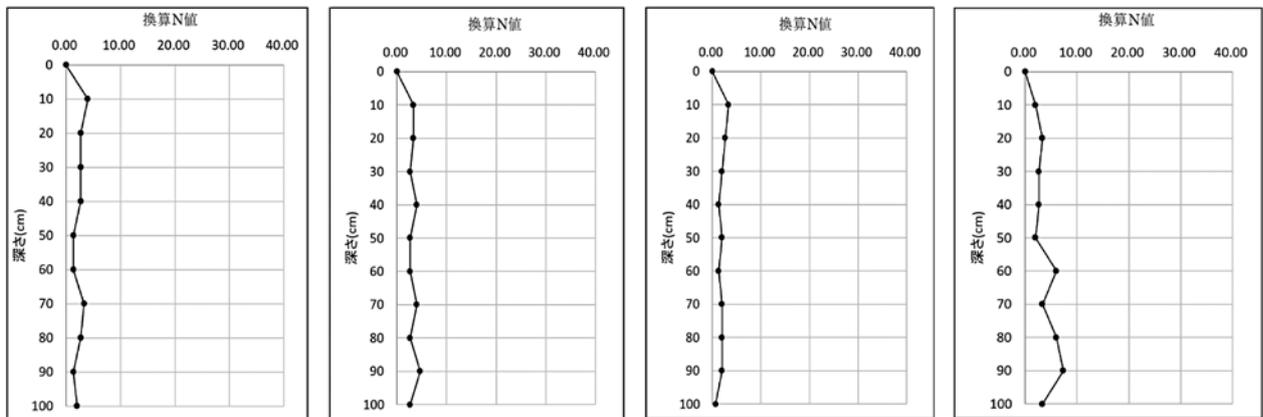


図-5 三軸圧縮試験結果



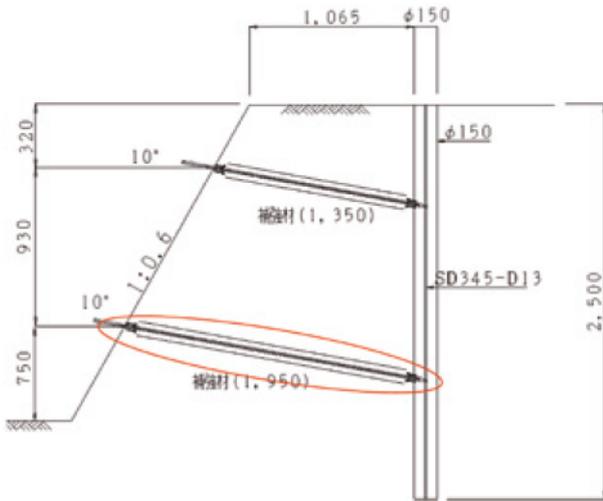
(a) No.1

(b) No.2

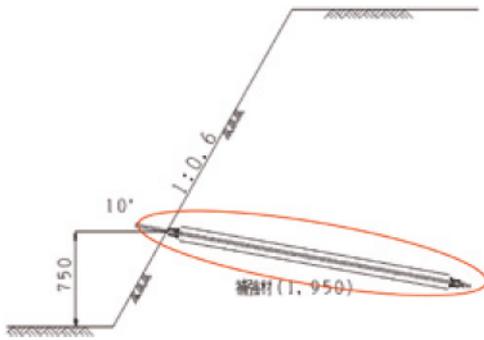
(c) No.3

(d) No.4

図-7 地盤支持力調査結果



(a) バットレス工法



(b) 鉄筋挿入工法 (従来型)

図-8 引抜実験

表-2 施工手順

<p>(1) 柱状構造体削孔</p>	<p>①のり肩から所定の位置に軽量ボーリングマシンを設置。 ②ビット径φ150mmで2,500mm削孔。 ③削孔終了後、ケーシング内部に保護管を挿入して、ケーシング材を引き抜く。</p>
<p>(2) 補強材削孔</p>	<p>①補強材は、柱状構造体と結合できるように位置決めを行う。 ②のり面側から鉄筋挿入工を施工する。施工機械はエアーオーガー(TAA=400)を用いる。 ③引抜試験対象部分として、ビット径：φ65で1,950mm削孔。※鉄筋挿入工に関しても同条件とした。</p>

<p>(3) 補強材挿入</p>	<p>①あらかじめ補強材を組み立てる。補強材は中空ネジ節棒鋼、補強材外周面に取り付けるパッカーは、主にPP製。パッカーの両端はコーキングする。 ②補強材の地山側先端はリング部材と接続し、補強材を挿入する。</p>
<p>(4) 柱状構造体鉄筋挿入</p>	<p>①柱状構造体側から鉄筋サイズD13 (1本) を挿入。 鉄筋の挿入に際し、各補強材の先端リング部材に貫通させる。</p>
<p>(5) 補強材グラウト注入</p>	<p>①グラウト配合 セメントミルク：W/C 50%、減水剤：C×2% ②注入ポンプ ダイヤフラム式ポンプ：NDS205 ③注入圧は0.2Mpa負荷確認して終了した。 ※柱状構造体側のグラウトが流出しないように鉄筋挿入工側の孔を閉塞させる。</p>
<p>(6) 柱状構造体グラウト注入</p>	<p>①グラウト配合 セメントミルク：W/C 50%、減水剤：C×2% ②注入ポンプ ダイヤフラム式ポンプ：NDS205 ③リターン確認して終了。</p>

ることを確認して載荷を行った。

変位計は図-10に示すように鉄筋挿入工の補強材頭部と反力体、またバットレス工法に関しては図-11に示すように柱状構造体頭部の水平側と鉛直側に設置して測定した。

3.4 実験結果

バットレス工法と鉄筋挿入工との荷重-変位曲線を図-12に示す。最大荷重はバットレス工法 $P_{max}=40.1kN$ 、鉄筋挿入工 $P_{max}=8.1kN$ となり、バットレス工法が5倍程度の引抜抵抗があることがわかった。なお、20kN付近で勾配が変化したのは、鉄筋挿入工の地山境界

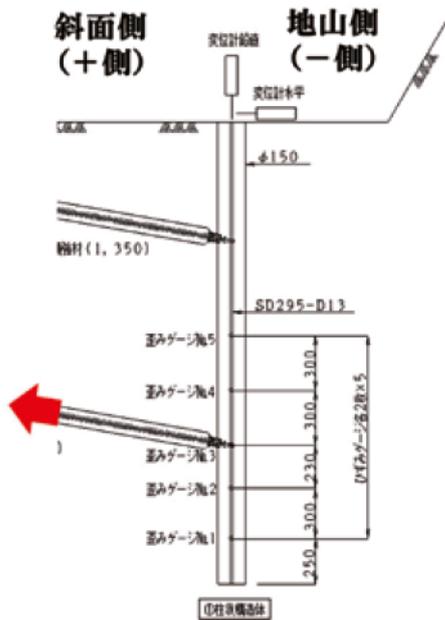


図-9 歪みゲージ位置



写真-3 実験状況

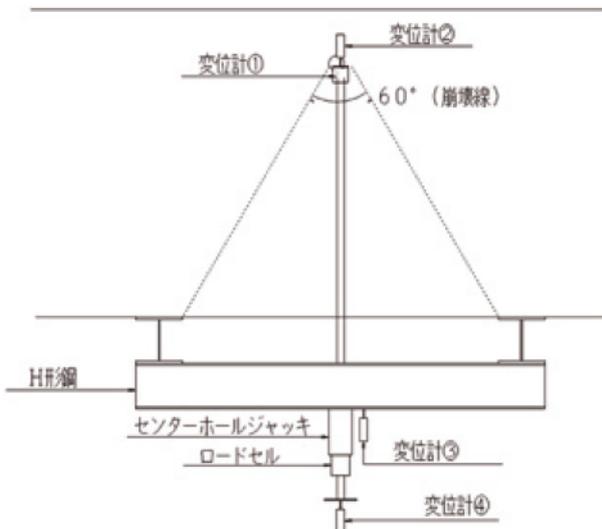


図-10 変位計取付位置 (平面図)

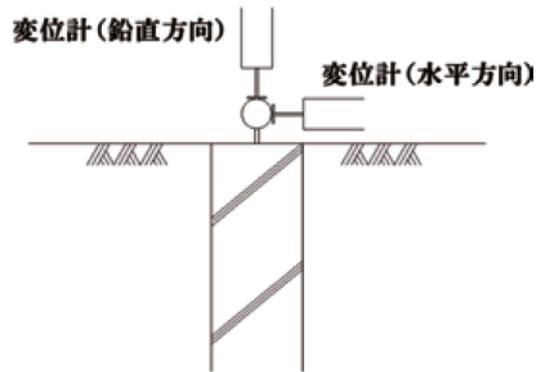


図-11 柱状構造体変位計取付位置

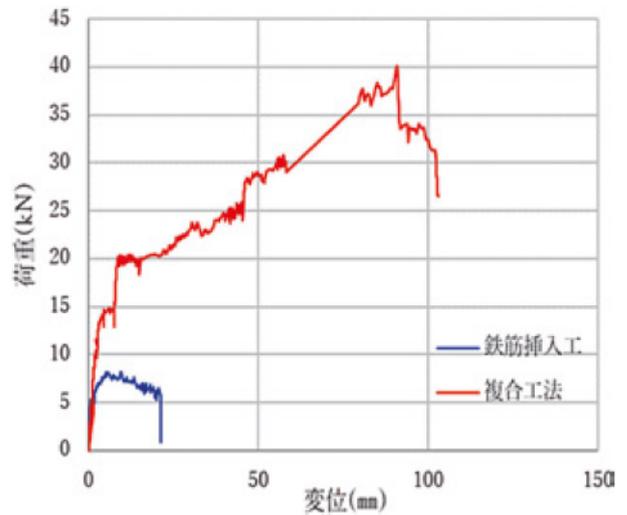


図-12 荷重-変位曲線

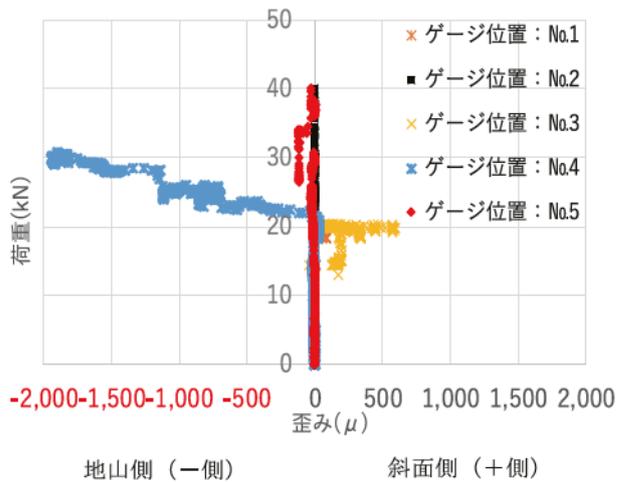


図-13 荷重-曲げ歪み

面における摩擦切れが生じ、柱状構造体の抵抗領域に入ったものと考えられる。荷重段階ごとに柱状構造体に埋設した鉄筋に作用した曲げひずみを図-13に示す。

荷重20kN付近で鉄筋挿入工の補強材と柱状構造体の

結合部において、曲げひずみが顕著に発生し始め、ひずみゲージを取り付けた部位によっては計測不能となった。これは、柱状構造体の鉄筋の変形にともない、ひずみゲージが破断したものと考えられる。バットレス工法写真-4 掘削状況（接合部拡大）の鉄筋挿入工と柱状構造体との結合部の歪みゲージNo.3は地山斜面側の曲げ歪み（+側）が発生し、逆にひずみゲージNo.4は地山奥側（-側）が大きく曲げ歪みが発生していた。一方、歪みゲージNo.5は大きな歪みが発生していないことから、バットレス工法の鉄筋挿入工作用する荷重が影響する範囲は、柱状構造体結合部から片側600mm以内で受動抵抗が発現しているものと考えられる。

実験後地山を掘削して補強材と柱状構造体の結合部の状況を調べた。掘削した状況を写真-4に示す。バットレス工法の補強材が斜面側に引き抜け、柱状構造体のグラウトが圧壊していた。また、鉄筋も斜面側へ大きく曲げられ、保護管の鋼製ワインディングパイプも引き裂かれている状況が確認できた。柱状構造体のグラウトを拘束している鋼製ワインディングパイプも鉄筋同様、変形しながら引抜抵抗力に寄与していたものと考えられる。

柱状構造体地山側頭部に関しては、図-14に示すように荷重25kN付近から水平・鉛直とも変位が発生始め、最大荷重時ではそれぞれ0.3mm度と非常に小さな値であった。

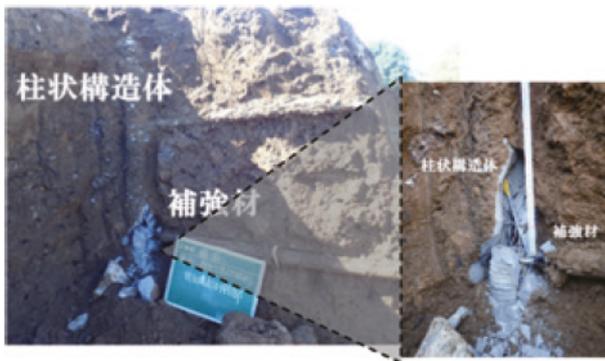


写真-4 掘削状況（接合部拡大）

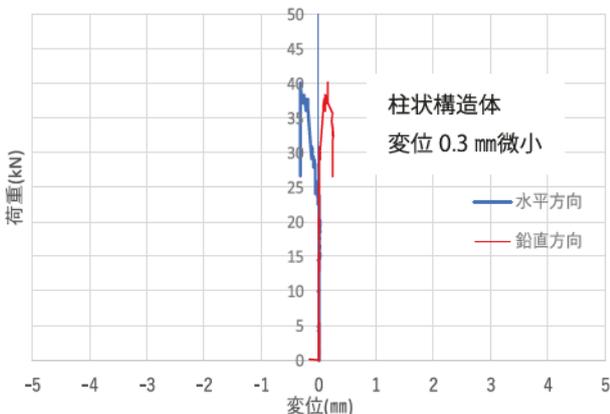


図-14 荷重-変位（柱状構造体）

4. 結合部検証実験概要

4.1 実験条件

引抜実験後盛土を掘削して状況を確認したところ、バットレス工法の柱状構造体と鉄筋挿入工との結合部において保護管が引き裂かれるように抵抗していたため、補強材の引き抜き抵抗力は保護管の強度にも依存していると考えられる。保護管の種類を変え、鉄筋挿入工との結合部の強度を検証するため結合部の曲げ試験を実施した。保護管は表-3のように5種類検討した。

4.2 実験方法

保護管中央部に鉄筋挿入工の補強材が挿入できるようにあらかじめ孔を開ける。補強材挿入後、柱状構造体の鉄筋（D13-SD295）を、補強材先端のリング部材内に通して固定する。グラウト注入時に補強材と柱状構造体との隙間からグラウトが漏れる可能性があるためコーキングする。保護管内部にグラウト（セメントミルク W/C50%）を注入して養生する。鉄筋には図-15に示すようにひずみゲージを取り付ける。

グラウト養生後、図-16のように引張試験治具に装着して載荷を行う。実験の載荷は単サイクル載荷とし終局

表-3 保護管の種類

保護管の種類	仕様	備考
No.1 保護管無し		
No.2 紙製ボイド管	φ132×t3.5	
No.3 鋼製ワインディングパイプ	φ120.64×t0.32	引抜実験で使用
No.4 塩ビ管VU	φ140×t4.5	
No.5 塩ビ管VP	φ140×t7.5	

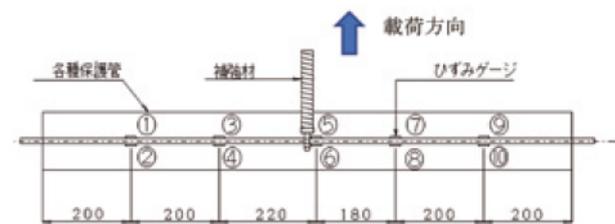


図-15 ひずみゲージ取付位置

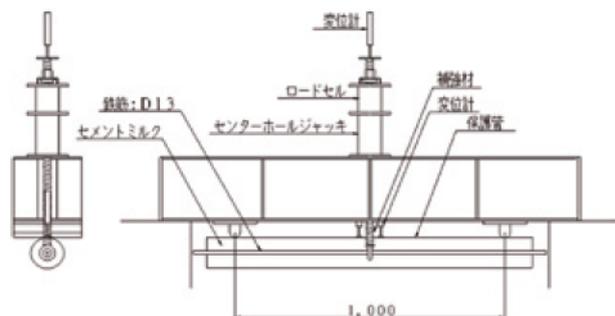


図-16 試験概要



写真-5 試験状況

状態まで荷重する。変位計は中央2ヶ所と補強材頭部に1カ所取り付け。試験状況を写真-5に示す。

4.3 実験結果

実験結果から保護管の種類によって補強材と柱状構造体の結合部の強度に差異があることがわかった。

表-4に保護管種別による最大荷重、図-17に荷重-変位（結合部近辺平均）曲線を示す。表-4の結果より、最大荷重はVP管（塩ビ管）>VU管（塩ビ管）>鋼製ワインディングパイプ>紙製ボイド管>保護管無しとなった。

また、引抜実験で使用した鋼製ワインディングパイプと終局荷重が一番高いVP管とは比較するとVP管（平均終局荷重：30.5kN）／鋼製ワインディングパイプ（平均終局荷重：12.7kN）=2.4倍の差があることがわかった。荷重-変位曲線の傾きは保護管無しと2種類の塩ビ管は同じ傾向であったが、紙製ボイド管と鋼製ワインディングパイプは傾きが緩やかであることがわかった。次に、荷重によって柱状構造体内の鉄筋（サイズD13）に発生した曲げひずみを図-18～32に示す。曲げひずみに関しては各種別比較できるようにレンジは1000 μ とした。図-18～32のプラス側曲げひずみは荷重方向側、マイナス側曲げひずみは荷重方向と逆側の曲げひずみが卓越したものである。

ひずみゲージを取り付けた位置関係からみると、No.1～3はバラツキが多く、曲げひずみもプラス側（荷重方向）に発生したり、マイナス側（荷重方向と逆）に発生したりしている。

一方、塩ビ管各種を比較するとNo.4は肉厚が薄いため上記同様に曲げひずみがプラス側、マイナス側と発生し、曲げひずみが安定していない。曲げひずみがプラス側とマイナス側と発生していたため、内部の鉄筋が荷重方向や荷重方向と逆側へ曲がり、全体的にうねりが発生している状況であることが確認できた。

No.5は曲げひずみがプラス側に発生していたため荷重方向側へ凸型に安定して湾曲している状況であることがわかった。本試験での各種保護管の比較では肉厚が厚く剛性が高い方が曲げひずみは同一方向に発生し、凸型に曲がることが確認できた。

表-4 保護管種別による最大荷重

保護管の種類	番号	最大荷重 (kN)	Ave(kN)	対保護管無しとの比
保護管無し	No.1	5.5	6.4	—
	No.2	6.9		
	No.3	6.7		
紙製ボイド管	No.1	7.8	7.6	1.2
	No.2	7.7		
	No.3	7.4		
鋼製ワインディングパイプ	No.1	12.6	12.7	2.0
	No.2	13.4		
	No.3	12.3		
塩ビ管VU	No.1	23.2	23.1	3.6
	No.2	22.9		
	No.3	23.3		
塩ビ管VP	No.1	31.6	30.5	4.8
	No.2	29.9		
	No.3	30.1		

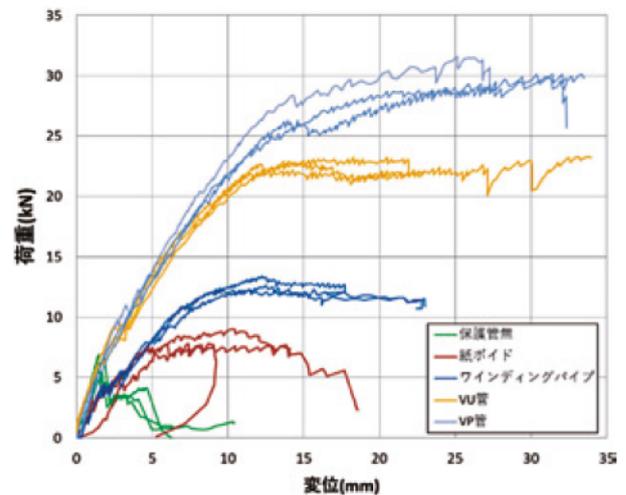


図-17 荷重-変位（中央平均）曲線

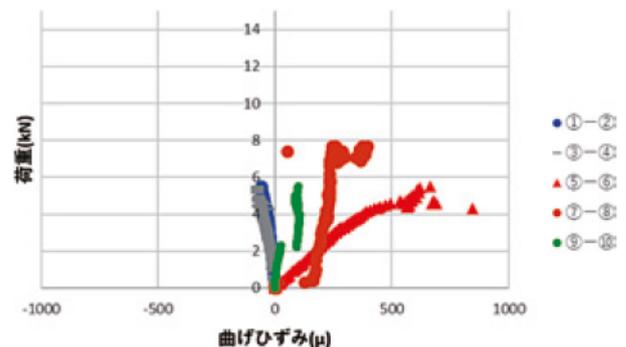


図-18 荷重-ひずみ（保護無し）

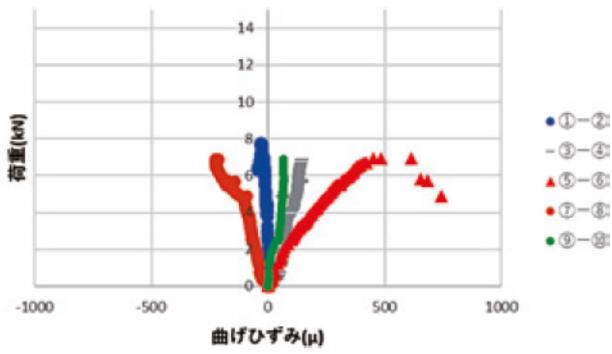


図-19 荷重-ひずみ (保護無し)

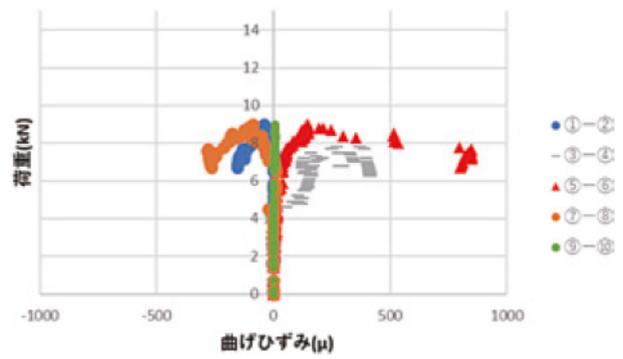


図-23 荷重-ひずみ (紙製ボイド管)

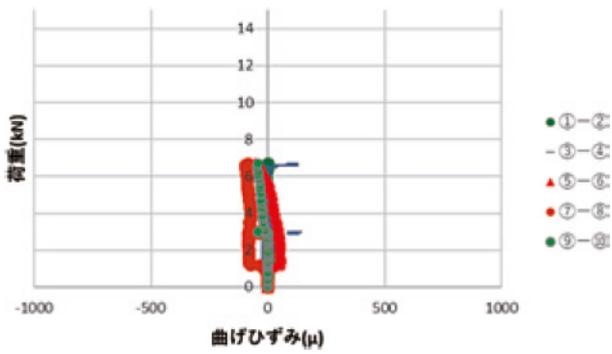


図-20 荷重-ひずみ (保護無し)

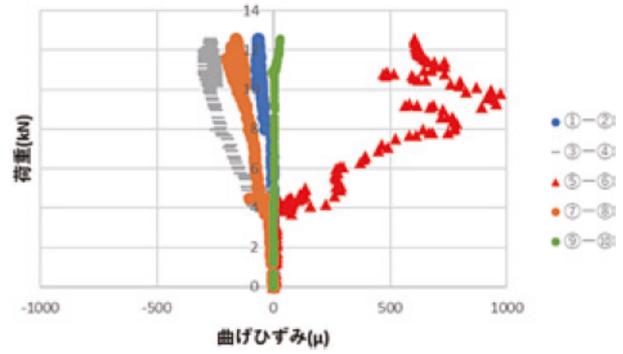


図-24 荷重-ひずみ (鋼製ワインディングパイプ)

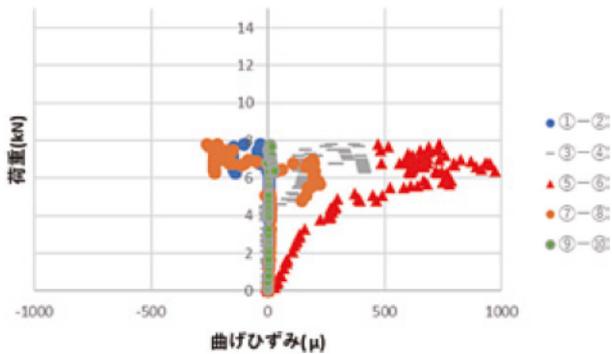


図-21 荷重-ひずみ (紙製ボイド管)

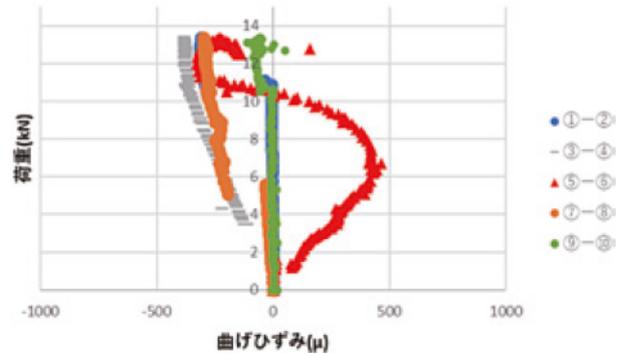


図-25 荷重-ひずみ (鋼製ワインディングパイプ)

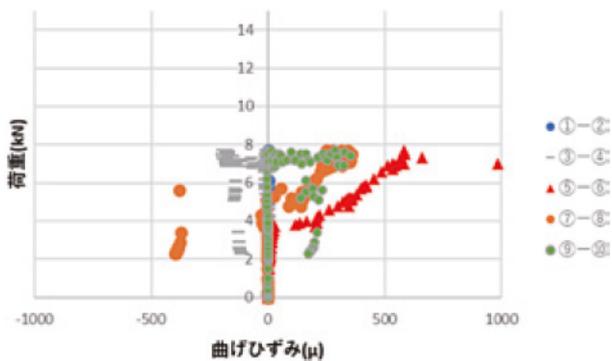


図-22 荷重-ひずみ (紙製ボイド管)

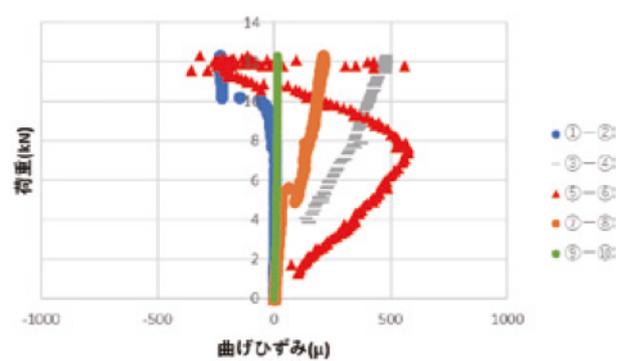


図-26 荷重-ひずみ (鋼製ワインディングパイプ)

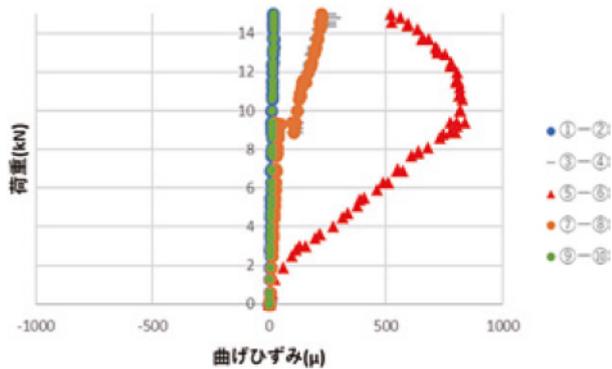


図-27 荷重-ひずみ (塩ビ管 VU)

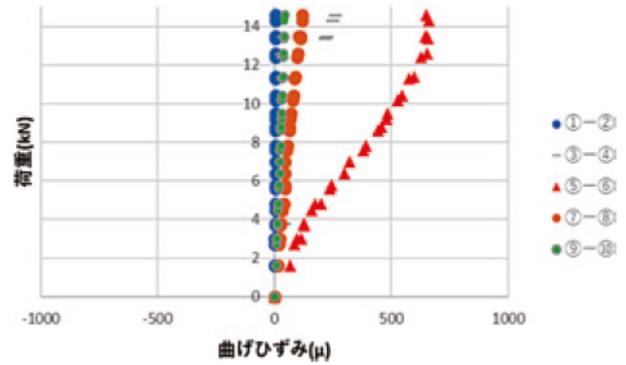


図-31 荷重-ひずみ (塩ビ管 VP)

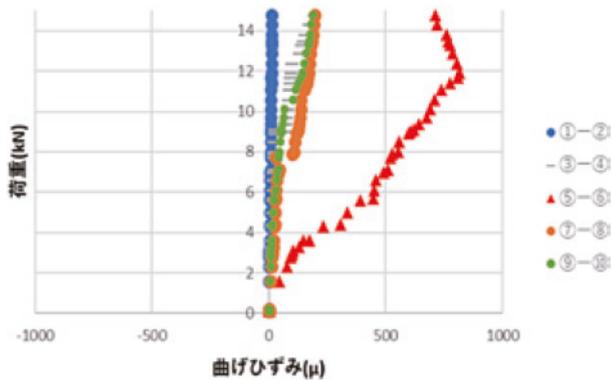


図-28 荷重-ひずみ (塩ビ管 VU)

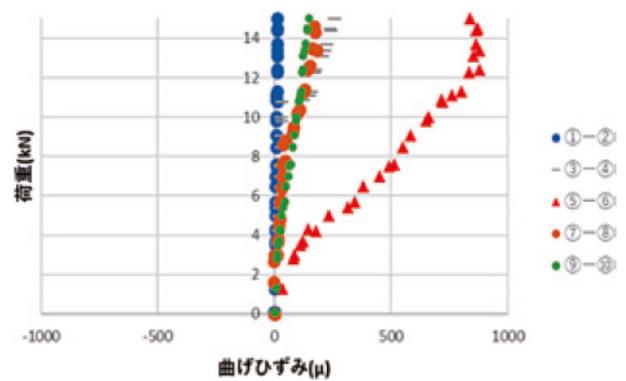


図-32 荷重-ひずみ (塩ビ管 VP)

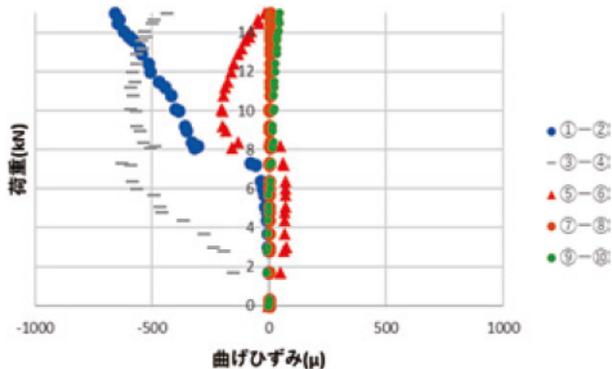


図-29 荷重-ひずみ (塩ビ管 VU)

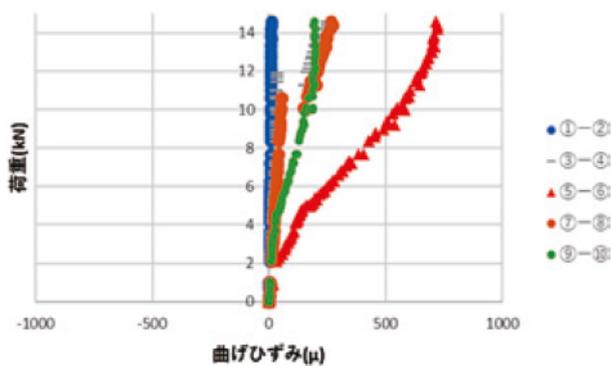


図-30 荷重-ひずみ (塩ビ管 VP)

5. ま と め

5.1 引抜実験

- 鉄筋挿入工と柱状構造体によるパットレス工法の効果について、本実験により以下のことが明らかとなった。
- ①パットレス工法は従来工法である鉄筋挿入工と比較して、最大荷重において約5倍の抵抗力が期待できる。
 - ②パットレス工法は荷重20.0kN付近で柱状構造体結合部の鉄筋に明確なひずみが発生し始める。
 - ③パットレス工法の鉄筋挿入工に作用する荷重が柱状構造体に影響する範囲は、鉄筋挿入工結合部から600mm以内である。
 - ④柱状構造体天端の変位は水平・鉛直とも0.3mm程度で非常に小さい値であった。
 - ⑤柱状構造体の保護管も変形しながら抵抗していたためグラウトの拘束効果が期待できる。

5.2 結合部検証実験

補強材と柱状構造体の結合部の引抜荷重に関して、保護管の種別により以下のように差異があることが明らかとなった。

- 1) 最大荷重はVP管 (塩ビ管) > VU管 (塩ビ管) > 鋼製ワインディングパイプ > 紙製ボイド管 > 保護管無し の順となった。

- 2) VP管の鉄筋に発生した曲げひずみはプラス側となり、載荷方向に凸型に湾曲していたことが確認できた。その他の保護管は鉄筋の曲げひずみがプラス側、マイナス側ともに発生していた。

塩ビ管同士比較しても肉厚の影響により、鉄筋の曲げひずみに違いがみられたため、肉厚の影響があることがわかった。これにより、保護管による曲げひずみを凸型にして、引抜抵抗力（最大荷重）を上げるためにはVP管以上の曲げ剛性が必要であることがわかった。

5.3 今後の検討課題

バットレス工法の柱状構造体を使用する保護管の剛性は引き抜き抵抗力に寄与するため、VP管（塩ビ管）を用い盛土で引抜実験を行う。柱状構造体の曲げに関しては鉄筋径による影響も考慮されるため、施工可能範囲でサイズアップしたもので曲げ試験を行い、保護管の影響とともに評価する。

また、疑似擁壁効果の検証と設計法確立のため、模型による静的載荷実験や振動実験も行う予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、岩佐技術士事務所岩佐直人様には多大なご助言を頂き、文化財石垣・石積擁壁補強技術協会の関係者の方々にもご協力頂いた。記して、深甚な感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋本隆雄, 中澤博志, 池本敏和, 宮島昌克: 大型振動台実験による石垣補強技術の耐震性評価, 土木学会論文集 A1 Vol.77 No.3, pp.405-417, 2021.
- 2) 前田和徳, 橋本隆雄, 岩津雅也: 鉄筋挿入工と柱状構造体を組み合わせたバットレス工法の引抜実験, 第58回地盤工学研究発表会, 2023.
- 3) 西村和夫, 山本稔: 比較的短いロックボルトを用いた切り取り斜面の安定について, 土木学会論文集 第388号, pp.271-226, 1987.