

# トンネル切羽前方の湧水調査技術 T-DrillPacker の展開

大成建設(株) 正会員 ○平塚 裕介  
 大成建設(株) 正会員 熊本 創  
 大成建設(株) 正会員 藤田 クラウディア  
 大成建設(株) フェロー会員 山本 肇

## 1. はじめに

山岳トンネル施工中に高圧・大量の湧水が発生すると、施工性の低下や切羽崩落等を引き起こす恐れがあり<sup>1)</sup>、工事の安全・工期・コストに重大な問題を引き起こす可能性がある<sup>2)</sup>。断層破碎帯などの湧水帯に切羽が到達する前に湧水対策（水抜きボーリング、止水注入工など）や濁水処理設備の増設等を計画するためには、切羽前方の湧水帯（例えば破碎帯など）の位置や流量、水圧などを把握することが重要である<sup>3)</sup>。そのため、筆者らは施工中の切羽から実施する先進ボーリングを行い、その孔内にパッカーを設置して湧水量・湧水圧を正確に測定する技術「T-DrillPacker<sup>®</sup>」を開発してきた。本技術は地質条件や調査目的に応じて削孔される様々なボーリング孔に対応しており、ボーリング長さに応じて2つのラインナップに大別される。これらの技術を用いて、トンネル施工状況や地質・湧水状況に応じて合理的な調査を行うことで、適切な湧水対策を計画・実施できると考えられる。本稿では、これら技術の概要と測定事例を説明する。

## 2. 技術概要

### (1) 先進ボーリングの分類

先進ボーリングはその探査距離によって、短尺ボーリング（20～50m）、中尺ボーリング（100m程度）、長尺・超長尺ボーリング（数100m以上～1,000m程度）に分類される<sup>4)</sup>。このうち、表-1に中尺・短尺ボーリングの特徴を示す。中尺ボーリングは専用ボーリングマシンを用いて削孔し、コア削孔・ノンコア削孔が選択可能である<sup>5)</sup>。岩種や地質構造などを詳細に把握でき、掘削休止時などで比較的短時間に施工可能である<sup>6)</sup>。一方、短尺ボーリングはトンネル施工機械であるドリルジャンボで容易に施工でき、ノンコア削孔に限定されるものの、岩級判定など簡易・迅速な調査が可能である<sup>7)</sup>。本技術は、長尺・超長尺ボーリングと比べて、調査時間やコスト面で施工が容易であり、適用実績が多い中尺ならびに短尺ボーリングを対象に開発したものである。以降に、本技術の概要を述べる。

### (2) 中尺ボーリングを対象とした T-DrillPacker<sup>®</sup>

先進ボーリングでは、ボーリング口元のバルブを開放／閉塞して得られる排水量・水圧を湧水量・湧水圧とすることが多い<sup>8)</sup>。この場合、ボーリング孔内の水が周囲に逸散するなどして、正確な測定ができないことが多い。個々の湧水帯を正確に調査するためには、パッカー

表-1 中尺・短尺ボーリングの特徴<sup>5), 6), 7)</sup>をもとに作成

項目	中尺ボーリング	短尺ボーリング
探査距離	最大100～150m	20～50m
削孔方式	コア/ノンコア	ノンコア
使用機械	専用ボーリング機	トンネル施工機械 (ドリルジャンボ)
専用人員	必要 (専門業者が実施)	不要 (トンネル作業員が実施)
調査時間	2日(昼夜4方)程度	数時間
取得情報	コア試料 削孔データ	掘り屑(スライム) 削孔データ
評価項目	岩種, 岩級変化点, 重金属	岩級変化点, 重金属
湧水測定	湧水量 湧水圧	湧水量 (湧水圧測定は困難)

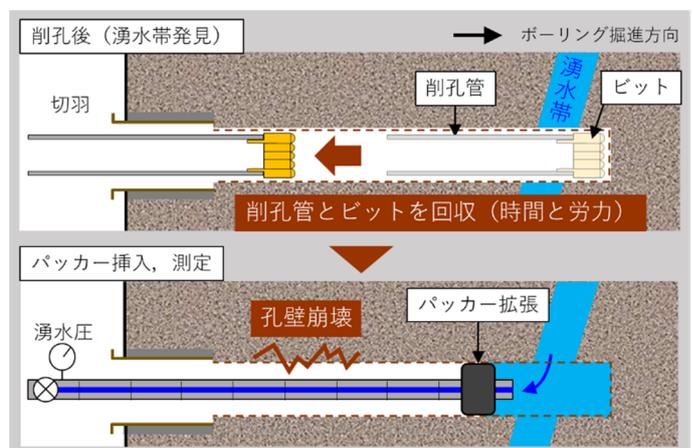


図-1 従来の中尺ボーリングへのパッカー設置方法

を用いて測定区間を水理的に隔離し、湧水量や湧水圧を測定することが望ましい<sup>9)</sup>。ただし、図-1に示す従来の方法ではパッカー挿入のために、削孔管やビットを全て引き抜く必要があり、孔壁崩壊のリスクを伴うという課題があった。T-DrillPacker（以降、「T-DP」と呼ぶ）はこれらの課題を解決した新しい測定技術である<sup>9)</sup>。図-2と図-3にT-DPの概要ならびにパッカー設置方式を示す。本技術では、削孔は図-2aに示す二重ビットで行い、湧水帯に遭遇したらインナービットのみをワイヤーラインで迅速に回収する（図-3a）。削孔管を引抜く労力・時間が無く、迅速にパッカーを設置できる。また、削孔管が孔壁を保護するため、パッカー設置時の孔壁崩壊のリスクも大幅に低減される。

パッカーの設置方法には、図-3中のb), c)に示す「ロッド方式」と「水圧圧送方式」<sup>10)</sup>の2つがある。前者はパッカーをロッドを継ぎ足しながらボーリングマシンで前方に押し込むことで、高圧湧水に対しても確実にパッカーを設置できる。後者はパッカーをボーリング孔先端まで水流で高速圧送することで、ロッド方式よりも迅速にパッカーを設置できる。いずれの方式も湧水量・湧水圧を測定後に、パッカーを収縮・回収し、インナービットを先端部まで水流で圧送して再セットすれば削孔を容易に継続でき、1本のボーリングで複数箇所での湧水測定をくり返し行うことができる。また、二重ビットを図-2bに示すコアビットに変更することで、コア削孔も可能である。

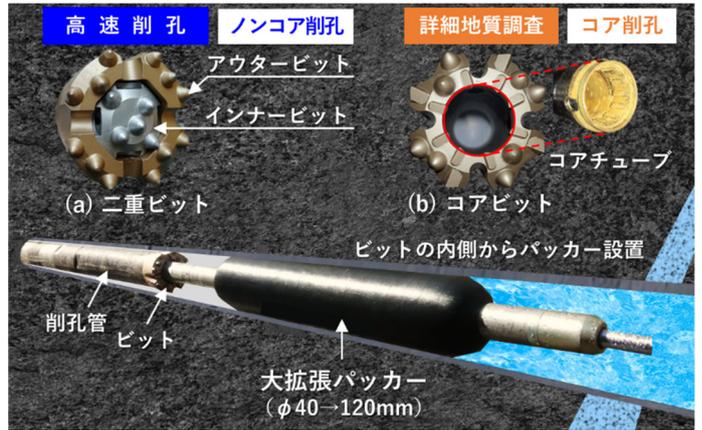


図-2 T-DrillPackerの概要

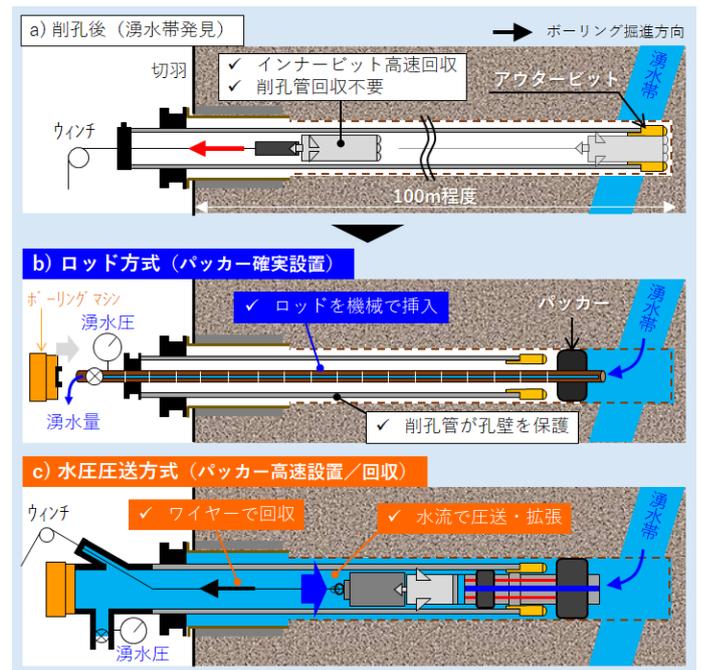


図-3 T-DrillPackerのパッカー設置方式

### (3) 短尺ボーリングを対象とした

#### T-DrillPacker®Jumbo

短尺ボーリングの湧水調査では、パッカーの設置作業などを1~2名の作業員が切羽直下にて人力で行う必要があり、安全性と労力に課題があった。図-4にT-DrillPacker®Jumbo<sup>11)</sup>（以降、「T-DPJ」と呼ぶ）の概要を示す。本技術は、ロッドの挿入、継ぎ足しから、拡張、回収までの作業をドリルジャンボに搭載されている削孔用アーム（ガイドシェル）のフィード（ロッド送り込み）や回転、送水等の機構を活用して、機械で行うこと



図-4 T-DrillPackerJumboの概要

で切羽直下での人力作業を大幅に低減した技術である。パッカーと専用の測定ユニットのみで容易に測定でき、補助工法の注入孔や、水抜きボーリングなどドリルジャンボで掘られる様々な孔に適用可能であり汎用性が高い。

## 3. 測定事例

### (1) T-DrillPackerの適用事例

本技術を国土交通省近畿地方整備局大野油道路荒島第2トンネル西勝原地区工事で実施した先進ボーリングに適用した<sup>12)</sup>。図-5に地質縦断図を示す。本現場では亀裂が発達した花崗閃緑岩が分布し、そのうち調査区間は周辺の

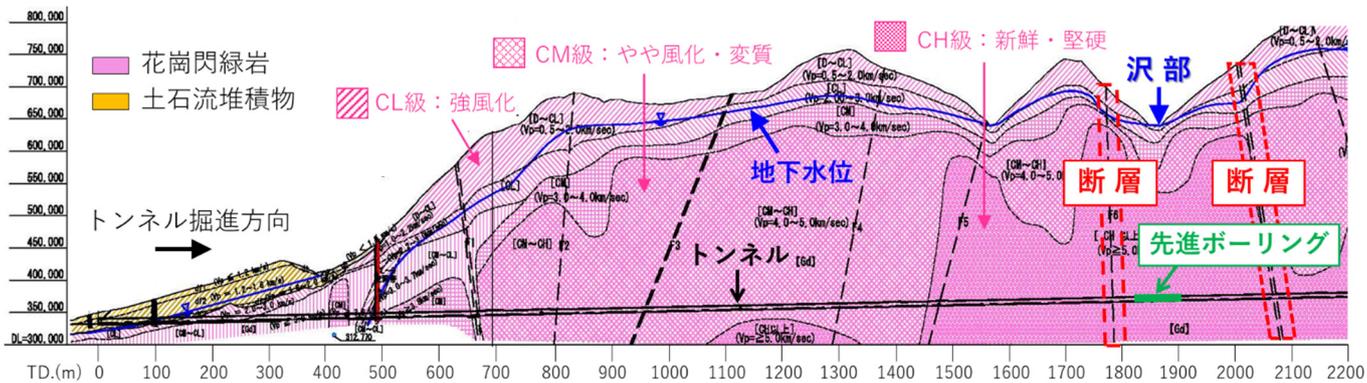


図-5 T-DP 適用現場の地質縦断図

断層の影響を受けて破碎質な地点であると想定され、直上の沢部の存在から高压湧水の発生が懸念されていた。図-6 に試験概要を示す。避難坑が本坑を 36m 先進している状況であった。本調査では先行する避難坑の水抜きも兼ねて本坑切羽から避難坑前方に向かってコアボーリング（長さ 70m）を実施し、T-DP による切羽前方の湧水量、湧水圧の測定を行った。図-7 に湧水圧の測定位置を示す。パッカー以奥の測定区間の湧水圧に加えてボーリング口元で湧水圧を測定した（以降、「口元湧水圧」と呼ぶ）。口元湧水圧はパッカーより手前のボーリング孔全体の平均的な圧力である。

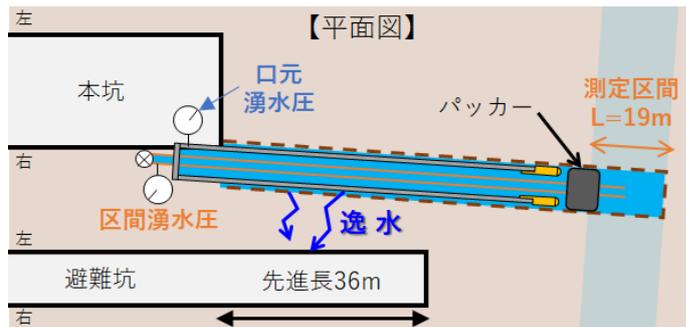


図-6 試験概要

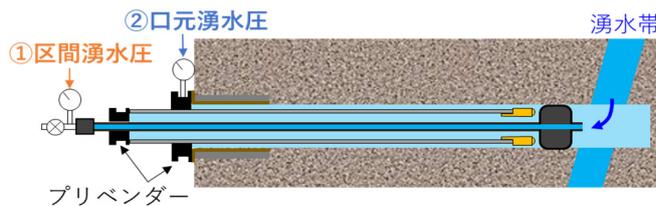


図-7 湧水圧測定位置

図-8に削孔10m毎にボーリング口元で測定した湧水量を示す。湧水量の急激な増加は見られなかったが、有意な量が確認されたため、亀裂の少ない健岩部にパッカーを設置し、湧水圧を測定した。同図中に本技術で測定した区間湧水圧を橙色点で示す。口元湧水圧がどの深度においてもゼロであるのに対して、区間湧水圧は0.53MPaを記録した。本技術により、簡易な口元測定では圧力が逸散して検知できない有意な湧水圧を測定できた。本事例のようにボーリング孔内の湧水が、先進している避難坑など周囲へ逸水する条件の場合、口元での測定では湧水圧が過小評価される可能性があり、パッカーを用いた水圧測定が重要である。なお、本調査の一連の作業過程において孔壁崩壊等のトラブルは無く、測定時間は従来方法と比べ約40%短縮された。

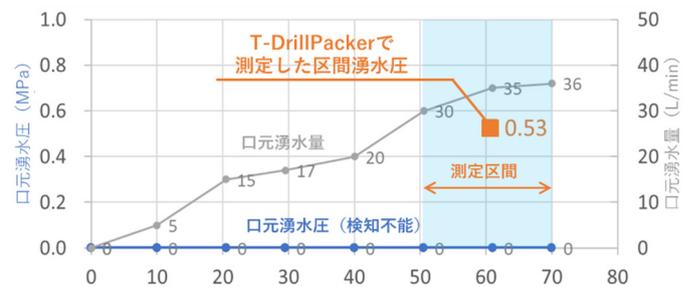


図-8 湧水量・湧水圧測定結果



図-9 T-DPJ 適用現場の地質縦断図

## (2) T-DrillPackerJumbo の適用事例

本技術を国土交通省四国地方整備局津島道路新内海トンネル工事で実施した穿孔探査孔に適用した<sup>13)</sup>。図-9に地質縦断図を示す。また、写真-1に試験時ならびにトンネル掘削再開後の切羽状況を示す。調査位置付近には硬質な砂岩層が広く分布し、直近の切羽は鋼製支保工を設けず施工され、湧水も無かった（写真-1a）。しかし、既施工区間の実績では泥岩の介在に伴う破碎部から時折湧水が発生していた。今回の試験位置は、高土被り（320m）で、想定地下水位が高いこともあり、多量湧水の発生が懸念されていた。そこで、ドリルジャンボによる切羽からの穿孔探査（長さ 21m）を行うとともに T-DPJ による湧水調査を実施した。



写真-1 試験時ならびに試験後の切羽状況

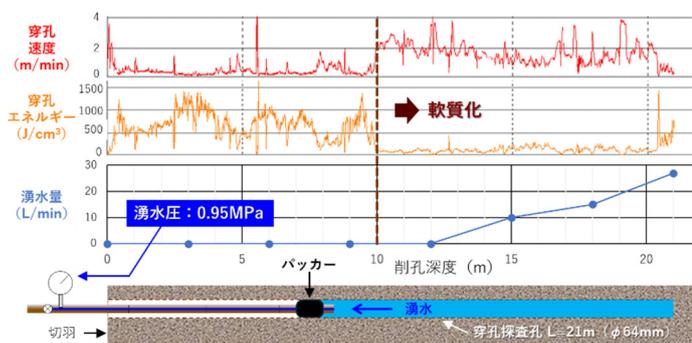


図-10 穿孔探査ならびに湧水量測定結果



写真-2 穿孔探査ならびに湧水量測定結果

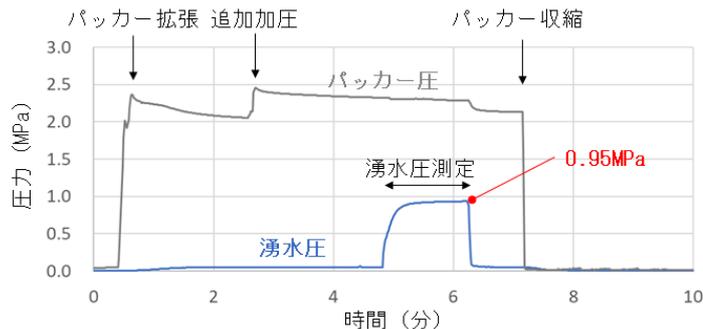


図-8 湧水圧測定結果

図-10 に穿孔探査の結果を示す。削孔深度 10m 以降で穿孔速度の増加および穿孔エネルギーの減少が見られ、地山の軟質化が認められた。削孔時に採取したスライム（掘り屑）観察でも同深度付近で褐色風化を伴う岩片や断層岩粒子が見られ、岩質変化が確認された。また、削孔中に削孔ロッド（L=3.0m）1本毎にボーリング口元で湧水量を測定した結果、削孔深度 12m 以降で湧水が発生し、削孔終了時点で 27L/min の湧水が確認された。この湧水発生区間を対象に T-DPJ による湧水圧測定を実施した。湧水圧測定状況を写真-2 に示す。湧水区間の手前にパッカーを設置し拡張した後、ボーリング口元から排水される湧水が止まったことから、パッカーが確実に拡張していると判断した。図-8 に湧水圧ならびにパッカー圧の測定結果を示す。パッカー圧が 2MPa 以上で維持できていることを確認した後、湧水圧を測した結果、0.95MPa の高圧湧水が観測された。本技術の切羽直下での作業時間を表-1 に示す。本技術ではロッドをガイドシェルにセットする際に切羽直下に人が立ち入る必要がある。ただし、その時間はロッド 1 本当たり 2 分程度であり、ボーリング長さ 30m を想定した場合、従来方法と比べ切羽直下の作業を約 60%削減でき、安全・迅速に測定できることが示された。

なお、調査後のトンネル掘削では、3.1m 掘進した地点で切羽に風化を伴う脆弱部が出現し、少量の湧水も発生した（写真-1b）。本技術で確認された高圧湧水の存在も考慮し、この段階で支保パターンランクアップと各種対策工の準備を行った。その後、10m 掘進した地点で脆弱部がさらに拡大し、切羽湧水量も増加した。そこで、先行して準備した対策工のうち、注入式フォアボーリングと水抜きボーリングを速やかに実施し、切羽の安定化をはかりながら掘削を進め、脆弱区間を安全に施工することができた。本技術により、穿

表-2 切羽直下での人力作業時間

作業項目	所要時間 (分) ※	
	従来手法	T-DPJ
パッカーの設置	40	15
パッカーの回収	80	30
計器類の設置	5	5
パッカーの拡張	10	0
計	135	50
時間短縮 (%)	63.0	

※ボーリング削孔長30mを想定

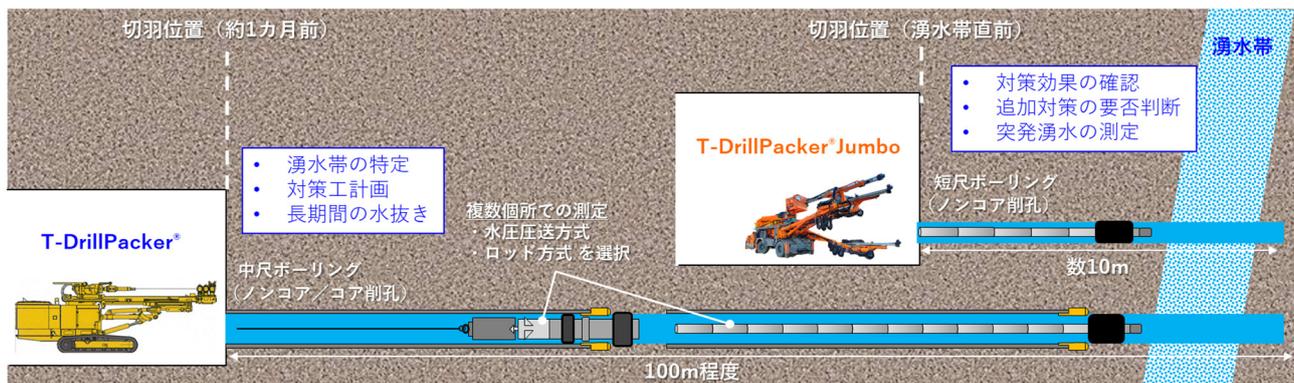


図-11 T-DrillPacker の使い分け

孔探査と併せて切羽前方の地質・湧水状況を事前に把握することで、早期に適切な対策工を準備・実施することができ、安全・確実なトンネル掘削に貢献できた。

#### 4. 湧水調査における本技術の使い分け

図-11 に本技術の使い分けを示す。T-DP は 100m 程度の中尺ボーリングを対象とした調査技術であり、この探査距離は、通常のトンネル掘進の時間にして約 1 カ月に相当する。本技術により、水抜きや止水注入などの時間を要する対策工を早い段階で計画し実施することが可能となる。特に水抜き工については、長期間の水抜きを求められる場合があり、時間的猶予をもって実施することが重要となる。これに対して、T-DPJ は湧水帯を施工する直前に上記の対策効果の確認や、あるいは、想定外の突発湧水の調査にも迅速に対処できる。これらの技術を組み合わせ、トンネル施工状況に応じて合理的な湧水調査を実施し、適切な対策工を計画・実施することで安全・円滑なトンネル掘削が可能になると考えられる。

#### 5. まとめ

先進ボーリングを用いた切羽前方の湧水調査技術 T-DrillPacker を開発した。本技術は中尺ならびに短尺ボーリングに対応した 2 つのラインナップを有している。これら技術を山岳トンネル工事に適用した結果、迅速・安全に正確な湧水測定が可能であることが示された。これらの技術をトンネル施工状況や調査ニーズに応じて適用することで、合理的な調査の実施と適切な対策工を計画・実施できると考えられる。今後は、高圧・大量湧水の発生が懸念されているトンネル工事に本技術を積極的に適用し、安全で確実なトンネル工事に貢献していきたい。

#### 6. 参考文献

- 1) 平野 太一, 奈良 聡, 吉永 浩二, 大谷 達彦, 原島 大, 山田 宏道: スコリア地山におけるトンネル掘削時の湧水対策, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-287, 2023.
- 2) 土木学会: トンネル標準方書[共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説, pp.33, 2016.
- 3) 山岳トンネル先進ボーリング連載講座小委員会: 山岳トンネル先進ボーリング入門 (4) - 施工計画の基本および得られる情報と効果 (1) -, トンネルと地下, 第 39 巻, 12 号, pp.942, 2008.
- 4) 「トンネル新技術への挑戦」連載講座小委員会: トンネル新技術への挑戦 (16) - トンネル切羽から行う短尺・中尺先進ボーリング -, トンネルと地下, 第 48 巻, 3 号, pp.229-239, 2017.
- 5) (一財) 災害科学研究所トンネル調査研究会: トンネル技術者のための地盤調査と地山評価, 鹿島出版社, pp.189, 2017.
- 6) 土木学会: 山岳トンネルの補助工法-2009年版-, トンネルライブラリー, 第 20 号, pp.202, 2016.
- 7) 村山 秀幸, 岡崎 健治, 山崎 秀策, 倉橋 稔幸, 亀村 勝美: 切羽前方地質の調査手法と地山評価における現状と課題に関する考察, トンネル工学報告集, 第 29 巻, I-9, pp.1-9, 2019.
- 8) 村山 秀幸, 丹羽 廣海, 伊東 佳彦, 岡崎 健治, 山崎 秀策: 坑内水平ボーリング削孔中における湧水圧の測定方法について, 土木学会第 71 回年次学術講演会, VI-393, pp.785-786, 2016.
- 9) 平塚 裕介, 山本 肇, 熊本 創, 増岡 健太郎: 前方調査ボーリングの湧水測定技術「T-DrillPacker」の開発, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, No.85, pp.483-487, 2021.
- 10) 平塚 裕介, 山本 肇, 熊本 創: 先進ボーリングの湧水調査技術「T-DrillPacker® (水圧送方式)」の開発, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-269, 2022.
- 11) 藤田 クラウディア, 平塚 裕介, 熊本 創: ドリルジャンボによる短尺ボーリングの湧水圧測定技術の開発, 第 78 回年次学術講演会, VI-284, 2023.
- 12) 熊本 創, 平塚 裕介, 山本 肇, 門田 和之: 先進ボーリングの湧水調査技術「T-DrillPacker®」の現場適用, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-268, 2022.
- 13) 藤田 クラウディア, 平塚 裕介, 熊本 創, 安倍 徹: ドリルジャンボを用いた湧水圧測定技術 T-DrillPacker®Jumbo の現場実証試験, 土木学会第 79 回年次学術講演会, VI-370, 2024.