

ドリルジャンボを用いた湧水圧測定技術

「T-DrillPacker®Jumbo」の開発

藤田 クラウディア^{*1}・平塚 裕介^{*1}・熊本 創^{*1}

Keywords : Tunnel, Drill Jumbo, Ahead Tunnel Drilling, Hydraulic Pressure, Packer

山岳トンネル, ドリルジャンボ, 短尺ボーリング, 湧水圧, パッカー

1. はじめに

山岳トンネル施工中に大量の湧水が発生すると、施工性の低下や、場合によっては坑内の水没、切羽の崩壊等の大事故につながり^{1), 2)}、工事の安全性、工期・経済性に重大な影響を及ぼすことがある³⁾。トンネル工事を安全かつ円滑に進めるため、切羽前方の湧水帯（断層、破碎帯等）の位置、流量や水圧を事前に把握し、止水注入工や水抜き工など適切な湧水対策を計画することが重要である⁴⁾。切羽前方調査の一つとして、切羽から前方に数10m程度の短尺ボーリングが行われる⁵⁾。短尺ボーリングを用いて湧水圧を測定するためには、孔口を止水する必要があり、ボーリング口元にて配管、シール材等を用いて止水し、湧水圧を測定した事例が報告されている⁶⁾。また、近年ではパッカーを孔口から1.5m先に設置し、デジタル水圧計を用いて湧水圧の連続的な時間変化を計測するシステムも開発されている⁷⁾。パッカーとは、孔内でゴム製の袋状部材を加圧し膨張させて、孔壁に密着することで孔内を水理的に隔離し、対象区間の水量・水圧を正確に測定するための装置である。しかし、いずれの手法もボーリング孔口近くで止水することから、孔奥で捉えた高圧湧水を口元まで導水し、切羽を不安定化させるリスクが考えられる⁸⁾。これを回避するためには、パッカーを孔奥に設置する方法が考えられるが、1~2名の作業員がパッカーロッドの挿入、継足から、拡張、回収まで、全ての作業を切羽直下にて人力で行う必要があり、安全性の確保や多大な労力がかかることに課題があり、実施が困難であった（図-1）。

そこで、筆者らは短尺ボーリングの湧水圧をトンネル施工機械であるドリルジャンボを用いて従来よりも

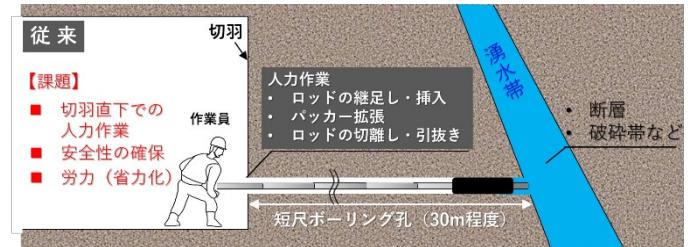
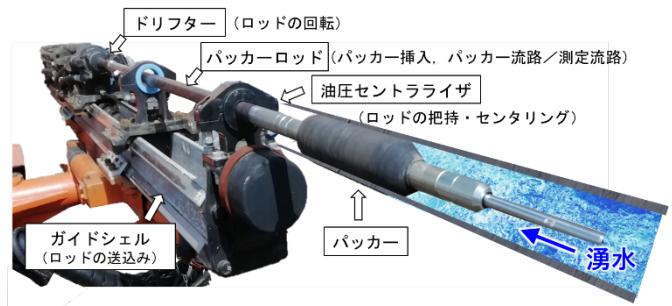


図-1 従来の湧水圧測定方法

Fig.1 Conventional method for hydraulic pressure measurement



ドリルジャンボのフィード・回転・送水機構を活用してパッカーを設置

図-2 ドリルジャンボを用いた湧水圧測定の概要
Fig.2 Hydraulic pressure measurement using drill jumbo

安全・容易に測定できる技術「T-DrillPacker®Jumbo」を開発した⁹⁾。本稿では、本技術の概要ならびに施工中のトンネル現場で実施した実証試験の結果について報告する。

2. T-DrillPacker®Jumbo の概要

2.1 本技術の特徴

T-DrillPacker®Jumboには以下の3つの特徴がある。

① 安全性向上

図-2に本技術による湧水圧測定の概要を示す。本技術は、ドリルジャンボに搭載されている削孔用アーム

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

(ガイドシェル) のフィード (ロッド送込み) や回転、送水等の機構を活用して、パッカーの設置・回収と拡張を行う。これにより、湧水圧の測定に際し、切羽直下での人力による作業が大幅に軽減され、安全性が向上する。

② 容易な測定

山岳トンネル坑内に常駐する施工機械であるドリルジャンボと、後述する専用の測定ユニットのみで切羽前方の湧水圧を容易に測定可能であり、事前調査に関わる従来の繁雑な作業（人力でパッカーロッドの挿入等）が大幅に改善され、調査頻度を向上させることができる。

③ 多様な調査ニーズに対応

ドリルジャンボは、AGF 等の地山を補強するための注入孔、または前方を調査するための穿孔探査孔、地下水位を低下するための水抜きボーリング等、トンネル施工に必要な様々な孔を削孔する¹⁰⁾。本技術はこれらの全ての孔に適応可能である。例えば、注入孔の施工中に突発的に湧水が発生した場合でも、迅速に湧水圧の測定が可能である。また、湧水圧の変化を長期的にモニタリングすることで、それまでに講じた湧水対策の効果を確認する等、多様な調査ニーズに対応できる。

2.2 測定手順

測定手順を以下に示す。

① パッカー挿入

先端にパッカーを取り付けたパッカーロッド（各種

長さ 0.5~3.0m を選択可）をドリフターのフィード機構を用いてボーリング孔へ挿入する（図-2）。1 本目のパッカーロッド挿入後、ドリフターを後退させて2本目のパッカーロッドをセットし、ネジで接続して前方に送り込む。この送込み作業をくり返して測定区間の手前までパッカーを挿入する。パッカーロッドの継足し・切離しは、油圧セントラライザでパッカーロッドを把持した状態でドリフターを回転させて行う。パッカーロッドは、口径変換コネクタを介して、シャンクロッド（ドリフターから突出する軸棒）に接続する。このコネクタを代えることで、様々なドリルジャンボに本技術を適用することができる。

② 測定ユニットの取付け

最後に接続するパッカーロッド後端に、「流路変換アダプタ」、「パッカー圧測定器」、「逆止弁」等で構成される測定ユニットを接続する（図-3）。測定ユニット後端に取り付けた押込み管を前方に押し出し、ガイドシェル先端のセントラライザより前に測定ユニットを配置し、圧力計やバルブ類を取付ける。

ここで、パッカーロッドは、パッカーを膨らますためのパッカーフロード（外管）と、測定区間の湧水を圧力計まで導水する測定流路（内管）から構成される二重管構造になっている（図-3a）。

ドリフターから給された水は、流路変換アダプタ（図-3b）を通じて、パッカーフロードに分配される。パッカーフロード後方の測定区間（パッカー以奥）の湧水は、測定流路（内管）を通り、流路変換アダプタ内の複数あ

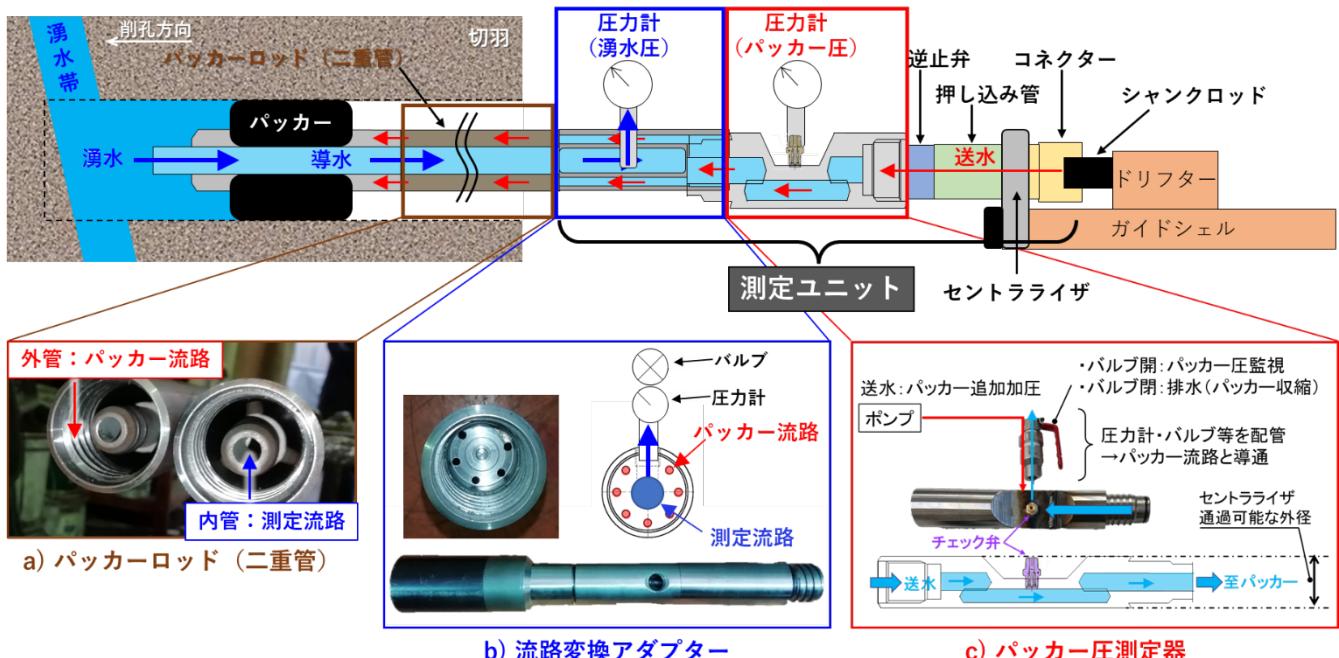


図-3 測定概念図
Fig.3 Illustration of measurement system

る小孔のパッカー流路の間を縫うようにして圧力計に導水され、これら2つの流路が干渉せずに湧水圧を測定できる。

湧水圧を長期間モニタリングする際は、パッカーワークを監視し、低下が見られる場合は再加圧する必要がある。パッカーワークを監視するための圧力計・バルブ等を取り付けた状態では測定ユニットはセントラライザ内を挿通できない。そこで、セントラライザを通過可能な外径で、パッカーワーク拡張後に計器類の配管することでパッカーワーク拡張流路と導通し（チェック弁構造）、パッカーワークの監視や再加圧を行うことができるパッカーワーク測定器を新たに開発した（図-3c）。

③ パッカーワーク拡張、湧水圧測定

ドリフターから送水加圧し、パッカーワークを拡張する。流路変換アダプタに取り付けたバルブを閉塞し、測定区間の湧水圧を計測する。

④ パッカーワーク収縮

パッカーワーク測定器に取り付けたバルブを開放し、パッカーワーク流路の水を排水し、パッカーワークを収縮する。

⑤ パッカーワーク回収

バルブや圧力計、測定ユニットを取り外した後、ドリフターを後退させ、①と逆の手順によりパッカーワークを回収する。

3. 現場実証試験

3.1 試験の概要

これまで、工場内にてドリルジャンボ実機にパッカーワーク等を搭載し、模擬ボーリング孔を用いて装置の基本的な動作確認を実施してきた⁹⁾。本現場実証では、孔荒れ・孔曲がりや湧水を有する実際のボーリング孔に対して、パッカーワークの損傷等のトラブルなく装置を設置・回収し、湧水圧の測定を確実に実施できるかを確認した。また、測定に要する切羽直下での作業時間についても検証した。

本試験は国土交通省四国地方整備局の令和2-6年度津島道路新内海トンネル工事にて実施した。本現場の地質縦断図を図-4に示す。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げず施工され、湧水も無かった（写真-1）。しかし、既施工区間の実績では泥岩の介在に伴う破碎部区間から時折湧水が発生しており、今回の試験位置は、土被りが高い（320m）ことから、想定地下水位が高く、多量湧水の発生が懸念されていた。そこで、前方の地質・湧水状況を調査するため切羽から長さ21mの穿孔探査（孔径

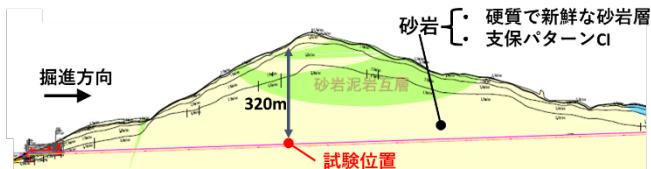


図-4 実証現場の地質縦断図
Fig.4 Geologic profile of the demonstration site



写真-1 試験前の切羽状況
Photo.1 Tunnel face of the demonstration site before the test

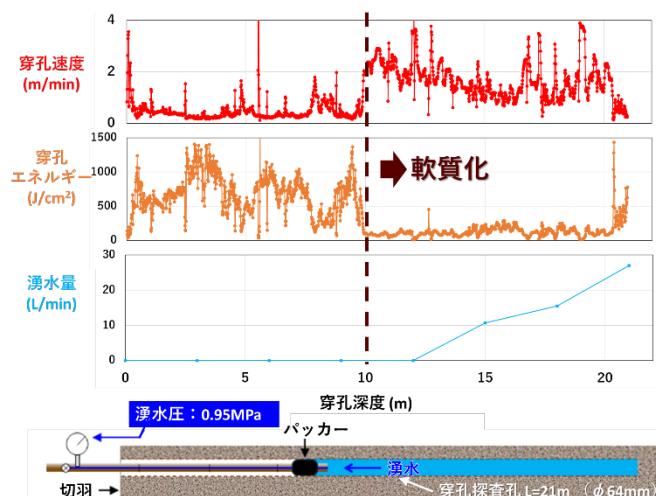


図-5 穿孔探査結果および湧水量測定結果
Fig.5 Drilling survey results and measured volume of water at the borehole during drilling

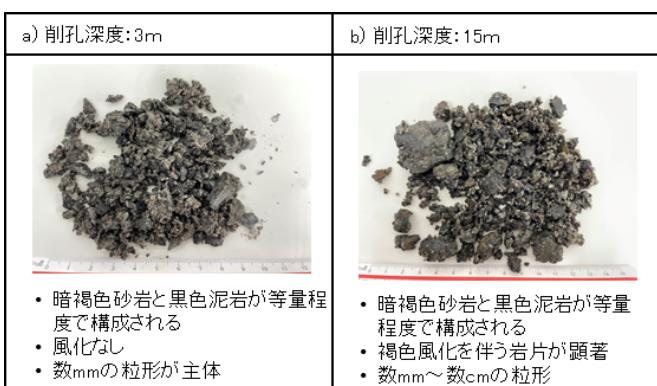


図-6 削孔時に採取したスライム観察結果
Fig.6 Examples of collected slime during drilling

64mm、長さ 21m) を実施し、この探査孔に本技術を適用した。

3.2 試験結果

図-5 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(図-5)。削孔時に採取したスライム(掘り屑)の観察結果を図-6 に示す。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(27L/min)で湧水が確認された(図-5)。これらの探査結果より、現切羽の 10m 前方での地山の脆弱化と湧水增加が懸念されたため、この区間を対象に本技術による湧水測定を実施した。

ドリルジャンボで削孔した孔は、孔曲がりや孔崩れが発生する場合がある。そこで、パッカーの設置に先立ってパッカーと同径の鋼管(ダミー管)を用いて挿入テストを行った。その結果、深度 7.7m までパッカーを挿入可能であることを確認し、それより手前の 7.2m にパッカーを設置することとした。パッカーは、前述の手順に従い、ガイドシェルを用いてパッカーロッドを継足しながら挿入した。所定の位置にパッカーを設置した後、測定ユニットならびに計器類を取り付け、ドリフターから送水してパッカーを拡張した(図-7)。

湧水圧測定状況を写真-2 に示す。ボーリング口元から排水される湧水を目視で監視した結果、パッカー拡張後に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ワークの測定結果を示す。パッカーワークが 2MPa 以上で維持できていることを確認した後、バルブを閉塞して湧水圧の測定を開始した。その結果、0.95MPa の高圧湧水が観測された。

測定後のパッカーワーク収縮、回収についてもトラブルなく完了した。

本技術における切羽直下に人が立ち入る時間は、パッカーロッドをガイドシェルにセットする時のみである(写真-3)。切羽直下での作業時間を表-1 に示す。パッカーの設置・回収時における切羽直下での人力作業は、パッカーロッド 1 本当たり 2 分ほどである。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時間を約 60% 削減でき、安全・迅速に測定できることが確認された。

3.3 試験後の切羽状況

写真-4 に試験後のトンネル施工における切羽状況を

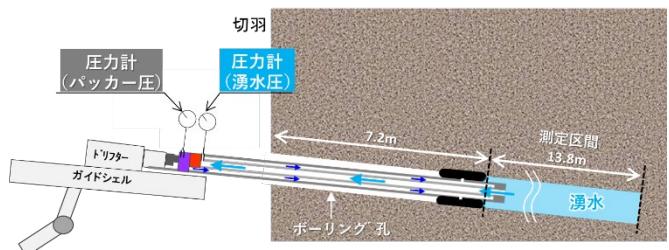


図-7 測定区間・パッカー設置位置および圧力測定位置

Fig.7 Measurement section, packer position, and pressure measurement position at the demonstration site



写真-2 湧水圧測定状況

Photo.2 Status of measuring the hydraulic pressure

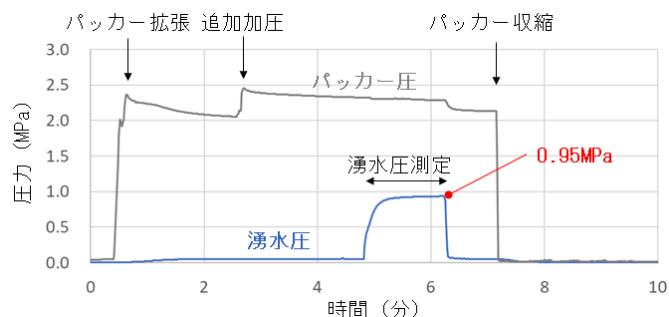


図-8 湧水圧測定結果

Fig.8 Measurement result of hydraulic pressure



写真-3 パッカーロッド継ぎ足しの様子

Photo.3 Status of rod extension

表-1 切羽直下の作業時間

Table 1 Working time just in front of the face

作業項目	時間/本(分)	本数 ※削孔長 30m を想定	合計 時間 (分)
人力 (従来)	パッカーの設置	2	20
	パッカーの回収	4	20
	パッカーの拡張 (手押しポンプ等)		10
		合計	130
本技術	パッカーの設置	0.75	20
	パッckerの回収	1.5	20
	パッckerの拡張		3
			合計
			48

示す。切羽を3.1m掘削した地点で風化を伴う脆弱部が左肩部に出現した。コンピュータジャンボの削孔データから求めた岩盤強度分布の推定結果、硬質岩盤と評価された試験時切羽と比べて、3.1m先で確認された脆弱部の岩盤強度は明確に低く、軟質であることが確認された。実証試験で確認された高水圧の存在も考慮し、切羽の不安定化が懸念され、この段階で支保パターンのランクアップ（鋼製支保工追加、上下半分割掘削）と各種対策工の準備を行った。それ以降の切羽状況は脆弱部や破碎部がさらに広がり、肌落ちが拡大、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、注入式フォアポーリングと水抜きポーリングを速やかに実施し、切羽を安定させながら掘削を進め、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、早期の適切な対策工準備・実施を行うことができ、安全・確実なトンネル掘削に貢献できた。

4.まとめ

山岳トンネル工事の切羽から行われる短尺ボーリングの湧水圧を、ドリルジャンボを用いて安全・容易に測定する技術「T-DrillPacker®Jumbo」を開発し、トンネル現場で実証試験を行った。湧水が発生している実際のボーリング孔に本技術を適用した結果、パッカーが正常に機能することを確認し、かつ脆弱区間の湧水圧を測定することができた。パッカーの設置・回収の作業状況も良好であり、従来方法と比べて切羽直下での人力作業の時間を約60%低減できることを確認した。また、本測定結果は、試験後のトンネル掘削時に確認された脆弱区間にに対する早期の対策検討に繋がり、安全・確実なトンネル掘削に役立てられた。

今後は、孔荒れなどパッカーが設置困難な地山条件も対応できるよう、適用範囲拡大に向けた改良を行うとともに、高圧・大量湧水が予想される山岳トンネル工事で本技術を積極的に活用し、安全で効果的な湧水対策に役立てていく予定である。

参考文献

- 1) 平野 太一, 奈良 聰, 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) 佐藤 勉, 久下 敦, 犬野 亮: 地すべりが懸念される坑口部と多量湧水区間を各種対策工を用いて掘削—河津下田道路 河津トンネル逆川地区—, トンネルと地下, 第53巻, 1号, pp.19-30, 2022.

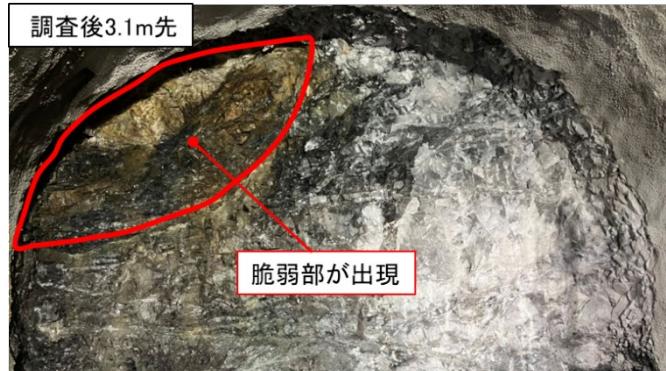


写真-4 試験後の切羽状況
Photo.4 Status of the face after the demonstration test

- 3) 土木学会: トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説, pp.33, 2016.
- 4) 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.
- 5) 「地下水対策」連載口座小委員会: トンネルにおける地下水対策(5)－山岳トンネルと地下水－, トンネルにおける地下水対策(5)－山岳トンネルと地下水－, 520号, Vol.44, No.11, pp.63-74, 2013.
- 6) 玉井 達毅, 高根 大輔, 中田 晓之, 大畠 雅義: 多量湧水下でのトンネル掘削における切羽安定化対策, トンネル工学報告集, 第28巻, I-37, 2018.
- 7) 小泉 恵介, 岩野 圭太, 岡田 侑子, 升元 一彦, 福住 幸雄, 出水 秀和, 川端 淳一: 短尺ボーリング水圧計測システムの開発と現場適用試験, 第72回年次学術講演会, VI-217, 2017.
- 8) 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(2)－ボーリング・先進ボーリングの概要－, トンネルと地下, 第39巻9号, pp.60, 2008.
- 9) 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.
- 10) 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, 2016.