

先進ボーリングを用いた湧水調査データ収集システムの開発

平塚 裕介*¹・熊本 創*¹

Keywords : NATM, forward drilling, auto data collection, remote viewing, inflow rate, hydraulic pressure, packer

山岳トンネル、先進ボーリング、自動データ収集、湧水量、湧水圧、パッカー

1. はじめに

大量湧水が懸念される山岳トンネル工事では、対策工の必要性判断や工法の検討などを行う上で、湧水の発生位置や湧水量、湧水圧などの情報を予め把握することが重要である^{1),2)}。著者らは、施工途中の切羽から行う先進ボーリングを用いた湧水調査技術「T-DrillPacker[®]」の開発を進めている^{3),4)}。本技術の概要を図-1に示す。T-DrillPackerは100m程度の先進ボーリング削孔途中で調査すべき湧水帯に遭遇した時点で、速やかにパッカーを設置して湧水量・湧水圧を測定する技術である。測定時は、削孔管やビットを孔内に残置したままケーシングとして利用するため、測定後はパッカーを回収するだけで直ちに削孔を再開できる。1本のボーリング孔で複数の湧水箇所を繰り返し調査できることは、本技術の重要な利点の一つである。この利点を十分に活かすためには、ボーリング削孔途中で、調査対象となる「測定区間」などの調査条件を、削孔中に得られる地質や湧水の情報参照しながらリアルタイムに決定する必要がある。また、湧水圧測定時には、測定終了の判断のため、測定結果をリアルタイムに評価する必要がある。これまで、専門家が現地で直接データを確認し、調査条件の決定や測定結果の評価を行ってきたが、人員の確保や費用などが課題であった。そこで、ボーリング削孔中に得られるデータや圧力測定結果を自動的に収集・整理し、遠隔地にて閲覧可能な「データ収集システム」を開発した⁵⁾。本稿では、システムの概要と現場での試行結果について報告する。

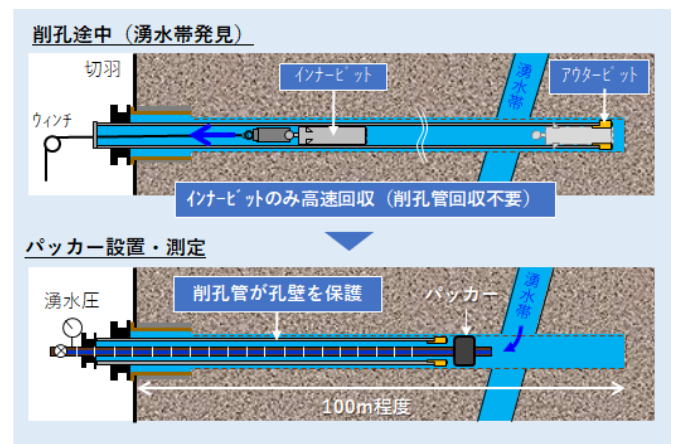


図-1 T-DrillPackerの概要

Fig.1 Overview of T-DrillPacker

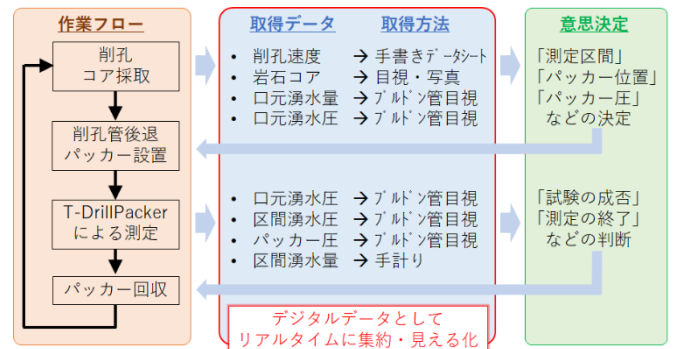


図-2 作業フローと取得データ

Fig.2 Work flow and acquired data

2. データ収集システムの概要

2.1 調査作業のフロー

図-2にT-DrillPackerによる湧水調査の作業フローならびに取得データとそれに基づく意思決定のフローを示す。まず、ボーリング削孔とコア採取を行う。削孔中は、削孔速度（単位時間当たりの削孔長）と岩石コアが得られる。また、削孔途中には、定期的に（例え

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

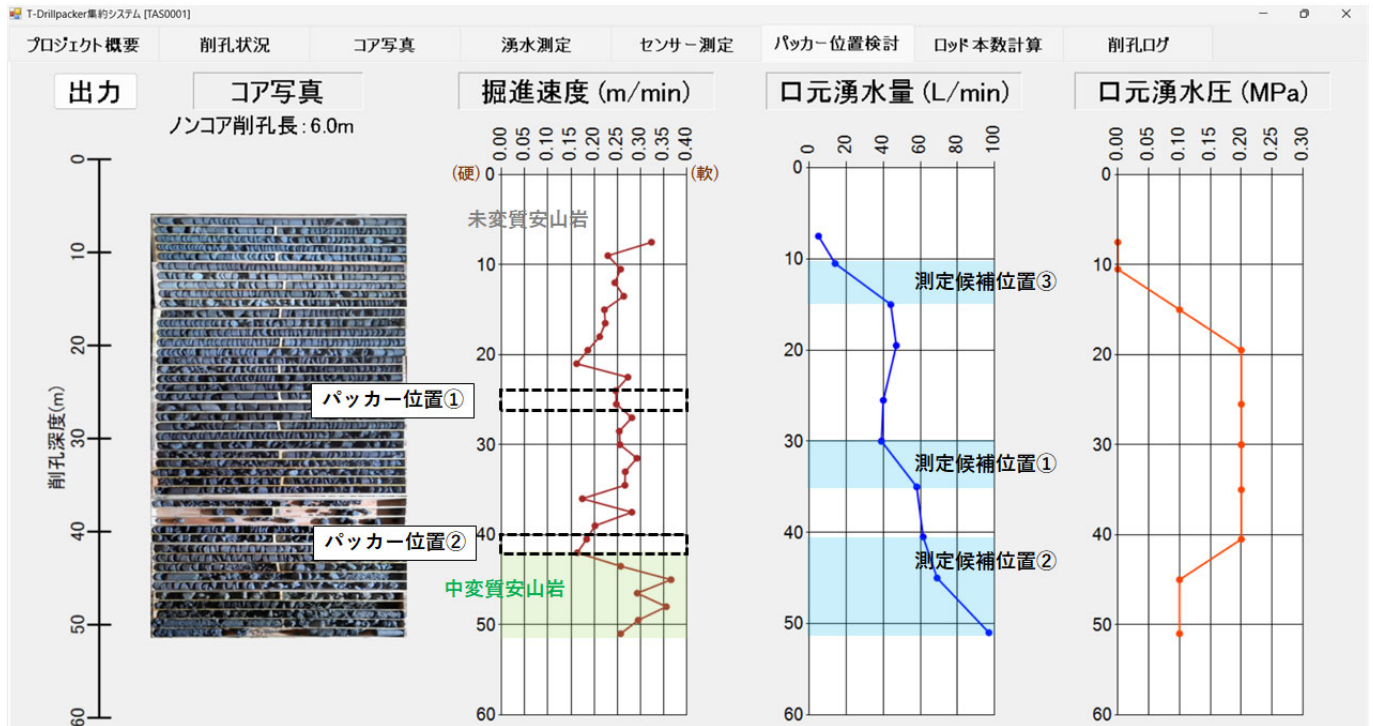


図-3 測定区間・パッカー設置位置の決定

Fig.3 Determination of measurement section and packer position

ば削孔 5m 毎) ボーリング口元で湧水量と湧水圧を測定する。図-3 に示すような口元湧水量や湧水圧が増加する区間を調査対象とし「測定区間」を決定する。

次に、岩石コアを観察しパッカー設置に適した亀裂が比較的少ない健岩部を特定し、「パッカー設置位置」を決定する。健岩部の特定には掘進速度も参考にする。パッカー設置位置の手前まで削孔管を後退させた後、パッカーを設置する。

図-4(a)に T-DrillPacker による区間測定で計測する圧力のイメージを示す。区間測定では、パッカーにより区切られた測定区間の湧水圧（以下、区間湧水圧）に加え、口元湧水圧ならびにパッカー圧の 3 つの圧力を測定する。ここで、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。まず、パッカーを拡張する前に全てのバルブを閉塞し、区間湧水圧と口元湧水圧の双方が同程度になる事を確認する。その後、パッカーを拡張し、口元湧水圧と区間湧水圧で異なる圧力変化を確認することで、パッカーによる水理的隔離状況を評価する。同時にパッカー圧が維持されていることも確認することでパッカーが正常に機能しているかを判断する。測定に問題が無い場合は、計測を継続し、湧水圧の定常状態を確認後に測定を終了する。測定終了後は、パッカーを回収し、削孔を再開する。

これまで、上記のボーリング削孔中に取りられるデー

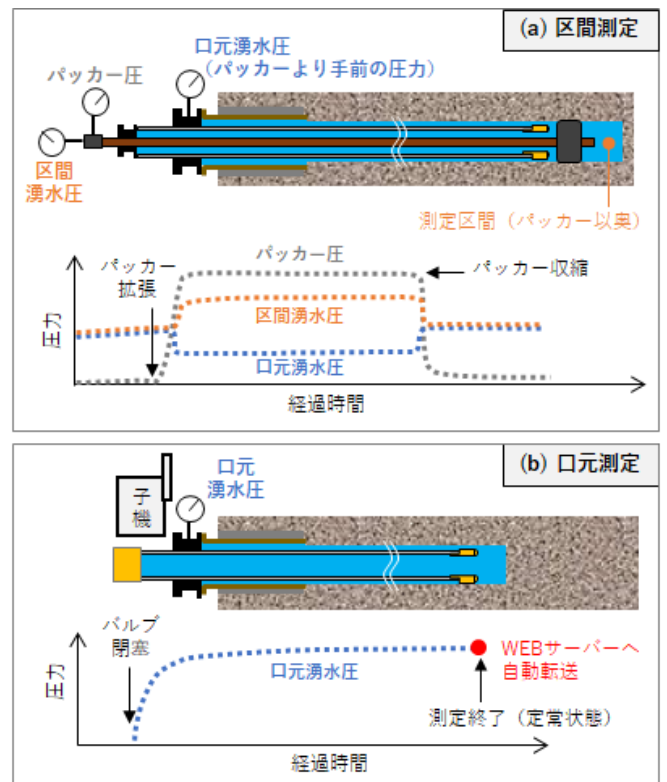


図-4 区間測定と口元測定の計測イメージ

Fig.4 Measurement of hydraulic pressures

タはオペレータや世話役らが別々に管理し、そのデータ形式も紙や写真など様々であった。そのため、調査条件の検討には、調査指揮者が現地で全てのデータを収集、整理する必要があり、極めて煩雑な作業であっ

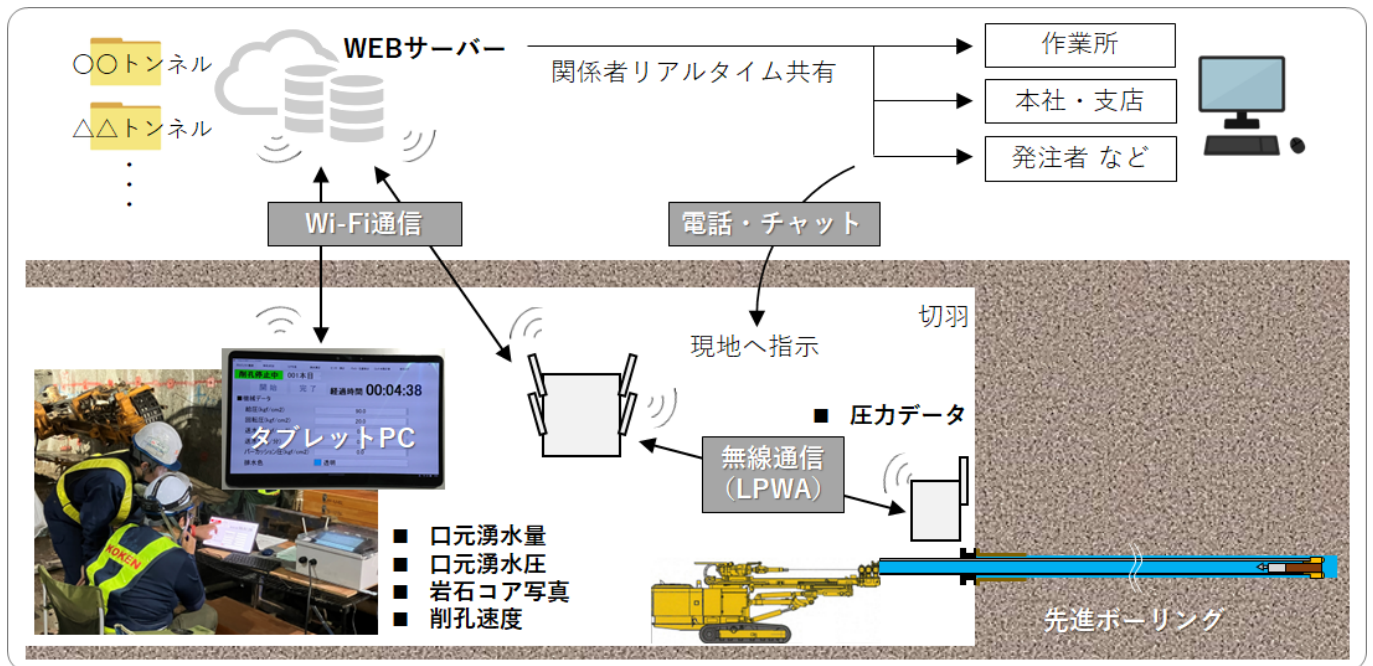


図-5 データ収集システムの概要

Fig.5 Overview of data collection system

表-1 無線伝送システムの諸元

Table 1 Specifications of wireless transmission systems

無線通信方式	LPWA (Private LoRa)
データ保存件数	10,000件/子機1台
親機電源	AC100V or 200V
親機外形寸法	W350×H366×D197mm
子機電源	2次電池
子機外形寸法	W100×H150×D70mm
許容使用条件	-10~60℃, 95%RH以下
防塵・防滴	IP65

た。また、湧水圧測定はボーリング施工者がブルドン管等で測定しており、定常状態の判断などに課題があった。そのため、圧力の時間変化を測定するための専属の計測員も現地に常駐する必要があった。

2.2 削孔中データの収集機能

図-5 にシステムの概要を示す。本システムは、ボーリング口元で測定する湧水量や湧水圧、コア写真、削孔速度などの参照データをデジタルデータとして一元管理し、調査関係者へのリアルタイム共有を可能としたものである。削孔中の全ての情報はボーリング施工者がタブレットPC上で入力することにより、デジタルデータとして自動的にWEBサーバー上に集約される。コア写真、削孔速度、口元湧水量・湧水圧は、削孔深度との関係でグラフ化・整列されデータ入力の度に随時更新される（図-3）。閲覧者は、湧水量や湧水圧の増減と地質状況の関係をリアルタイムに確認でき、測定

区間やパッカー設置位置などの調査条件を遠隔地から迅速に決定することができる。

2.3 圧力測定データの自動収集機能

圧力測定には圧力センサーを用い、その近傍に無線通信のための子機（10cm×15cm×7cm）を接続する。無線システムの諸元を表-1 に示す。子機から親機へのデータ伝送には、長期のモニタリング等にも対応可能なLPWA（Low Power Wide Area）を採用した。親機に転送されたデータは、坑内Wi-Fiを経由してWEBサーバー上のデータベースに格納される。これらのデータは専用ソフトでグラフ化など整理された状態で坑内外のどこからでも閲覧することができる。口元測定では、専門家が遠隔地から圧力変化の定常状態をリアルタイムで判断し、ボーリング施工者はその判断を受けて、測定を停止し、その際の最終読み値が自動的に記録される（図-4(b)）。区間測定では、子機3台を用いて口元湧水圧・区間湧水圧・パッカー圧の時間変化を遠隔閲覧することができる。これら全ての測定データを遠隔地にて閲覧できるため、専門家や計測員などの現地常駐人員を大幅に削減することが可能となる。

3. 現場での試行

3.1 削孔中データの収集

本システムを複数現場の先進ボーリング調査において試行した。図-6 に施工設備の設置レイアウトの一例を示す。この現場は、坑内Wi-Fi（PicoCELA/PCWL-

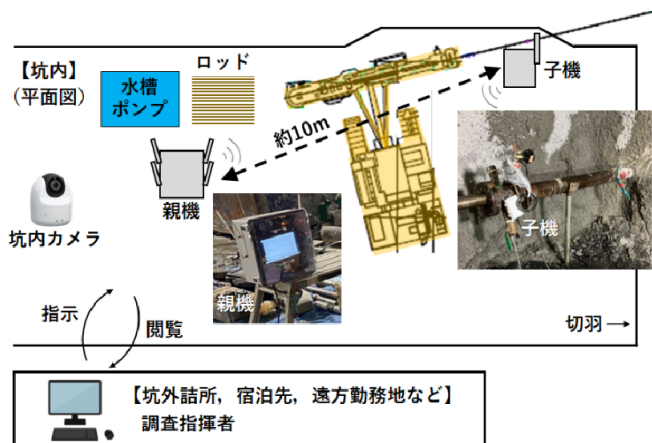


図-6 施工設備・計測機器のレイアウト

Fig.6 Layout of construction and measuring equipment

0400, 規格: IEEE802.11) が整備されており, 先進ボーリング実施位置から WEB サーバーにアクセス可能な環境である。Wi-Fi の電波強度は-70dBm 程度であった。また, 坑内カメラにより作業状況も遠隔地から確認できる環境であった。ドリルジャンボ等の施工機械類は全て切羽後方にあり, 調査位置付近は無線通信への支障物が少ない環境であった。調査の実施体制は, ボーリング削孔からバッカー設置, 湧水測定までの一連の現地作業をボーリング施工者(世話役 1 名, 削孔オペ 1 名, 手元作業員 2 名)が実施し, 世話役が本システムによりデータ入力を行った(写真-1)。調査条件の決定や, 測定の開始/終了判断などは, 調査指揮者(地下水の専門技術者 2 名)が, 坑外詰所や遠方の勤務地などから各種データを遠隔閲覧して行った。

本システムの閲覧画面とそれに基づいて決定した調査位置の一例を図-3 の青ハッチング部に示す。本事例では、測定候補位置として、口元湧水量が増加した3区間を抽出した。パッカー設置位置は、通常、コア写真を参考に亀裂の少ない健岩部を選定するが、本事例では、コアディスクキングが顕著であったため、削孔速度の遅い区間を健岩部と判断しパッカー設置位置とした。本事例では、選定した3か所の候補位置のうち、限られた時間で2か所の測定を行うことができた⁶⁾。

3.2 圧力データの収集

センサーの設置、圧力測定を開始・終了操作など現地での一連の作業は、世話役や手元作業員が実施した（写真-2）。設置した無線子機と親機間の距離はボーリングマシンを介して約 10m である。図-7 に区間測定における口元圧と区間圧の測定例を示す。これらの圧力データも、専門家が切羽から離れた場所から本システムの閲覧画面を参照することで、測定の成否や測定終



写真-1 データ送信状況

Photo.1 Transferring boring data



写真-2 無線機器の設置状況

Photo.2 Installing of wireless device

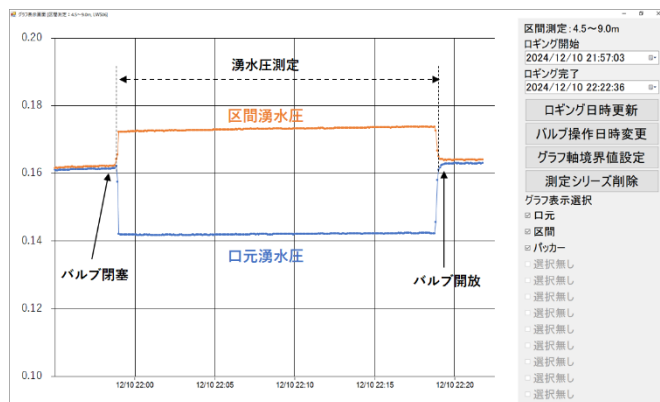


図-7 圧力測定結果

Fig.7 Results of hydraulic pressure measurement

了の判断など一連の調査指示を行うことができた。

本システムにより、削孔時の各種データや湧水圧の測定データを遠隔地にてリアルタイムで閲覧し、現地のボーリング施工者への迅速な作業指示を実現することができた。これにより、従来現地常駐が必要であった調査指揮者や計測員などの人員（昼夜作業2班で計4名）を削減できる見通しが得られた（図-8）。また、本システムを用いれば調査指揮者と同様に、現場元請け職員や発注者などの工事関係者も、ボーリングの進捗

管理や調査後の記録閲覧に活用できると考えられる(写真-3)。

4. まとめ

先進ボーリング削孔中に得られるデータや圧力の時間変化データを迅速に収集・整理するシステムを開発し、トンネル現場での湧水調査にて試行した。その結果、ボーリング施工者の操作によって収集された削孔中のデータを現場の坑内 Wi-Fi 環境下にて WEB サーバー上に集約し、調査指揮者が坑外の遠隔地にて閲覧することによって、迅速に測定区間やパッカー設置位置などの調査条件を決定するのに役立つことが確認できた。本試行により、従来、現地常駐が必要であった調査指揮者や計測員を削減し、今後の調査を大幅に省人化できる見通しが得られた。今後は、得られた調査データを用いてトンネル掘削時の切羽湧水量予測や対策工検討などの分析・評価作業を迅速に実施可能な技術の開発に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 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，p.205，2009.
- 2) 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，p.942，2008.
- 3) 平塚 裕介，熊本 創，増岡 健太郎，山本 肇：先進ボーリングを用いた切羽前方の湧水調査技術「T-DrillPacker®」の開発，大成建設技術センター報第 54 号，2021.
- 4) 平塚 裕介，熊本 創，山本 肇：先進ボーリングを用いた切羽前方の湧水調査技術「T-DrillPacker®（水圧圧送方式）」の開発，大成建設技術センター報第 55 号，2022.
- 5) 平塚 裕介，熊本 創：先進ボーリング調査データ収集システムの開発，土木学会第 79 回年次学術講演会，2024.
- 6) 平塚 裕介，熊本 創，山本 肇：先進ボーリングの湧水調査技術「T-DrillPacker®（水圧圧送方式）」現場適用，土木学会第 79 回年次学術講演会，2024.

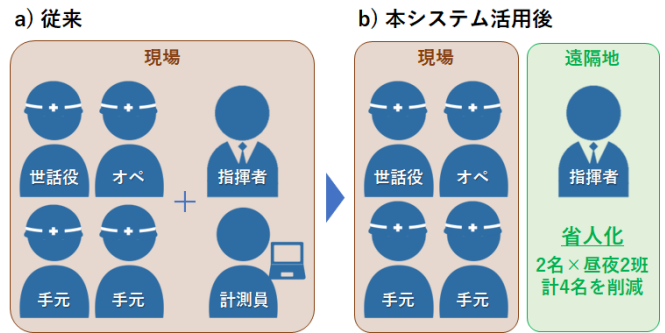


図-8 調査に関わる人員

Fig.8 Investigation members

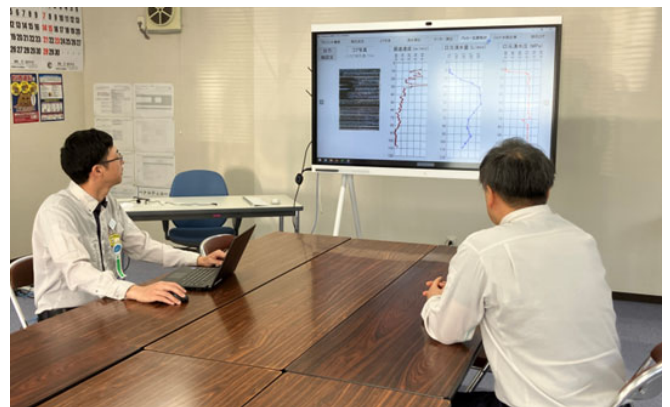


写真-3 作業所内でのボーリング進捗の確認

Photo.3 Checking the drilling progress at the site office