

先進ボーリングを用いた湧水調査技術の 現場実証

平塚 裕介^{1*}・熊本 創¹・増岡 健太郎¹・山本 肇¹

¹大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

*E-mail: hrtyus00@pub.taisei.co.jp

山岳トンネル工事の安全・施工性を確保するためには、切羽前方の湧水状況を事前に把握することが重要である。その方法としては、切羽からの先進ボーリング孔内にパッカーを設置して、湧水発生箇所の流量・水圧を測定することが有用である。従来の方法では、パッカー設置作業時に削孔管を引き抜く必要があり、孔壁崩壊のリスクや工程遅延などの問題から実施が困難な場合が多かった。そこで筆者らは、切羽前方の湧水帯の流量や水圧を削孔管を引き抜くことなく、確実かつ迅速に測定する新たな技術「T-DrillPacker®」を開発した。本技術はコア削孔とノンコア削孔に対応しているが、本報では、ノンコア削孔用のツールズを山岳トンネルの先進ボーリングに用いた結果について報告する。

Key Words : mountain tunnel, advanced borehole, groundwater inflow, hydraulic pressure, packer

1. はじめに

山岳トンネル工事では、施工中に大量の湧水が発生すると、トンネル切羽の崩壊や水没などの危険があり、工事の安全や工期・工費に重大な影響を及ぼすことがある。そのため、切羽前方の湧水帯の位置や水量・水圧を確実に把握し、止水注入や水抜き孔設置などの湧水対策を事前に検討する必要がある。切羽からの先進ボーリングを利用した湧水帯の調査では、ボーリング口元での湧水量や水圧の測定が簡便である^{1) 2)}。しかし、個々の湧水帯を正確に調査するためには、パッカーを用いて湧水帯を水理的に隔離し、その水量や水圧を測定することが望ましい^{3) 4)}。しかしながら、従来の方法では、図-1のように、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。また、削孔管引き抜き作業には多くの手間と時間を要するため、特に100m程度以上の中長尺のボーリングではパッカーを用いた湧水測定の実施が困難な場合が多かった。最近では、削孔管の中からパッカーを先端まで挿入しビットを前方に押し出すことで、削孔管を引き抜くことなく、パッカーを設置する方法が開発されているが、測定後のビット回収や再削孔の方法は明らかではない⁵⁾。

そこで筆者らは、上記の削孔管を引き抜く手間や孔壁崩壊のリスク、測定後の削孔継続性などの課題を解決す

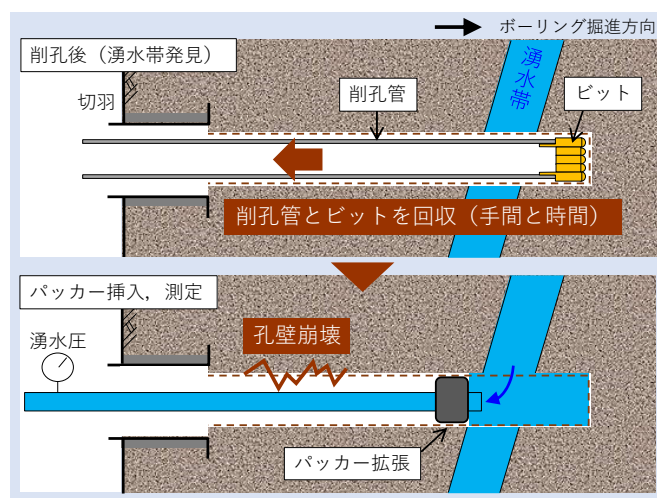


図-1 従来の湧水圧測定方法

る新たな測定技術「T-DrillPacker®」を開発し⁵⁾、トンネル現場等において装置の動作状況や機能性の検証を行ってきた。本稿では、本技術の概要を述べるとともに、山岳トンネル現場における湧水測定の結果について報告する。

2. T-DrillPackerの概要

本技術では、図-2 (a) に示すようなアウタービットとインナービットから構成される二重ビットシステムを

採用した。アウタービットとインナービットの接合面は八角形状となっており、両ビットが確実に嵌合されることで、ボーリングマシンから削孔管を通じてアウタービットに伝達された回転・打撃力がインナービットに伝わり、効率的な全断面でのノンコア削孔が可能である。削孔中に湧水帯が確認された際は、ワイヤーラインでインナービットを速やかに回収することができる（図-3の②）。インナービット回収後、削孔管を湧水帯の手前まで後退させ、パッカーをインナービットを回収した後の隙間を通して挿入し、拡張させて湧水帯の水量や水圧を測定する（図-3の③、④）。削孔管が既削孔区間の孔壁を保護した状態でパッカーを挿入することができるため、孔壁崩壊のリスクも少なく、迅速・確実な測定が可能である。測定完了後には、インナービットを水圧圧送で再設置し、削孔を再開することができ、複数の湧水帯が確認された場合でも、繰り返し削孔と測定を行うことが可能である（図-3の⑤）。

本技術で用いるパッカーは、アウタービットの狭い内径を通して挿入するため、通常よりも大きな拡張幅が必要となる。そこで、図-2 (b) に示す初期径の約3倍拡張可能な大拡張パッカーを新たに開発した（初期外径46mmから最大120mmまで拡張可能）。耐圧性能は5.0MPaで、4.0MPa程度の湧水圧まで対応可能である。削孔マシンやワイヤーラインシステムなどは、鉦研工業㈱のPS-WL（パーカッションワイヤーラインサンプリング工法）⁹を用いている。T-DrillPackerの諸元を表-1にまとめる。上記のノンコア削孔方式に加え、二重ビットをコアを格納する鋼管（コアチューブ）を備えたコアビットに代えることで、コア削孔にも適用可能である（図-2 (c)）。コア削孔方式の場合、コアチューブをワイヤーライン回収した後にパッカーをコアビットの内側を通して挿入する。コアビットの内径が45mmであるため、図-2 (d) に示すノンコア削孔方式よりも初期外径の小さいパッカーを新たに開発した（初期外径40mmから最大で120mmまで拡張可能）。耐圧性能はノンコア削孔方式と同じく5.0MPaである。

表-1 T-DrillPacker の緒言

削孔方式	ノンコア	コア
アウタービット外径	101mm	-
インナービット外径	55mm	-
コアビット外径	-	101mm
採取コア径	-	45mm
パッカーラバー長	600mm	500mm
パッカー外径（拡張前）	46mm	40mm
パッカー外径（拡張後）	120mm	
パッカー耐圧	5.0MPa	

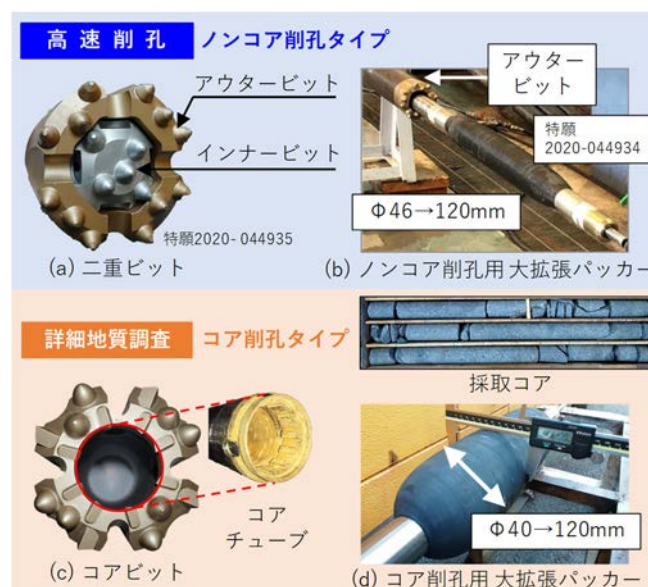


図-2 T-DrillPacker のラインナップ

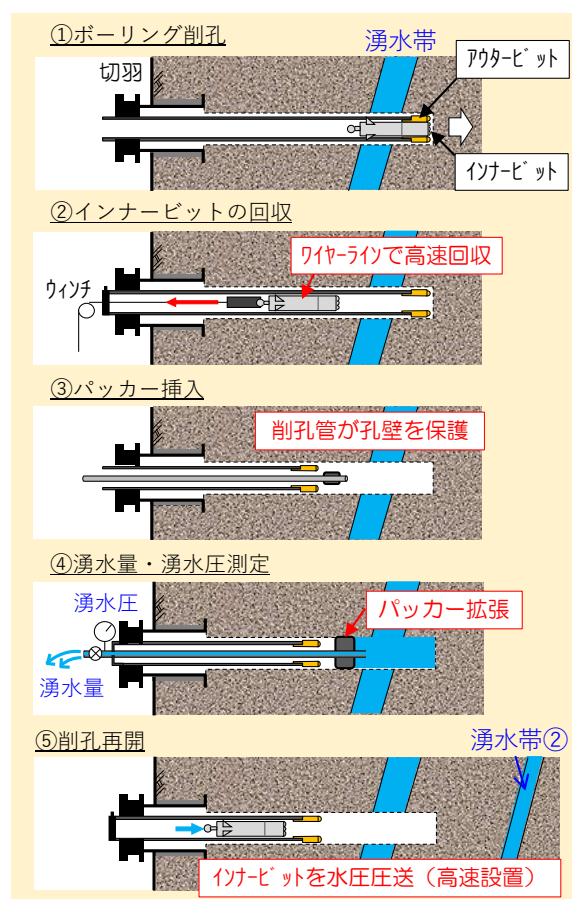


図-3 T-DrillPacker（ノンコア削孔方式）の測定手順

3. 現場実証試験

本稿では、ノンコア削孔方式の現場実証試験の概要と結果について示す。試験場所は、国土交通省近畿地方整備局大野油坂道路荒島第2トンネル西勝原地区工事であ

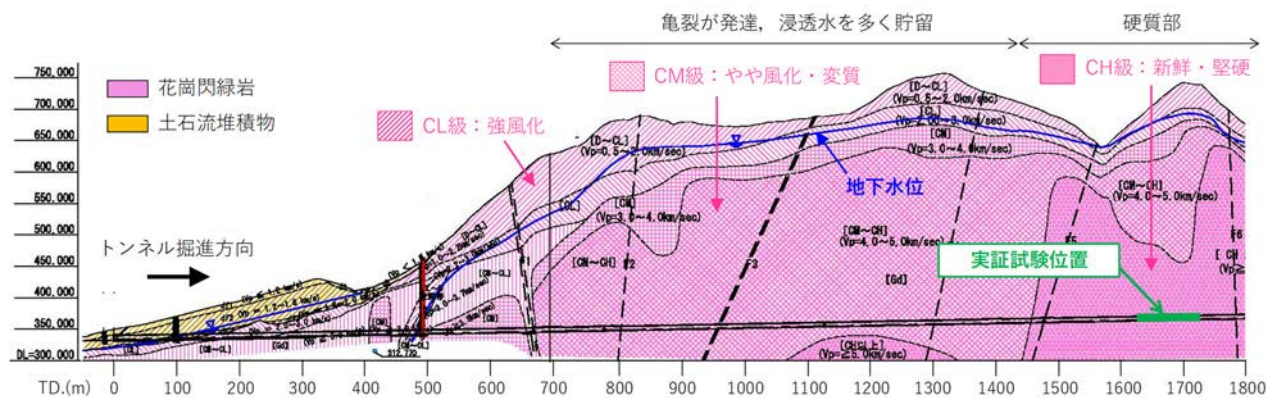


図-4 地質縦断面図および実証試験位置（本坑全長2,721mのうちTD0m～1,800mを表示）

り、本坑切羽から本技術による先進ボーリングの削孔および湧水測定を行った。

(1) 試験の目的

a) 二重ビットの削孔性能確認

硬質な岩盤を削孔する際の二重ビットの耐久性について確認した。また、削孔性能を確認するため、掘進速度データ（1分あたりの削孔長）を取得し、コア削孔方式との比較を行った。さらに、ワイヤーラインによるインナービットの回収および水圧圧送によるインナービットの再セットの動作状況についても確認した。

b) パッカーの動作確認

実現場環境下における大拡張パッカーの挿入・拡張・収縮などの動作確認を行った。なお、ノンコア削孔の場合、ボーリングコアを採取しないため、パッカーを設置する健岩部の位置を特定することが難しい。今回は、ボーリング削孔中に得られる口元湧水量・口元湧水圧、掘進速度データに着目し、パッカー設置位置を決定する方法について検討した。



写真-1 先進ボーリング口元からの湧水状況



写真-2 先進ボーリング削孔状況

(2) 試験現場の地質および湧水状況

図-4に地質縦断面図を示す。実証試験位置は、新鮮で堅硬な花崗閃緑岩が分布し、硬質部が連続する区間である。事前の地質調査では、一部で小規模な破碎帯が確認されており、多量の湧水が予想されていたが、先進ボーリングの結果、ボーリング湧水量は最大で60L/min程度であった（写真-1）。

(3) 試験概要

二重ビットによる長さ70mのノンコアボーリングを行った（写真-2）。一般に、硬岩地山で100mのボーリングを行う場合、ビットの損耗により削孔速度が低下することから、削孔途中に1回程度のビット交換が行われる。これを前提に、今回は1個のビットで少なくとも50mの削孔が可能かどうかを確認するため、削孔深度53.5m時

点で、二重ビットを回収し、ビットの損耗度を確認した。その後、口元湧水圧が増加した削孔深度40mを対象に、本技術による湧水圧測定試験を行った（図-5）。

パッカーの設置位置は、図-5を参考に口元湧水圧が増加する削孔深度30～40mより手前で、かつ掘進速度が比較的小さい区間を健岩部と考え、削孔深度30mとした。測定区間長はパッカー設置位置からその時点での削孔済先端部までの23.5mである。

(4) 試験結果

a) 二重ビットによるボーリング削孔

削孔深度53.5m時点で、二重ビットを回収し、損耗状況を確認した結果、コアビットの硬岩に対する一般的な

損耗具合と同程度であることを確認し、削孔継続可能と判断した。その後、ビット交換を行うことなく削孔深度70mまで削孔を完了することができ、硬岩を削孔する上での二重ビットの耐久性に大きな問題が無いことが確認できた。

累積削孔長と削孔時間の関係について、今回の二重ビットによるノンコア削孔と、過去に同現場で実施されたコアボーリング（コア回収時間を除く）との比較を図-6に示す。対象地山は異なるものの、同地山等級CIIの岩盤に対して、二重ビットによるノンコア削孔方式の掘進速度はコア削孔方式と比べて同程度以上であり、二重ビットの削孔性能に問題がないことが確認できた。また、湧水測定時のインナービットの回収および再セットに要した時間はそれぞれ5分程度であり、動作状況も良好であった。

b) 湧水圧測定

パッカー挿入用ロッド（L=1.5m）を継ぎ足して所定の位置にパッカーを設置した（写真-3）。パッカー拡張後、パッカー挿入用ロッド口元に取り付けた圧力計（図-5中の①）にて測定区間の湧水圧（以降、区間湧水圧と呼ぶ）を計測した。測定区間の湧水圧に加えて、削孔管口元のプリベンダーに設置した圧力計（図-5中の②）で口元湧水圧を計測した。この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と考えられる。区間湧水圧と口元湧水圧の測定結果を図-7に示す。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った事を確認した。その後、パッカー拡張を開始し、パッカーが孔壁に密着すると、区間湧水圧が上昇した。これにより、パッカーによって測定区間とその手前の孔内との水理的な分離が確認できた。これらのデータから、パッカー設置箇所からの水のリークは無く、口元湧水圧や湧水量ならびに掘進速度データから決定した今回のパッカーの設置位置に問題がないことが確認できた。

次に、パッカー挿入用ロッドの口元に設けたバルブを開放し、測定区間の区間湧水量の測定を行った。湧水量測定の後、再度バルブを閉鎖し、区間湧水圧が概ね安定するまで計測を継続した。区間湧水圧と口元湧水圧に明瞭な違いが見られることから、口元湧水圧だけでは把握できない湧水帯そのものの湧水圧を計測できたと考えられる。図-8に、先進ボーリング削孔10m毎に測定した口元湧水圧と、今回測定した区間湧水圧の比較を示す。口元湧水圧は、その時点までに削孔したボーリング孔全体の平均的な圧力である。それに対して、パッカーを用いて測定した区間湧水圧は明確に高い。口元湧水圧は、ボーリング孔内の水が周辺へ逸水する影響等により、前方の湧水帯の水圧を正確に把握できず、多くの場合に過小評価すると考えられる。このような場合は、特に、本技

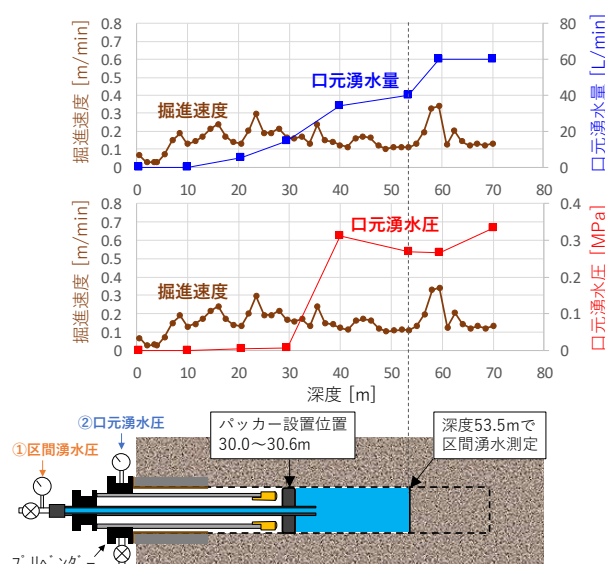


図-5 口元湧水量、口元湧水圧および掘進速度

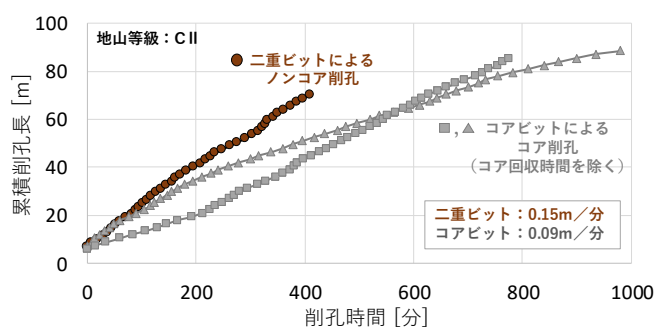


図-6 ノンコア削孔とコア削孔の掘進速度の比較



写真-3 パッカー挿入状況

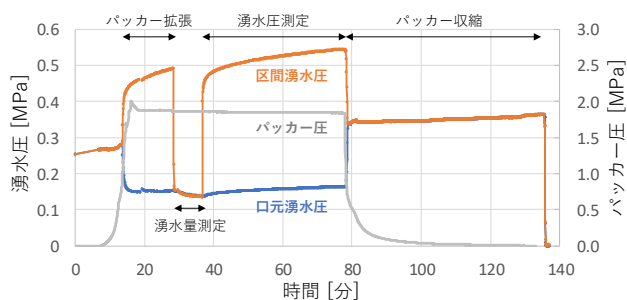


図-7 湧水圧測定結果

術によるパッカーを用いた区間湧水圧の測定が有効であると考えられる。

計測完了後のパッカー収縮・回収に問題は無く、再度インナービットをボーリング先端にセットして、削孔を再開した。最終的に予定されていた70mの削孔を所定時間内に完了することができた。削孔を中断し、湧水測定を行った後、削孔再開までの一連の作業に要する時間を従来方式と比べ約40%短縮することができた。

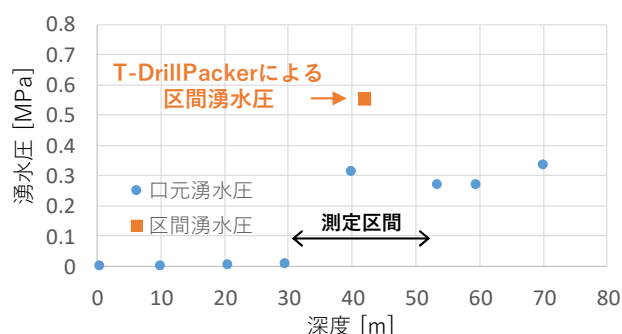


図-8 口元湧水圧と区間湧水圧の比較

4. 透水係数の算定および切羽湧水量の推定

試みに、今回の試験区間（削孔深度30～53.5m）の透水係数を、以下のトンネル湧水量の理論式⁷⁾を用いて算出した。

$$Q = 2\pi k \frac{h}{\ln 4 \frac{h}{d}} \cdot l \quad \text{式(1)}$$

ここに、 Q ：湧水量（ m^3/s ）， k ：透水係数（ m/s ）， h ：水頭（ m ）， d ：トンネル径（ m ）， l ：トンネル長（ m ）。

上記の測定結果に基づいて、 Q と h をそれぞれ、ボーリングの区間湧水量12L/min、区間湧水圧55m（0.55MPa）と仮定し、 d をボーリング径100mm、 l を1mとして計算した結果、透水係数は $4.4 \times 10^{-6} \text{m/s}$ であった。この透水係数から同式により、 d をトンネル径10.5m、 h を55m、 l を1mとして計算したトンネル湧水量の推定値は30L/minであった。実際の同区間の切羽湧水量は切羽観察より10～50L/min程度であり、概ね妥当な推定結果が得られたと考えている。

5. まとめ

先進ボーリングの削孔を継続しながら、ボーリング先端の湧水量・湧水圧を迅速に測定する技術「T-DrillPacker」を開発した。本技術はノンコア削孔とコア削孔の両者に対応している。今回は、ノンコア削孔方式のツールズを山岳トンネル工事の先進ボーリングに適用し、現場実証試験を行った。その結果、得られた湧水圧はボーリング口元で測定した圧力よりも明らかに高く、パッカーを用いた区間湧水圧測定の必要性・有効性が改めて確認された。パッカーを用いた切羽前方の湧水調査は、孔壁崩壊リスクや調査時間の制約等の理由により必ずしも容易で

はないが、本技術を用いれば、削孔管を引き抜かずにビット先端からパッカーを突出して水圧測定できることを現場試験を通じて確認できた。また、測定時間は従来法より約40%短縮できることを確認した。二重ビットの耐久性や削孔性能、測定完了後の削孔継続性も良好であった。測定結果から試験区間の透水係数を算出し、切羽湧水量を推定した結果、トンネル掘削時に確認された湧水量と概ね整合的であり、調査結果の妥当性が示された。今後は、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。

参考文献

- 1) 高原 英彰，依田 淳一，川原 一則：偏圧する高圧帯水層の地山における湧水圧管理を用いたトンネル掘削，トンネル工学報告集第15巻，pp.101-105，2005。
- 2) 永利 将太郎，長川 善彦，中田 暁之，大畑 雅義：多量湧水区間をさまざまな対策で施工，トンネルと地下，550号，Vol.47，No.6，pp.7-16，2016。
- 3) 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，pp.785-786，2016。
- 4) 滝 英明，志水 俊仁，升元 一彦，岩野 圭太，岡田 侑子，川端 淳一，倉岡 研一，久我 俊充，橋本 淳弘：中尺ボーリング先端区間の湧水圧モニタリング技術，土木学会第72回年次学術講演会，pp.437-438，2017。
- 5) 平塚 裕介，山本 肇，増岡 健太郎：ボーリング削孔中の湧水帯測定技術「T-DrillPacker」の開発，土木学会第75回年次学術講演会，VI653，2020。
- 6) 日本トンネル技術協会「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）ートンネル切羽から行う短尺・中尺ボーリングー，トンネルと地下，559号，Vol.48，No.3，pp.73-83，2017。
- 7) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル・ライブラリー20，山岳トンネルの補助工法，pp.115，2009。

APPLICATION OF MEASUREMENT SYSTEM FOR GROUNDWATER INFLOW RATE AND PRESSURE IN ADVANCED BORING

Yusuke HIRATSUKA, Sou KUMAMOTO, Kentaro MASUOKA
and Hajime YAMAMOTO

It is important to find in advance groundwater flow paths with high hydraulic pressure (*e.g.* fractured zones) ahead of a tunnel face for safety of mountain tunnel construction. Advanced boring is an effective way to investigate possibility of large groundwater inflow. However, in a conventional way, there are significant risks of borehole collapse and time delays when retrieving drill rods and drill bit before installing a packer system. Therefore, the authors developed a new measurement system called “T-DrillPacker®” that could be installed without pulling out the drilling tools. In this paper, we describe the concept and overview of the new measurement system and its application to an advanced boring at a mountain tunnel construction.