

トンネル前方の湧水調査技術「T-DrillPacker®」の開発

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	増岡健太郎
大成建設(株)	正会員	山本 肇

1. はじめに

山岳トンネル施工中に坑内に流入する湧水の発生箇所や水量・水圧を事前に把握することは、工事を安全・確実に進めるために重要である。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、ボーリング口元で湧水量や水圧を測定する方法が簡便であるが^{1)・2)}、個々の湧水帯について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た状態で測定することが望ましい³⁾。しかし、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、削孔管を引き抜くことなく、切羽前方の湧水帯の流量や水圧を測定できる新たな技術「T-DrillPacker」を開発し⁴⁾、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流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**)。

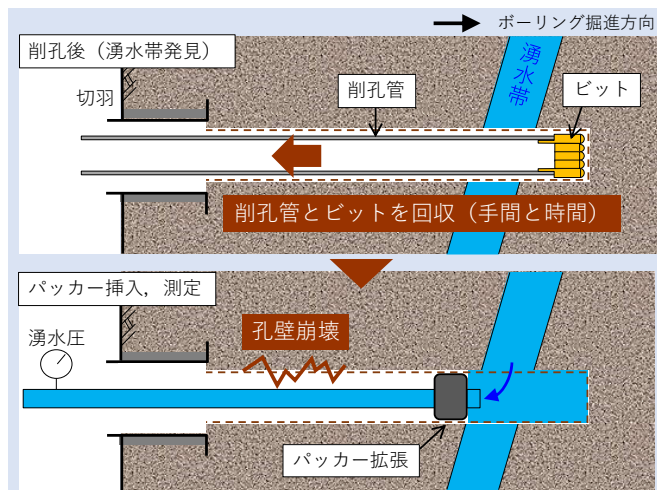


図-1 従来の湧水圧測定方法

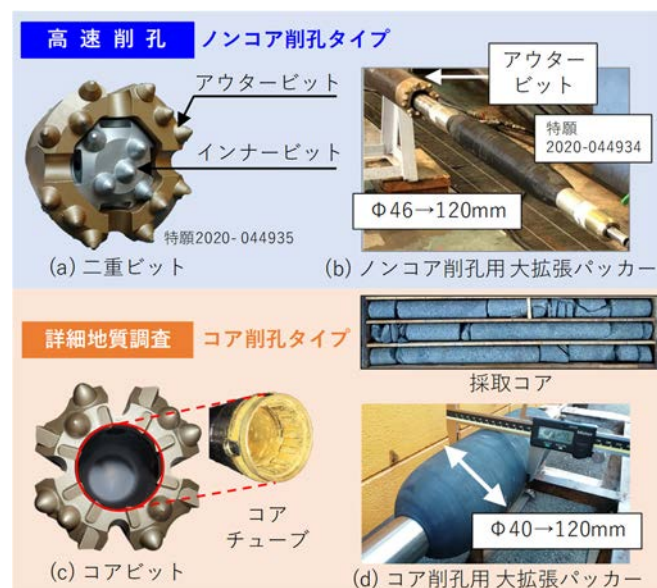


図-2 T-DrillPacker のラインナップ

キーワード 山岳トンネル, 先進ボーリング, 湧水量, 湧水圧, パッカー

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株)技術センター TEL 045-814-7221

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）。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）⁵⁾を用いている。

先進ボーリングには、水抜きボーリングなどのノンコア削孔と、コア採取を伴うコア削孔がある。本技術はいずれにも対応しており、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。

3. 現場実証試験

ノンコア削孔方式、コア削孔方式のそれぞれについて現場実証試験を行った。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り、本坑切羽から行った先進ボーリングを用いて湧水測定を行った。以下に、試験の概要と結果について示す。

(1) コア削孔方式

a) 試験の目的

本試験では、開発した大拡張パッカーをビットの内側を通してボーリング先端まで挿入できるかを確認した。また、パッカー拡張の際、漏水などのトラブル無く測定区間を正常に区切れるかどうかを確認した。さらに測定後、パッカーが正常に収縮し、速やかに回収できるかを確認し、本手法による測定の迅速性や測定後の削孔継続性についても検証した。

b) 試験現場の地質および湧水状況

本ボーリング位置では地下水位がトンネル上方 300m 程度にあると想定されており（**図-4**），湧水の増加が予想されていた。亀裂が発達した花崗閃緑岩が分布し、一部の小規模な断層や変質を受けて脆弱化した部分では、トンネル掘削時に多量の湧水が発生する可能性が指摘されていた。試験を実施した地点では、切羽の手

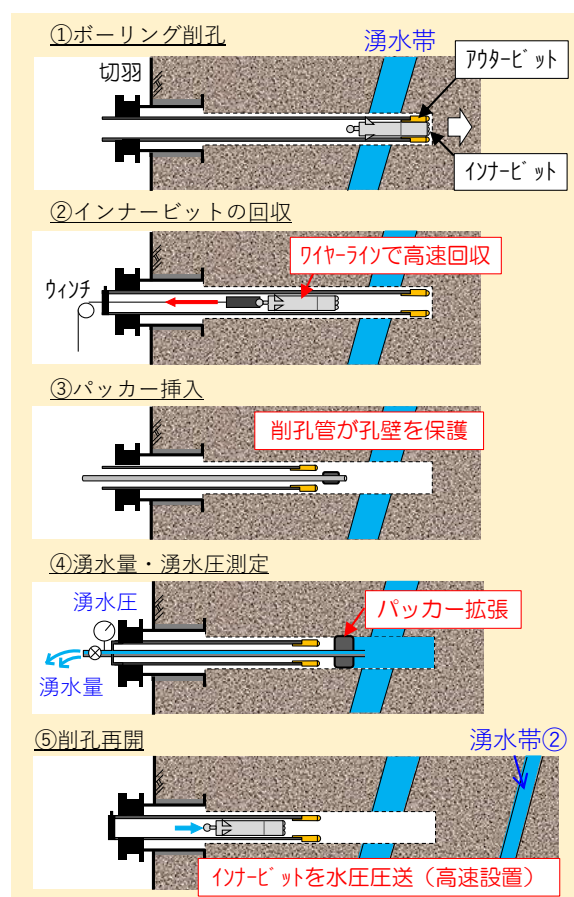


図-3 T-DrillPacker（ノンコア削孔方式）の測定

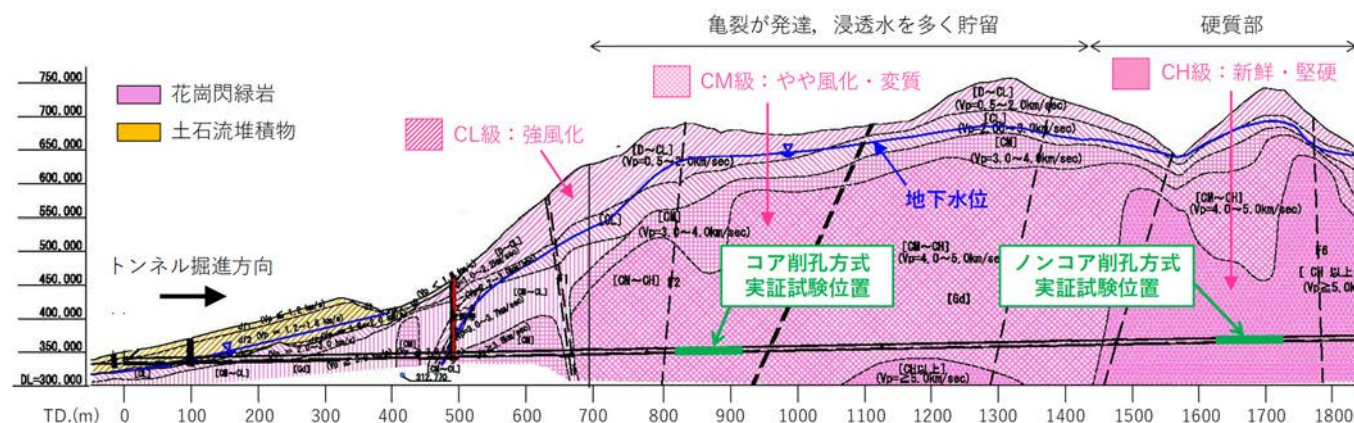


図-4 地質縦断図および実証試験位置（本坑全長 1,423m のうち TD0m～1,850m を表示）

前 10m 程度から湧水の増加が確認されており、切羽上部から行った水抜きボーリングと吹付面の亀裂から合計で 300L/min の湧水があった。また、切羽から数 m 手前の右側壁部からも長さ 15m の水抜きボーリングを行っていた（湧水量 150L/min）。今回の先進ボーリングでは、上述の水抜きボーリングと並行して、さらに前方の湧水帯を調査するものであった。

先進ボーリングで採取したコア観察の結果、口元から 28m に渡って破碎状のコアが確認され、切羽付近で発生した湧水は、主にこの破碎ゾーンからのものと考えられた（図-5）。それ以深は、口元から削孔深度 70m 地点で確認された厚さ 1m 程度の破碎部を除き、棒状のコアが採取される健岩部であった。

c) 試験概要

本坑切羽から長さ 90m の先進ボーリングを行い、削孔途中で確認された削孔深度 70m 地点の破碎部を対象として、コア削孔方式による湧水測定を行った。先進ボーリングの削孔を破碎部を抜ける削孔深度 82.5m まで継続した後、削孔を中断し、削孔管を後退させてコアで確認された亀裂のない健岩部（削孔深度 68～69m）にパッカーを設置した（図-7）。湧水の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 13.5m である。

d) 試験結果

パッカーを所定の位置に設置した後、パッカーを拡張し、パッカー挿入用ロッド口元に取り付けた圧力計（図-6 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-6 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。

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。今回のボーリングでは、どの測定深度においても 0.5MPa 程度の圧力であった。これに対して、パッカーを用いて測定した区間湧水圧は口元湧水圧よりも明確に高い。今回のように、先進ボーリング開始時点で切羽周辺から湧水が発生し、あるいは近傍に水抜きボーリングがある条件下では、ボーリング口元での湧水圧測定を行っても、先進ボーリ

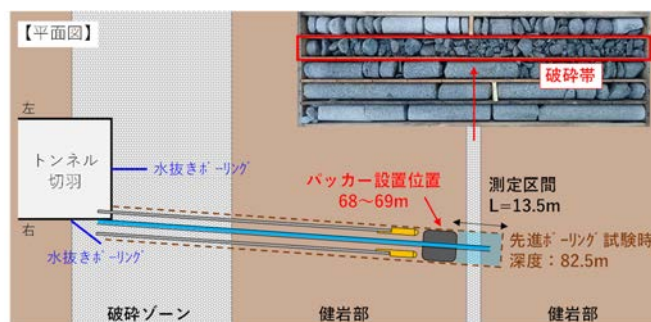


図-5 湧水圧測定区間

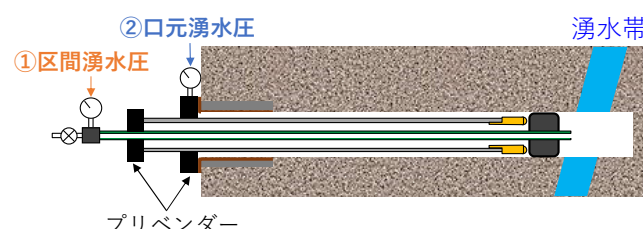


図-6 湧水圧測定位置

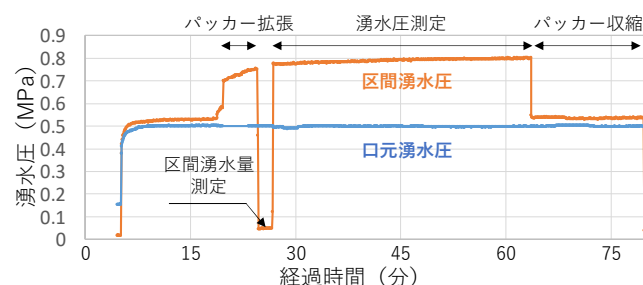


図-7 湧水圧測定結果

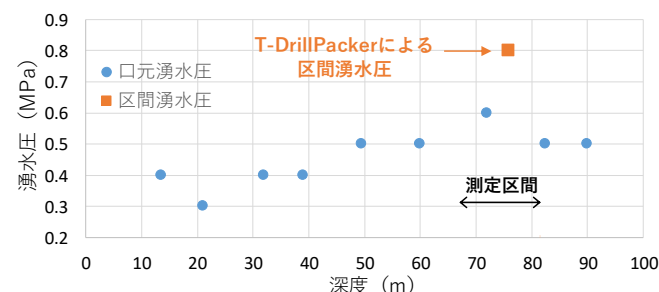


図-8 口元湧水圧と区間湧水圧の比較

ング孔内の水が周辺へ逸水するなどにより、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、再度コアチューブ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 90m の削孔を所定時間内に完了することができた。湧水帯発見後から、湧水測定後の削孔再開までの一連の作業においてパッカーの設置作業を迅速に行えることから、従来方式と比べ測定時間を約 40%短縮することができた。

(2) ノンコア削孔方式

a) 試験の目的

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。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。

b) 試験現場の地質および湧水状況

当該区間は、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（図-9）。

c) 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。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。

パッカーの設置位置は、図-9 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。

d) 試験結果

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-10 に示す。対象地山は異なるものの、同地山等級 C II 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、

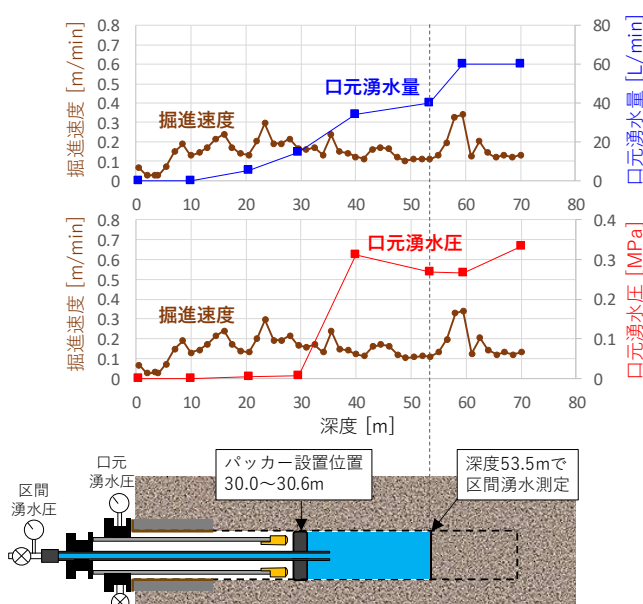


図-9 口元湧水量、口元湧水圧および掘進速度

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。

区間湧水圧と口元湧水圧の測定結果を図-11に示す。コア削孔方式と同様に、パッカー拡張後に、拡張前とは明瞭に異なる口元湧水圧、区間湧水圧を測定することができた。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、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。

4. 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。山岳トンネル工事の先進ボーリングを用いて、両削孔方式について現場

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。水抜きボーリングなどコア採取を必要としないノンコア削孔では、コア削孔よりも早く削孔可能であることが確認できた。二重ビットの耐久性や測定完了後の削孔継続性も良好であった。今後は、高压・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。

5. 参考文献

- 1) 高原 英彰, 依田 淳一, 川原 一則: 偏圧する高压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) 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.
- 5) 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) — トンネル切羽から行う短尺・中尺ボーリング —, トンネルと地下, 559号, Vol.48, No.3, pp.73-83, 2017.

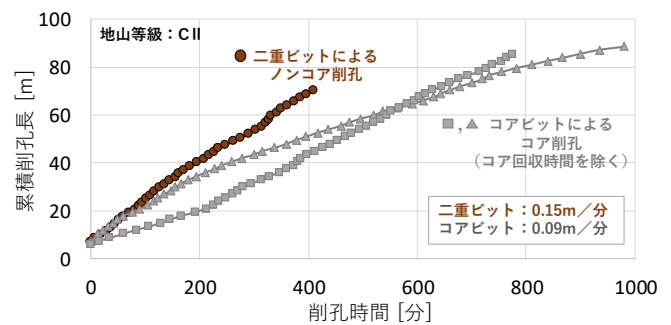


図-10 ノンコア削孔とコア削孔の掘進速度の比較

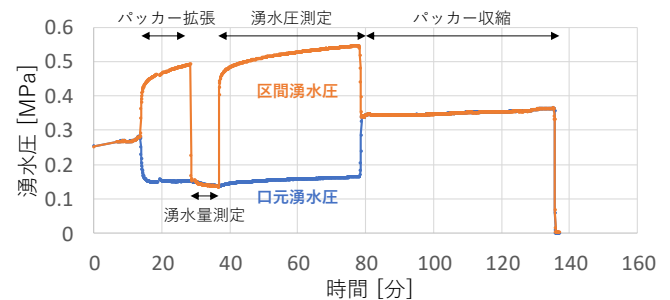


図-11 湧水圧測定結果