

## 超長尺ボーリングを利用した切羽前方の湧水状況計測システムの適用

### Application of System for Measurement of Water Inflow Ahead of Tunnel Face Using Extra Long Horizontal Boring

岩野圭太 岡田侑子 升元一彦  
川端淳一 瀬尾昭治 北村義宜<sup>1)</sup>

#### 要 約

トンネル掘削に伴う大量湧水の発生は、切羽の崩落や周辺の地下水位低下を招く恐れがあるため、切羽前方の水利状況を事前に把握することが重要である。特に、長大山岳トンネルにおいては、地表からのボーリング調査が困難であるため、トンネル坑内からの水平ボーリングによって前方の湧水状況を把握することが望まれる。そこで筆者らは、1,000m級の超長尺コントロールボーリングの削孔と同時に切羽前方の湧水圧・湧水量を正確かつ連続的に自動で計測できるシステム「スイリモ（水(すい)リサーチ・モニター)」を開発し、トンネル掘削に伴う湧水が懸念された箕面トンネル西工事で実施された超長尺ボーリングに本システムを適用した。これにより、切羽前方の湧水区間における湧水圧・湧水量を測定でき、ボーリングで得られる削孔エネルギーなどほかの地質情報と併せて総合的に地質状況を判断する指標を得ることができた。また、これらのデータは、実際のトンネル掘削時の地質や湧水状況と合致しており、その精度についても良好さを確認することができた。

#### 目 次

- I. はじめに
- II. 超長尺ボーリングの概要
- III. 従来の湧水計測方法とその課題
- IV. 今回開発した「スイリモ」による計測技術
- V. 箕面トンネル西工事への試験適用
- VI. おわりに

#### I. はじめに

山岳トンネルにおいては、地質や地下水の情報を正確に把握することは、施工を合理的かつ安全に行ううえで非常に重要である。特に、掘削中の突発的な大量湧水は、工程の遅延のみならず、甚大な災害につながる恐れがあるため、湧水区間の位置や湧水の程度を事前に把握することは重要である。しかし、長大な山岳トンネルにおいては、地表から複数のボーリング調査を行うことが困難であるため、トンネル坑内からの水平ボーリングによって前方の地質や湧水の情報を把握することが望まれている。

水平ボーリングは一般に、その延長によって、短尺は20~50m程度、中尺は数100m以下、長尺は数100m以上、超長尺は1,000m以上と概ね分類されている<sup>1)</sup>。切羽前方の地質・湧水情報を把握し、トンネル掘削に役立てるためには、切羽の進捗に対して十分な削孔速度と距離を有した事前調査が必要である。そのため、長尺かつ高

速掘進可能なボーリング技術の選定が求められる。現状の長尺ボーリング技術としては、高圧・大量湧水下でもコアを採取しながら掘削可能なシールドリバース工法や、コアを採取しながら比較的高速で掘進可能なPS-WL（パーカッションサンプリングワイヤライン）工法が挙げられるが、シールドリバース工法は掘削速度が遅く、PS-WL工法も切羽の進捗に対しては掘削速度が不十分であった。そこで、石油業界で実績のある超長尺コントロールボーリングに着目した。

コントロールボーリングは、掘削方向を制御しながら、ダウンホールモーター（高水流を送ることでビットを回転させるモーター）により岩盤掘削することができるノンコアボーリングであり、高速で1,000m級のボーリング掘削が可能である。この技術を利用して、切羽の進捗に対して高速かつ長距離の先進ボーリングを行い、事前に切羽前方の地質調査を行うことが可能である。しかし、これまでの超長尺ボーリングに伴う湧水に関する調査は、口元で断続的にアナログデータを取得する程度であり、湧水区間の正確な湧水圧・湧水量データを把握することは困難であった。そこで筆者らは、湧水圧・湧水量を正確かつ連続的に自動で計測できるシステム「スイリモ（水(すい)リサーチ・モニター)」(以下、スイリモ)を開発した<sup>2) 3)</sup>。

本稿では、その概要と箕面トンネル西工事での試験適用事例について報告する。

1) 関西支店 Kansai Branch

**キーワード:** 長大山岳トンネル, 前方探査, 超長尺ボーリング, コントロールボーリング, 湧水計測

**Keywords:** long span mountain tunnel, prediction ahead of tunnel face, advanced extra long horizontal drilling, control drilling, monitoring measurements of water inflow

II. 超長尺ボーリングの概要

1. 目的

超長尺ボーリングは、掘削方向を制御しながら高速で1,000m程度を掘削できるコントロールボーリングである (Fig.1) 4)。切羽前方の地質や水理状況を事前に調査するための手段として用いられており、確実に500m以上を掘削できることに主眼を置いた掘削システムとなっている。削孔速度が速いため、トンネルの本掘削に対して数か月先の切羽情報を入手することができ、対策工法の検討に十分な時間を確保することができるのが特長である。

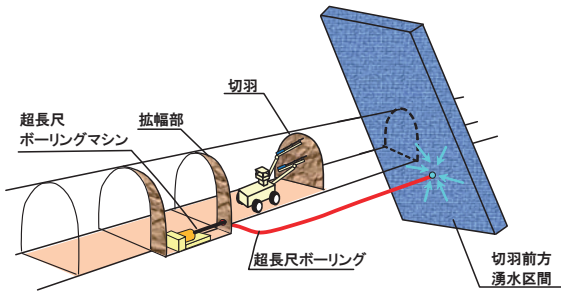


Fig.1 超長尺ボーリングの概念図

(Schematic Diagram of Extra Long Horizontal Drilling)

2. 超長尺ボーリングの構成機材・掘削方法

超長尺ボーリングは Fig.2 に示すとおり、ボーリングマシンのほかに運転を制御する制御ユニットや、削孔方向をコントロールする孔曲りモニター、削孔のための高圧水を送水する送水ポンプ、削孔に使用した泥水からスライムを取り除くマッドスクリーンなどで構成される。

ロッドの先端にはビットとそれを回転させるダウンホールモーター (水圧ポンプから高水流を送ることでビットを回転させるモーター) が取り付けられ、先端のビットが回転することで岩盤を掘削す

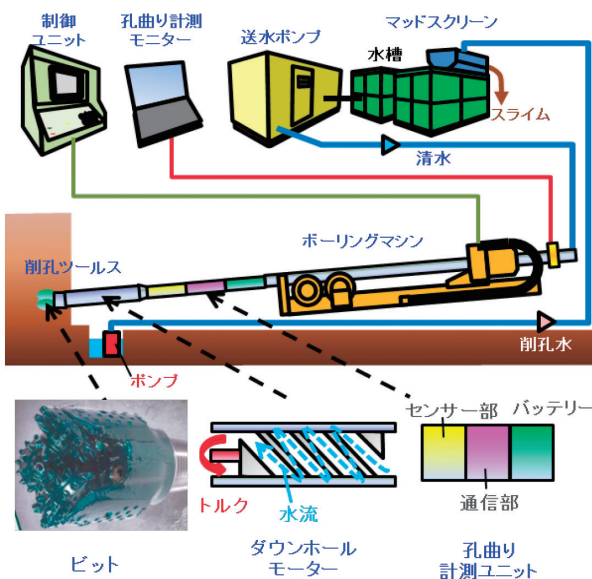


Fig.2 超長尺ボーリングの構成機材

(Structure of the Control Drilling Machine)

る。ダウンホールモーターの後方には、孔曲りを計測し、掘削方向を制御する孔曲りセンサーが内蔵され、随時方向を制御して掘削する。

3. 取得できるデータ

超長尺ボーリングでは、Table 1 に示す7つの情報が得られる。また、今回開発したスイリモを併用することで、これらの情報と併せて正確な湧水圧・湧水量の情報が得られるため、切羽前方の水理状況を事前に取得することが可能となる。

Table 1 超長尺ボーリング計測項目 (List of Measurement)

・深度
・削孔速度
・給進力
・回転数
・回転トルク
・送水量
・送水圧

まずは、従来行われてきた湧水圧・湧水量の取得方法の問題点を整理し、その後、スイリモを用いた計測システムについて詳しく説明する。

III. 従来の湧水計測方法とその課題

1. 作業員による口元での湧水量測定

これまででは、Table 2 (a) に示すようにボーリング孔口からの排水を作業員がバケツに一定量溜め、それに要した時間から湧水量を求めていた。そのため、作業に大きな時間と手間がかかり、断続的な計測結果に留まっていた。

2. 口元での区間湧水圧測定、パッカー挿入による先端湧水圧測定

湧水圧の測定方法には、ボーリング孔口にブルドン管を設置して、ボーリング先端から孔口までの区間湧水圧を口元で簡易に計測する方法 (Table 2 (a)) がある。口元での湧水圧測定は、ボーリング区間に複数の湧水帯が存在する場合には、ボーリング先端の正確な湧水圧を計測することができなかった。また、ボーリング先端にパッカーを設置することで正確に先端水圧を計測する方法も考えられるが、先端湧水圧を測定する方法では、ボーリング削孔後にロッドを一旦抜管し、別途パッカーを挿入する必要がある。これでは作業に大きな手間がかかるうえ、パッカー挿入時に孔崩れが生じるなどのリスクがあった。

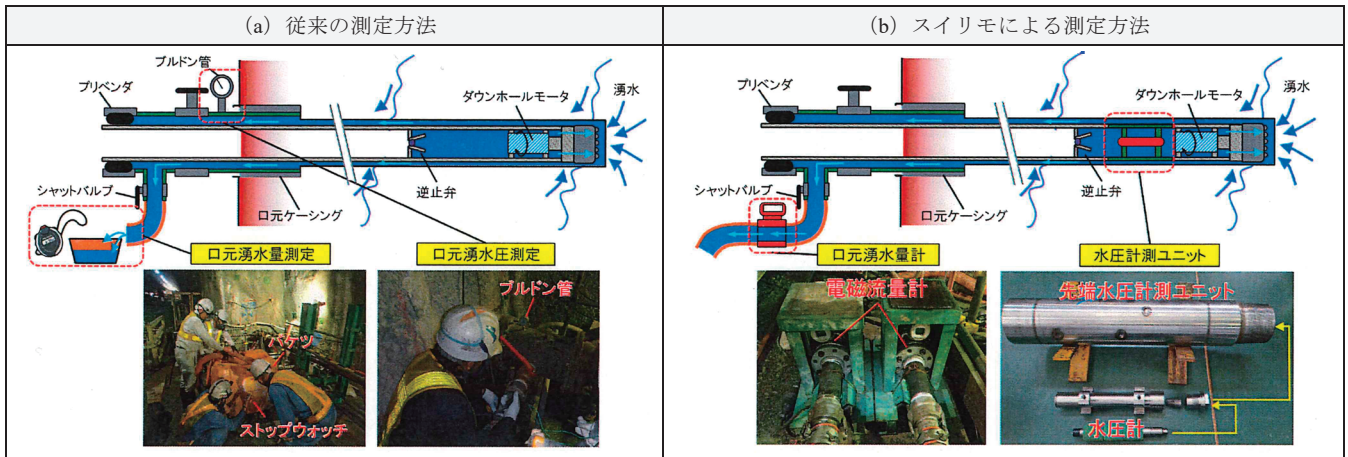
IV. 今回開発した「スイリモ」による計測技術

1. スイリモの概要

III. で整理したとおり、既存の計測技術では、正確な湧水状況を計測することが難しく、孔崩れのリスクや作業に手間がかかるなどの課題もあった。これらの課題を解決するには、ロッドを一旦引抜く (裸孔状態とする) ことなく、湧水圧の計測を行えることが必要とされた。そこで、切羽前方の湧水区間の湧水量・湧水圧を超長尺ボーリングの削孔と同時に連続的に計測できるシステム「スイリモ」を開発した。本システムは、以下2つの計測技術を組み合わせたものである (Table 2 (b))。

Table 2 超長尺ボーリングに伴う湧水圧・湧水量の測定方法

(Comparison of Measurement Method for Water Pressure and Amount of Water Flow)



① 口元湧水量の自動計測技術

湧水量を自動かつ連続的に計測するため、ボーリング孔口に電磁流量計を設置した。これは孔径 80mm の電磁流量計で、測定範囲は 90L/min~3,000L/min である。排水量が 3,000L/min を超える場合には、分岐管に電磁流量計を増設することで上限なく湧水量を自動で計測することが可能である。

② ボーリング先端での湧水圧測定技術

湧水圧の発生している位置やその程度を正確に測定するため、ボーリングマシン先端部に水圧計測ユニットを装着し、削孔中の先端湧水圧を計測できるようにした。水圧計は、内部にメモリとバッテリーが内蔵された自記式のセンサーで、約 7MPa まで計測が可能である。

2. スイリモによるデータ計測方法

Fig.3 に削孔時と削孔停止時の計測状況をそれぞれ示す。II. で前述したとおり、超長尺ボーリングはダウンホールモーターに高水圧を送水することで先端のビットが回転し、削孔する。そのため削孔中は、口元から高圧かつ大量の清水を先端まで送水するが、ロッド継足し時や休憩中など削孔を停止している間は、口元からの送水が停止される。水圧計測ユニットの後方には、逆止弁がついているため、送水時には逆止弁が開いて先端まで送水され、送水停止時には逆止弁が遮断される構造になっている。

つまり、送水を停止しているロッド継足し時や休憩時に水圧計測ユニットの後方に設置した逆止弁が閉じられ、ボーリング先端付近の湧水圧を計測することができる。削孔停止中は、孔長全体から生じた湧水が口元の電磁流量計を通過するため、孔内に流入する湧水量を正確に計測することが可能となる。このように計測されたすべてのデータから削孔停止時の湧水量・湧水圧データのみを抽出することで、湧水の定量的評価を行うことが可能となった。

V. 箕面トンネル西工事への試験適用

1. 工事概要

箕面トンネルは、新名神高速道路（高槻第一 JCT~神戸 JCT 全長 40.5km）のうち、大阪府箕面市北部を東西に横断する全長 5km

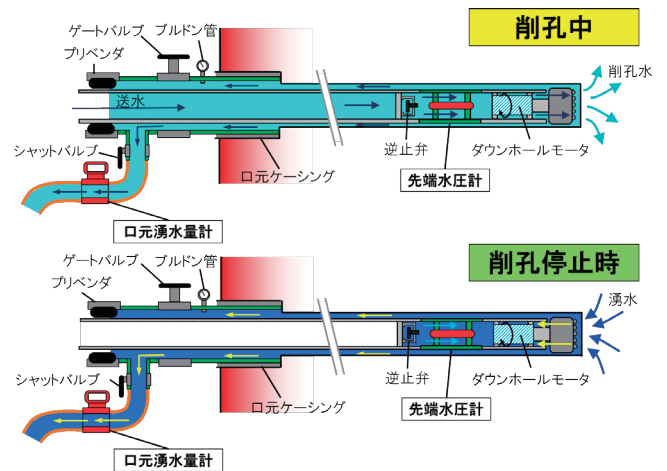


Fig.3 削孔時と削孔停止時の計測状況

(Situation about Measurement While Drilling and Stop Drilling)

の道路トンネルである。そのうち本工事は、西側約 2.5km を施工するものであり、地質は砂岩または砂岩優勢砂岩・頁岩互層が大部分を占め、一部で石英斑岩や流紋岩が貫入する (Fig.4)。

本工事では、トンネル直上に河川が直交していたため、トンネル掘削に伴う周辺利水への影響を確認するとともに、トンネル掘削時の安全性を考慮した水抜き対策などを目的として、下り線に配置された拡幅部 2 か所より長距離が削孔可能な超長尺コントロールボーリングを実施した (Fig.5)。第 1 回ボーリングでは 700m 掘削し、それにラップさせて第 2 回ボーリングを 600m 実施した。第 1 回ボーリングと、第 2 回ボーリングで実施したケーシングプログラムをそれぞれ Fig.6 に示す。

2. 計測システムの適用性確認結果

第 1 回ボーリングの一部区間で行った、スイリモの原位置での適用性確認結果について述べる。Fig.7 に、スイリモで計測された口元排水量・先端湧水圧の時刻歴の一部分を示す。削孔中は 1,400L/min 程度を 3~5MPa で送水していることがわかる。休憩中やロッド継足し時には送水が停止され、湧水量が 800 L/min 程度、湧水圧は約 0.05MPa を計測しており、湧水圧水頭は 5m 程度であ

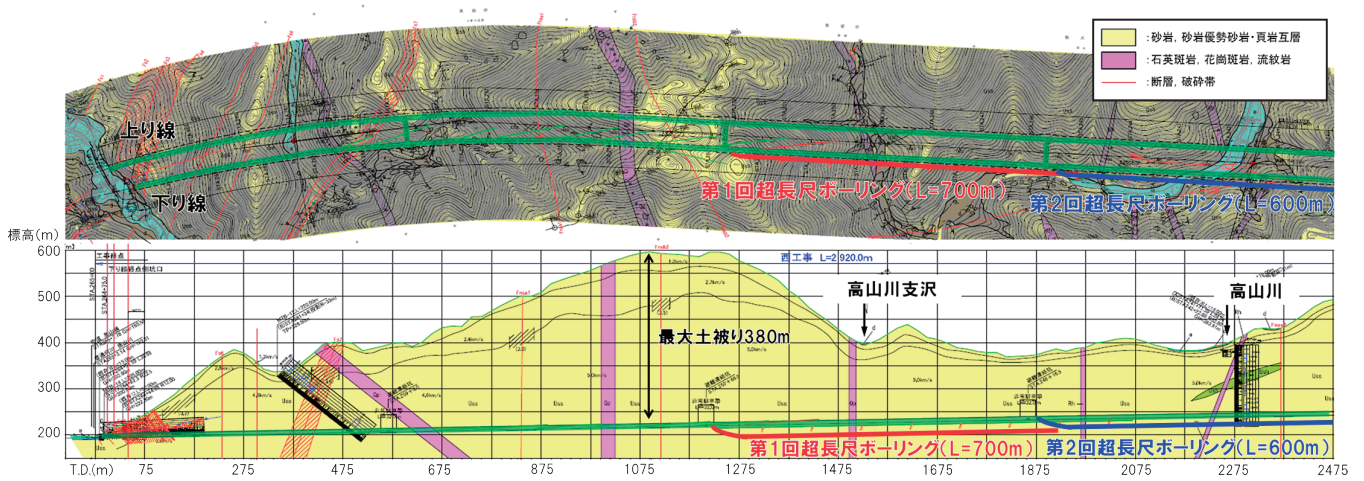


Fig.4 箕面トンネル西工事 地質平面図・地質縦断図  
(Geological Profile of The Western Section of Mino Tunnel)

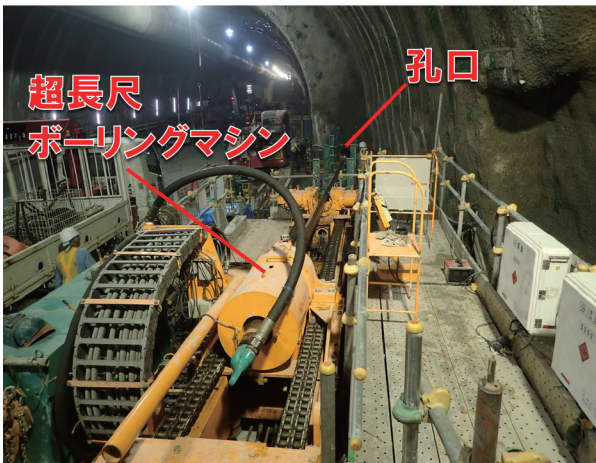


Fig.5 超長尺ボーリング実施状況  
(Long Horizontal Drilling at Mino Tunnel)

ており、流量が精度よく計測できていることがわかる。一方、70～80m、230～260m 区間においては、排水量が増加し湧水が発生していることがわかる。また、水圧データに着目すると、ボーリングマシンで記録された送水圧と、スイリモで計測された先端水圧の変動は概ね一致しており、さらに掘進距離に応じた圧力損失も捉えていると言える。

次に、削孔停止時の湧水量・湧水圧データに着目すると、湧水量・湧水圧ともに作業員の手ばかりと同じ傾向を示しており、作業員の手測りに比べてより連続的に計測できたことがわかる。湧水量データからは、70m、90m、200m、250m で湧水量の変化点があることが見て取れる。さらに、湧水圧データからは、200m、250m 付近で水圧が大幅に上昇する地点があることが確認できた。

これらの結果から、スイリモの適用によって、湧水量と湧水圧の変化を適確にとらえらるとともに、その湧水箇所を正確にとらえられることが分かった。

### 3. スイリモによる地下水評価結果

箕面トンネル西で実施した超長尺ボーリング 2 回分の削孔データと湧水計測データを Fig.9 に併せて示す。ここで、超長尺ボーリングでは、ボーリング孔の崩壊を防ぐためある一定の削孔深度まで掘削した後、保孔のためのケーシングを挿入している。T.D.1524m 付近における湧水量の低下は、ケーシングの挿入による通水断面の減少によるものである。また、一部区間において、送水時の高水圧または削孔振動の影響で、先端水圧計が破損し水圧データが欠損となる場合があった。

超長尺ボーリングとそれに適用したスイリモでの計測の結果、図中の①～⑨に示す区間では、湧水圧もしくは湧水量の上昇が確認されるとともに、削孔エネルギーが低下傾向にあることがわかった。これらの結果から、湧水を伴う脆弱な地山が出現することが懸念され、注意を要する区間であることが分かった。この計測結果をもとに、同区間の下り線掘削時には、切羽観察や計測データを注視しながら掘削管理を行った。

実際の切羽掘削時に確認された地質は、いずれの懸念箇所でも亀裂の発達や軟弱な岩質が確認され、相対的にはほか区間より脆弱な

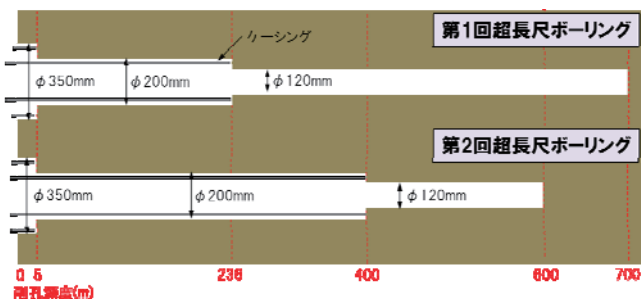


Fig.6 超長尺ボーリングケーシングプログラム  
(Program of Casing)

ったことがわかる。このように、削孔停止時の湧水圧・湧水量情報を整理することで、湧水データを得ることができる。

Fig.8 には、削孔時と削孔停止時の湧水量・湧水圧データをそれぞれ削孔深度毎に示す。削孔時の流量データに着目すると、湧水が未発生区間(削孔深度 0～70m)では、ボーリングマシンで記録された送水量と、スイリモで計測された流量(=排水量)は一致し

地山であった。T.D.1460~1480m付近では孔崩れが発生し、セメンチングとリボーリングを実施したが、突破するのに困難を伴った。これらの地質の硬軟は、超長尺ボーリングの削孔エネルギーにもよく表れていた。さらに、①, ③, ⑦区間において、下り線切羽掘削時にも切羽からの湧水が確認され、実際の水理状況とも合致していることが分かった。⑧, ⑨区間は未掘削であるため、今後も地質状況などに注意を払い、管理を行っていく予定である。⑧区間では、削孔エネルギーは100~500MN・m/m<sup>3</sup>と比較的高い値を示しており、100L/min程度の湧水が確認されている。硬質ではあるが、亀裂が発達した帯水層が出現することが懸念される。また、⑩区間においては、300L/min程度の湧水量が確認されているものの、該当箇所での削孔エネルギーは300MN・m/m<sup>3</sup>以上の極めて高い値を示している。⑩区間のすぐ手前に着目すると、削孔エネルギーが15MN・m/m<sup>3</sup>程度の低いプロットが出ており、粘土化した薄い層の奥に湧水が出現するなどの可能性が考えられる。

VI. おわりに

本稿では、超長尺ボーリングを用いた切羽前方の湧水状況計測技術の概要と、そのシステムを箕面トンネル西工事で適用した結果について報告した。

切羽前方の地質・湧水情報を事前に把握するため、高速かつ長距離で掘削可能な超長尺コントロールボーリングに着目し、それに接続可能な水圧計測ユニットと自動流量計測システムを開発した。これらによってボーリング先端の湧水圧を正確かつ連続的に計測することができ、口元流量を自動かつ連続で計測することができた。

また、本システムを箕面トンネルへ試験適用し、システムの適用性を確認した。湧水圧・湧水量を正確にとらえるとともに、その湧水箇所をとらえることができた。

試験適用の結果から、ボーリング調査で得られる地質情報とスイリモから得られる水理情報を併せて、切羽の進捗に対して事前に調査を行い、湧水対策の検討に十分な時間を確保することが可能となった。本システムを適用することにより、今後の長大山岳トンネルにおいて、生産性の向上と、工事の更なる安全性の向上を目指していく予定である。

参考文献

- 1) 二村 亨ほか；先進ボーリング技術のブレークスルーを目指してー長尺・高速掘進・孔曲り制御なども技術開発ー，トンネルと地下，2010.
- 2) 岡田侑子ほか；超長尺ボーリングを用いた切羽前方の湧水データ計測技術，土木学会第71回年次学術講演会，2016.
- 3) 北村義直ほか；切羽前方の湧水状況計測システムの適用事例，土木学会第71回年次学術講演会，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 (1) ~ (5)，トンネルと地下.

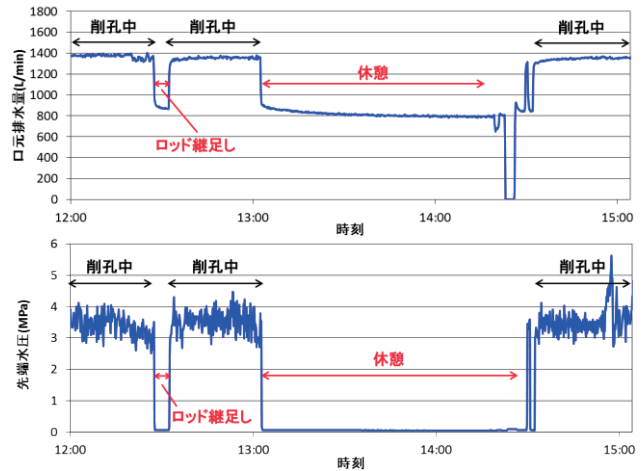


Fig.7 スイリモで計測された口元排水量・先端湧水圧の時刻歴 (Time History from Water Pressure and Amount of Water Flow)

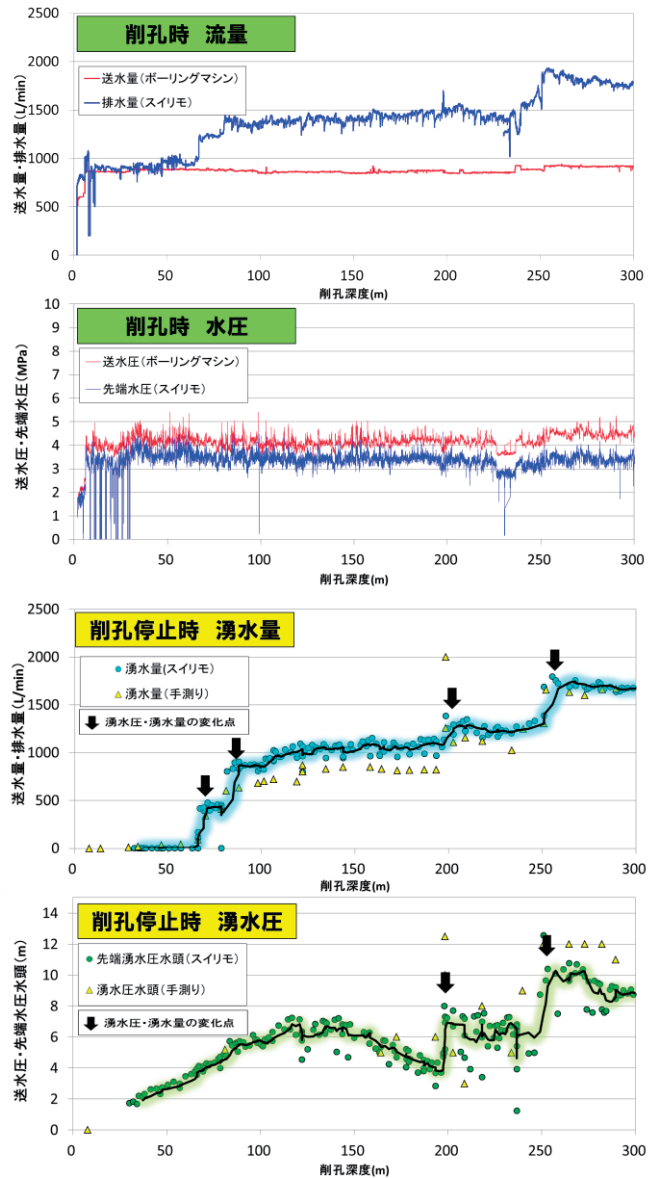


Fig.8 削孔時と削孔停止時の湧水データの深度分布 (Water Pressure and Amount of Water Flow in Depth)

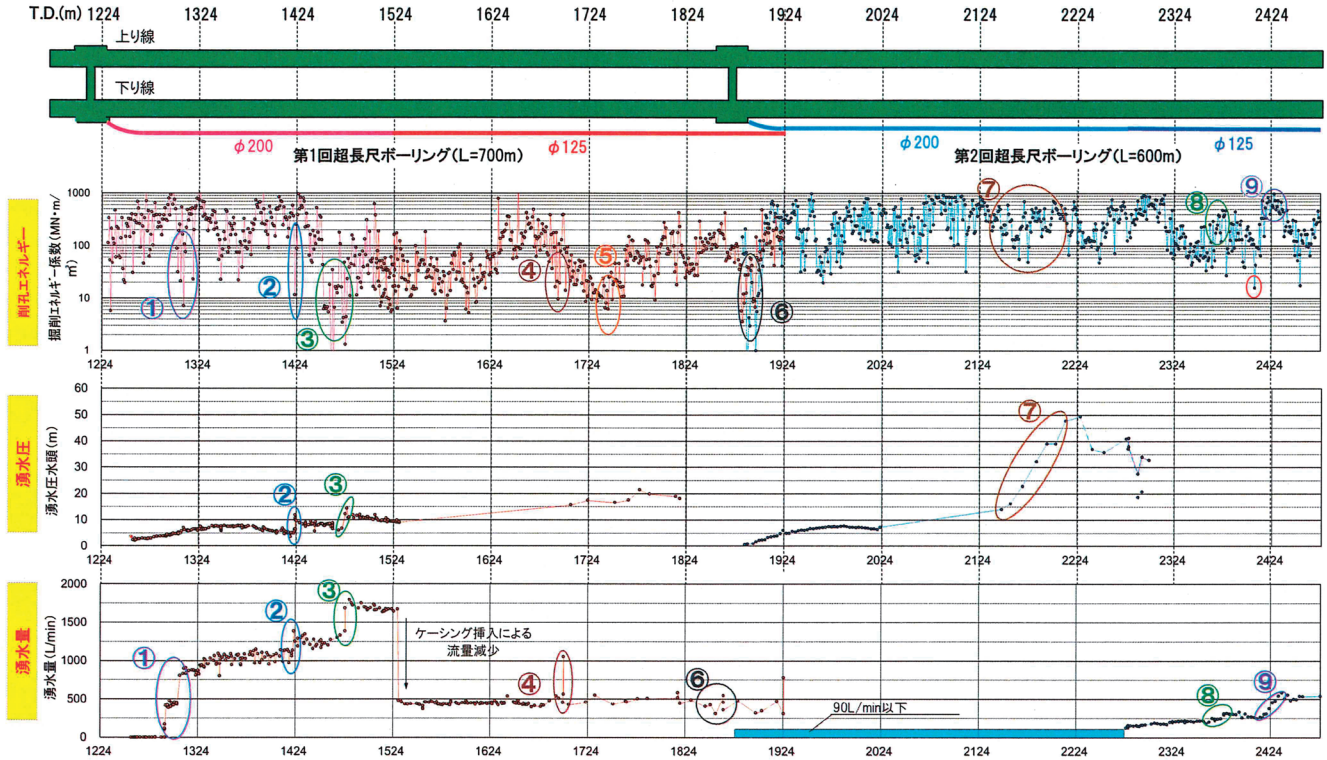


Fig.9 箕面トンネル西工事 第1回超長尺ボーリング・第2回超長尺ボーリング 地質・湧水情報  
(Comparison of Energy of Drilling and Water Pressure and Amount of Water Flow )

### Application of System for Measurement of Water Inflow Ahead of Tunnel Face Using Extra Long Horizontal Boring

*Keita Iwano, Yuko Okada, Kazuhiro Masumoto,  
Junichi Kawabata, Shoji Seno and Yoshinori Kitamura<sup>1)</sup>*

When excavating a tunnel, it is important to know the geological conditions and the state of water inflow ahead of the tunnel face. Given the high cost of multiple drillings from the surface, especially for long tunnels, surveys using extra long horizontal drilling from inside the tunnel should be conducted. However, the conventional method using advanced extra long horizontal drilling to measure water pressure and flow rate was inaccurate and intermittent. Therefore, the authors have developed a system which enables water pressure and water inflow ahead of the tunnel face to be measured correctly and automatically. The measurement system is called System of Water Inflow Research Monitoring (SWIReMo).

The authors have applied the system with extra long control drilling at the western section of the Mino Tunnel site. The results showed that the system could be used to monitor water pressure and water flow minutely and automatically under various geological conditions. Moreover, the geological conditions and water inflow state found when the tunnel was excavated were consistent with the results obtained from an advanced drilling survey using SWIReMo.