

山岳トンネルにおける新しい湧水情報計測システムの開発

Development of New System of Monitoring Ground Water Information Ahead of Tunnel Face

岡田 侑子 升元 一彦 岩野 圭太
野中 隼人 川端 淳一¹⁾

要 約

山岳トンネル掘削時の突発的な湧水の発生は、甚大な災害や工程遅延につながる懸念があるため、事前に地質や湧水の情報を取得することは重要である。しかし、トンネルは線形構造物である特殊性から地表からの事前調査のみで十分な情報を取得することは困難である。特に、地下水に関しては土被りが大きい場合、地表から地下水水位を観測するための井戸を設置することが期待できず、施工前にトンネル掘削区間の地下水情報を正確に把握することは困難であった。そこで、トンネル切羽前方の地質調査や水抜きなどを目的にトンネル坑内から実施される先進ボーリングを活用し、切羽前方の湧水情報を計測するシステム（スイリモ（水リサーチ・モニター））を開発した。本システムは3種類の湧水計測システム（超長尺スイリモ、中尺スイリモ、短尺スイリモ）から構成されており、トンネルの掘削段階に合わせて必要な情報を適切な方法で取得することができる。本システムを適用することで、施工中の湧水状況を精度よく把握することができトンネル掘削作業の安全性向上が期待できる。

目 次

- I. はじめに
- II. システムの全体概要
- III. 各技術の計測方法と現場適用試験
- IV. おわりに

I. はじめに

山岳トンネルは線形構造物であるという特殊性から、事前に地質や地下水の情報を精度よく把握することは困難である。特に、地下水に関する情報は観測井を設置して地表から水位を計測する方法が一般的であるが、長大トンネルの線形上に複数の観測井を設置することは難しく、特に土被りが大きいトンネルでは観測井を設置すること自体が困難である。このような場合の対策として、施工時にトンネル坑内から実施する先進ボーリングを利用して地下水情報を取得することが望まれている。近年、さまざまな削孔長・用途のトンネル先進ボーリングが行われており、最近では1,000m級の超長尺ボーリングを実施する事例もある¹⁾。そこで、トンネルで一般に実施されている先進ボーリング技術を活用し、切羽前方の湧水情報を取得するシステム「スイリモ（水リサーチ・モニター）」を開発した（Fig.1）。本システムは3つの計測システム（超長尺スイリモ、中尺スイリモ、短尺スイリモ）から構成されており、トンネルの施工ステップに合わせて段階的に運用することで、切羽前方の湧水情報を定量的に評価することが可能となり、トンネル掘削時の安全性向上が期待される。開発したシステムを湧水が懸念された現場にそれぞれ適用し、精度よく計測できることを確認したので、以下に報告する。

「スイリモ（水リサーチ・モニター）」を開発した（Fig.1）。本システムは3つの計測システム（超長尺スイリモ、中尺スイリモ、短尺スイリモ）から構成されており、トンネルの施工ステップに合わせて段階的に運用することで、切羽前方の湧水情報を定量的に評価することが可能となり、トンネル掘削時の安全性向上が期待される。開発したシステムを湧水が懸念された現場にそれぞれ適用し、精度よく計測できることを確認したので、以下に報告する。

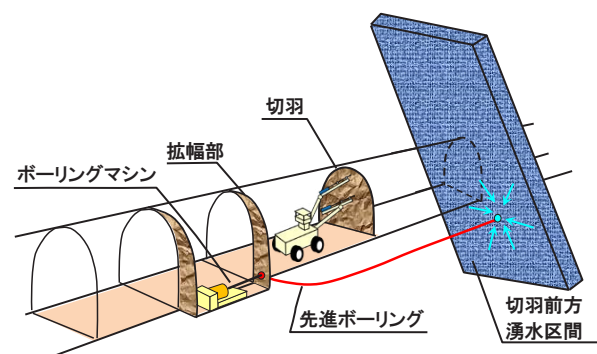


Fig.1 先進ボーリングを利用した湧水計測
(Water Inflow Measurement System with Pilot Boring)

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード：山岳トンネル，先進ボーリング，地下水モニタリング，湧水圧，湧水量
Keywords：tunnel, pilot boring, hydrological monitoring, water pressure, water inflow

II. システムの全体概要

先進ボーリングは、一般にその長さによって①長尺または超長尺ボーリング(長さL=200~1,000m)、②中尺ボーリング(L=50~200m)、③短尺ボーリング(L=0~50m)に分類されている²⁾(Fig.2)。これらに対し、それぞれ異なるコンセプトの湧水計測技術「超長尺スイリモ」、「中尺スイリモ」、「短尺スイリモ」を開発した(Fig.3)。各計測システムの役割を以下に示す。

a. 超長尺スイリモ

超長尺ボーリングにより切羽より最大1,000m程度前方に存在する湧水帯の位置とその程度を把握する。

b. 中尺スイリモ

a. で明らかになった湧水帯に対してより詳細な状況を把握するため、切羽が湧水帯の100m程度手前まで到達した時点で100~150m程度の中尺ボーリングを実施し湧水圧の経時変化を確認する。トンネル掘進に伴う湧水圧の変動を把握し、掘削可能な程度まで地下水位が低下しているか評価することができる。地下水位の低下状況に応じて湧水対策の要否を判断し、要対策となれば対策の方法やその数量を判断するため、解析などの定量評価を併せて行う。

c. 短尺スイリモ

短尺ボーリングにより切羽前方20~30m程度の湧水圧をモニタリングし、対策の効果をj確認する。計測したデータは、

追加対策工の要否や掘削可否の判断材料とする。

このように、a~cの3つのシステムを用いて事前に湧水情報を取得し切羽前方の湧水状況を予測評価することで、水抜き等の対策工の要否を検討することができる。さらに、対策実施後にその効果を定量的に評価することで突発的な湧水によるトラブルを未然に防ぐことが期待できる。

III. 各技術の計測方法と現場適用試験

ここで、各ボーリング技術の紹介とそれに伴う従来の湧水計測技術、新しく開発したシステムの湧水計測方法について概説し、実現場への試験適用事例について報告する。なお、超長尺ボーリングを用いた湧水計測技術については、2016年に報告しており³⁾、詳細はそちらを参照いただきたい。

1. 超長尺ボーリングとその湧水計測技術

(1) ボーリングシステムの特徴

超長尺ボーリングは、トンネルの線形に沿って掘削方向を制御することが可能な水平コントロールボーリングである。長大山岳トンネルの地質調査や水抜きを目的として、Photo1に示すパワースイベルタイプのボーリングマシンにより高速で500~1,000m級のボーリングを削孔することができる。



Photo 1 超長尺コントロールボーリングマシン⁴⁾
(Directional Drilling Machine)

(2) 湧水計測方法

従来は、削孔中に顕著に湧水量が増えた際に一度削孔を中断し、ボーリング孔口元で湧水圧・湧水量を計測していた。

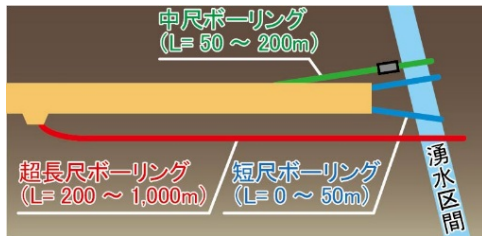


Fig.2 先進ボーリングの分類
(Categorization of Pilot Boring)

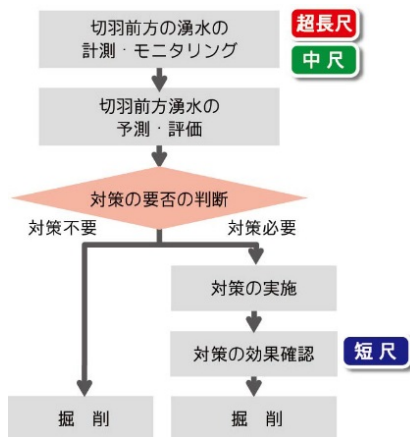


Fig.3 開発したシステムによる湧水対策フロー
(Flow Diagram for Groundwater Tunnel)

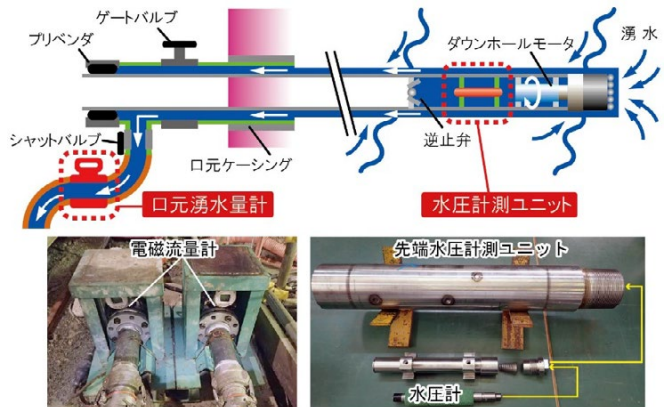


Fig.4 超長尺スイリモの計測システム
(System for Measurement of Water Inflow used in Extra-Long Boring)

計測方法は作業員が手測りで行う程度であったためデータは断続的で、計測に時間と手間がかかっていた。また、ボーリング線上に複数の湧水帯が出現した場合には孔内で平均化され各湧水帯の水圧を正確に把握することは困難であった。

そこで、ボーリングツールの先端に接続可能な水圧計測装置を開発し、削孔と同時に孔先端部の水圧を精度よく計測する手法を開発した。さらに、ボーリング孔口元に電磁流量計を設置することで、自動かつ連続的に湧水量をとらえることができ、作業にかかる手間も軽減した。

(3) 現場適用試験

本システムを新名神高速道路 箕面トンネル西工事で実施された超長尺ボーリングに試験適用した。得られた湧水圧・湧水量のデータから湧水状況の変化点を把握することができ、湧水帯の位置とその程度を事前に把握することができた (Fig.5)。また、実際のトンネル掘削時の地質・水理状況ともよく合致していることが確認できた。

超長尺スイリモで計測した結果、高水圧が懸念される場合には次のステップとして中尺スイリモを適用し、水圧の経時変化を確認することが望まれる。

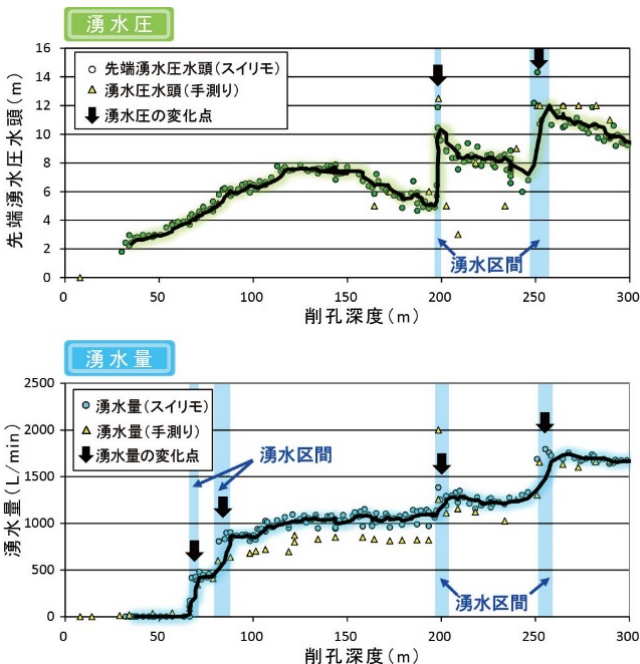


Fig.5 超長尺スイリモによる湧水圧・湧水量データ (Water Pressure and Amount of Water Inflow in Depth Measured by Extra-Long Boring SWIReMo)

2. 中尺ボーリングとその湧水計測技術

(1) ボーリングシステムの特徴

中尺ボーリングには高圧水を動力源とするウォーターハンマー工法やコアを採取しながら比較的高速に掘削可能な



Photo 2 中尺ボーリングマシン (RP 工法) 4) (Rotary Percussion Drills Machine)

パーカッションサンプリングワイヤライン (PS-WL) 工法などが挙げられるが、本システムではノンコアボーリングのロータリーパーカッション (RP) 工法を採用した。削孔は専用機 (Photo 2) で行われ、地質調査や水抜きを目的に実施されている。休工期 (土日 2 日以内) に 100~150m 程度の削孔が可能のため適用実績は多い。

(2) 湧水計測方法

従来は、超長尺ボーリングと同様に、口元での湧水量・湧水圧を作業員が手測りで断片的に計測する程度であった。そのため、トンネルの掘進や水抜きの実施による影響を受けてしまい、湧水区間の水圧を正確に把握することは困難であった。

湧水区間の水圧を経時的かつ正確に計測するためには、ボーリング孔内にパッカを設置する必要がある。また、パッカはボーリング孔内の適切な位置に設置する必要がある。パッカの設置位置によってはトンネルの掘進に影響されて正確な水圧を計測することができない。これは、Fig.6 (a)に示すように口元にパッカを設置した場合、掘削が進むにつれて計測区間からトンネル壁面へ逸水し計測値が低下してしまうためである。これでは、湧水区間の水圧計測値が十分に低下していないにもかかわらず計測区間の水圧が低下してしまい、

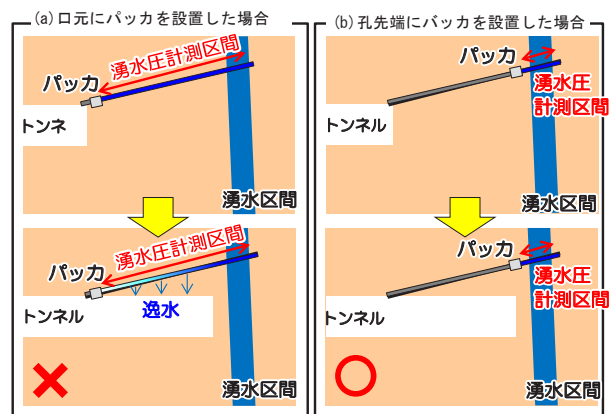


Fig.6 湧水圧モニタリング時におけるパッカ設置位置の重要性 (A Packer Position to Measure Water Pressure)

危険側の評価となってしまう恐れがある。一方、Fig.6 (b)に示すようにパッカをボーリング孔先端部に設置した場合にはトンネル掘進の影響を受けることなく水圧を計測することができ、正確に湧水圧の変動を把握することができる。したがって、パッカを適切な位置に設置することは重要なポイントの1つである。

しかし、100m級の水平ボーリング孔の先端にパッカを設



Fig.7 従来のパッカ設置方法に伴う孔崩れの発生 (Conventional Method)

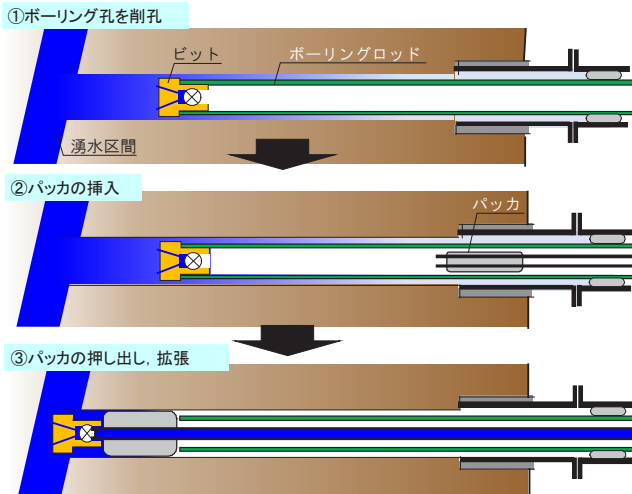


Fig.8 中尺スイリモによる新しいパッカ設置方法 (A new Packer Insertion Method)

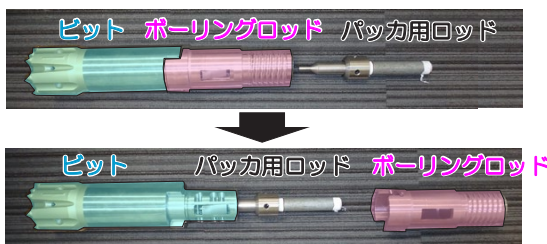


Fig.9 中尺スイリモのビット (A new Bit System)

置することは容易ではない。パッカをボーリング孔に設置するためには、従来の方法では、削孔後に一度ボーリングロッドを引き抜いて、裸孔にパッカを挿入する必要があった (Fig.7)。そのため地山が悪い場合には孔崩れの恐れがあった。また、高湧水圧下ではパッカが水圧で押し戻され、挿入すること自体が困難であるという課題もあった。そのため、地質不良部において100m級の水平ボーリング先端にパッカを設置した事例はほとんどない。

そこで、削孔時に使用するボーリングロッドを保孔管として利用するという新しい発想を基に、パッカをボーリング孔



Photo 3 中尺スイリモ適用状況 (新北陸トンネル) (Moderate-Length Boring and Measurement of water pressure at Shin-Hokuriku Tunnel)

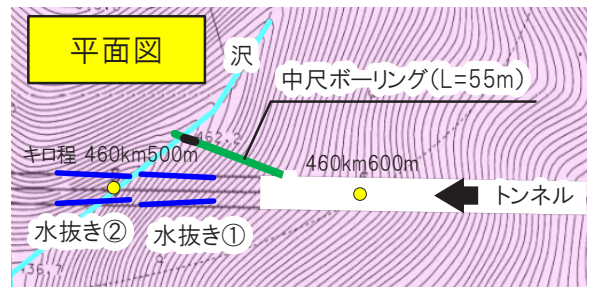


Fig.10 試験位置平面図 (新北陸トンネル) (Geological Plan View at Shin-Hokuriku Tunnel)

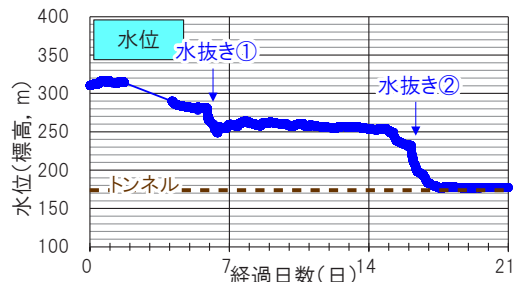


Fig.11 中尺スイリモによる水位モニタリング結果 (Monitoring Data of Ground Water Level Measured by Moderate-Length Boring SWIReMo)



Fig.12 短尺スイリモシステム
(Monitoring System of Water Pressure Using Short Boring)

先端に確実に設置し前方湧水区間の水圧を正確にモニタリングできるシステムを開発した (Fig.8)。削孔完了後に湧水帯の手前まで削孔ツールを引抜き、ボーリングロッドの中からパッカを挿入することで、孔崩れや湧水による押し戻しの影響を受けることなく安定してパッカを挿入することができる。さらに、パッカ挿入時に外すことができる新しいビット (Fig.9) を開発し、パッカを裸孔区間に押し出すことを実現した。本方法により、ボーリング孔をボーリングロッドで保孔しつつ先端の裸孔区間にパッカを設置することが可能となり、確実なパッカの設置が実現した。その結果、トンネル掘削の影響を受けることなく湧水圧をモニタリングすることが可能となった。

(3) 現場適用試験

本システムを北陸新幹線 新北陸トンネル (葉原) 工事に適用した。本工事では、花崗岩区間の断層付近では断層に沿って湧水が多いとされ、さらに土被りが最大 440m であったため高压の湧水が懸念されていた。そこで、本システムを適用し、湧水圧の変動をモニタリングした (Photo 3)。適用区間の直上には沢が流れており、沢直下で湧水量の多い区間が出現したため、その区間に対してモニタリングを行った (Fig.10)。設置直後はトンネル天端から約 150m 水頭分の水圧が作用していたが、水抜きの実施と掘削の進捗に伴って水圧が低下する様子が確認できた (Fig.11)。切羽が沢直下を通過する際には十分に地下水位が低下していることを確認し安全にトンネル掘削を進めることができた。実際の切羽到達時には粘土層を挟んだ後に亀裂の発達した花崗岩から数 10L/min の湧水が確認され、断層に沿って湧水が貯留されていたことが推測される。

3. 短尺ボーリングとその湧水計測技術

(1) ボーリングシステムの特長

短尺ボーリングは、トンネル工事の汎用機であるトンネルジャンボにより最大で 30~50m 程度の削孔を行うことができる。削孔に要する時間は数時間と比較的短く、どの現場でも簡易に実施することができる。

(2) 湧水計測方法

従来は、現場ごとに工夫を凝らしながら湧水圧の計測に取り組んでいた。例えば、小口径長尺フォアパイリングの鋼管を使って削孔し、口元周りを早強セメントやシリカレジンを



Photo 4 短尺パッカ挿入状況 (気高第一トンネル)
(Insertion of Packer System at Kedaka Tunnel)



Photo 5 短尺スイリモによるモニタリング状況
(Monitoring of Water Pressure by Short Boring SWIReMo)

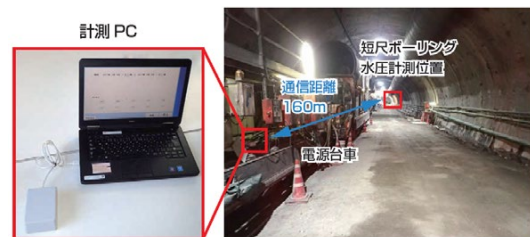


Photo 6 短尺スイリモのデータ通信状況
(Transmission of Monitoring Data of Short Boring SWIReMo)

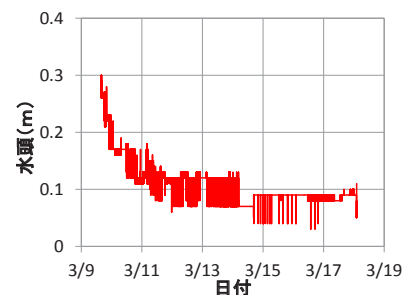


Fig.13 短尺スイリモによる計測結果
(Monitoring Data of Hydraulic Head Measured by Short Boring SWIReMo)

どでコーキングする方法を行っていたが、作業に手間がかかるとともに、ブルドン管を設置する程度で断続的な計測に留まっていた。

これに対し、どの現場でも簡易に設置できるパッカシステムをパッケージ化し、Fig.12に示す計測装置を開発した。ジャンボで削孔後、本装置を挿入することで水圧を連続的にモニタリングすることが可能となる。また、本システムは切羽近傍で計測することを想定し、取得したデータは無線で長距離離れた場所で取得することが可能なシステムとした。

(3) 現場適用試験

本システムを砂礫層での湧水が懸念された鳥取西道路 気高第一トンネル西工事に適用し、施工性の確認と水圧のモニタリングを行った (Photo 4, 5)。その結果、簡易に設置・挿入することができ施工性に問題はないことを確認した。また、パッカ設置位置から 100m 程度離れた電源台車に計測 PC を設置し、リアルタイムにデータの通信ができることを確認した (Photo 6)。Fig.13 に水位のモニタリング結果を示す。パッカの設置から約 9 日間計測を行い、トンネルの掘進に伴い、徐々に水位が低下していく状況が確認できた (Fig.13)。

IV. おわりに

突発湧水による工程遅延や甚大な災害を未然に防ぎ、安全に施工を進めるため、トンネル坑内から切羽前方の湧水情報を取得する技術の開発に取り組み、これまでに超長尺・中尺・

短尺と長さの異なる先進ボーリング技術を活用した湧水計測技術を開発した。現場で適用試験を行った結果、精度よく湧水データを取得することができ、実掘削時の地質・水理状況とよく合致していることを確認した。

今後は、施工段階ごとの水圧計測データに基づいた湧水予測や対策の評価手法の開発を進めていく予定であり、今回開発した湧水計測技術と評価技術とを統合することで、切羽前方の湧水状況を総合的に判断し、対策の要否検討や掘進の可否検討に役立て、トンネル掘削を安全に進めることが可能な湧水対策システムが構築できると考えている。今後も、湧水が懸念される現場に本技術を展開し、安全な施工に貢献していく予定である。

参考文献

- 1) 北村義宜ほか；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，VI-392，2016.9，pp.783-784.
- 2) 土木学会；トンネル・ライブラリー第 20 号山岳トンネルの補助工法－2009 年版－，2009.
- 3) 岩野圭太ほか；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，鹿島技術研究所年報，第 64 号，2016.11，pp.46-51.
- 4) 鉦研工業 HP；<http://www.koken-boring.co.jp/j/>（2018.7.17 現在）

Development of New System of Monitoring Ground Water Information Ahead of Tunnel Face

*Yuko Okada, Kazuhiko Masumoto, Keita Iwano,
Hayato Nonaka and Junichi Kawabata¹⁾*

It is very important to predict the geological and hydraulic conditions ahead of the tunnel face, because a misjudgment could cause a major disaster and schedule delays. However, due to the long and linear properties of tunnels, pre-geological investigations are sometimes insufficient. In particular, regarding groundwater, it is difficult to drill observation wells due to the huge overburden. In order to solve this problem, we have developed a new system of monitoring groundwater information which is combined with several types of pilot boring from the tunnel face. We categorized the horizontal pilot boring for the tunnel into three types by drilling length, and developed new devices to measure water inflow information for each of the three drilling systems. These devices have different concepts and structures depending on the purpose of measurement. By applying these systems at appropriate construction stages in turn, quantitative hydraulic information is obtained. The three types of devices were tested at a tunnel site and their good performance was verified. In the future, a system that combines the three techniques will help to estimate the groundwater condition ahead of the tunnel face and judge appropriate countermeasures, thus leading to safe tunnel excavation.