

山岳トンネルにおける切羽前方湧水 モニタリング技術の開発

岩野 圭太¹・岡田 侑子²・升元 一彦³・川端 淳一⁴

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:iwanokeita@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:okadyuko@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:masumotk@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:kawabata-j@kajima.com

山岳トンネルは線状構造物である特殊性から事前調査が十分でなく、施工中に遭遇する地山条件に合わせ随時計画変更する場合が多い。地下水に関しては、特に土被りの大きい長大トンネルにおいて突発湧水などが懸念されるものの地表からの観測井が期待できないため、坑内の先進ボーリングから確実な湧水情報を得ることが重要となる。そこでトンネル坑内で実施されているボーリングの削孔長や用途に応じて、必要な湧水情報を精度よく計測する技術（スイリモ）を開発した。これらの技術を現場適用し、定量的な湧水データが得られることを確認した。この湧水情報を活用することで、切羽前方の地山の想定や湧水対策の要否検討、適切な対策工を選定ができ、安全な施工につながるものと考えられる。

Key Words : hydrological monitoring, horizontal boring, water pressure, water flow

1. はじめに

山岳トンネルは線状構造物である特殊性から事前調査のみで地質・地下水などの地山条件を正確に把握することが難しい場合が多い。そのため施工中に遭遇する新たな地山条件により計画を随時変更する場合が多い。なかでも地下水に関しては、長大山岳トンネルにおいて高水圧の突発湧水による工程遅延や甚大な災害につながる懸念があるものの、大土被りのため地表からの観測井が期待できないことから、施工段階において坑内の先進ボーリングから確実な地下水の情報を得ることが重要となる。

近年、適用事例が増えている超長尺ボーリング^{1),2),3)}をはじめ、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いる。そこで切羽前方を総合的に評価し、安全な掘削につなげることを目的として、正確な湧水情報を取得するシステム「スイリモ」（水（すい）リサーチ・モニター）を開発した。このスイリモは施工時期、用途に応じて異なる削孔長の先進ボーリングに応じて必要な湧水情報を得るように複数の計測技術を開発しており、それぞれについて現場適用を行った。

2. 湧水モニタリング技術の開発目的と課題

(1) 開発目的と適用方針

本開発の最終目的は、トンネル坑内からの計測・モニタリングによって切羽前方の湧水状況を確実に把握し、そのデータに基づいて適切に坑内湧水量の予測や対策の要否の判断、対策方法の選定・準備照査を実施し、湧水トラブルを起こすことなく安全な掘削につなげる総合的な切羽前方の湧水対策システム（図-1）を構築することにある。このフローを構築するための最大のポイントは、①切羽前方の湧水の計測技術の開発及び②そのデータに基づく対策立案の判断につながる評価手法を確立することである。このうち本報では①に関する開発状況を報告する。今後の想定される大土被りトンネルでは地表からの観測井が期待できないことを念頭に置くと、湧水情報は坑内の先進ボーリングからの情報が基本となると考えられる。また懸念する湧水区間に達するまでの対策検討の時期や段階を考慮するとそれに伴って削孔長ごとの先進ボーリングに求められる湧水情報の質も変わる。現状、トンネル坑内からの先進ボーリングは①長尺または超長

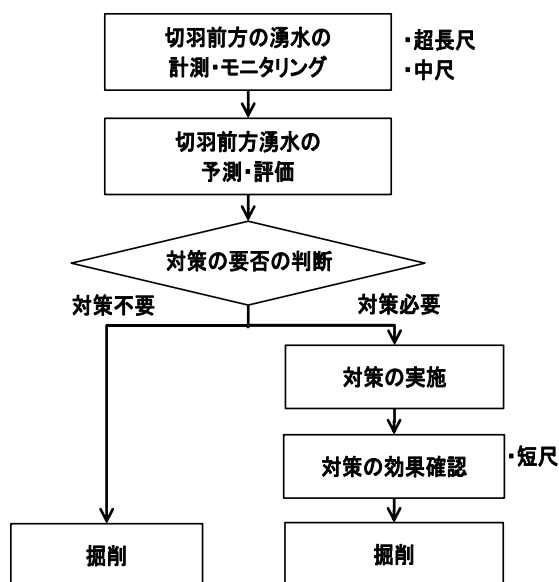


図-1 切羽前方の湧水対策システムのフロー

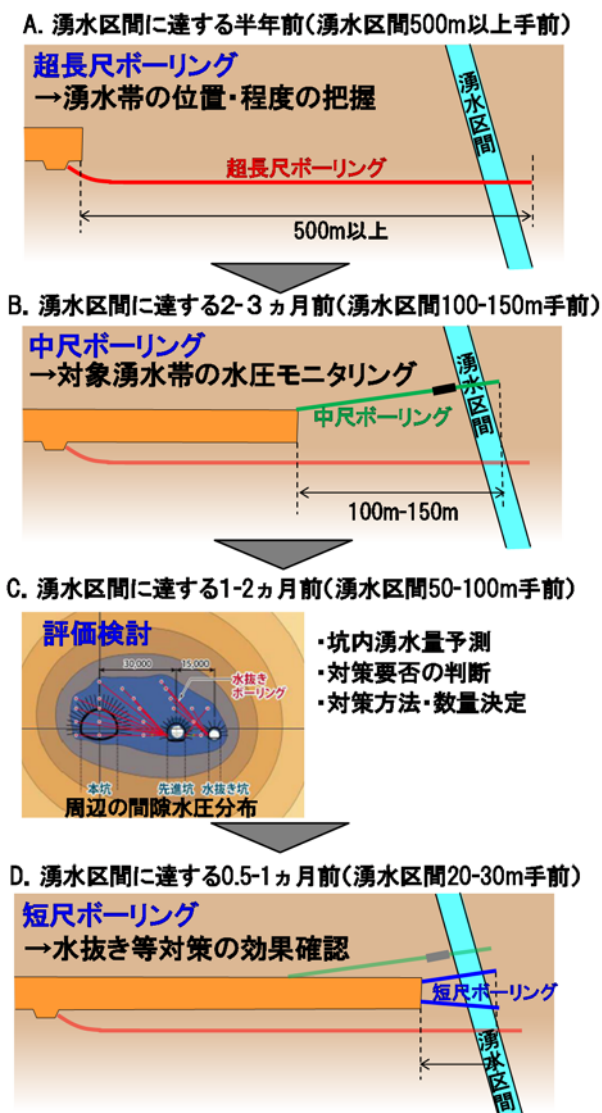


図-2 湧水に対する安全な掘削に向けた手順

尺ボーリング（500m超）（以下、超長尺ボーリング），
②中尺ボーリング（100～150m），③短尺ボーリング
（20～30m）におおむね分類できるが，図-2に示すよう
に各先進ボーリングの施工時期に応じた湧水計測の用途
や役割が求められている。

a) 湧水区間に達する半年前

超長尺ボーリングにより切羽前方500～1000mに存在
する湧水帯の位置・程度を把握。

（超長尺ボーリングの実施がない場合はb)から）

b) 湧水区間に達する2～3ヶ月前

中尺ボーリングにより100～150m前方から想定される
湧水帯の湧水圧モニタリングを実施。トンネル掘進に伴
う湧水圧の変動傾向を計測する。

c) 湧水区間に達する1～2ヶ月前

中尺ボーリングの湧水圧モニタリングデータからトン
ネル掘削進捗と湧水圧変動の関係を求める。それに基づ
きトンネル自体の水抜き効果を考慮し，湧水対策の要否
の判断を行う。要対策となれば対策方法やその数量の判
断材料とするべく，解析など定量的評価も併せて行う。

d) 湧水区間に達する0.5～1ヶ月前

短尺ボーリングにより，20～30m前方から湧水圧モニ
タリングを実施し，水抜きなどの対策の効果を確認し，
対策継続／掘削開始の判断材料とする。

(2) 湧水モニタリング技術の現状と課題

各削孔長の先進ボーリングの現状技術は前述のような
湧水計測の目的を達成するにはまだ不十分な状況である。
各ボーリングの特徴や現状技術，湧水計測に関する課題
を整理すると以下ようになる。

a) 超長尺ボーリング

トンネル計画線に沿い掘削できる500～1000m級の水平
コントロールボーリングである。長大山岳トンネルの
施工リスクの軽減策の一つとして山岳トンネル用に実用
化されており，これまでに数件の実施例がある。削孔は
専用機により行われ，従来の長尺ボーリング工法に比べ
高速削孔が可能である。一方，削孔時に得られるデータ
は機械データから算出される削孔エネルギー係数のみで
あり，湧水については口元湧水量・圧を断続的に計測す
るのみに限られていた。

b) 中尺ボーリング

水抜き，地質の確認などの用途で削孔長100～150m程
度削孔される。削孔は専用機で行われ，コア採取可能な
ワイヤーライン工法や100m以上を高速に安定して削孔
できるウォーターハンマー式など工法の種類も多い。
100～150mをおおむね4方程度で掘削することが可能で
あり，休工日に実施が可能なため適用実績は多い。一方，
湧水については，超長尺ボーリングと同様に削孔中の湧
水量の変化を手計りで断続的に計測する，または削孔後，

口元にアナログの水圧計を設置する程度であった。

c) 短尺ボーリング

水抜き、前方地質の確認などの目途で汎用機のジャンボにより20～30m程度削孔される。施工時間は数時間程度であるため頻繁に実施される。湧水に関しては、主に水抜き孔として削孔されるが、水圧計測孔として用いられることもあり、その際は口元にアナログの水圧計を設置することが多い。

(3) 各ボーリングの湧水計測に関する開発目標

以上、現状の各種ボーリングの湧水に関する計測技術と求められる湧水計測の目的を踏まえ、達成すべき開発目標を以下にまとめる。

a) 超長尺ボーリング

ボーリング長が非常に長く、孔壁の自立や段落としての施工手順を考慮すると削孔完了後のパッカ設置・モニタリングは技術的に困難なため、削孔期間中に湧水圧・湧水量をデジタルで連続的に計測する技術が必要となる。

b) 中尺ボーリング

従前のように湧水圧を口元で計測する場合、トンネル進行に伴い、湧水帯の水圧に関わらずトンネル側壁からの湧水圧低下が生じるため、切羽前方の湧水圧を危険側に評価する可能性がある。そのため削孔先端部の対象湧水区間にパッカを確実に設置し、湧水圧を連続的にモニタリングする技術が必要となる。

c) 短尺ボーリング

湧水圧計測は、各トンネル現場で独自に工夫した手法として一般には統一されておらず、計測されたデータもアナログで断続的であることが多い。従って、どの現場でも適用できる連続的な湧水圧計測モニタリングユニットの開発が必要となる。

水帯に均された水圧を計測することとなり、各湧水帯の正確な位置や水圧を判断できない。そこで、超長尺スイリモでは、削孔ツール先端部分に水圧計測ユニットを設置し、削孔中の先端水圧を連続的にデジタル計測する方法を採用した。水圧計は内部にバッテリーとメモリを搭載した自記式水圧計とした。

超長尺ボーリングでは、先端部のダウンホールモータを送水にて回転することにより削孔を行う。図-4に示すように削孔中は、口元の電磁流量計では送水量と湧水量の合計を計測し、先端の水圧ユニットでは主に送水圧を計測していることになる。一方、ロッドの継ぎ足し時や

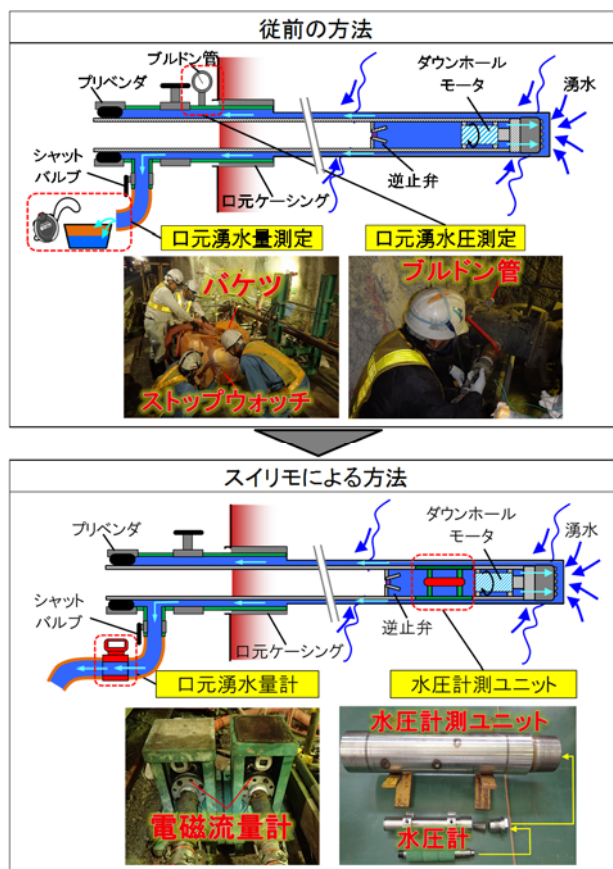


図-3 超長尺スイリモの改良点

3. 超長尺ボーリング湧水計測技術

(1) 湧水計測技術の開発概要

超長尺ボーリングのこれまでの湧水に関する計測方法に対する超長尺スイリモの改良点を湧水量・湧水圧それぞれの計測について整理する（図-3）。

a) 口元湧水量の自動計測

従前の口元湧水量の手計り計測では手間がかかるうえ、断続的なデータしか取得できない。そこで超長尺スイリモでは口元に電磁流量計を設置し、削孔中の湧水量をデジタルで自動かつ連続的な計測方式に変更した。

b) 削孔先端部の湧水圧計測

削孔途中で都度、口元にてブルドン管を目視で読む従前の方法の場合、断続的なデータしか取得できないだけでなく、削孔長が長くなると、孔内に存在する複数の湧

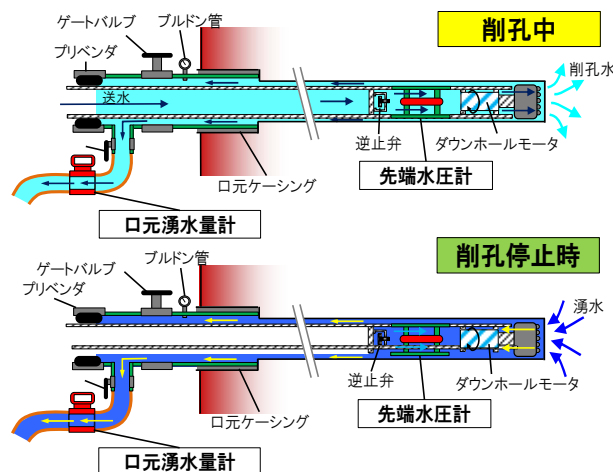


図-4 削孔時・削孔停止時の計測状況

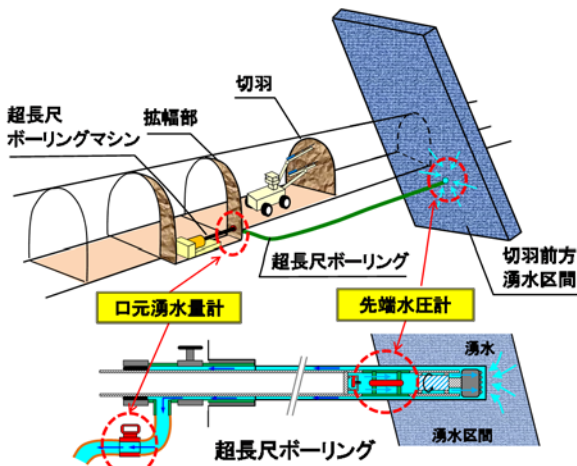


図-5 スイリモによる湧水圧/量の計測概念図



写真-1 超長尺ボーリング実施状況



写真-2 水圧計測ユニット

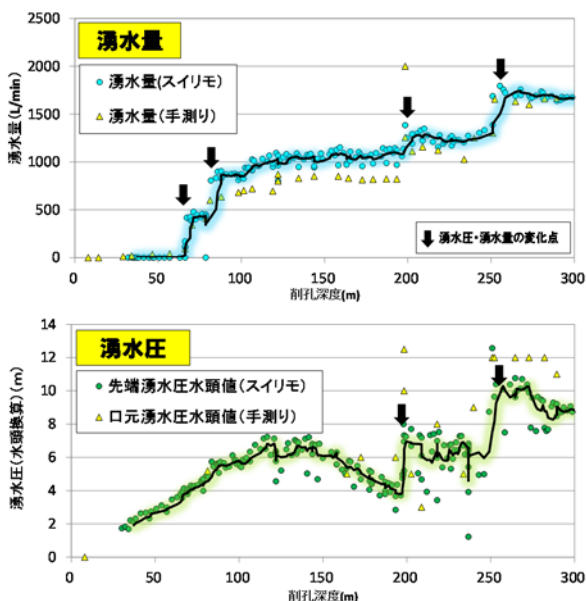


図-6 スイリモによる湧水圧・湧水量データ

休憩時などの削孔停止中は、先端部の逆止弁が効くため、電磁流量計では湧水量のみを計測し、水圧計測ユニットでは先端部の湧水圧を計測していることになる。このようにスイリモデータから削孔ログを参考に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より確度の高い湧水データが得られる。

(2) 現場適用（箕面トンネル西工事）

この超長尺スイリモを箕面トンネル西工事に適用した。本現場では、図-5および写真-1に示すように拡幅部を起点とした超長尺ボーリングを2回実施し（削孔長1回目700m、2回目600m）、これらに対し超長尺スイリモを適用した。湧水量は口元に電磁流量計の設置、湧水圧は写真-2に示すような水圧計測ユニットの削孔ツール先端部への設置によりそれぞれ計測した。ボーリングの削孔は、削孔と停止（ロッド継足しなど）を繰り返しているが、その一連を計測したデータの中から削孔ログに基づき削孔停止時のみを抽出したデータを図-6に示す。同図に手計りの計測結果（湧水量・湧水圧ともに口元で計測）を追記したが、手計りは計測点数が少なく傾向が捉えにくいのに対し、超長尺スイリモでは削孔深度に対する連続データが取得できており、湧水圧・湧水量ともに値の急増点を捉えている。

また、超長尺ボーリングを行った全区間において、超長尺スイリモで得られた湧水量・湧水圧データに地質展開図やボーリングに伴う削孔エネルギー分布を重ね合わせ、トンネル前方の水理・地質情報を整理した結果を図-7に示す。削孔エネルギーから、ボーリング区間に6箇所程度（図中①～⑥）の地質不良部と思われる区間が存在することが明らかになったが、そのうち前半の3箇所（図中①～③）は湧水圧・湧水量の急増点と合致しており、地下水を含んだ脆弱な地山区間であることが想定された。一方、後半の3か所（図中④～⑥）については、湧水データに大きな変化が見られないことから、これらの区間は湧水を伴う地質不良部は想定されることが分かった。実際のトンネル掘削時には①及び③の区間では切羽から滴水が確認されており、実際の地質や水理状況と合致していることが分かった。

4. 中尺ボーリング湧水計測技術

(1) 湧水計測技術の開発概要

今後想定される大土被りトンネルにおいても対象湧水区間の正確なモニタリングをに実施するためには、トンネル坑内からの水平ボーリングを利用し、パッカを対象湧水区間の手前に確実に掛ける必要がある。これは図-8に示すように口元の水圧計測では、トンネル掘削に伴う

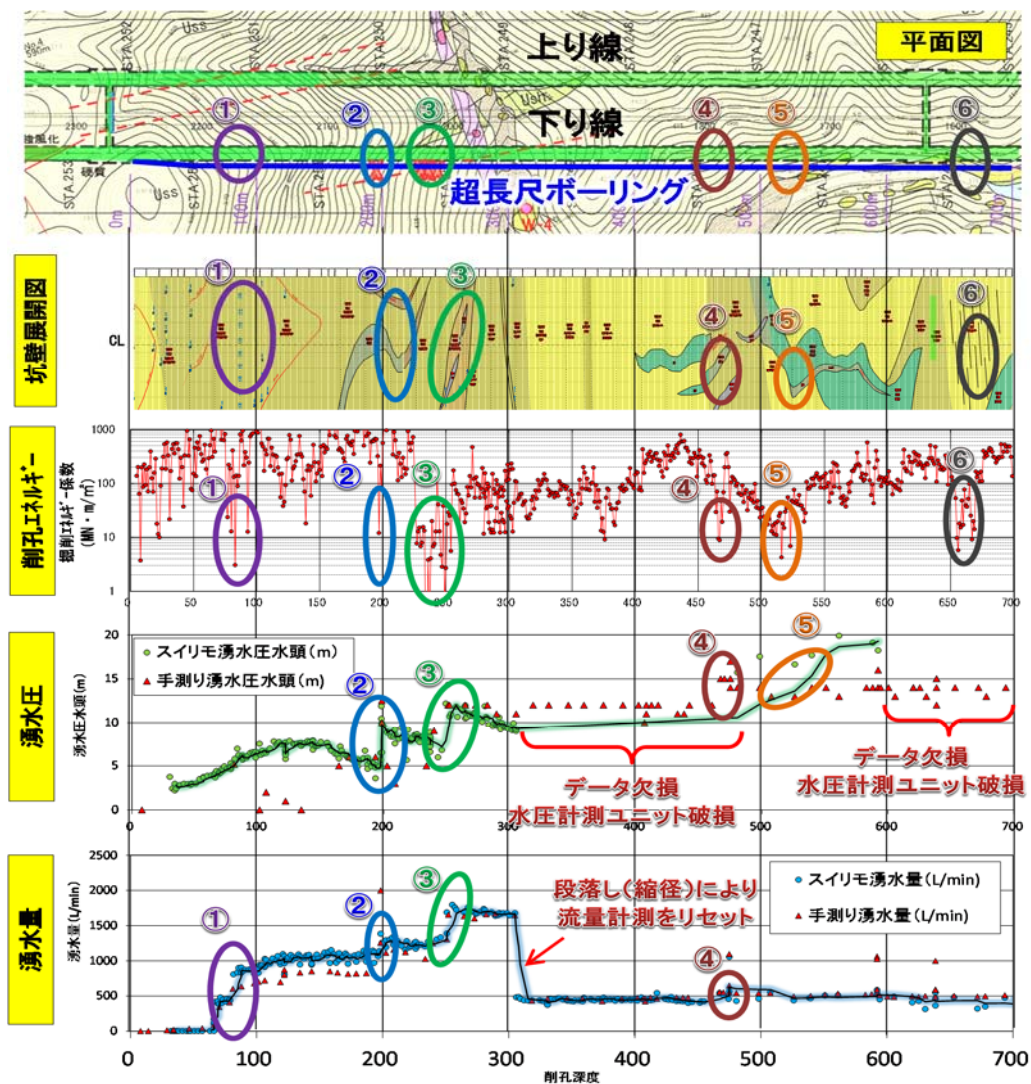


図-7 超長尺ボーリング実施区間の地質・湧水情報のまとめ

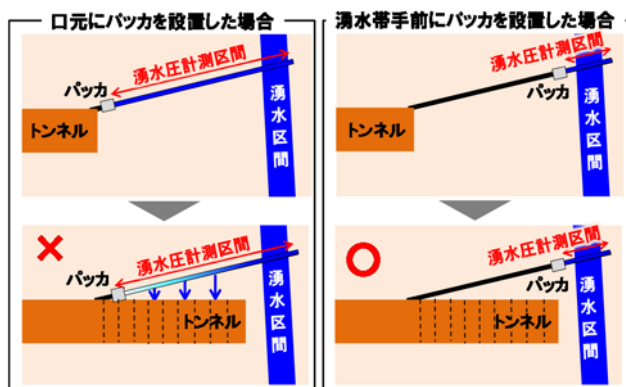


図-8 パッカ位置による湧水圧計測の影響

トンネル側壁からの逸水による水圧低下のため、実際の湧水区間の湧水圧を危険側に評価する恐れが大きいのである。パッカを対象湧水区間の手前に確実に掛けるためにはボーリング削孔後、一旦削孔ツールを引抜き、パッカを裸孔に挿入する方法が考えられるが、この場合、大量出水で湧水が口元から噴出する状況での孔内へのパッカ押し込みが難しいだけでなく、孔崩れによりパッカ

の挿入・回収が困難であることからこれまでほとんど実績がない。そこで図-9に示すように、ボーリング削孔後に削孔ツールを引き抜かず(＝裸孔にすることなく)、逆に削孔ツールを保孔管として活用し、パッカを挿入・設置するシステムを開発した(中尺スイリモ、特許出願中)。この手順を可能とする本システム最大の特徴は、削孔ビットがパッカ挿入時に外れ、そのまま押し出される機構とすることである。

(2) 現場適用(羽根トンネル工事)

この中尺スイリモのプロトタイプを製作し、羽根トンネル工事で適用試験を実施した⁴⁾。本工事では、図-10に示すように砂礫区間での湧水が懸念されたため地上からのディープウェルによる排水工法が採用されていた。そこでこの砂礫区間手前約100m地点より、坑内から中尺ボーリングを削孔し(削孔実績120m)、砂礫が確認された手前の口元から82mの地点に図-9で示した手順でパッカを設置した(写真-3)。施工は通常の中尺ボーリングと同様に土日4方で終了し、その後3か月間水圧モニ

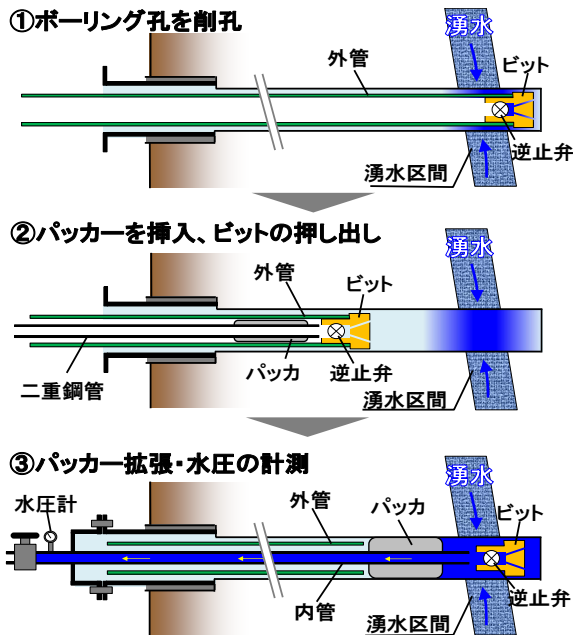
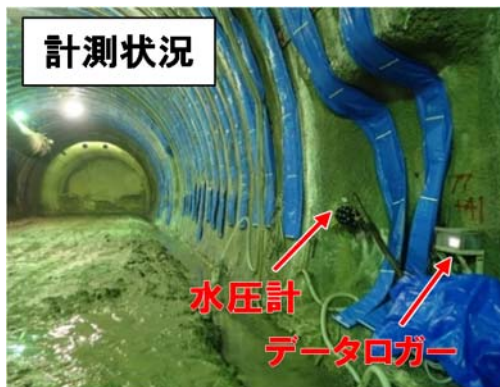
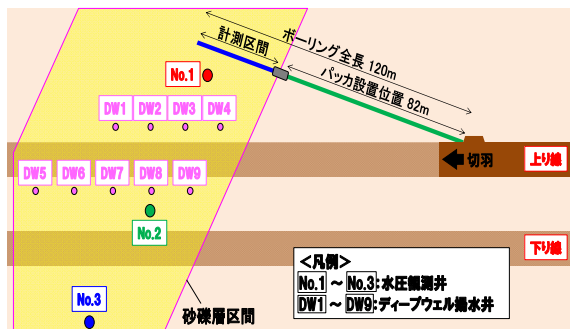


図-9 中尺ボーリング水圧モニタリングの手順



タリングを実施した（写真-4）。図-11にモニタリング期間中に計測した中尺スイリモと地表観測井の湧水圧モニタリングデータを示す。中尺スイリモによる計測結果は、図-10に示されている最も近くに設置された観測井No.1とほぼ同様の水圧変動トレンドを示しており、確実にボーリング先端部の湧水圧を計測できていることが確認できた。

5. 短尺ボーリング湧水計測技術

(1) 湧水計測技術の開発概要

前述のように短尺ボーリングによる水圧測定は、各現場で独自に工夫した方法で計測され、アナログで断続的なデータが多い。そこでどの現場においても簡単にデジタル水圧計測ができるよう水圧計測ユニット（短尺スイリモ）を作製した。短尺スイリモは削孔長が短いことから、図-12や写真-5に示すように口元より1.5mの位置に設置できるメカニカルパッカーにより水圧計測するシステ

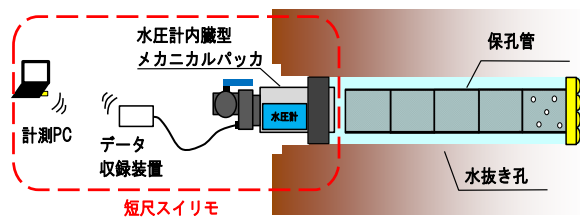
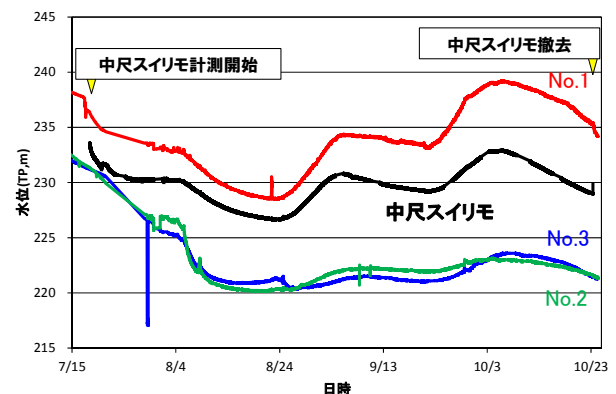




写真-6 トンネル坑内通信試験



写真-7 短尺スイリモの挿入状況

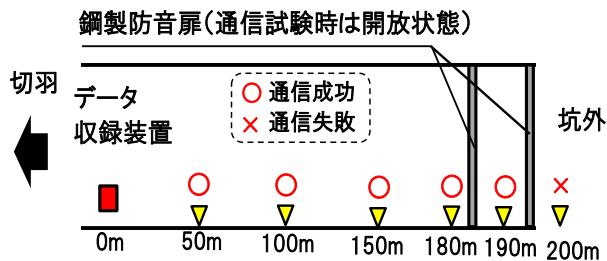


図-13 トンネル坑内通信試験の結果

ムとした。水圧計測は従来のブルドン管を断続的に読む従来の方法をやめ、連続的なデータを取得するためデジタル計測とし、水圧計自体をパッカシステム内に内蔵し一体化した。また短尺ボーリングでは口元が切羽近傍にあり、計測頻度や盛り替えも多いことが想定されるため、計測は無線にて後方の計測PCに伝送する方式とした。さらに口元の裸孔に直接パッカを掛ける都合上、水抜き孔が鋼管を伴う場合は、最後の端末管を外した状態で15m程度追加削孔する方式とした。

(2) 現場適用 (気高第一トンネル工事)

この短尺スイリモのプロトタイプを気高第一トンネル工事にて試験適用した。本現場では、湧水を多く含んだ砂礫層が当初想定より脆弱な切羽に出現し、切羽安定のための鏡ボルトや水抜きが実施されている。

短尺スイリモの施工に先立ち、坑内データ通信試験を実施した⁹⁾ (写真-6)。データ収録装置と計測PCの距離を離し、通信状況を確認した結果、図-13に示すように、鋼製防音扉1枚を挟んで最長190m離れた位置でも確実にデータを収録することが出来た。

本システムの挿入設置試験を同現場の水抜き孔にて実施し、パッカを設置した (写真-7, 写真-8)。同孔は想定湧水区間の終端部に差し掛かっており、削孔直後の湧水量は20L/minであった。パッカは同現場の水抜き孔で用いられているもの (削孔径90mm, 鋼管径76mm) に合わせて作製しており、挿入・設置といった施工性は問題ないことを確認した。モニタリングでは計測PCを水圧計測位置の後方160mに位置する電源台車に配置したが、問題なく通信できることが分かった (写真-9)。図-14に



写真-8 短尺スイリモの設置状況



写真-9 モニタリングの通信状況

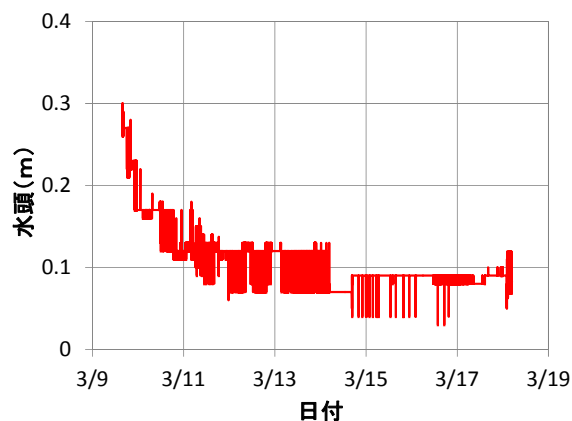


図-14 短尺スイリモ水圧データ

モニタリングを実施した約9日間の水圧データを示す。日ごとに水位が低下していく状況が確認できていることがわかる。

6. おわりに

大土被りのため地表からの観測井が期待できない長大山岳トンネルに対し、高水圧の突発湧水による工程遅延や甚大な災害を未然に防ぎ、安全に施工するため、新たに開発した坑内からの切羽前方の湧水モニタリング技術についてその概要と開発現況を報告した。

これまでに超長尺・中尺・短尺と削孔長が異なる先進ボーリングに対し、それぞれ施工段階やその時の用途に合わせて、必要な湧水データを取得する技術を確立しつつあり、今後は現場への本格運用に向けて安定したデータ取得、システムの頑健性に対する改良を進めて行く予定である。

また、これに並行して施工段階ごとの水圧計測データに基づいた湧水予測の評価手法の開発も進めている。この水圧計測技術と評価技術を統合することで、切羽前方湧水を総合的に判断し、対策要否の判断、対策方法の選定を行うトンネル湧水対策システムが構築できると考えている。今後も開発を進め、トンネル湧水に関するトラブル解消、安全な施工に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 岩野圭太，升元一彦，岡田侑子，川端淳一，北村義宜；山岳トンネルの切羽前方における湧水データの連続計測技術の開発，第 26 回トンネル工学研究発表会，2016.
- 2) 岡田侑子，升元一彦，岩野圭太，瀬尾昭治，川端淳一，北村義宜；超長尺ボーリングを利用したトンネル切羽前方の湧水状計測システムの適用，第 14 回岩の力学国内シンポジウム，2016.
- 3) 岩野圭太，岡田侑子，升元一彦，川端淳一，瀬尾昭治，北村義宜；超長尺ボーリングを利用した切羽前方の湧水状計測システムの適用，技術研究所年報，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，2017.
- 5) 小泉恵介，岩野圭太，岡田侑子，升元一彦，福住幸雄，出水秀和，川端淳一；短尺ボーリング水圧計測システムの開発と現場適用試験，土木学会第 72 回年次学術講演会，2017.

(2017.8.11 受付)

INOVATED MONITORING SYSTEM OF GROUNDWATER INFORMATION AHEAD OF TUNNEL FACE

Keita IWANO, Yuko OKADA, Kazuhiko MASUMOTO, Junichi KAWABATA

Due to long and linear properties of tunnel, pre-geological investigation of it is sometimes insufficient. Especially, as to groundwater, misjudgement of its condition ahead of tunnel face might cause tremendous disaster. Therefore, grasping reliable information of it beforehand is quite important to prevent geological trouble and schedule delay. However, in the case of large-scale tunnel, it is quite difficult to set monitoring well on the surface due to its huge overburden. Here, in this study, several types of innovated monitoring techniques from tunnel inside are developed. They are tested in site and are verified their good performance. These monitoring system will help site staffs to judge the appropriate counterplan.