

山岳トンネルの切羽前方における湧水データ 連続計測技術の開発

岩野 圭太¹・升元 一彦²・岡田 郁子³・川端 淳一⁴・北村 義宜⁵

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:masumotk@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:okadyuko@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

⁵正会員 鹿島建設株式会社 関西支店 (〒540-0001 大阪府大阪市中央区城見2-2-22)

E-mail:y-kitamura@kajima.com

長大かつ土被りの山岳トンネルでは、地上からの調査ボーリングや観測井の情報が期待できないため、坑内から切羽前方の地質や地下水の情報を確実に得ることがトンネルの災害リスクを軽減し、安全な施工に寄与すると思われる。トンネル坑内から施工される超長尺ボーリングに対し、削孔中の湧水量と湧水圧を自動測定する技術「スイリモ」を開発し、箕面トンネル西工事に適用した。その結果、従来の手作業による断続的な計測に比べ、計測に関する作業性が著しく向上したうえ、連続的なデータが取得できることが分かった。また、超長尺ボーリングにて得られる地質情報とスイリモで得られる水理情報を併せて評価することにより、切羽前方の地山の想定や湧水対策の要否検討に役立てることができた。

Key Words : extra-long control boring, hydrological investigation, water pressure, water inflow

1. はじめに

山岳トンネルは、その特性として当初の事前調査のみで地形、地質、地下水等の状況などの地山条件を完全に把握することは難しい場合が多く、施工中に遭遇する新たな地山条件によって柔軟に当初計画を変更することが多い。特に地下水については、特に土被りの大きい山岳トンネルでは、高水圧の突発湧水により工程遅延や甚大な災害に繋がる懸念があるが、地表からの観測井が期待できないため、施工段階においても坑内から地下水に関する情報を得ることが極めて重要となる。

近年、長大な山岳トンネルに対し、500m以上の超長尺の水平コントロールボーリング技術が開発され¹⁾²⁾、実際の山岳トンネル現場に適用されつつある。本技術により、500m以上のトンネル切羽前方におけるの断層破碎帯などの地質状況が把握でき、対策に十分な時間を確保できることが期待されている。一方で、現在の本技術の湧水に関する計測は、口元において手作業で断続的に

アナログデータを取得するものであり、手間がかかるうえにデータの質は十分ではなかった。そこで、超長尺湧水圧および湧水量を正確かつ自動で連続的に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。本稿では、その開発の概要と、実際に現場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結果について述べる。

2. 超長尺ボーリング技術の概要

(1) 超長尺ボーリング技術の特長

超長尺ボーリングは、トンネル坑内から掘削方向を制御しながら、トンネル施工速度と比べ極めて早く掘削することが可能なコントロールボーリングである。図-1に示すように、トンネル坑内で超長尺の掘削深度を高効率に削孔できるように開発されたボーリングマシンに加え、削孔方向をコントロールする孔曲り計測ユニットや制御

ユニットを備える。また、削孔はトリコンビット（写真-1）によるノンコアボーリングであり、超長尺でも先端の削孔エネルギーを保つようにダウンホールモータに高水圧を負荷する機構となっている。

(2) 計測データ

超長尺ボーリングでは、表-1に示す削孔に関する情報が得られる。これに対し、今回開発したスイリモを適用することで、削孔深度毎の湧水圧・湧水量情報が併せて得られることが期待される。

3. 新しい湧水計測技術「スイリモ」

(1) 湧水計測の従前の課題

超長尺ボーリングでは、これまで方向制御や削孔速度といった削孔技術に注力され、湧水に関するデータ取得は従前の方法に留まっていた。

a) 湧水量の測定

従前では、ボーリング孔口からの排水を一定量のバケ

表-1 超長尺ボーリングで得られるデータ

・深度	・給進力
・削孔速度	・送水量
・回転数	・送水圧
・回転トルク	

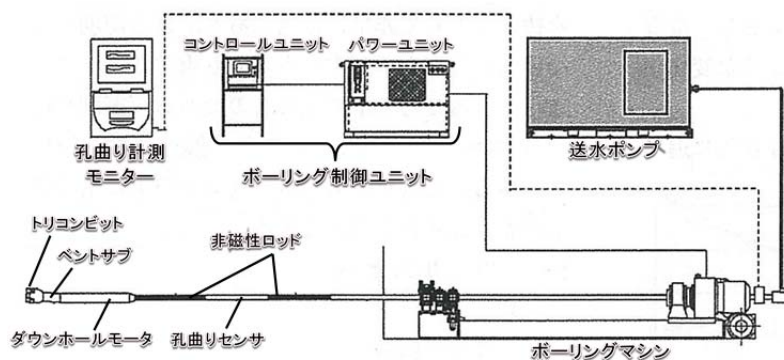


図-1 超長尺ボーリング構成^{1),2)}

ツに溜めるのに要した時間から湧水量を求めており、手間がかかる上、単発データしか取得できていなかった。

b) 湧水圧の測定

これまで、湧水圧測定は、ボーリング孔口にブルドン管付の口元管を設置し、バルブを閉じて水圧の計測を行っている事例が多い。しかしながら、口元での湧水圧測定は、ボーリング長が長くなるほど、ボーリング区間内の複数の湧水帯に均された水圧となり、各湧水帯の正確な位置やその水圧を判断できない。また削孔後のボーリング孔にパッカを設置し、区間湧水圧を計測する方法も考えられるが、削孔終了後、裸孔となった500m以上のボーリング孔に、パッカを後挿入することは作業的に大きな手間がかかるうえ、孔崩れ等によりパッカが拘束されるリスクが懸念され、現実的には非常に困難である。

(2) スイリモの概要

a) 口元湧水量の自動計測

以上の従前の課題に対するスイリモの改善点を図-2に示す。スイリモでは削孔中の湧水量を自動かつ連続的に計測するため、孔口に電磁流量計を設置する。電磁流量計は口径80mmを標準とし、流量が多い場合は、複数台を併用するなどの措置で対応できる流量範囲を調整する。

b) ボーリング先端の湧水圧計測

削孔後のパッカの後挿入によるモニタリングが困難であると想定されたため、スイリモでは、ボーリングロッ



写真-1 トリコンビット

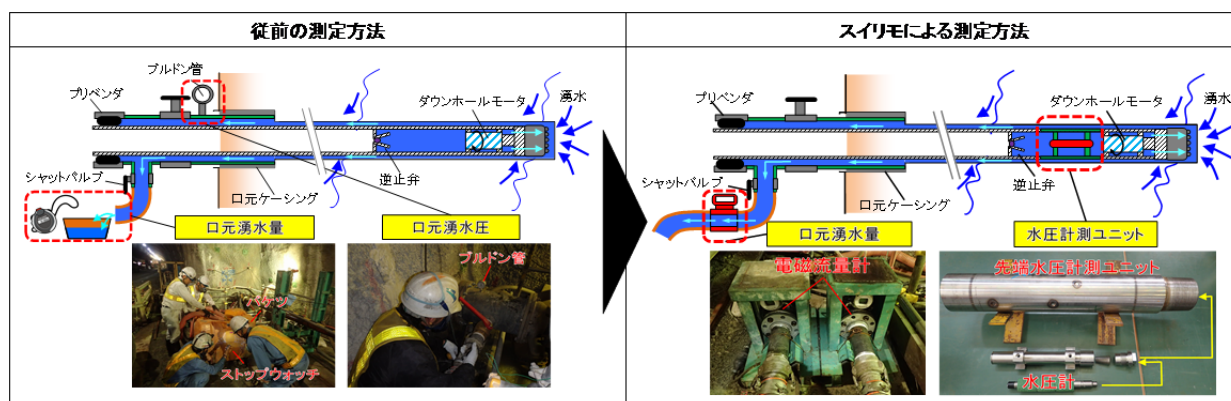


図-2 湧水圧・湧水量の測定方法

ドの先端区間に水圧計測ユニットを設置し、削孔中の先端水圧を計測する方法とした。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である。

c) スイリモによるデータ計測

図-3にスイリモによる湧水量・湧水圧計測の概念図を示すが、最大の特徴は、削孔作業に支障をきたすことなく、削孔中に連続的なデータを取得できることにある。

しかしながら、超長尺ボーリングは前述のとおり、高

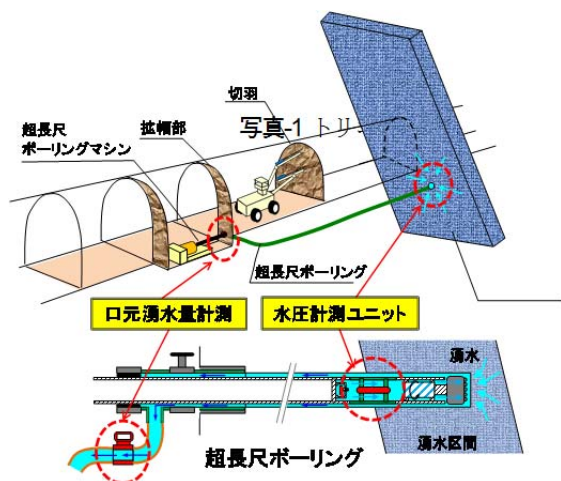


図-3 スイリモにより湧水量・湧水圧の計測

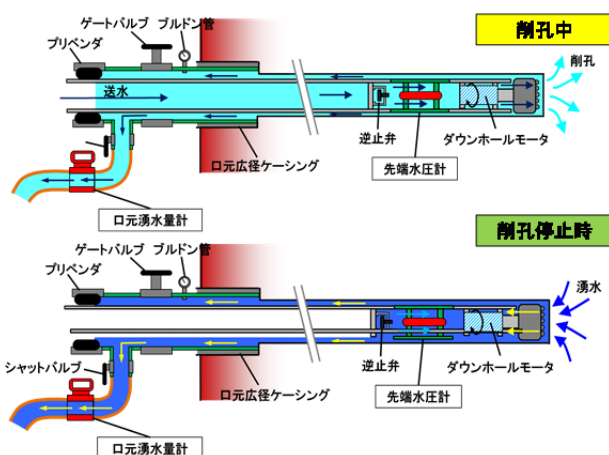


図-4 削孔時・削孔停止時の計測状況

水圧の送水による先端のダウンホールモータの回転により削孔するため、湧水量・湧水圧ともに得られる連続データの精査が必要となる。図-4に削孔中・停止中の超長尺ボーリング先端部の状況を示す。削孔中、口元の電磁流量計は、送水量と湧水量の合計を計測し、先端の水圧計測ユニットは、送水圧を計測していることになる。一方、ロッド継足し時や休憩時などの削孔停止中は、湧水量については、電磁流量計が、孔長全体の湧水を測定しており、湧水圧については水圧計測ユニットの後方の逆止弁が効き、先端からの湧水圧が測定されることになる。厳密な意味では、先端の湧水圧はパッカ等で仕切られているわけではないが、先端に水圧計測ユニットを設置したことで、深度毎の先端湧水圧の傾向は十分得ることができる。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。

4. 現場適用

(1) 現場の工事概要

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約5kmのトンネルである。西工事は、図-5に示すように、そのうち西側約3km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、一部で石英斑岩や蛇紋岩が貫入する。最大土被りは380mである。先行していた下り線がTD1575m付近で、地表で高山川支沢と直交し、トンネル掘削に伴う大量湧水が懸念されたため、避難連絡坑の拡幅部を始点とした700mの超長尺ボーリングが施工された。また同ボーリングにスイリモを初適用した(写真-2, 写真-3, 写真-4)。また図-6に示すように、削孔深度230-240m付近で破碎帯に遭遇したため、直径200mmのケーシングを挿入したケーシングプログラムとしている。

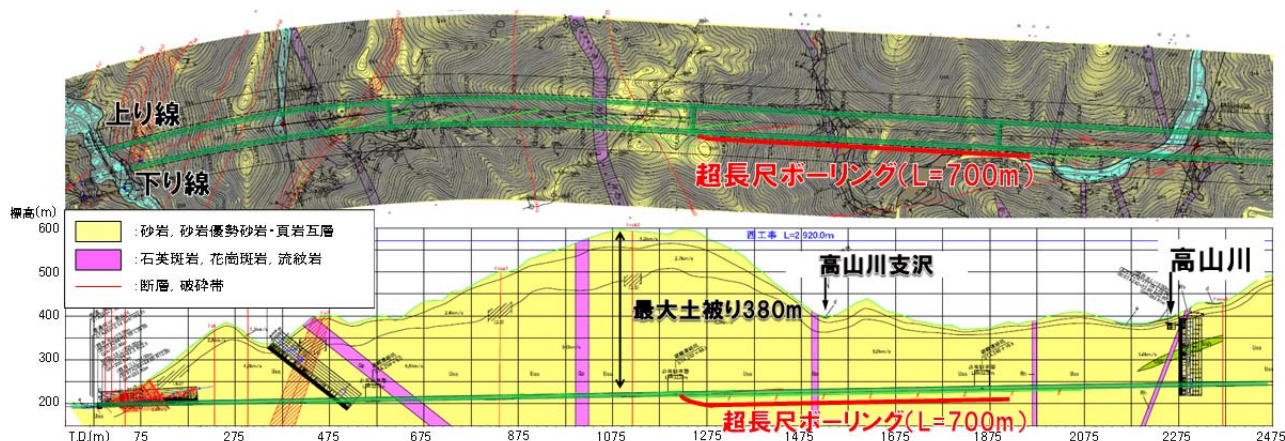


図-5 箕面トンネル西工事 地質平面・縦断図と超長尺ボーリングの位置関係



写真-2 超長尺ボーリング実施状況



写真-3 超長尺ボーリング実施状況 (孔口付近)



写真-4 スイリモ (水圧計測ユニット)

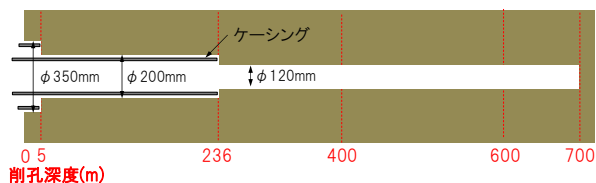


図-6 ケーシングプログラム

(2) スイリモの湧水計測状況

図-7にスイリモの口元湧水量と先端湧水圧の生データの時刻歴（拡大）を示す。削孔時は、口元から3~4MPa程度で1400L/minで送水していることがわかる。これに対し、ロッド継足し時や休憩時には、送水が停止され、湧水量が約800L/min、湧水圧は約0.05MPa（水頭換算で5m程度）であったことがわかる。このように、このようにスイリモの生データから削孔ログを参考に、湧水量・湧水圧データの挙動を抽出できることが分かった。図-8および図-9には、削孔深度を横軸に、湧水量・湧水圧

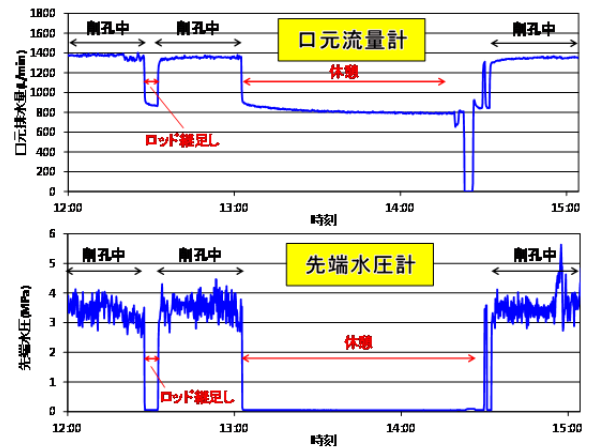


図-7 スイリモで計測された生データ

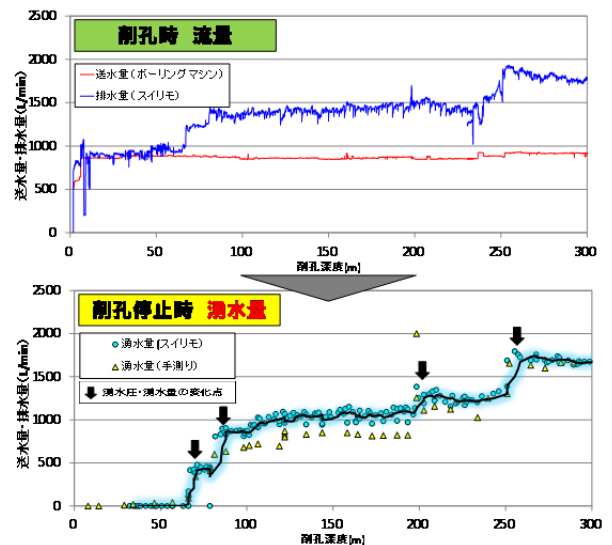


図-8 削孔時（上段）と削孔停止時（下段）の流量データ

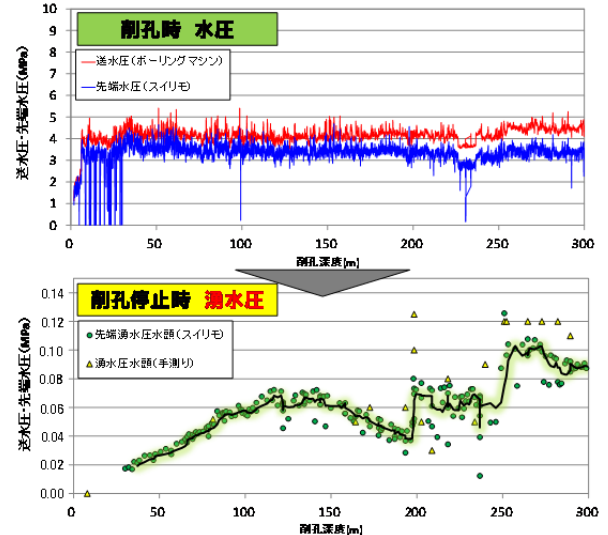


図-9 削孔時（上段）と削孔停止時（下段）の水圧データ

それぞれについて、削孔時データと削孔停止後データを示す。流量（図-8）については、削孔中データ（図-8上段）の送水量はほぼ一定（800L/min）であるのに対し、排水量（電磁流量計）は、深度70~80m、230~260m区

間で増加していることが分かる。また、削孔停止時データ（図-8下段）もほぼ同じ区間で湧水量の増加が認められている。同図には、口元での手計りによる結果も示しているが同じ傾向を示していることが分かる。なお例えば削孔深度150m地点でみると、削孔中データ（図-8上段）の送水量－排水量は、 $1400\text{L/min} - 800\text{L/min} = 600\text{L/min}$ 程度であるのに対し、削孔停止時データ（図-8下段）の湧水量が 1000L/min であり、一致しない。これは、削孔時には孔内に送水圧をかけて、湧水の排出を妨げている効果が表れているものと思われる。

水圧（図-9）については、削孔中データ（図-9上段）からボーリングマシンの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、さらに削孔深度に応じてその差である圧力損失も捉えている。削孔停止時データ（図-9下段）からは、水圧自体は小さいものの、

深度200m、250mにおいて湧水圧が上昇する地点を捉えることができています。

(3) 水理・地質情報の整理と分析

図-10に示すように超長尺ボーリングを実施した全区間において、スイリモで得られた湧水量・湧水圧データに、地質展開図や超長尺ボーリングに伴う削孔エネルギーの結果を併せ、トンネル前方の水理・地質情報を整理した。このうち、超長尺ボーリングの削孔深度250～300mの間は削孔中に孔崩れ等が頻発し、セメンチングの実施とφ200mmのケーシングの設置を行ったため、削孔深度300m以深で、湧水量が著しく低下している。一方、削孔深度300～700mの湧水量の増加がほとんど認められていないことから、この区間は、大きな湧水量を含む地質不良部は想定されないことが分かる。削孔エネルギーは、

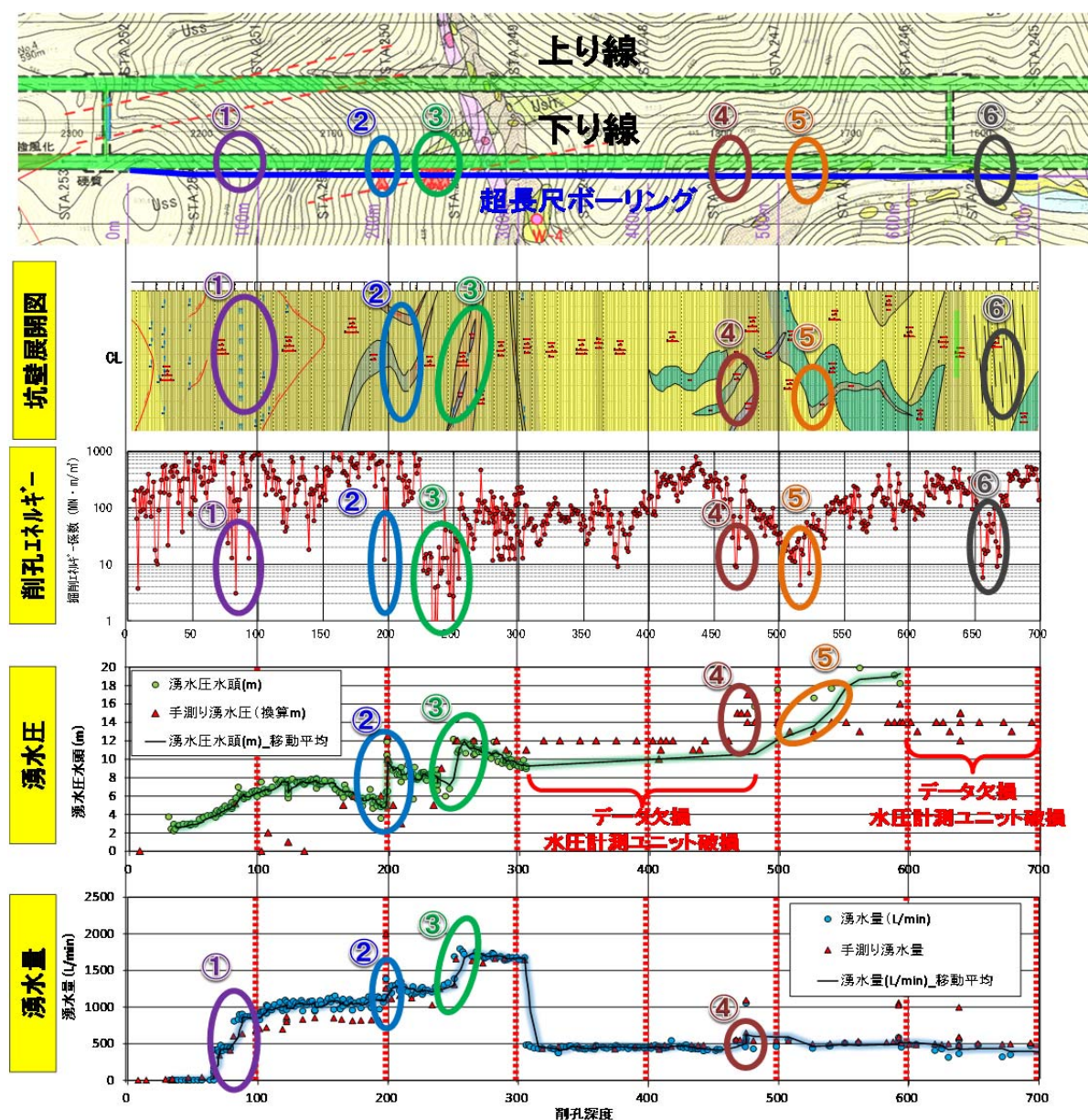


図-10 超長尺ボーリング実施区間の地質・湧水情報のまとめ

図中の①～⑥の区間で低下傾向となっていることが認められており、相対的に地山性状が悪いことが分かる。更にその中の幾つかの区間（例えば①、②および③）は、湧水圧および湧水量も上昇傾向にあるため、地下水を含んだ脆弱な地山であることが想定され、掘削には注意を要する区間であることが分かった。同図に示したトンネルの地質展開図でもわかるように、実際の切羽掘削時に確認された地質は図中の①～⑥のいずれの区間も、割れ目の発達や軟質な岩質で相対的に他区間より脆弱な地山であった。また、①および③の区間では、トンネル掘削時にも切羽から滴水が確認され、実際の地質や水理状況とも合致していることが分かった。

(4) スイリモの改善点

図-10の湧水圧データで示すように一部の区間で水圧計でデータの欠損が生じた。水圧計測ユニットから水圧計を回収したところ、水圧計の受圧面が著しい高圧を受けた痕跡が見られるものがあった（図-11）。この間の送水データを見ると、トリコンビットの目詰まりによる送水不良を、高圧送水による噴射にて解消しており、管内先端ではそれが水撃（ウォーターハンマー）となって、想定以上の高水圧が付加されたものと想定される。そのほか、削孔におよぶ振動も水圧計に大きな影響を与えているものと想定される。現在、このような課題を克服し、安定した計測が行えるよう、水圧計測ユニットの構造や水圧計の変更を検討している。

5. おわりに

トンネル坑内から施工される超長尺ボーリングに対し、削孔しながら湧水量と湧水圧を自動測定する技術「スイリモ」を開発し、箕面トンネル西工事に適用した。その



図-11 超破損した水圧計の受圧面

結果、従来の手作業による断続的な湧水データに比べ、計測に関する作業性が著しく向上したうえ、連続的なデータが取得できることが分かった。また、超長尺ボーリングにて得られる地質情報（削孔エネルギー）とスイリモの水理情報を併せて評価することで、切羽前方の地山の想定や湧水対策の要否検討に役立てることができた。

スイリモは、現時点でまだ改善の余地があり、安定した計測が行えるよう今後も改良を進めて行く予定であるが、今後、予定される長大トンネルでは、地表からの観測井が期待できないため、坑内から切羽前方の湧水圧・湧水量のデータの計測技術は、トンネルの安全な施工に大いに寄与するものと思われる。

参考文献

- 1) 二村亨，梅村哲男，萩原博之，生森敏：先進ボーリング技術のブレークスルーを目指して，トンネルと地下，第41巻8号，pp.37-47，2010.
- 2) 山本雄介，二村亨，萩原博之，生森敏：長大山岳トンネル施工を見据えた長尺先進ボーリング技術の開発，地下空間シンポジウム論文・報告集，vol.16，pp201-208，2011.

(2016.8.5 受付)

SELF MONITORING SYSTEM FOR HYDROLOGICAL INFORMATION AHEAD OF TUNNEL FACE

Keita IWANO, Kazuhiko MASUMOTO, Yuko OKADA,
Junich KAWABATA and Yoshinori KITAMURA

A large-scale tunnel tends to have little geological and hydrological information due to the difficulty of vertical boring from the surface. Therefore, investigation with horizontal boring in the tunnel is necessary for it. Hydrological investigation system which is named SWIReMo, System of Wate Inflow Research Monitoring, was newly developed and set it in extra-long horizontal boring. The results clarified that the SWIReMo can automatically monitor the continuous hydrological data that was more detailed than conventional method. Then, comprehensive evaluation with hydrology data by SWIReMo and geological data by extra-long horizontal boring can help the judgement of ground condition ahead of tunnel face.