

軟質地山トンネルにおける 情報化および大型機械化施工

寺西 陽一朗¹・釜谷 薫幸²・豊岡 敏典³・藤内 昭⁴

¹国土交通省 近畿地方整備局 京都国道事務所工務課
(〒600-8234 京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動堂町808)

²三井住友建設(株) 大阪支店 西山トンネル作業所 (〒618-0081 京都府乙訓郡大山崎町)
E-mail:nkamatani@smcon.co.jp

³三井住友建設(株) 四国支店 箸蔵トンネル作業所所長 (〒778-0020 徳島県三好市池田町津藤ノ井)

⁴三井住友建設(株) 大阪支店 西山トンネル作業所所長 (〒618-0081 京都府乙訓郡大山崎町)

軟質地山において、トンネルを安全かつ効率的に掘削するためには、事前に切羽前方地質や湧水の有無を把握し、最適な対策を講じることが重要である。また、内空変位や天端沈下を抑制するためには、トンネル断面の早期閉合が有効であることが知られている。

軟質地山に位置する西山トンネル奥海印寺工区工事では、情報化施工と大型機械化施工により、大きなトラブルを招くことなく、無事掘削を終えることができた。

Key Words : *Soft ground tunnel, immediate ring closure, groundwater ingress, computerized information system, mechanization tunneling*

1. はじめに

京都第二外環状道路は、沓掛IC～久御山ICをつなぐ総延長15.7kmの自動車専用道路であり、平成25年4月21日に沓掛IC～大山崎JCT、IC間（延長9.8km）が開通した。

西山トンネル奥海印寺工区工事は、京都第二外環状道路のうち、長岡京市と京都市境に位置し、延長約2,270mの上下線2本のトンネルの長岡京市側約1,500mを新設する工事である。平成23年2月より掘削を開始し、平成24年8月に上り線、同9月に下り線が貫通した(図-1)。

当該トンネルの坑口から350m区間の地質は、破碎帯の連続するメランジェ（付加体）区間である。事前の水平ボーリングでは最大200L/分の湧水を確認しており、地表には地下水位が高い場所を好む竹が広範囲に分布していることから、トンネル掘削時の湧水が多いと想定された。このため、坑口から数100m間のトンネル掘削においては、切羽の不安定化、突発湧水を伴う天端、鏡面の崩落、地山の緩み拡大に伴う大変形の発生等が懸念された。

本稿では、西山トンネル奥海印寺工区工事で採用したトンネル情報化施工システムと大型機械化施工について報告する。

2. 地形、地質

工事位置付近は、北摂山地と京都盆地との境界部にあたり、活断層である西山断層、灰方断層、円明寺断層などによってブロック化されている。このうち西山トンネルは標高200～240mの野山山塊をほぼ南北に貫き、坑口から240m付近には見舞谷の下方を通過する小土被り区間がある。

地質は、丹波帯および岩脈類からなる基盤岩類と、これらを覆う新期の未固結堆積物からなる。基盤の丹波帯は三畳紀～ジュラ紀に形成された付加複合体であり、泥岩、砂岩、チャート等の堆積岩類や緑色岩などから構成される。これらの地質体は形成時とその後幾度も変形を蒙っており、地質体間や地質体内部に多くの破碎帯、剪断面を伴っている。トンネルは、幅数m～10数mの破碎帯を多数有する泥質混在岩を通過する。破碎帯はトンネル軸と同方向の走向であることから、トンネル切羽に長く連続して出現する可能性が高かった(図-1)。

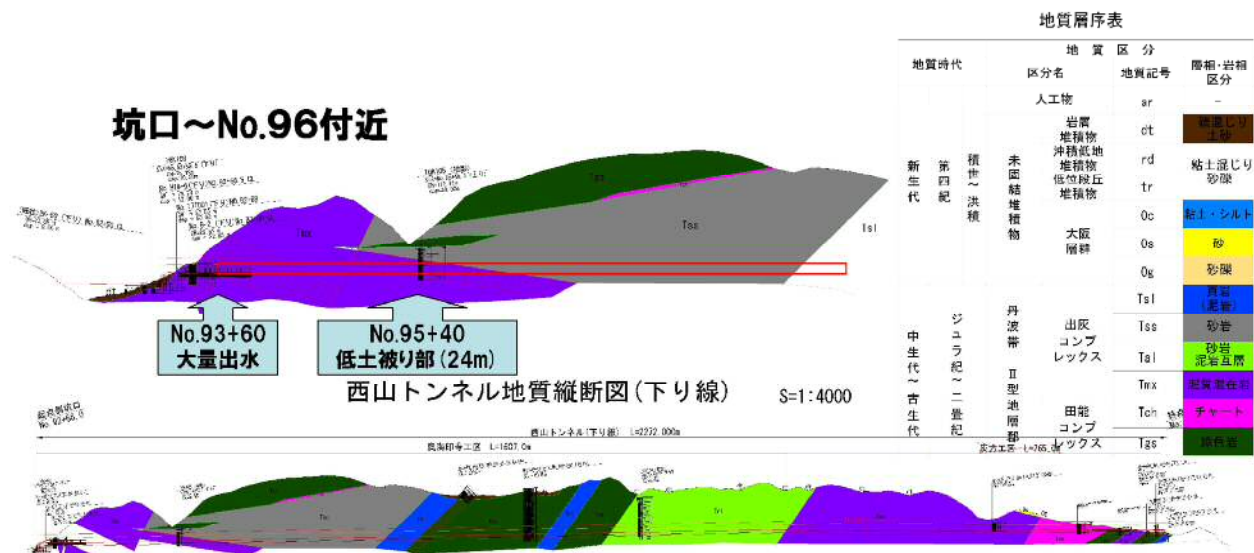


図-1 地質縦断面図

3. トンネル情報化施工システムの概要

(1) 急速コアサンプリング水抜きシステム（ワイヤーライン工法）

ボーリングコアによる切羽前方地質の確認と水抜きを目的として、ボーリングを行った。1回の穿孔深度を80mとし、2週間毎の週末に実施した。先行ボーリングは全油圧式ロータリーパーカッションドリルで行い、コア採取方法はワイヤーライン(PS-WL)工法とした。

本工法では、コアチューブの先端に回転打撃に対応できるコアバーレルを装着し穿孔時にコアを採取する。コアの回収はロッド内にワイヤーで接続した回収器を水圧で送り込み、ロッド内のインナーチューブアセンブリーを回収する。この工法により、礫層や破碎質地山のコアを効率よく短時間で採取できた（写真-1）。



写真-1 急速コアサンプリング水抜きシステム

(2) 切羽前方三次元削孔検層システム

切羽前方三次元削孔検層システムとは、ドリルジャンボ削孔時のトルクや打撃圧などの機械量データから切羽前方の地質構造やトンネル周辺地山の健全度を三次元的に推定する、自社開発のシステムである。通常の探り削孔以外に、長尺先受けやロックボルト孔の削孔データも取り込むことができる。1回の削孔深度を30mとし、トンネル進行に合わせ適時実施した。

得られた機械量データは全自動で取得しパソコンにダウンロードする。処理、解析に要する時間は1時間以内で、岩盤の硬軟を削孔エネルギー（MJ/m³）で表示する。当現場では、強破碎帯を介在する泥質混在岩を粘性土層0～50MJ/m³、軟弱層100～200MJ/m³、硬質層300MJ/m³以上に区分することで切羽前方の地山状況を定量的に可視化することができた（図-2）。

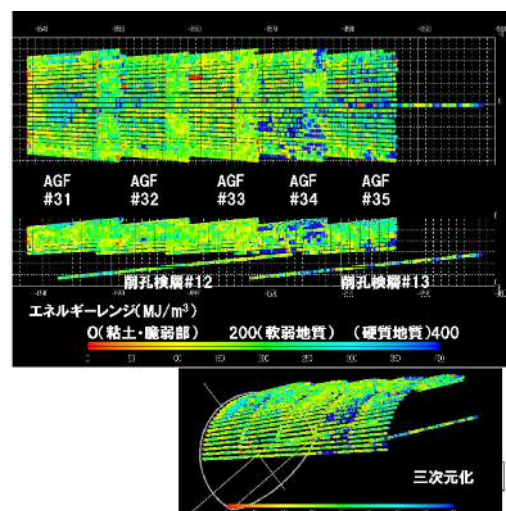


図-2 切羽前方三次元削孔検層システム

(3) 地下水情報化施工システム（SWING法）¹⁾

当工区は、事前地表踏査やボーリングデータにより、地下水位が比較的高いと想定されていた。また、見舞谷の下方を通過する小土被り区間では突発湧水が懸念されていた。トンネル掘削開始後の下り線切羽前方削孔検層において坑口から63m地点で大量湧水に遭遇したため、トンネル掘削を安全で効率的に進める目的でSWING法による湧水予測を導入した。

SWING法 (System on Water Information of Ground) とは、トンネル掘削による湧水量変化や周辺の地下水位低下等を、精度よく簡易的かつ迅速に予測する地下水解析法である。まず、事前準備として設計段階での地質縦断図を基にスライスモデルを作成する。当トンネルのスライス間隔は、水抜きボーリング実績を反映できる5m間隔とした。これに急速コアサンプリング水抜きシステムの実績（削孔長、湧水量）をその都度反映することで、降雨の影響も含めたトンネル前方の水利地質状況（透水係数、帯水層幅、地下水位）を把握できた。また、急速コアサンプリング水抜きシステムの実績から本坑掘削時の湧水予測（切羽集中湧水、湧水量低減特性）や本坑掘削のための水抜きボーリングの過不足評価（水抜き期間、ボーリング延長、必要本数）を実施した（図-3）。

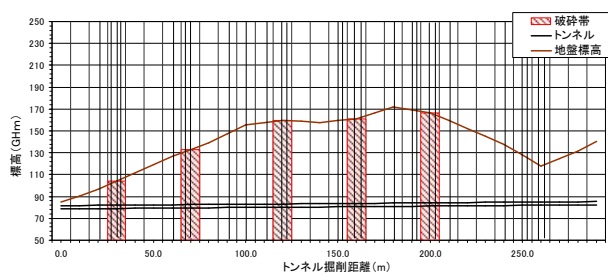


図-3 坑口から300m間でのスライスモデル

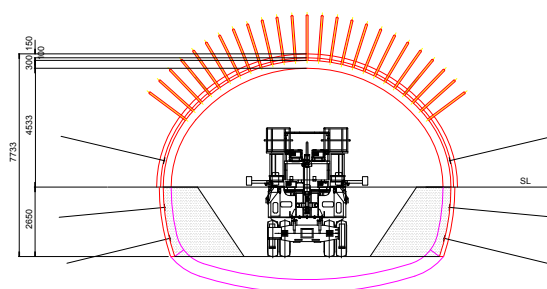


図-4 下半側壁部残し全断面掘削工法



写真-2 曲面切羽の施工

4. トンネル掘削における大型機械化施工

(1) 下半側壁部残し全断面掘削工法の採用

設計のトンネル掘削工法は上半先進ベンチカット工法であった。当現場において切羽付近での作業を効率的に進めるため、大型の3ブームドリルジャンボとエレクター付吹付けロボットを導入した。導入にあたっては、掘削機械がトンネル掘削断面内に入るよう下半側壁部残し全断面掘削工法を採用した（図-4）。

下半側壁部残し全断面掘削工法では、上半切羽の安定性を確保することを目的に、上半鋼製支保工脚部の支持力を確保できる幅を残し大背の掘削を行ない、上半切羽鏡面と下半側壁部掘削面に高強度吹付けコンクリートを施工することとした。

(2) 曲面切羽²⁾の採用

軟質地山におけるトンネル切羽安定対策のひとつに核残しがあるが、切羽断面が大きくなるほど核も大きくなるため、作業空間が狭くなってしまう。掘削直後の切羽応力は切羽前方から鏡面を押し出そうとする力であり、そこにはアーチアクションが生じている。その形状は切羽面に対して凹面である（写真-2）。

また、トンネル天端安定対策として長尺鋼管先受け工を施工することで、掘削直後のオーバーハング状態となった切羽天端からの崩壊を未然に防止した状態での高強

度鏡吹付けコンクリートの施工が出来る。これにより、切羽形状が凹面の自立性の高い曲面切羽が形成された。

切羽作業での安全性確保のため、オーバーハング状態の切羽作業をなくすための大型機械化施工を導入し、作業員が切羽に入ることなく当取りの確認、一次吹付け、鏡吹付けコンクリート、鋼製支保工建込みの一連作業を行えるようにした（写真-3）。



写真-3 大型機械による切羽作業

(3) エレクター付吹付けロボット

エレクター付吹付けロボットの機能は、トンネル作業内容を一連で行えるように改良されており、通常の一体型吹付機の機能に加え、エレクターとマンゲージを2基ずつ搭載している（図-5）。

一連の作業の流れは以下の通りである。

- ① エレクター付吹付けロボットの設置
- ↓
- ② 一次吹付け、鏡吹付け
- ↓
- ③ 鋼製支保工建込み
- ↓
- ④ タイロット取付け作業
- ↓
- ⑤ 二次吹付け

ベースマシンはホイール式ドリルジャンボを使用しているため、鋼製支保工を建て込む際にも機体は安定している。ホイール式により、履帯式に比べ機械の入替え時間を短縮できる。エレクターは、1250kgまで保持できる能力を有し、操作は前側中央部の高い所で視認性を確保しながら作業できる（写真-4）。タイロット取付作業に用いるマンゲージまでは、ブーム上の専用のアクセスルートを通っていくことで、切羽に近づく事なく安全に乗り降り可能になっている。

(4) リサイクルコンテナシステムの採用

注入式鋼管先受け工法は注入材がシリカレジンで、通常200 缶入りで、薬液容器（400 ）にA、B液をそれぞれ必要量移替える作業が発生する。1回の注入でA、Bそれぞれ80缶程度の開封と移替えという肉体労働が発生する。さらに空缶は混合廃棄物で処分されるため、処分コストは高くなる。また、空缶による材料検収を実施するが、粘性体のため缶内部に少量残るものはロスになり、



写真-4 鋼製支保工をセットした状態での鏡吹付け状況

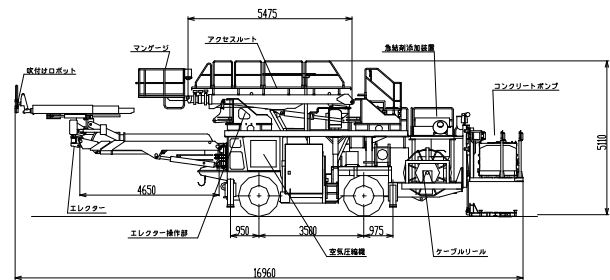


図-5 エレクター付き吹付けロボット詳細図

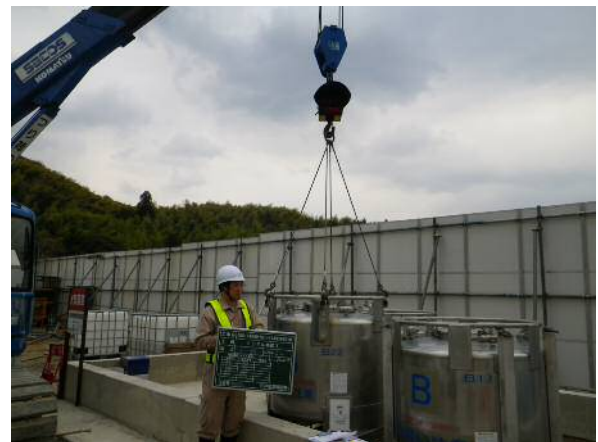


写真-5 リサイクルコンテナシステム

遺失利益は無視できない数量となる。

当作業所では、これらの問題を全て解決できる、リサイクルコンテナシステムを採用した。これはA、B液を「リサイクルコンテナ」（写真-5）と呼ばれる1000L容器で納入し、注入台車にあらかじめ備え付けた専用レーバタンクに移し替えることで、薬液の補充管理をするものである。

これによって、注入ごとの缶の開封作業が不要となり空き缶処分による産廃の発生を抑制し、缶内部に少量る薬液のロスもゼロになる。缶の製造、ロスする薬液、缶の移替え作業などで発生するCO2を抑制することで、環境負荷低減に大きく寄与するものである。

5. 下り線 No.93+60 付近の大量湧水

(1) 大量湧水の発生経過

下り線坑口より63mのNo.93+40上半断面より3回目切羽前方三次元削孔検層を実施した。削孔深度 $L=21\text{m}$ の位置で毎分1000L/minの大量湧水に遭遇した(写真-6)。その後、下半断面より水抜き削孔を行った結果、切羽からの総湧水量は2300L/minまで増加した。大量湧水は6時間継続したのち、24時間で130L/minまで減少した(図-6)。

(2) 大量湧水区間の地質性状

当検層区間は強破碎帯を介する泥質混在岩中に位置し、No.93+40～No.93+50：硬質層（ $\geq 300\text{MJ/m}^3$ ），No.93+50～No.93+60：軟弱層（ $100\sim 200\text{MJ/m}^3$ ），No.93+60～



写真-6 削孔検層孔からの湧水1000L/min

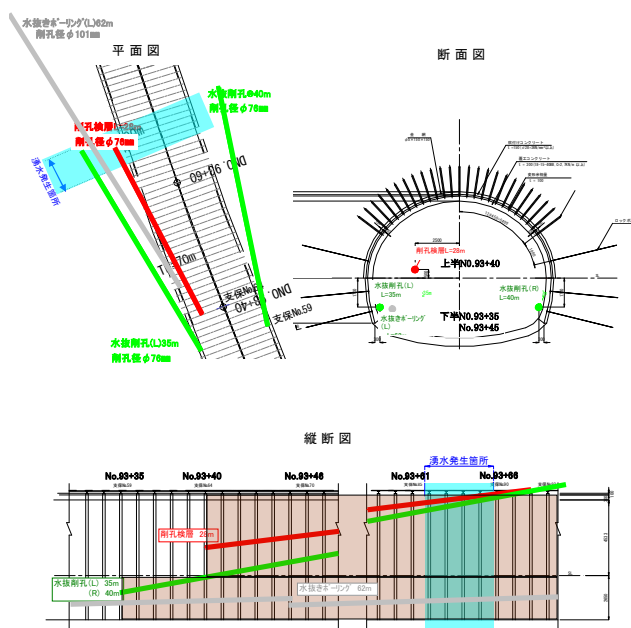


図-6 削孔検層、水抜きボーリング施工位置

No.93+70：硬質層（ $\geq 300\text{MJ/m}^3$ ）と大別され、 100MJ/m^3 以下の脆弱部が不規則に分布している状態である。深度21m（No.93+62）付近より大量湧水を捉えており、削孔完了時の湧水量は1000L/minであった。直前の検層結果では $0\sim 50\text{MJ/m}^3$ の値を示していることから当該地質は粘性土と推定され、粘性土に奥に帯水層があるものと考えられた。また、その後のコアボーリング試料からも粘性土とそれ以深の硬質層が確認された(図-7, 8)。

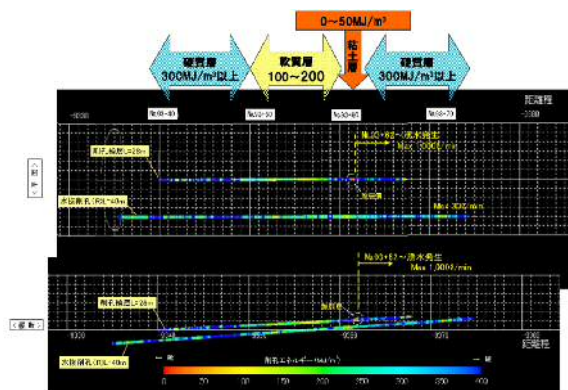


図-7 切羽前方削孔検層データ

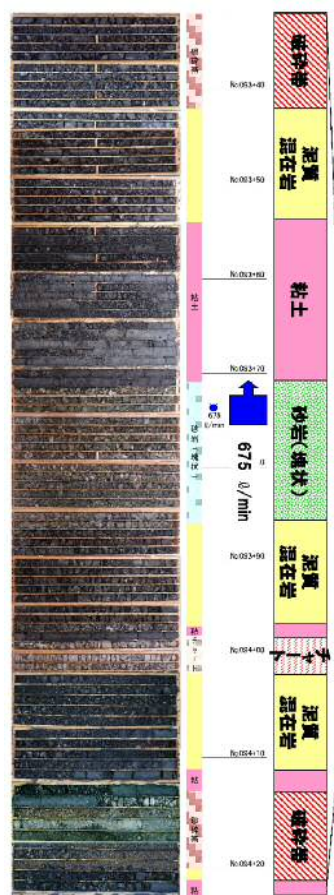


図-8 ボーリングコア

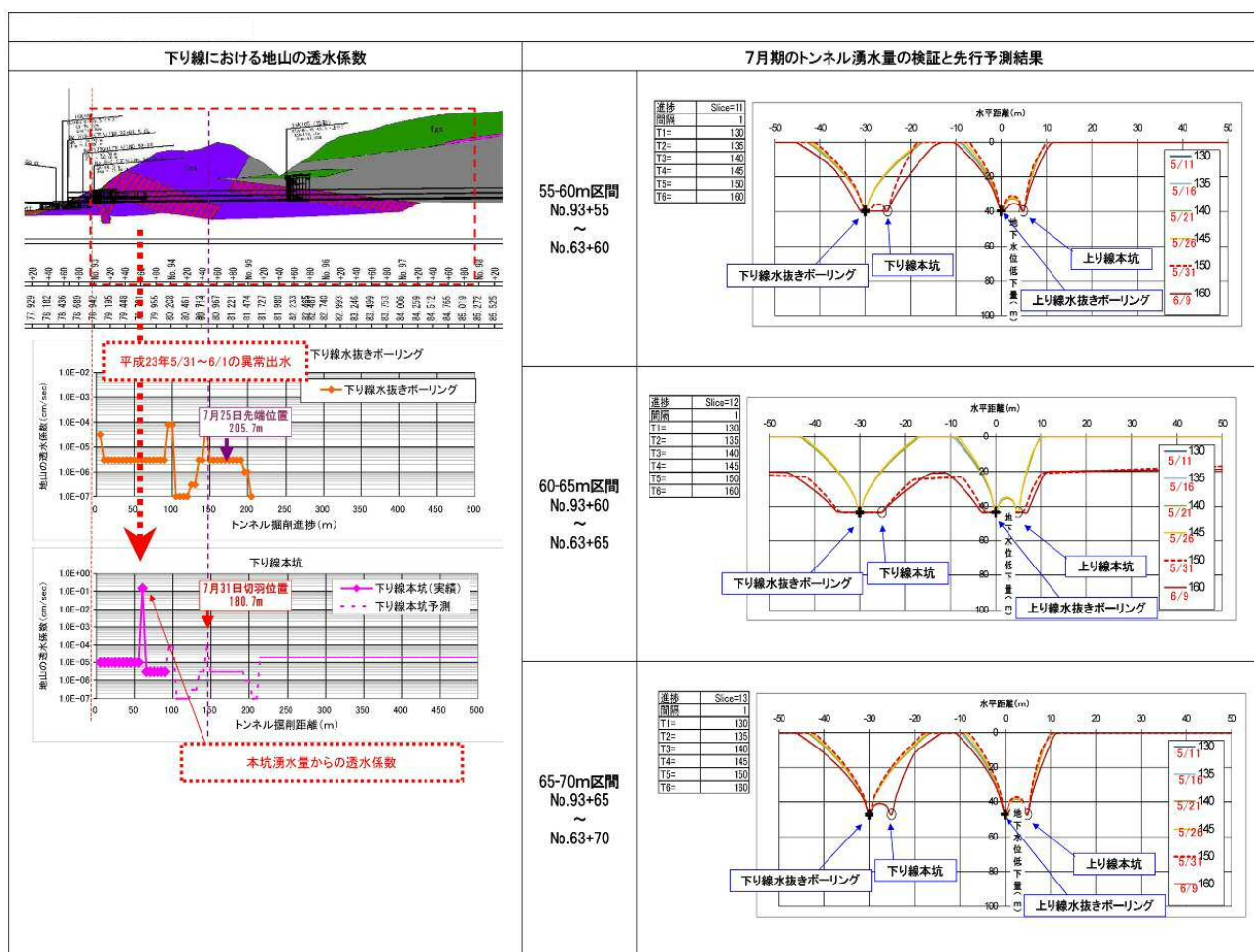


図-9 大量湧水の発生した区間の透水係数と地下水低下量の予測

6. SWING法の適用

(1) 下り線 No.93+60 付近の透水係数と地下水位低下

既施工区間の先進水抜きボーリング情報と坑口湧水量、削孔検層データ、切羽観察を入力データとしてSWING法により透水係数と地下水位低下量を予測すると、大量湧水の発生した5m区間は $1.8 \times 10^4 \text{ cm/sec}$ に相当し、きわめて高透水性区間であると推察された。また、この区間では本坑両側から上り線までの広範囲に15~20m程度の地下水位低下量が予測された。しかし、前後の断面位置では地山の透水係数も $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 程度のため、先進水抜きボーリングの水抜き効果は比較的狭い範囲であると想定される（図-9）。

(2) 小土被り区間（見舞谷直下）の先行予測と結果

先行水抜きボーリングデータより、同区間の地山の透水係数は $3 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ であり、地下水位低下量はきわめて狭い範囲に限定されると予測された。それにより、本坑掘削前の水抜きボーリングの追加は必要ないものと判断できた。また、見舞谷直下の通過に際して表流水への影

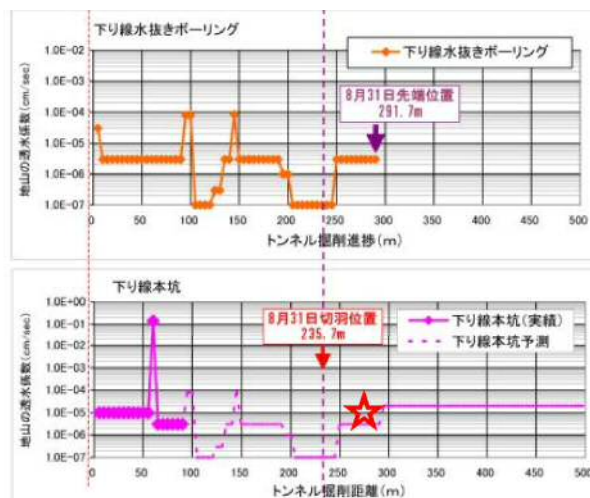


図-10 見舞谷直下の透水係数予測

響は顕著に現れないものと予測された（図-10、11）。

先行水抜きボーリングの実績を基にSWING法による地山の透水係数を推定し、本坑掘削時の切羽湧水量の先行予測の結果、追加対策の必要性はないと判断した。実施工でもこの区間の切羽湧水はわずかで、安全かつ効率的にトンネル掘削を進めることができた。

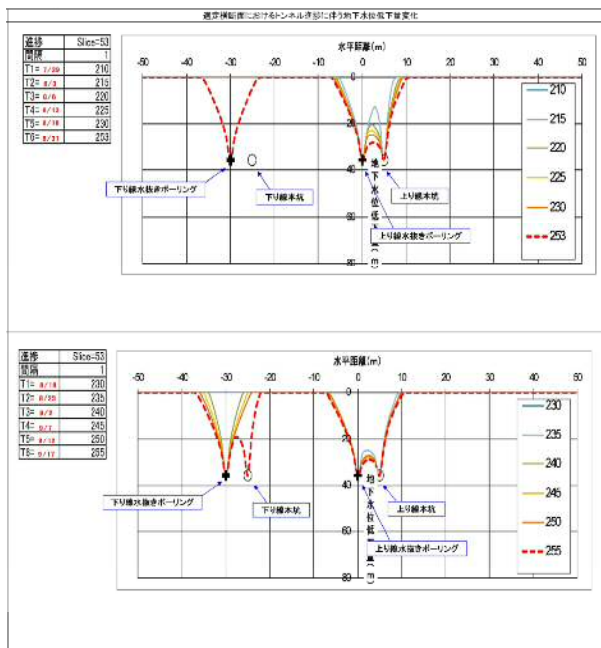


図-11 見舞谷直下の地下水低下量変化予測

(3) 周辺水環境への影響評価

トンネル施工実績を基に既施工区間の地山透水係数を推定し、これに未施工区間の通常岩盤と破碎帯の透水係数を設定して本坑掘削時のトンネル坑口湧水量の先行予測を行った。その結果、500m 掘削時点での湧水量は上り線600L/min程度、下り線500L/min程度が予測された。結果は上り線750L/min程度、下り線470L/min程度と上り線のほうが若干多い結果であったが概ね予測値どおりであった。

また、トンネル周辺の水文調査結果とSWING法を統合することでトンネル施工に伴う地下水位低下範囲の推移や水位低下量を予測することができる。これによりトンネルルート上の沢水、井戸およびため池等の水環境に対する将来的な渇水影響の動向を将来予測し、地表モニタリング地点の縮減や湧水量管理に対する検討資料に活用していく計画である。

7. 掘削補助工法の検討

(1) 当初設計の補助工法

当初設計では、切羽安定対策として、長尺鏡ボルト(FIT工法、シリカレジンを注入)が計画されていた。

(2) 打設管の変更

FIT工法で使用する打設管はGFRP管(ガラスファイバー製)である。トンネル掘削時に断面内の障害となるGFRP管を容易に撤去できるようにしているが、端末管撤去時にGFRP管が割裂し、飛散する。また、掘削ずり

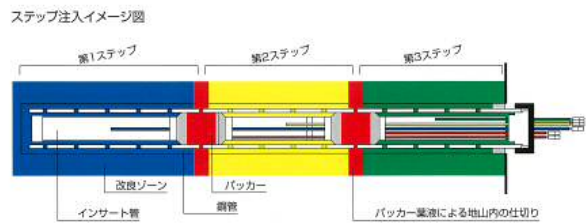


図-12 ステップ注入イメージ図



写真-7 3連ポンプ台車

とGFRP管の分別回収が困難である。

GFRP管に変えて管部材の各物性において同等以上の鋼管を使用することとした。

- ①弾性係数×断面積 (GFRP管の約6.8倍)
- ②引張強度 (GFRP管とほぼ同等)
- ③せん断強度 (GFRP管の約1.6倍)
- ④施工性向上 (端末スリット管使用) 撤去時の分別
- ⑤鏡ボルトにも即適用可能

(3) 注入方法の変更

ウレタン系注入材の注入方式は、通常ステップ注入方式と呼ばれる方式で行われる。これは、鋼管内を3つの仕切り(ステップ)に分け、それぞれのステップごとに注入し改良体を形成する方法である。通常は施工性を考慮し、2台の注入ポンプで左右に分かれて注入作業を行う(図-12)。

これに対して、当作業所では3台の注入ポンプを連動するように改良し、1本の注入を3台のポンプで同時に行う3連ポンプ方式を採用した。これによって、注入時間は標準方式に比べ1/3になった。また、流量、流速、圧力センサーが3台連動することで1台のポンプが圧力上昇を起し停止した場合、他のポンプへ自動的に注入残量が振り分けられて自動的に注入が行われるので地山への注入率が向上し、地山改良効果の向上が見込まれる。また、停止や再起動が自動で行われるので、通常左右に各1名のポンプ操作者が必要であるが、1名で左右合計6台のポンプを操作することが可能で省力化にもなる(写真-7)。

8. 施工結果

急速コアサンプリング水抜きシステムで切羽前方の地質をボーリングで直接確認しながらトンネル掘削を進めた結果、断層破碎帯は当初想定した350m 区間より広範囲に多数分布していることを掘削前に把握することができた。上り線のボーリング総延長は720m まで達したが、通常のトンネル掘削を休止することなく、9回に分けて休日を利用してのボーリング作業を行った。

先行水抜きボーリング穿孔中の湧水量は1 000L/min に達する時もあった。ボーリングからの湧水量が多い所では、トンネル掘削に先立って切羽前面の3個所に切羽前方三次元削孔検層システムによる長孔削孔を実施し、粘性土層の位置と走向傾斜、以奥の帯水層厚を確認した。これにより、トンネル切羽が粘性土層に到達する前に地下水位を低下させ、切羽からの突発湧水もなく安全にトンネル掘削ができた。

当初想定では350mであったAGF施工区間（泥質混在岩地層）は想定をはるかに超える750m 続き、全体の50%占め工期の遅延が懸念されたが、大型機械化施工と補助工法の改良と情報化施工システムの採用で、上り線は18ヶ月（1 470m）、下り線も17ヶ月（1 507m）で掘削を終えることができた。

9. おわりに

地質が軟質で破碎された地山で、天端崩落や切羽崩壊の危険性を排除してトンネル掘削を行うためには、切羽

前方地山の地質情報を早期に収集して現場施工にフィードバックすることが大切である。それぞれのシステム情報をネットワーク化することでより精度の高い情報として利用できると考える。トンネルの前方の地山を掘る前に直接見ることができるということは、想定内でトンネル掘削ができるということである。

また、このような軟質地山において安定した掘削を可能としたのは、大型機械が導入可能な掘削形状と曲面切羽の採用、早期に鏡の安定から一次支保状態の構築が可能な吹付け機の導入、天端安定補助工法の施工サイクル短縮といった要素を融合させたことによるものと考えている。これらはすべてトンネルの早期閉合を主目的とした一連の方法であるといえる。

今回の施工により、今後のトンネル施工方法の選択に新たな可能性を見出すことができた。本報告が同様の施工の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 安田：山岳トンネルの地下水情報化施工，トンネルと地下，pp.49-58，2009.8
- 2) 今田徹，山崎良一：曲面切羽に関する研究，土木学会第51回年次学術講演開会論文Ⅲ-B55，1996. 9
(2013. 9. 2受付)

THE COMPUTERIZATION AND MECHANIZATION OF SOFT GROUND TUNNELING

Youichirou TERANISI, Nobuyuki KAMATANI, Tosinori TOYOOKA and Akira FUJIUCHI

An early investigation of the ground conditions and the presence of groundwater ingress ahead of a tunnel face can ensure appropriate implementation of countermeasures, which is of utmost importance for a safe and effective soft ground tunneling. Furthermore, it is known that to prevent surface settlements and the collapse of top heading, immediate ring closure is most effective.

This paper discusses the combination of various computerized information system and early utilization of heavy machineries in the Nishiyama Okukaiinji Area soft ground tunneling project. The results show promising use in tunnel construction due to the smooth tunneling process.