

情報化施工システムを導入した トンネル掘削について

藤内 昭¹・佐治 嘉朗²

¹三井住友建設(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)

²近畿地方整備局 道路部道路計画第二課 (〒540-8586 大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)。

地質が軟質で破碎された地山でのトンネル工事は、事前に切羽前方の地質を把握し最適な対策を実施しながらトンネル掘削を行うことが、安全でかつ効率的な施工方法である。また、トンネル湧水の先行予測は、突発湧水による切羽崩壊を未然に防ぐことが可能となる。しかし、現状は地表面からの弾性波速度値や局所的なボーリングコアの状態、地表踏査などの事前調査のみの資料でトンネル掘削を開始し、掘削中の断層破碎帯に遭遇してから対策工を検討する。西山トンネル奥海印寺工区工事では、破碎帯の連続するメランジェ（付加体）区間をトンネル情報化施工システムを導入してトンネル掘削を行っている。

キーワード 断層破碎帯、突発湧水、切羽前方、トンネル情報化施工システム

1. はじめに

京都第二外環状道路は、大枝IC～久御山ICをつなぐ自動車専用道路である。西山トンネル奥海印寺工区工事は長岡京市と京都市境を貫く延長約2,270mの2車線、上り下り2本のトンネルの内、長岡京市側約1,500mのトンネル掘削を平成23年2月より開始している。

トンネル坑口～No.96付近までの約350m区間のトンネル掘削は、天端や切羽の崩落等が懸念されたため補助工法として注入式長尺先受工法（φ76mm L=12.5m@450）が計画されている。

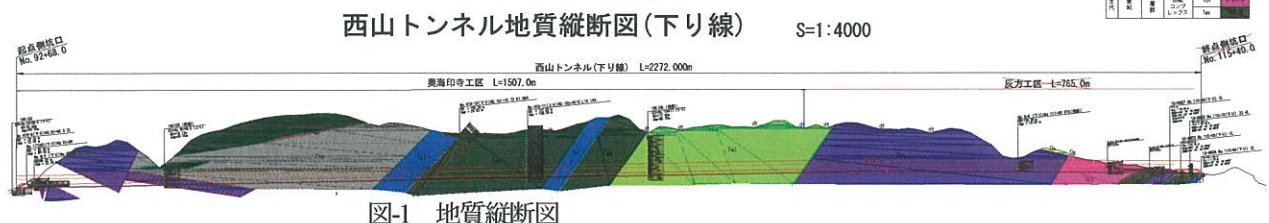
本稿では、軟質で破碎された地山でのトンネル情報化施工システムとして、急速コアサンプリング水抜きシステム（ワイヤーライン工法）による切羽前方水抜き対策とコアによる地質確認、切羽前方三次元削孔検層システムによる切羽前方地山の地質性状把握、地下水情報化システム（SWING法）によるトンネル掘削時の湧水の先行予測を実施したのでここに報告するものである。

2. 地形・地質

工事位置付近は、西側の北摂山地と東側の京都盆地との境界部にあたり、北北西・南南東方向と北北東・南南西方向の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く。坑口より240m付近には見舞谷の下方を通過する低土被り区間がある。

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。基盤の丹波帯は三疊紀～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に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。破碎帯はトンネル方向の走向を有しており、長い区間連続する可能性が高かった（図-1）。

地質図例			
地質時代	地質体	地質体番号	地質体説明
新期	未固結堆積物	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層
	沖積層	Q	沖積層



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）

トンネル掘削は昼夜2方施工を標準として施工するため、掘削休止中の土、日曜日に専用機械を使っ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。

コアチューブの先端に回転打撃に対応できるコアバ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（オーバーショット）を水圧で送り込み、ロッド内のインナーチューブアッセンブリを回収する。この工法により、礫層や破砕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

トンネル掘削に使用するドリルジャンボによる削孔時のトルクや打撃圧などの機械量データからトンネル切羽前方の地質構造やトンネル周辺地山の健全度を推定する

写真-1 急速コアサンプリング水抜きシステム

写真-2 切羽前方三次元削孔検層システムシステムである。1回の削孔深度を30mとし、トンネル掘削進行に合わせ適時実施した。削孔は4mロッドを継ぎ足しながら所定の深度まで連続して長孔削孔を行う。

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。当現場における地質では、強破砕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（写真-2）。

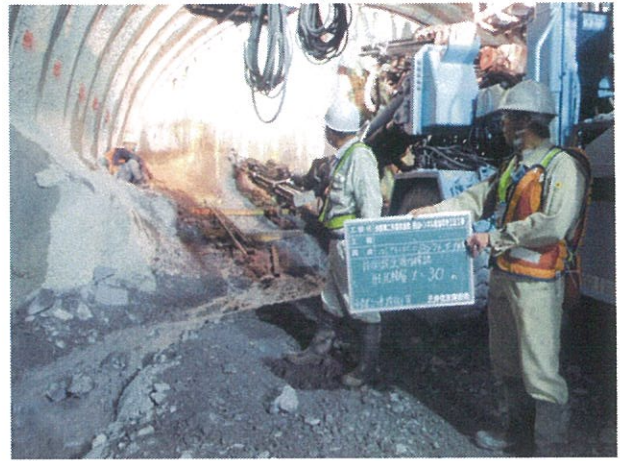


写真-2 切羽前方三次元削孔検層システム

(3) 地下水情報化施工システム（SWING法）

西山トンネル奥海印寺工区は、事前地表踏査やボーリングデータ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低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。

事前準備として設計段階での地質縦断面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間隔を採用した。これに先行水抜きボーリングの実績（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理地質状況（透水係数、帯水層幅、地下水位）を把握できる。また、先行水抜きボーリング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-2）。

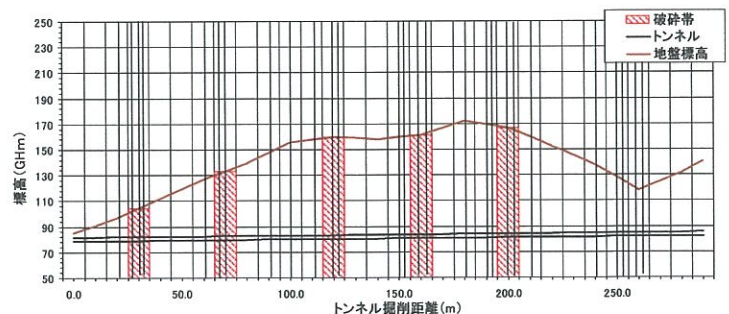


図-2 坑口から300m間でのスライスモデル

4. 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 $1,000\text{ l/min}$ の大量湧水に遭遇した。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 $2,300\text{ l/min}$ まで増加した。大量湧水は6時間継続した後、24時間で 130 l/min まで減少した(図-3、写真-3)。

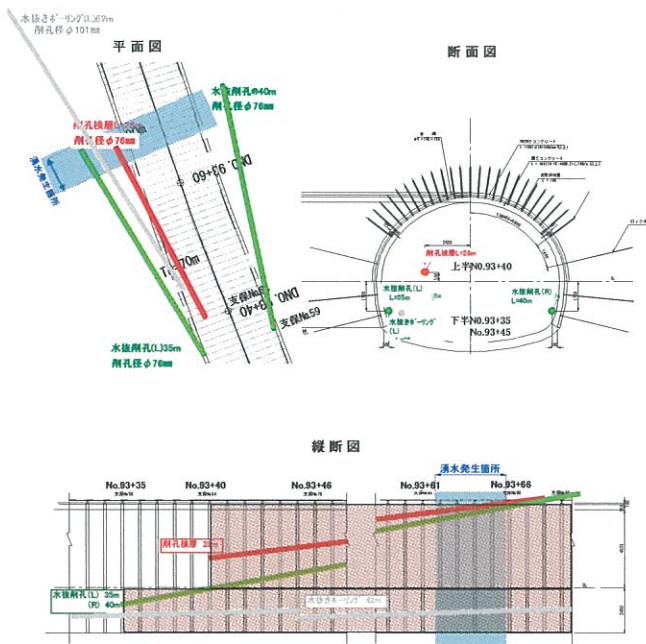


図-3 削孔検層、水抜きボーリング施工位置



写真-3 大量湧水状況

(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～No. 93+70：硬質層 ($\geq 300\text{ MJ/m}^3$)と大別され、 100 MJ/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 21 m (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 $1,000\text{ l/min}$ 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

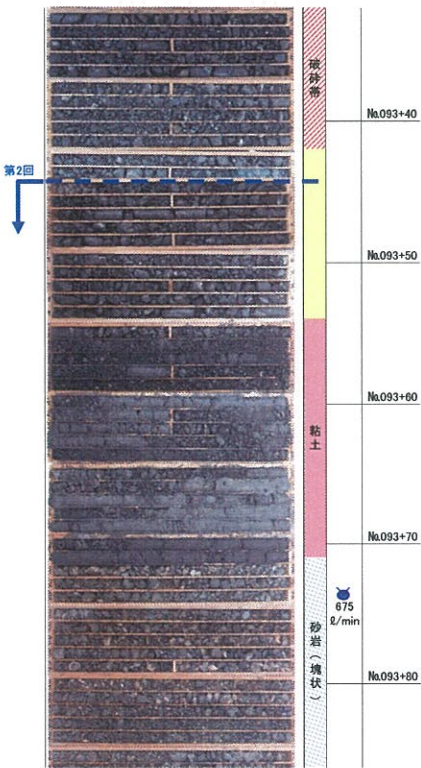
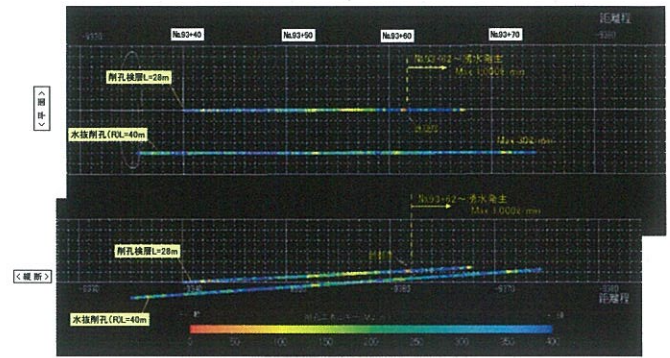


図-4 切羽前方三次元削孔検層とボーリングコア

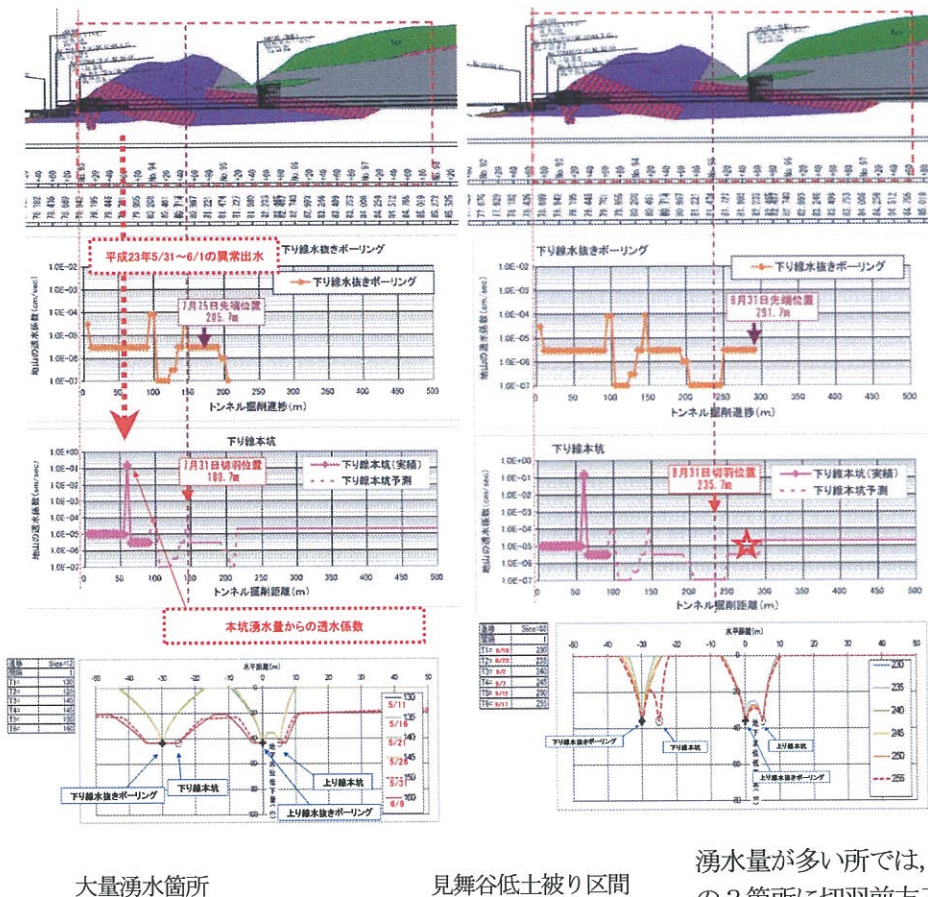
性土と推定され、粘性土以奥に帯水層があるものと考えられた。また、その後のコアボーリング試料からも粘性土とそれ以深の硬質層が確認された(図-4)。

5. 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 5 m 区間は $1.8 \times 10^{-1}\text{ cm/sec}$ に相当し、極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 $15 \sim 20\text{ m}$ 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-5)。



大量湧水箇所

見舞谷低土被り区間

図5 透水係数と地下水位低下量の予測

(2) 低土被り区間（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 3×10^{-6} cm/sec であり、地下水位低下量は極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響は顕著に現れないものと予測された（図-5）。

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。

(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6000 l/min程度、下り線5000 l/min程度が予測された。

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時の掘削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

水環境に対する影響も評価できる。

6. その後の施工状況

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うことができた。

先行水抜きボーリング穿孔中の湧水量は1,000 l/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箇所にて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。

坑口から63mの断層破碎帯で大量湧水を経験し、これから想定される突発湧水を SWING 法で予測し対応した。SWING 法は施工中のトンネル情報を繰り返し入力することでより精度の高い湧水量予測が可能であり、トンネル掘削に迅速にフィードバックできた。また、地山と地下水の量的評価を基にしたトンネル掘削の安全性評価も可能であった。

7. 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す。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。

トンネル情報化システムを使い、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。