

井荻トンネル建設に係わる地下水流動影響解析とその評価

東京都土木技術研究所 正 杉本隆男
パシフィックコンサルタンツ(株) 正 斉藤泰久、 正 楨明
杉山技術士事務所 正 杉山茂

1. はじめに

井荻トンネルは、東京都に広がる武蔵野台地上に建設された南北方向の延長約1.5kmの開削トンネルである。工事着工後、トンネル外周の土留め壁を施工した段階で、台地浅層に分布する不圧帯水層に地下水流動阻害が生じたため、通水管式の地下水流動阻害保全対策を行った。井荻トンネルの流動保全対策では、用地条件から通水管式対策工を採用し、施工時には通水管の通水能力や効果を確認しつつ通水管の改良を進めた。また、対策検討・施工の過程では、詳細な水文地質構造・水理地質特性の調査や多くの地下水位観測結果を基に、準三次元多層地下水浸透流解析を用いて、通水効果の事前予測や通水試験結果をもとにした施工後の効果検証を行った¹⁾。

地下水流動保全対策自体は、地下構造物でせき止められた上流側の地下水を下流側へ通水させるだけなので、原理的にはあまり難しいものではない。しかし、その効果は必ずしも期待どおりになるとは限らず、通水設備の形式によってはほとんど効果が現れない場合もある。この原因の最たるものは通水管の集排水部の目詰まりと考えられている²⁾。

本報告では、流動保全対策の初期に行われた予測解析や通水管の能力評価と通水管の効果を加味した再現解析結果などを示し、通水管対策工の考え方、及び計画・設計時における留意事項について述べる。

2. 井荻トンネルの地下水流動阻害と対策の概要

2-1 地形地質・帯水層の概要

井荻トンネルは、図-1に示すとおり標高45m程度の武蔵野台地上を南北に建設されている。武蔵野台地は、西方の青梅付近を扇とした扇状地性の台地で、井荻トンネルがある標高45~55m付近には台地を刻む河川の谷頭部に、石神井池や善福寺池などの湧水起源の池が分布している。河川沿いは細長い河谷低地となっており、腐植土層を主体とした沖積層が分布している。図-2の地質断面図のとおり、井荻トンネル付近は武蔵野台地の基本的な地質構造を示し、地表から立川・武蔵野ローム層、武蔵野礫層が分布し、河谷低地には沖積層が分布する。そして、これらの下位には武蔵野台地の基盤層である東京層群(東京層、東京礫層など)が分布している。

帯水層は、立川・武蔵野ローム層に宙水が分布し、沖積層の腐植土層と連続した不圧帯水層を形成している。ローム層下部

は凝灰質粘土層となっており難透水層として分布している。この下位には、武蔵野台地の優良な浅層帯水層である武蔵野礫層が不~被圧帯水層として分布している。河谷低地では沖積層と武蔵野礫層が接しており、ここでは地下水の水頭分布は静水圧で連続した状態にある。武蔵野礫層の下位には砂・粘性土・砂礫の互層からなる東京層群が分布するが、井荻トンネル付近では東京礫層に区分される砂礫層が分布する。この砂礫層の水頭も武蔵野礫層から静水圧で連続している。武蔵野礫層と東京礫層は層相の違いはあるものの、地下水は1つの帯水層として分布していると考えられる(以下、井荻トンネル周辺においては武蔵野礫層と東京礫層を合わせて第一帯水層とする)。東京礫層の下位には層厚の変化する固結した粘性土層が分布し、難透水層を形成している。このため、下位に分布する砂を主体とした東京層下部は、第一帯水層よりも数メートル低い被圧水頭を持つ被圧帯水層となっている(以下、第二帯水層とする)。

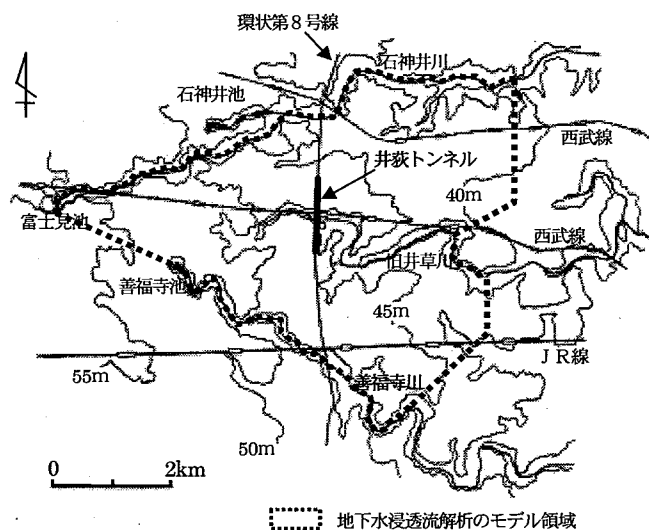
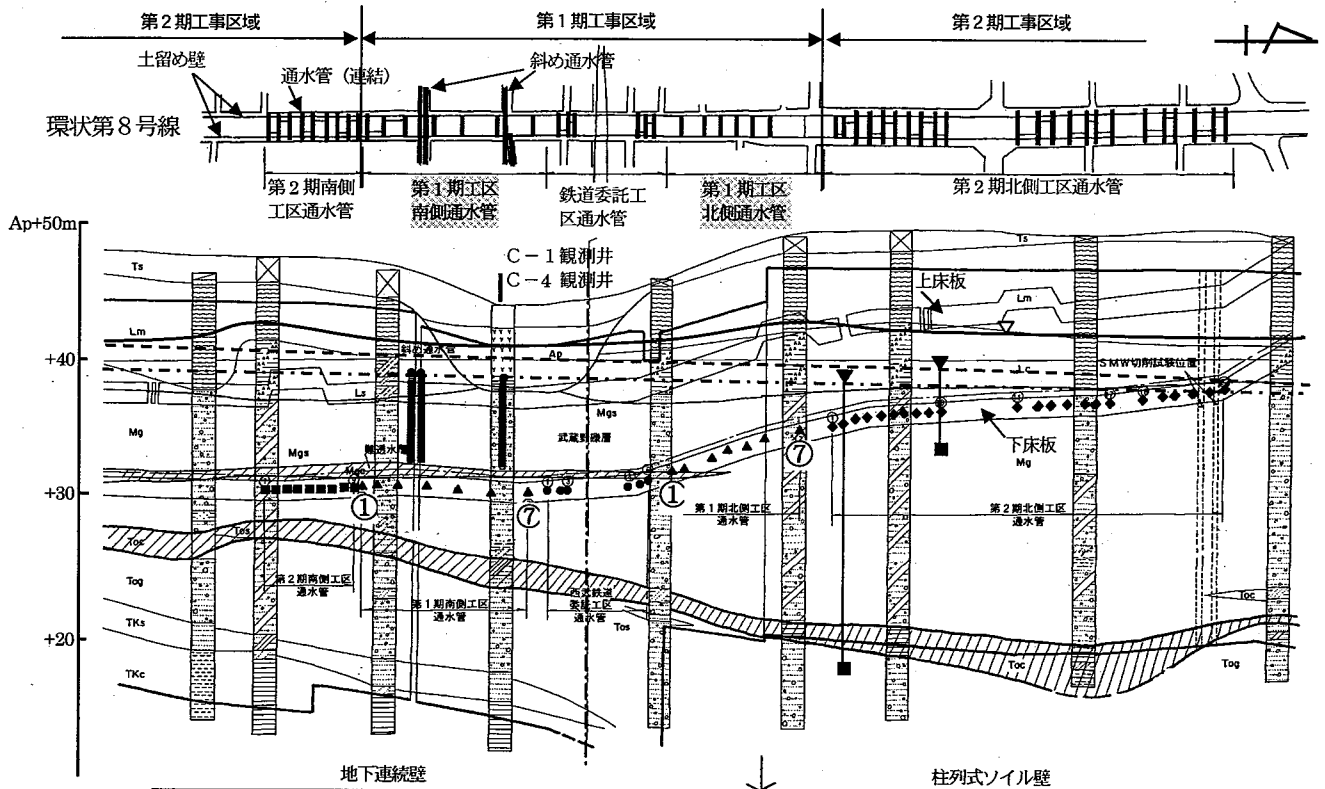


図-1 井荻トンネル周辺の概要と解析領域

2-2 地下水流動阻害の概要

工事は、図-2に示すとおり、トンネル中央区間(454m)の第1期工事(中央の鉄道委託区間83mと北側工区176m、南側工区195mの3工区)と、その両側の第2期工事(北側工区521m、南側工区577mの2工区)に分かれ、全体では5工区で施工した。

第1期工事は平成2年頃から施工が開始され、土留め壁は地下連続壁を採用し、概ね第一帯水層下位の難透水層まで根入れ



- ▽ ローム・沖積層の不圧地下水位
- ▽- 第一帯水層の被圧地下水位
- ▽ 第二帯水層の被圧地下水位

* 地下水位はトンネル工事以前における概況を表す
 * ①~⑦は、第1工区通水管の番号で、表-3に通水試験結果を示す

図-2 地質断面図と通水管の設置状況

された。この土留め壁の施工に従い地下水流動阻害が発生し、図-3のように、トンネルの両側で地下水位の変化が生じ始めた。そして、第2期工事の土留め工事が進むと急激にトンネル両側の水位が変化し、平成5年5月頃の低水位時には約4mの水位差が生じた。

トンネル東側では地下水位低下が生じ井戸枯れや地盤沈下が発生したため地下水流動保全対策を行うこととなった。対策は、施工用地の条件等から、トンネル内から外へ水平ポーリングを行い土留め壁を開口させ、ここに鋼管を接続して上流側の地下水を下流側へ流す通水管を設置することとした。

図-3に示すとおり、通水管は平成5年の夏季に第1期工区で施工され、この効果を検証したあと改良を加えて平成6~7年にかけて第2期工区で施工された。これにより上流側のトンネル西側の地下水位が若干低下し、効果が確認されたが、大きく水位を回復させるにはいたらなかった。そこで、平成8年に斜め通水管が

表-1 通水管の概要

工区	施工年度	本数	管径 (mm)	集排水管長 (m)	設置位置	効果
第2期北側	H6	23	φ200	5.0±	下床板内	認
第1期北側	H5	7	φ300	なし	"	不認
西武鉄道	H6	6	φ200	1.5±	"	不認
第1期南側	H5	7	φ300	なし	"	不認
	H7	2	φ150	24.0 (斜め)	上床板上	認
	H8	1		15°; 実質 17.5 (±)		
第2期南側	H6	9	φ200	1.5	下床板内	不認
合計		55				

注) H6のφ200の通水管は、3~4本を連結。
 H8の斜め通水管は、下流側のみ複管。

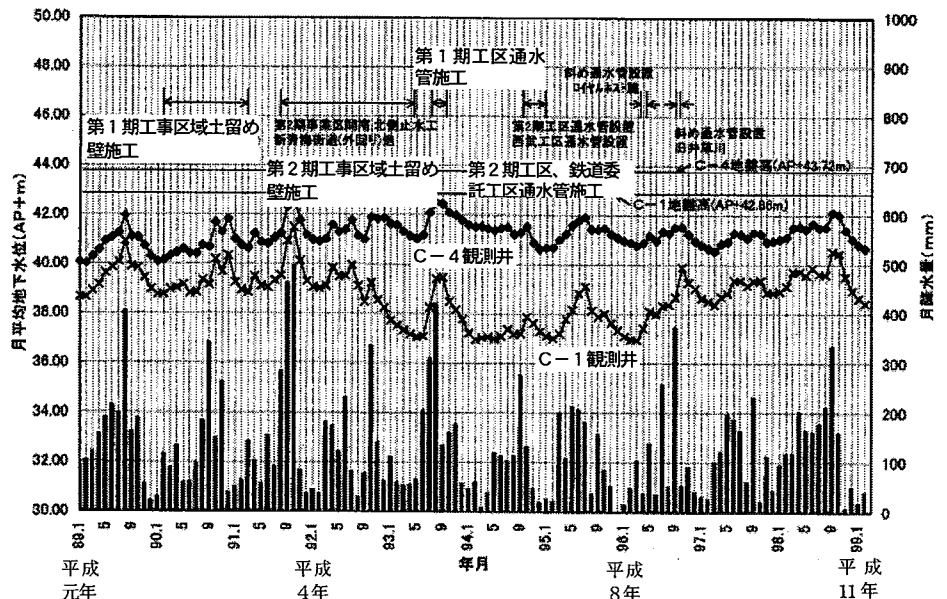


図-3 トンネル工事中の第一帯水層月平均地下水位の変化

施工され、この結果、下流側（トンネル東側）の地下水位が上昇し、地下水位の回復したことが確認された。最終的には、表-1に示す計55本の通水管を設置した。通水管の効果を向上させるため、土留め壁外側への集排水管をできるだけ長くしたり、通水管を連結させて排水効果を高めるなどの工夫を行った。最も効果的であったのは、詳細な水理地質調査から地下水流動量が多いと考えられた地下水面の谷部分（いわゆる水みちに相当すると言える）において、集排水管を長くし集水排水効率を高めた斜め通水管の形式であった¹⁾。

なお、実施した通水管が大きな地下水回復効果をあげられなかった要因についてはすでに別途報告しているが¹⁾、最も大きな要因は、通水管を設置するための削孔作業における目詰まりの発生であると考えられる。

以下、本報告では第1期工区の通水管（鉄道委託区間を除く）を取り上げ、事前効果予測解析と現地通水試験結果を考慮した通水後の再現解析を示し、通水管対策工を実施する場合の予測解析や施工上の配慮事項を示すこととする。

3. 地下水流動影響解析モデルの概要

3-1 水文地質構造のモデル化

1) 解析対象層

武蔵野台地は、表層の関東ローム層以下、砂・砂礫層と粘性土層の互層が厚く堆積し、いくつもの帯水層が互層している。前述したとおり、井荻トンネルではローム層・沖積層からなる不圧帯水層と、武蔵野礫層及び東京層群の東京礫層からなる第一帯水層（被圧）、そして東京層群の東京層下部からなる第二帯水層（被圧）までの3帯水層にトンネル構造物が建設されることから、解析ではこの3層を対象としてモデル化した。

なお、第二帯水層は流動阻害による大きな影響は生じていなかったが、第一帯水層からの漏水をモデル化する目的で解析対象層に含めたものである。

2) 解析領域と境界条件

井荻トンネル周辺を流れる地下水は、帯水層の水文地質構造に規制された地下水涵養・貯留・流動・流出特性を持っている。一般に、この地下水の循環が1つの閉じた系とみなせる領域は地下水域と呼ばれ、この系の中では水収支が成り立っていると考えることができる。地下水流動阻害による影響が生じるのは井荻トンネルの周辺であるが、ある程度広い範囲の地下水流動をモデル化する場合には、地下水域を考慮し自然の地下水循環を再現できるように解析領域を設定することが望ましい。

そこで、図-1、図-4に示したような解析領域を設定した。流動阻害の影響が顕著に表れた第一帯水層を主要な解析対象層と考え、井荻トンネル付近を中心に、南北の境界は台地を刻む河川（北を石神井川、南を善福寺川）を定水頭境界あるいは漏水境界とし、ローム層・沖積層の不圧帯水層と第一帯水層の地下水が河川へ流出するような条件とした。また、東西の境界は井荻トンネルから十分な離隔をとって不透水境界とし、境界条件の影響がトンネル付近の地下水流動に及ばないようにした。この領域設定により、地下水は地表からの降水で涵養され、南北の河川へ流出する地下水循環が表現できることになる。

なお、このような境界条件の設定は、東側の不透水境界の設定など自然状況にそぐわないところもあるが、井荻トンネル周辺の第一帯水層の地下水流動ができるだけ自然な形で再現できるよう、境界条件の不明瞭な設定によって解析結果が影響を受けないように配慮したものである。

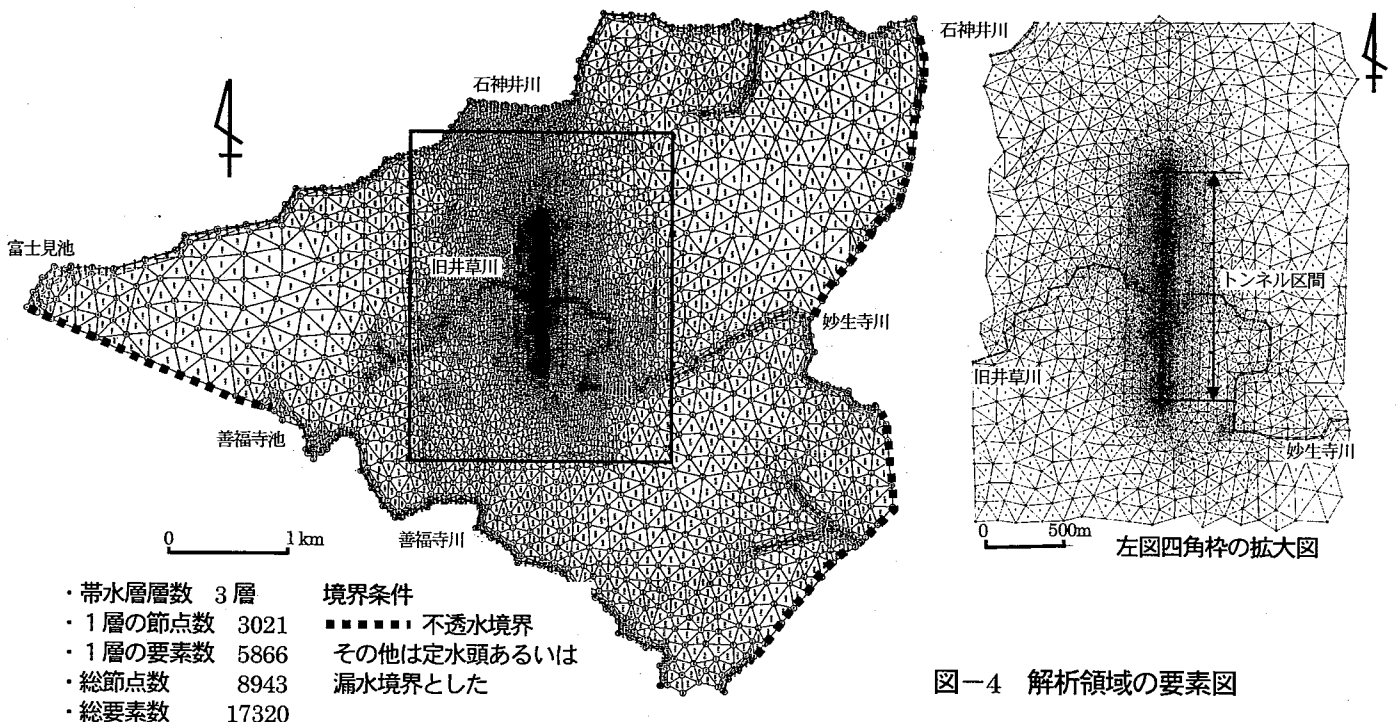


図-4 解析領域の要素図

3) 解析モデルの次元

有限要素法による浸透流解析において、解析モデルは多層準三次元モデルとした。帯水層が広域に広がっており、帯水層の広がりに対して厚さが薄いことから地下水の流れは平面二次元で近似することができる。地下水の流出域やトンネル近傍及び通水管の集排水部では鉛直方向の地下水の流れの割合が多くなっていくことから、このような流況では三次元モデルが望ましい。しかし、本解析では各帯水層の水利特性は当方均質で一様と仮定し、帯水層の空間的な不均質性を考慮しないことから、通水管を後述するようなモデルで表現することで準三次元モデルを用いることとした。

4) 解析領域の離散化

有限要素法では、解析領域を三角形等の要素に分割する。図-4に本解析で作成した要素図を示す。図のように、井荻トンネル周辺は、地下水の流動を滑らかに再現するため、細かく要素分割を行った。土留め壁付近は、通水管をモデル化するため約20m程度の要素幅となっている。

5) 帯水層構造及び水利定数等のモデル化

解析モデルには帯水層構造を入力する。各帯水層の上下面形態（等高線）は既存データや現地調査データから求めた。その一例として、第一帯水層下面形態を図-5に示す。帯水層の上下面の標高から、帯水層や難透水層の層厚が決定される。

本解析では、すでに流動阻害が発生した状況の地下水位分布を用いて解析モデルの同定を行った。水利パラメーターは、モデル同定の結果、最終的に表-2に示す値とし、帯水層には水平方向の透水係数を、難透水層には鉛直方向の透水係数を各要素に設定した¹⁾。

表-2 設定した水利パラメーター¹⁾

帯水層区分	地質	透水係数 (cm/s)	備考
不圧帯水層	ローム層・沖積層	1×10^{-3}	台地
		1×10^{-2}	旧井草川低地
難透水層	ローム層・沖積層下部	4×10^{-7}	
第一帯水層	武蔵野礫層・東京礫層	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^0$	地下水位分布からゾーン区分
難透水層	東京層粘性土	1×10^{-6}	分布域
		1×10^{-5}	欠如域
第二帯水層	東京層下部	5×10^{-3}	
土留め壁	地下連続壁, SMW	1×10^{-6}	幅50cm相当

6) モデルの同定

解析モデルの同定は、第一期、第二期工事区域の土留め壁が設置され、流動阻害対策が実施される前の渇水期（低水位期）の第一帯水層地下水流況を再現することで行った。降雨涵養がほとんどない低水位は帯水層の基底水位であり、この状況では地下水流動や水収支は極めて安定しておりほぼ定常状態にあると考えられる。同定したモデルでは、地下水涵養条件として全要素に一律0.8mm/日の地下水涵養量を与えた。図-6(a), (b)に井荻トンネル付近の解析による再現地下水面と実測地下水面を示す。

AP+38mとAP+41m, AP+42mの等高線を比較すると、完全には一致した状況となっていないものの、概ね、井荻トンネルを挟んだ地下水位の分布勾配とその形態から現況の再現ができたと判断できる。そこで、このモデルから土留め壁を取り除いて、工事前の地下水流況を再現した。これを図-7(a), (b)に示す。

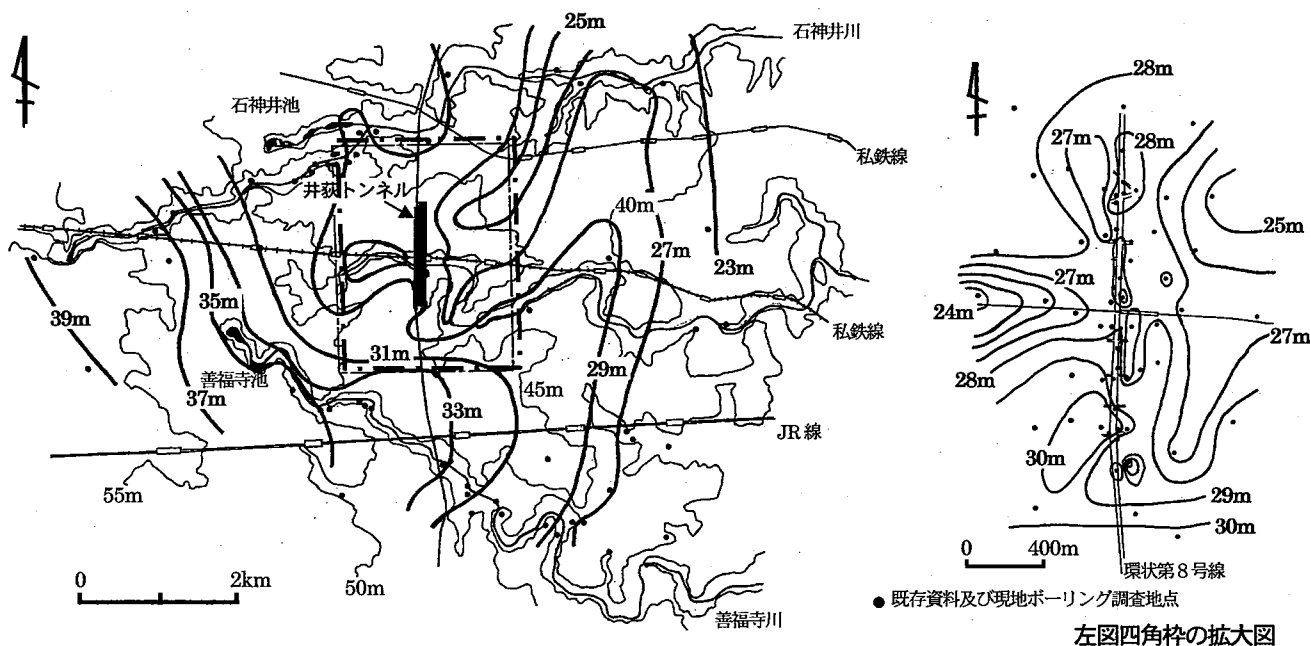


図-5 第一帯水層下面等高線図

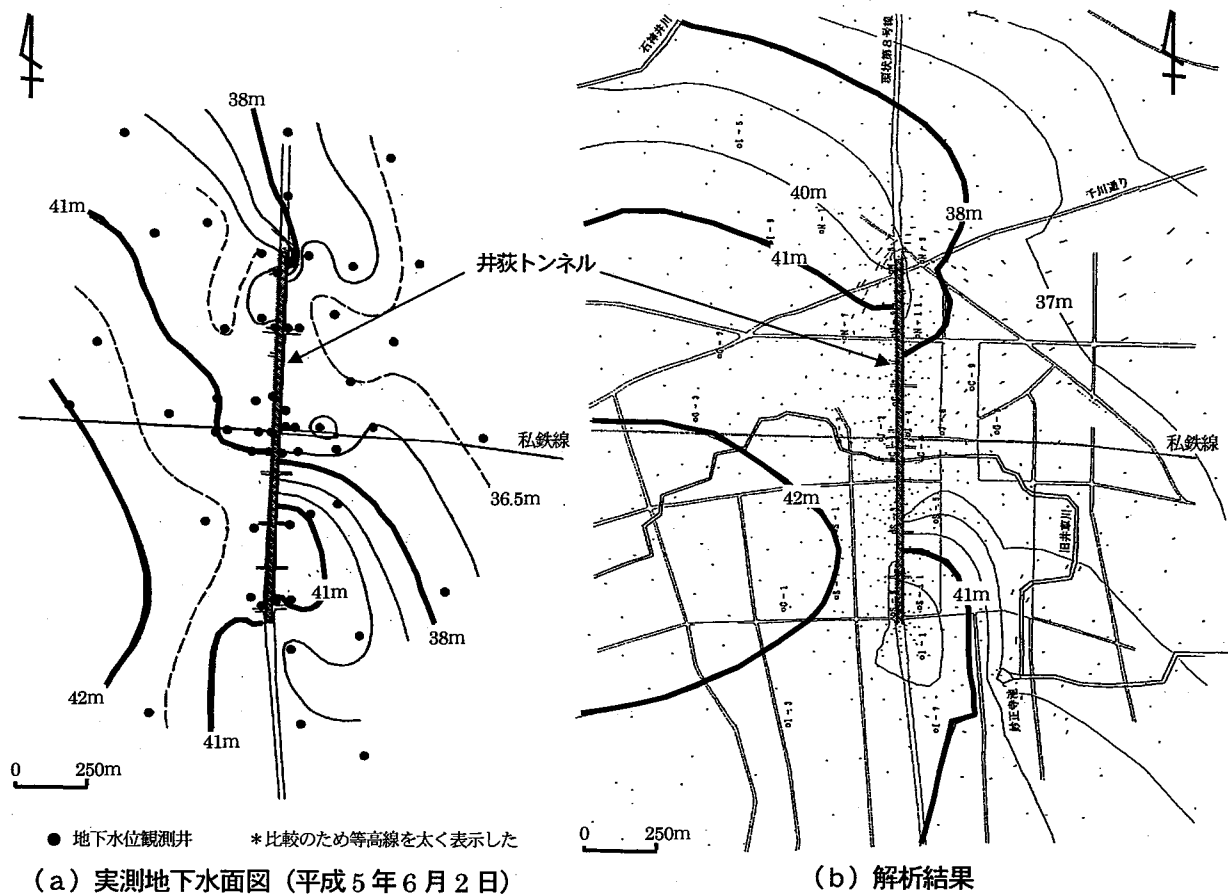


図-6 解析モデルの同定 (第一帯水層、土留め壁設置後)

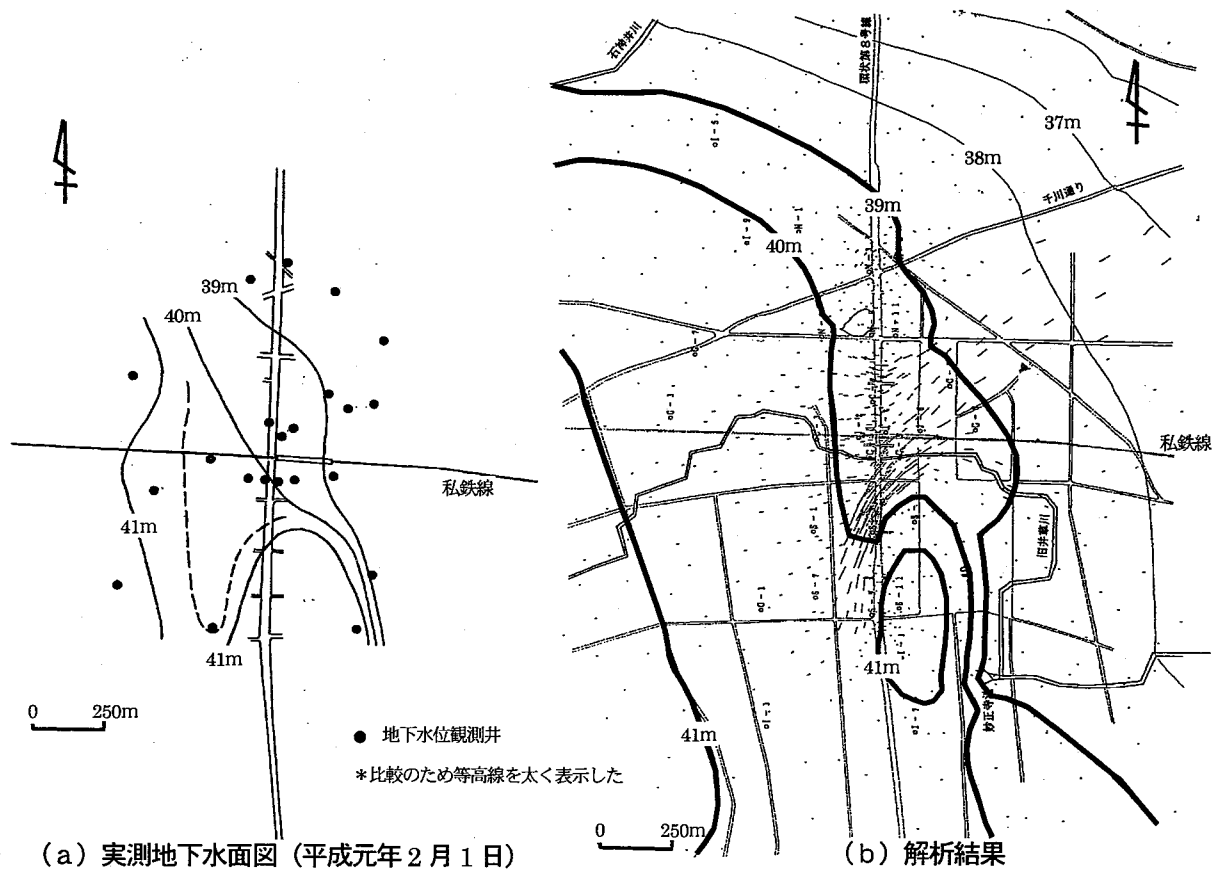


図-7 工事開始前の地下水流況の再現 (第一帯水層、土留め壁設置前)

工事前の第一帯水層の湧水期地下水位分布の解析結果は、細部において実測の水位分布形態を再現できていないものの、トンネル付近の地下水面勾配と流向は概ね再現できていると考えられる。そこで、図-7の地下水位分布を工事開始前の状態とし、図-6の地下水位分布を土留め壁が完成し地下水流動阻害が発生した状態とした。通水対策工の効果予測は、これらの地下水位分布をもとに行った。

4. 第1期工区通水管対策工の効果予測と評価

3-1 通水管のモデル化

1) 通水管の水理式

通水管を土留め壁に設置したときの通水量（集水量または排水量）は次式で表すことができる。

$$Q = C f(r) k \Delta h$$

ここに、

Q : 通水管の通水量 (m³/分)

C : 集排水口付近の特殊な構造や条件、あるいは目詰まりなどによる通水効率で、最大が1.0であり、通水効果が悪くなると $C < 1.0$ となる。

$f(r)$: 管の口径と集排水口の形状により決まる形状係数
例えば、平口形状の場合 $f(r) = 4r$ 、下式参照。

k : 集排水部のある帯水層の透水係数 (m/分)

r : 管の口径の1/2 (m)

Δh : 通水管の両側における水頭差の1/2 (m)

通水管の集排水口の形式により、上記の式は以下と表せる。

- ①口が平らな場合 $Q = C 4 r k \Delta h$
- ②口が半球状の場合 $Q = C 2 \pi r k \Delta h$
- ③短い有孔集水管の場合 $Q = C 2.3 \pi r (l/r)^{1/3} k \Delta h$
- ④十分に長い有孔集水管の場合

$$Q = C 2 \pi l / (\ln(R) - \ln(r)) \cdot k \Delta h$$

ここに、 l : 有孔集水管の長さ (m)

R : 影響圏半径 (m)

2) 通水管試験による通水流量の確認方法

通水管の集排水部付近の透水性が異なるとき、通水管内の水頭は図-8のような状況にあり、例えば、平口形式の集排水部では次式が成り立つ。

$$Q_1 = C_1 4 r k_1 \Delta h_1 \quad Q_2 = C_2 4 r k_2 \Delta h_2$$

$$Q_1 = Q_2 \text{ であるから } C_1 = C_2 \text{ であるとすれば、}$$

$$\Delta h_1 : \Delta h_2 = k_2 : k_1$$

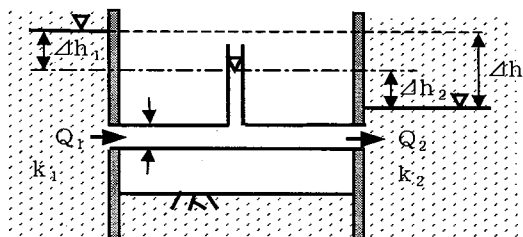


図-8 通水管試験時の水理状況の概念図

となるように落ち着く。したがって、片側の透水係数が不明であっても、通水試験を行っておけばその値を推定することができる。図-8の平衡状態のとき平口形式では次式が成り立つ。

$$Q = C 2 k \Delta h r$$

ここに、 Q : 通水管の通水量 (m³/分)

C : 通水効率

k : 両側地盤の透水係数の調和平均 (m/分)

$$k = 1 / ((1/k_1 + 1/k_2) \times 1/2)$$

Δh : 通水管両側の水頭差 (m)

r : 集水管の口径の1/2 (m)

3) 浸透流解析における通水管のモデル化

本解析では、通水管を図-9及び以下のような考え方でモデルに組み込み通水管の効果を予測した。

- ①まず、土留め壁を設置したとき（流動阻害時の）水位分布を計算する。
- ②通水管の通水量 Q を前述した水理式から求める。
- ③通水管が設置される上流側節点において流量 Q を除き、下流側節点で流量 Q を加える。
- ④この計算を行うと、土留め壁近傍での地下水位が大きく変化してしまうことから、土留め壁両側の水位が安定するまで陽解法によって繰り返し計算を行い地下水位分布を計算する。

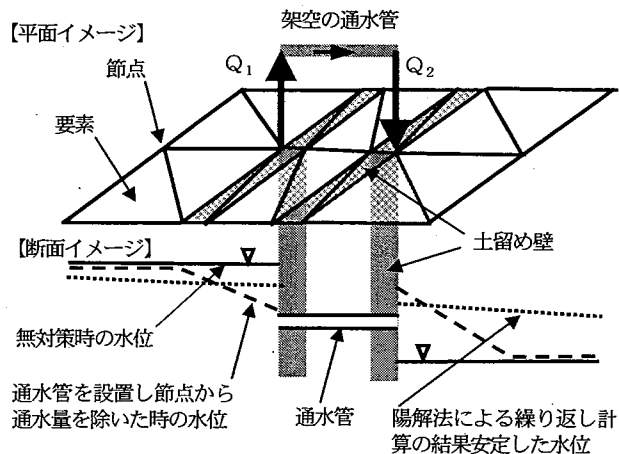


図-9 通水管の浸透流解析への組み込み概念図

3-2 通水管の効果予測結果

1) 通水試験前の予測

井荻トンネルの事例では、第1期工区の通水管検討の過程では通水管の通水効率をどのように見込めばよいかかわからなかった。通水管を施工するにあたって、集排水部付近の透水性や集排水部の構造、あるいは土留め壁構築時に使用された安定液などにより、通水量が左右される可能性があることは容易に推察できた。しかし、施工時に十分通水管の集排水部付近を洗浄すれば、ある程度の通水量は期待できるのではないかと考えた。そこで、まず通水効率が最大 ($C=1.0$) の場合の効果予測を行った。図-10はこの場合の水位回復状況の解析結果である。

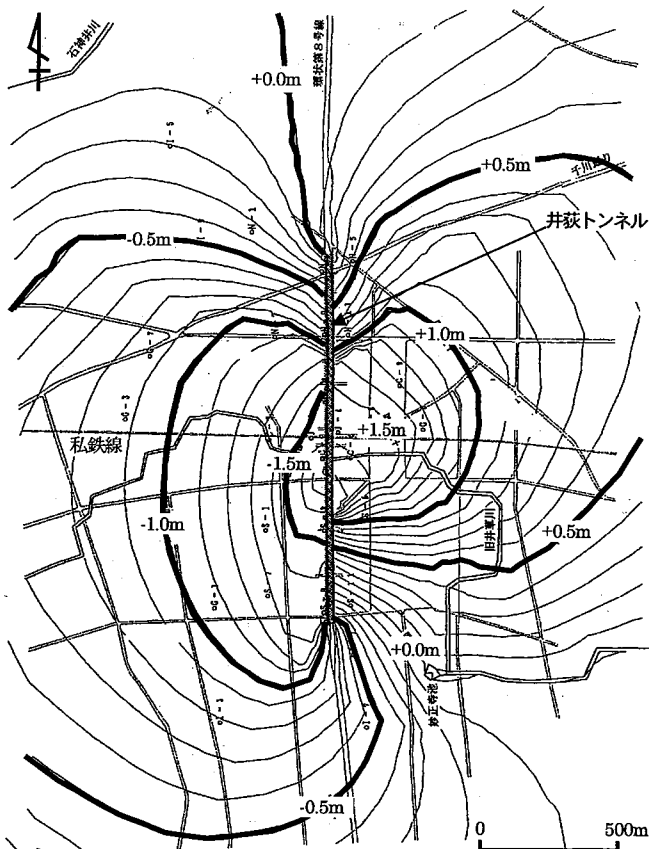


図-10 第1期工区通水管効果の予測結果
(通水効率C=1.0と考えた場合)

このように、通水管の設置によりトンネル近傍で約1.5mの水位低下(西側)、水位上昇(東側)という効果が予想された。

しかしながら、図-3に示した地下水位のとおり、第1期工区の通水管対策ではこのような大きな効果は現れなかった。これは、通水管の集排水能力が予想より小さかったことが原因であり、その要因は、集排水部の長さが短く十分な機能を持ち得なかったことや、土留め壁構築時の泥水の影響、あるいは通水管設置時の土留め壁及び帯水層の削孔による帯水層の目詰まりなどが考えられた¹⁾。

2) 通水試験による通水能力の把握

図-8に示した概念に基づく通水管の通水試験結果は表-3に示すとおりである。図-10の予測解析では、帯水層の透水性や通水管形状から、通水管1本当たりの通水能力を流量係数(土留め壁両側の水頭差1m当たりの通水量)として約26(北側工区及び南側工区の北側)～約260(南側工区南側) m³/日/mを見込んでいた。しかし、試験結果は最大15.6m³/日/mから最小0.1m³/日/m、平均で4.9m³/日/mと、期待していた値の約20～60%という通水量であった。

また、管口付近の地盤の透水係数を求めると、表-3のとおり概ね10⁻³～10⁻²(cm/s)のオーダーとなっている。この透水係数は、先に示した通水管の流量式のf(r)Ckという値であるが、武蔵野礫層の透水係数としては原位置試験等で測定される値と考えられる。一方、今回の浸透流解析において武蔵野礫層(第一帯水層)に設定した透水係数と比較すると、1

表-3 第1期工区通水管試験結果(図-2参照)

工区	土留め壁	番号	比流量*1 (%/分 /0.1kg/cm ²)		管口付近の透水係数 (×10 ⁻² cm/s)			流量係数*2 (m ³ /日/m)
			上流側	下流側	上流側	下流側	平均	
南側	地下連続壁	①	3.9	12.2	1.1	3.4	1.7	4.3
		②	2.5	6.6	0.7	1.8	1.0	2.6
		③	4.4	2.8	1.2	0.79	0.95	2.5
		④	1.3	5.5	0.37	1.5	0.59	1.5
		⑤	3.8	5.1	1.1	1.4	1.2	3.1
		⑥	6.7	8.8	1.9	2.5	2.2	5.7
		⑦	19.4	8.4	5.4	2.3	3.2	8.3
北側	地下連続壁	①	0.2	0.1	0.056	0.028	0.037	0.1
		②	5.2	10.7	1.4	3.0	1.9	4.9
		③	21.9	21.7	6.1	6.0	6.0	15.6
		④	9.0	16.7	2.5	4.6	3.2	8.3
		⑤	6.6	11.4	1.8	3.2	2.3	6.0
		⑥	13.4	0.1	3.7	0.1	0.19	0.5
	SMW	⑦	4.5	9.6	1.3	2.7	1.8	4.7

*1 試験時に読み取った定常時の集水量、排水量と圧力計の読みから求めた比流量

*2 平口タイプの集排水管の通水流量算定式から求めたもの。この値に上下流の水頭差を掛けると通水量となる。

オーダー程度小さい値となっている。

3) 通水試験結果を考慮した第1期工区通水管効果の評価

通水試験により把握できた通水管の通水能力を基に、第1期工区通水管の通水効果を再現し、試験前に想定した通水管の通水能力が実際のどの程度のものとなっているのかを、浸透流解析により検証した。

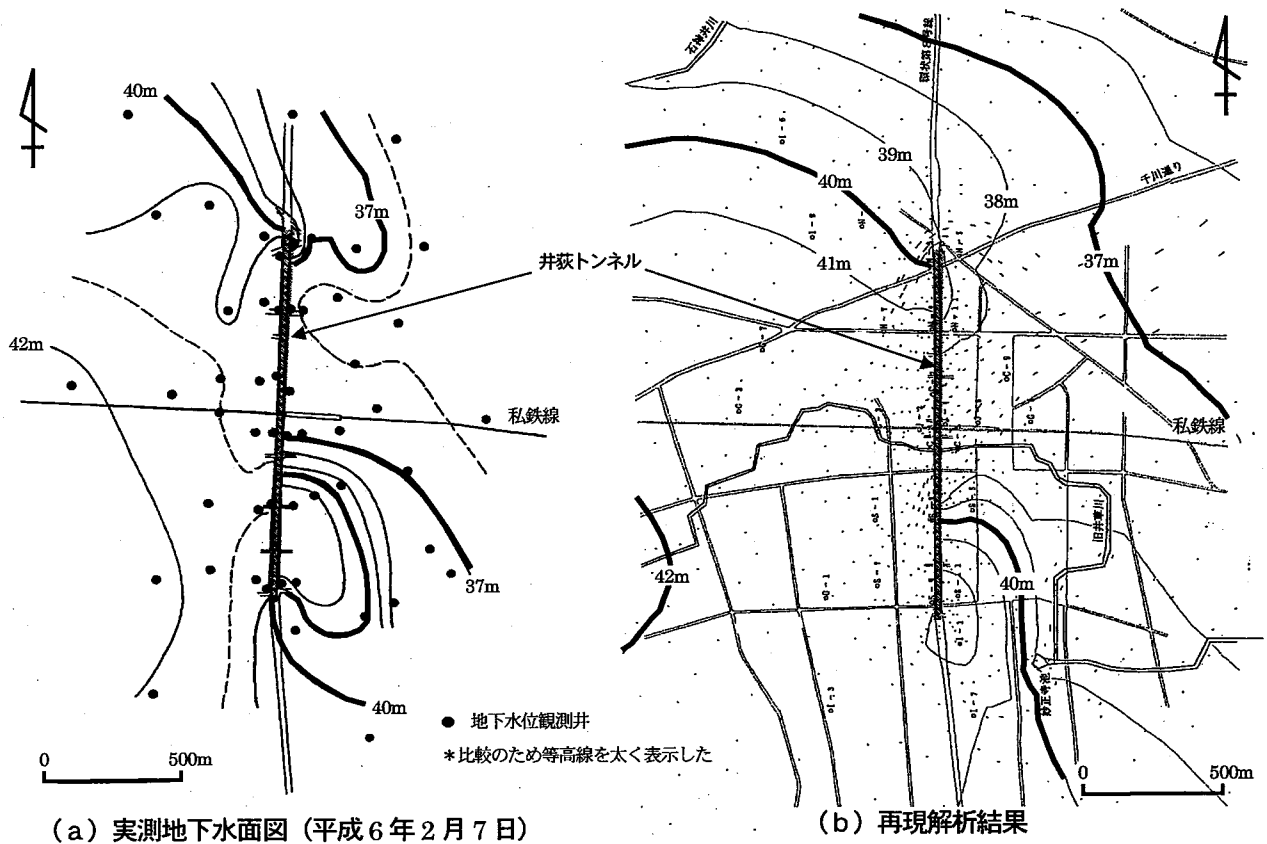
図-11に第1期工区通水管設置後の実測地下水面と通水管試験により得られた通水管の流量係数を用いて解析した再現結果を示す。また、図-12には通水管の実際の能力(すなわち通水効率C<1)における地下水位の回復状況の再現結果を示す。

図-11のとおり、通水管の効果により上流側(土留め壁西側)の上昇した水位は低下しており、再現水位は概ね実測水位となっている。しかし、下流側(土留め壁東側)では土留め壁近傍の水位は十分回復しておらず、解析による水位の方が実測水位よりも高くなっている。

この解析結果において、土留め壁の断面範囲を流動していた地下水量や通水管の流量は以下のようにになっている。

- ・施工前、土留め壁断面範囲の流動量 2160m³(100%)
- ・施工後、土留め壁断面範囲全流動量 40m³(2%)
- ・通水管設置後の場合(通水効率C=1)
 - 土留め壁断面範囲の通水管流動量 1640m³(76%)
- ・通水管設置後の場合(通水効率C<1)
 - 土留め壁断面範囲の通水管流動量 260m³(12%)

このように、第1期工区通水管は、第一帯水層の湧水期基底水位を最大で30cm程度しか回復させる能力しかなく、当初期待していた地下水回復に対し1/6程度の効果に留まっていることが把握できた。



(a) 実測地下水面図 (平成6年2月7日)

(b) 再現解析結果

図-11 第1期工区通水管施工後の地下水面 (通水管の安全率 $C < 1.0$ と考えた場合)

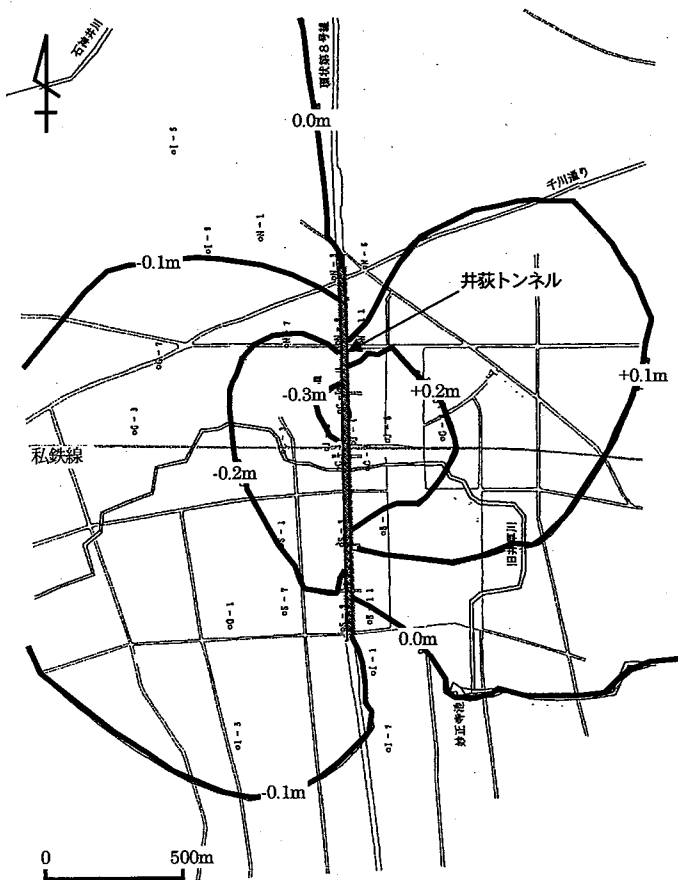


図-12 第1期工区通水管効果の再現結果 (通水管の通水効率 $C < 1.0$ と考えた場合)

5. まとめ

地下水流動阻害対策の効果を浸透流解析によって予測する場合、本事例のように、通水管の通水能をどのように設定するか大きな問題となる。本事例では、十分な洗浄の基に通水能力を100%期待する考え方をとったが、通水試験によれば通水効率は1/6程度となっていた。このように、通水管の形式や集排水部周辺の帯水層の目詰まりなどにより通水能は大きく低下すると考えたほうがよく、現地において通水試験を行い通水効率を評価することの重要性が認識された。井荻トンネルでは、第2期工区の通水管については、第1期工区の通水能力の低下を加味して予測解析を行い、さらに通水試験を行ってその程度を把握している。このような検討を重ね、施工範囲や工程等の限られた条件の中で効果が期待できる形式として斜め通水管が実施され、顕著な復水効果を得ることができた。

なお、通水管の集排水形式と通水能力、帯水層の透水性等との関係については、別途報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 杉本隆男: 開削トンネル工事における地下水復水対策の一例, 地下水地盤環境に関するシンポジウム '98 発表論文集, 地下水地盤環境に関する研究協議会, 1988. 10
- 2) 地下水流動保全工法に関する研究委員会設計ワーキンググループ: 地下水流動保全工法の設計の考え方, 地下水地盤環境に関するシンポジウム '98 発表論文集, 地下水地盤環境に関する研究協議会, 1998. 10