

トンネル掘削時の湧水量予測と情報化施工に関する考察

Evaluation of Groundwater flow during Tunnel Excavation and Study on Information Execution

今津 雅紀*, 三宅紀治**, 根橋 輝***, 西 淳二****

Masanori IMAZU, Noriharu MIYAKE, Akira NEHASHI, Junji NISHI

In tunnel excavation, it is reasonable to determine capacities of systems for drainage and for turbid water treatment during construction prior to the start of work and then redefine them using the field data obtained during construction on such items as changes in geological properties and a large quantity of seepage that were not collected in pre-construction investigations. This study, therefore, based on a case of construction of a real tunnel, re-evaluated the soil permeability at the site based on the pre-construction boring log and the data on seepage in inclined shafts during excavation. Seepage during the excavation of the main tunnel was estimated.

Keywords : Tunnel, Groundwater, Drain Boring, Information Execution

1. はじめに

トンネル湧水は、岩盤中に明確な地下水面が存在しない場合にも生じ、時には被圧地下水や宙水などの連続性に乏しいものもある。また、突発湧水等が集中的に出現した場合において、初期には大量湧水が生じて掘削に苦勞するものの、覆工打設後においては、しだいに低減して、ほぼ一定の恒常湧水に収束していく傾向にある。

これらの状況の中で、ボーリング調査段階およびトンネル施工中の湧水に関するデータを用いて、トンネル掘削時における最終湧水量を推定し、湧水に関する情報化施工を行うことが望ましい。すなわち、トンネル掘削にあたって、施工中の排水設備や濁水処理設備容量を事前に決めた上で、建設時に得られた地質変化・大量湧水など事前の調査で把握されなかった現場のデータを用いて、再設定し直すことが合理的な施工につながる。そこで、具体的なトンネルでの事例に基づいて、事前のボーリング調査結果、掘削時における斜坑の湧水データなどから、対象地山の透水性を再評価し、本坑掘削時の湧水量を予測した。一方、本坑下方には高水圧かつ高透水性を示す未固結の被圧帯水層が存在し、切羽やトンネル底盤における安定性の観点から、この層の減圧が不可欠であった。本稿では、この被圧帯水層の地下水対策についても言及する。

キーワード : トンネル, 湧水, 水抜きボーリング, 情報化施工

・ 正会員 工修 清水建設株式会社 土木本部技術第二部 主査
.. 理博 清水建設株式会社 技術研究所土木研究開発部 主席研究員
... フェロー 日本鉄道建設公団 名古屋支社 支社長
.... フェロー 工博 名古屋大学大学院 教授 工学研究科地圏環境工学専攻

2. 御牧原トンネルの概要

北陸新幹線高崎・長野間に位置する御牧原トンネルは、図-1に示す作業用斜坑（ $L=906\text{m}$ 、斜坑全長は 928m であるが斜坑底の水平坑 22m を除く）を有する全長 $6,984\text{m}$ の新幹線トンネルである。対象とする工区は、本坑に 54 度の角度で平面交差する作業用斜坑を利用し、高崎方に $1,409\text{m}$ （交点からの距離を示す）、長野方に 621m に分かれた中間部 $2,030\text{m}$

の区間である。このうち、高崎方の一部区間には、最大 1.4MPa という高い水圧をもつ未固結砂層と礫および泥岩の互層地山があり、トンネルは鉛直水抜きボーリングと水平ボーリングを併用しながら掘削された。

御牧原トンネルが位置する御牧原台地を構成する地層は、第四紀および新第三紀に属する小諸層群と呼ばれる火山破屑岩を主とした

堆積岩から構成されている。小諸層群は、図-2に示すように上位より瓜生坂累層、布引累層、大杭累層に3区分される。布引累層は、凝灰角礫岩中に、安山岩質で径 $1\sim 5\text{m}$ に及ぶ大きな岩塊が混じり、含水砂層および泥岩などがレンズ状に介在している。大杭累層は、一部に凝灰角礫岩を挟むものの大部分は、砂と泥岩および砂礫の互層を呈し、これらのうち未固結層は、高水圧の被圧帯水層であったため、トンネル掘削時には、別途対策が必要であった。

3. トンネル湧水量の推定

トンネルの湧水量を推定するには地下水位と透水性が必要であり、これらの設定方法およびこれによる湧水量の推定値について以下に述べる。

3. 1 地下水位の設定

本坑レベルにおける平均地下水位は、ボーリング調査データによれば、水頭換算で、 146m （斜坑と本坑の交わる本坑基面である標高 588m を基準面 0m ）である。この値は、湧水圧試験によって得られた湧水圧ともほぼ等しいことより、トンネルの水理水頭として、以下のように設定する。

作業斜坑 : $(\text{掘進長}) \times (146 / 906) \text{ (m)}$

本 坑 : 146 (m)

本坑については、すべて平均水頭（ 146m ）を採用した。作業用斜坑については、斜坑底の水頭も本坑と同じ 146m 、坑口を 0m として設定した。

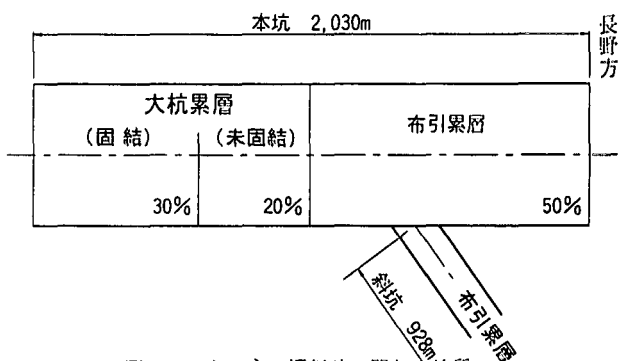


図-1 トンネル掘削時に関わる地質

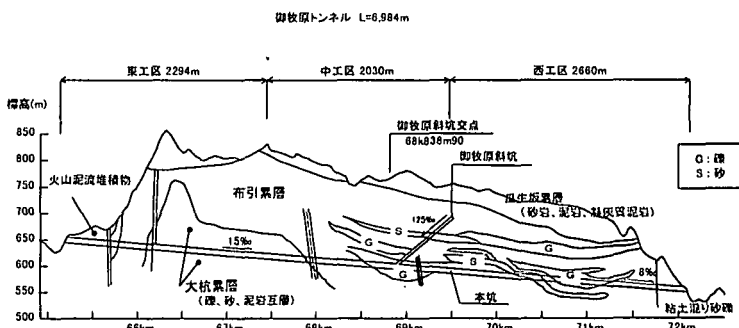


図-2 地質縦断面図

3. 2 地表ボーリングによる透水係数

対象工区における地表ボーリングによるトンネル施工基面付近での湧水圧試験結果による透水係数を、表-1に示す。試験によって得られた透水係数は、すべて 10^{-7} m/sec のオーダーになっている。また、表-1には示していないが、未固結の砂層を挟在している大杭累層の孔内湧水圧試験による透水性は、 3.14×10^{-6} m/sec であった。透水係数は、湧水量に正比例する水理定数で、その値の設定により、予想される湧水量も大きく変化するが、ここでは透水係数を平均値である 4.75×10^{-7} m/sec に設定した。

なお、孔内湧水圧試験では、ボーリング孔内をパッカーにより任意の区間に区切り、トリップバルブを瞬時的に開放して測定管内の水位を上昇させ、平衡水位ならびに時間と水位変化量を計測している。

表-1 湧水圧試験による透水係数

地 点	地 質*	透水係数**
T1299	P (u ₀) S	4.92×10^{-7}
T1299	P (u ₀) S	1.70×10^{-7}
T184R275	P (Nb) G	8.16×10^{-7}
T184R275	P (u ₀) S	3.58×10^{-7}
T184	P (Nb) G	5.55×10^{-7}
N851	P (u ₀) S	4.60×10^{-7}
平 均	---	4.75×10^{-7}

*: P (u₀) S; 砂岩, P (Nb) G; 凝灰角礫岩

** : 透水係数 (湧水圧試験による, m/sec)

3. 3 事前データおよび斜坑湧水量からのトンネル湧水量推定

トンネル施工においては、切羽安定のための湧水対策のみならず、排水処理のための濁水処理設備・ポンプ台数等を最終湧水予測に基づいて、初期の段階から設置しなければならない。そこで、本坑掘削前に調査されている地表ボーリングおよび斜坑掘削時の湧水量を基にして、トンネル全体の透水性を見直すことにより、トンネル湧水量を予測し、設備の見直し・増設時期の設定にフィードバックした。

(1) 地表ボーリングによる湧水量推定

自由水面帯水層中に掘削されたトンネル湧水量を求めるため、以下の定常式^{2),3)}を用いる。ここでは、地下水面は湧水によって減少せず常に一定とし、トンネルは円形と仮定する。

$$Q_0 = 2 \pi k H / (2.3 \cdot \log (2 H / r)) \quad (1)$$

ここに、

Q_0 : 単位長さ当たりの湧水量 ($\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{m}$)

k : 透水係数 (m/sec)

H : 水理水頭 (m)

r : トンネルの半径 (m)

なお、水頭 H は、先に設定した式を参考に、

$$\text{坑口} \sim \text{掘進長 } 511\text{m} \text{ の平均水頭} : H = 511 \times (146 / 906) \div 2 = 41\text{m}$$

$$\text{坑口} \sim \text{掘進長 } 906\text{m} \text{ の平均水頭} : H = 906 \times (146 / 906) \div 2 = 73\text{m}$$

式(1)より、本坑到達時 (906m) における斜坑全体の湧水量を計算する。

計算にあたって、透水係数 k は先に設定した 4.75×10^{-7} m/sec とし、水理水頭 H は上記の 73m とする。斜坑を直径 7.2m ($r = 3.6\text{m}$) の円形断面と考えると、

$$\begin{aligned} Q_0 &= 2 \times \pi \times 4.75 \times 10^{-7} \times 73 / (2.3 \times \log(2 \times 73/3.6)) \\ &= 0.59 \times 10^{-4} \quad (\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{m}) \end{aligned}$$

これより、906m 掘削時の湧水量を求めると、次のようになる。

$$0.59 \times 10^{-4} \times 906 = 0.053 \quad (\text{m}^3/\text{sec})$$

(2) 斜坑中間部での透水性の再評価

斜坑 906m のうち、511m 掘削した段階での実際の湧水量は、 $0.025 \text{ m}^3/\text{sec}$ となり、その後のトンネル施工による排水設備や濁水処理設備の容量を再設定する必要があったため、予想湧水量について再評価した。

よる地質調査および水抜きによる揚水試験を実施した。

図-3に示すように、T260井（水抜き井）とT220井（観測井）およびT180井（観測井）を40mの間隔で直線上に配置した。試験対象の被圧帯水層は、削孔時の状況から難透水性の泥岩と砂層と砂礫層との互層（以下、便宜的に被圧帯水砂層と呼ぶ）からなり、スクリーン先端は難透水性の泥岩に貫入させた。T260井は完全貫入、T220井およびT180井は不完全貫入である。図-4にT260井の構造を示す。他のT220井およびT180井も同様の構造である。

この井戸を設置する際の留意点は、被圧帯水砂層が高水圧であるため、削孔時に砂分が流出することによる地盤の脆弱化を防止するために、カバーロック（凝灰角礫岩層）に設置したガイド管とプリベンダー（止水ゴム、止水ボックス）により、完全止水を行うことであった。つまり、削孔時には多少の砂分流出を許すが、削孔時は完全止水が可能なることを必要条件とした。さらに、次に述べる揚水試験の際に減圧（水抜き）が可能で、そうでない時には、すべてのバルブを閉め、圧力測定可能な構造とした。

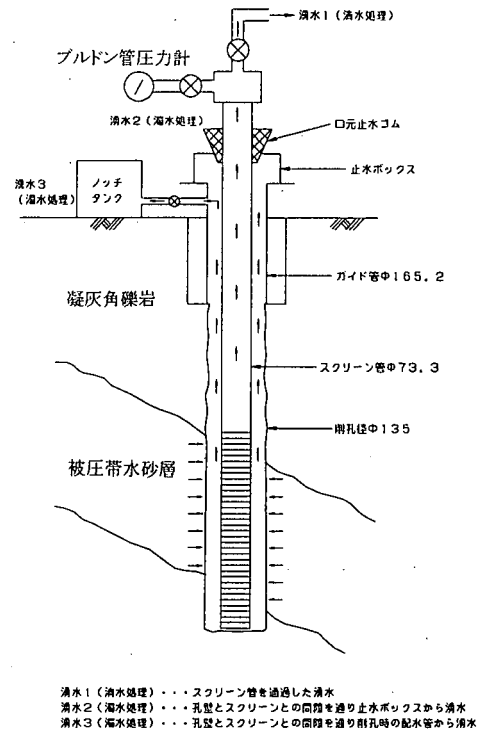


図-4 T260井（水抜き井）の構造¹⁾

4.3 揚水試験の方法

被圧帯水砂層の透水性や減圧効果を知るために、T260井を揚水井、T220井およびT180井を観測井とし、揚水量（ここでは自噴による水抜き量）と水圧の経時的な変化を記録し、平衡状態になる時間まで計測を行った。

自噴による水抜き量：濁水処理施設で計測された値をもとに、これまで恒常的に処理していた分を差し引き、試験開始から終了までの総流量を時間で除した値Qを採用

$$Q = 0.046 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

- 水 圧：各観測井に取り付けたブルドン管水圧計の読み取り値
- 初期水圧：試験開始前にT180井およびT220井の水圧計が示した同一値を採用

4.4 揚水試験の結果

透水量係数Tならびに貯留係数Sは、図-5に示す $s - \log(t/r^2)$ 曲線からJacob式（(2), (3)式）によって求めた。

図-5によれば、T260井からの距離 $r = 80\text{m}$ に位置するT180井および距離 $r = 40\text{m}$ のT220井とも同様の水圧低下状況を示し、被圧帯水砂層はほぼ均質であると判断される。

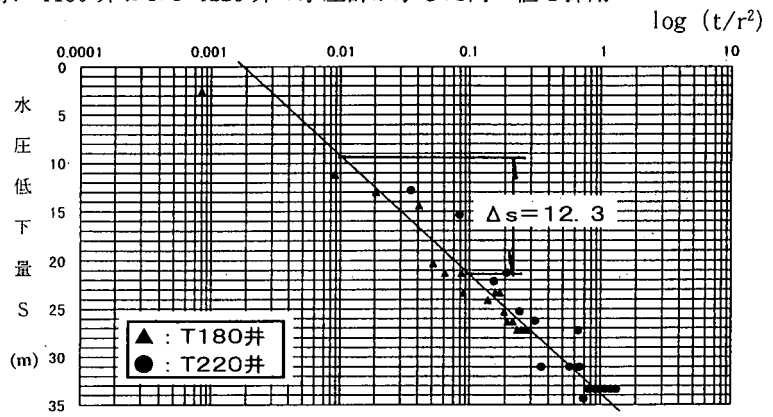


図-5 水抜き後の観測井の水圧低下

また、同図から読み取りにくい、水抜き開始後 20～22 時間で水圧は安定する。

$$T = k D = 2.3 Q / 4 \pi \Delta s \quad (2)$$

ここに、 k ：透水係数

D ：帯水層厚

Q ：単位時間の流量

Δs ： $s - \log(t/r^2)$ 図での対数 1 サイクルの水圧低下量

$$S = 2.25 T (t/r^2)_{s=0} \quad (3)$$

ここに、 $(t/r^2)_{s=0}$ ： $s - \log(t/r^2)$ 図において、水圧差 $s = 0$ であるときの t/r^2 の値

t ：自噴開始後の時間

r ：水抜き井と観測井間の距離

上記の式より算定すると、

$$\begin{aligned} T &= 2.3 \times 0.046 / (4 \times 3.14 \times 12.3) \\ &= 6.8 \times 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{sec)} \end{aligned}$$

ここで、帯水層厚を 20m とすると、透水係数は、

$$\begin{aligned} k &= 6.8 \times 10^{-4} / 20 \\ &= 3.4 \times 10^{-5} \text{ (m/sec)} \end{aligned}$$

式(3)で S を求める際は、以下のように t/r^2 における単位の関係で、 $T = 4.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{min}$ を適用した。

$$\begin{aligned} S &= 2.25 \times 4.1 \times 10^{-2} \times 0.002 \\ &= 1.8 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

以上のことから、高水圧の被圧帯水砂層における透水性は、本坑到達時に推定した布引累層の $k = 2.97 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ に比べて 2 オーダー大きく、ほぼ均質な地質であることが予想された。また、貯留係数が 10^{-4} オーダーで比較的小さく、透水性と併せて判断すると、本稿には詳説しないが、水抜き井による減圧効果が大きいと予測された。さらに、本層の上端は本坑が進む高崎方に向かって上方に傾斜し、加圧（カバーロック）層になっている凝灰角礫岩が薄くなることから、被圧帯水砂層の減圧が不可欠であることが明らかになった。

4.5 鉛直水抜き孔による減圧効果

対象となる被圧帯水層に対して 40m ピッチで切羽方向へ 3 本の鉛直水抜きボーリング（前述の T260 井、T220 井、T180 井）を行った結果、図-6 に示すように、湧水圧の低下とともに湧水量も低下した。また、ボーリング削孔に伴う地下水圧の経時変化を図-7 に示す。

水圧の経時変化図によれば、前方における水抜きの効果は大きく、T180 井において当初 0.8MPa あった水圧に注目してみると、T220 井

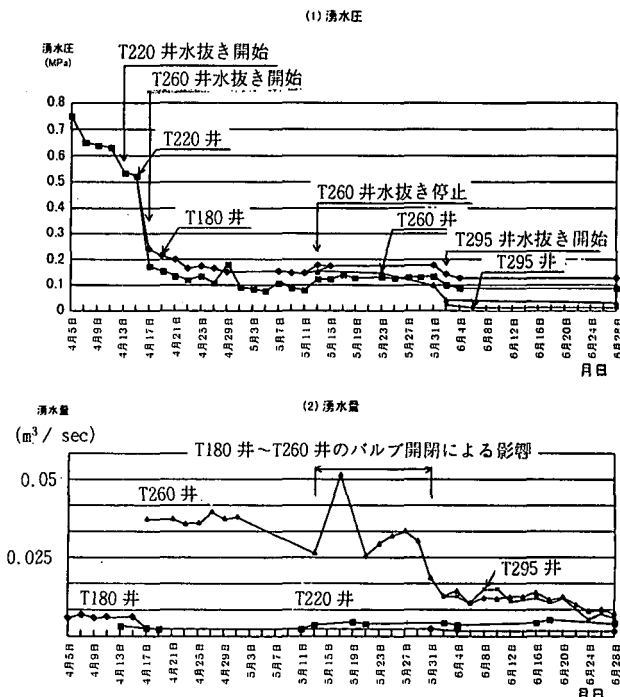


図-6 水圧および湧水量の経時変化図¹⁾

の水抜き開始とともに 0.1MPa、T260 井の水抜き開始とともに 0.4MPa 程度圧力が落ち最終的に 0.15MPa まで低下した。その後、高崎方 295m で行った T295 井により、T180 井の湧水圧は、0.12MPa まで減圧している。このことから、鉛直井による水抜きは、水圧低減に大きな効果をもたらしていることがいえる。湧水量についても、T260 井の湧水量が、T295 の削孔により、 $0.017\text{m}^3/\text{sec}$ 瞬時に減少し、最終的には、 $0.006\text{m}^3/\text{sec}$ 以下に収まっている。

突発的な湧水区間以降、継続的に水抜き孔として、水平ボーリング（総延長 1,724m）および鉛直水抜き井（総延長 315m）を併用しながら合計 2,039m の掘削を進めて行った。これらの水抜きボーリングによって、切羽に現れている泥岩の下部にある礫・砂・泥岩の互層やルーズな砂層および礫岩中の被圧水を効果的に水抜きすることができた。

図-8 に鉛直水抜き井 9 本の湧水量変化を示す。水平ボーリングは、施工直後は約 $0.017\sim 0.025\text{m}^3/\text{sec}$ の湧水があるものの、その後のロックボルト打設時の削孔、切羽の進行などにより涸れるものが多かった。一方、鉛直水抜き井においては、中央集水管接続（数ヶ月後）時の最終水量が、 $0.02\text{m}^3/\text{sec}$ （図-8 における T750 井）あるものもあり、被圧帯水層の水抜きに

は、鉛直水抜き井が多大な効果を発揮することが確認できた。結果的に、被圧帯水層の減圧に起因する湧水量（鉛直水抜き井の湧水量合計）は、初期において $0.145\text{m}^3/\text{sec}$ 、最終 $0.062\text{m}^3/\text{sec}$ であった。

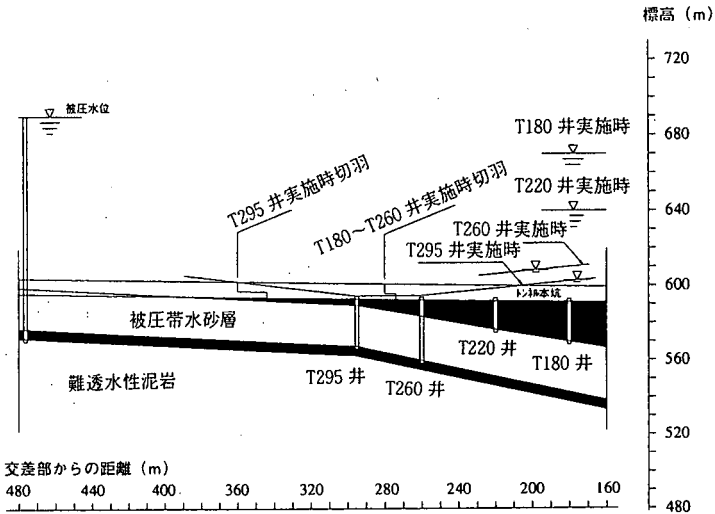


図-7 鉛直水抜き井による水圧の変化

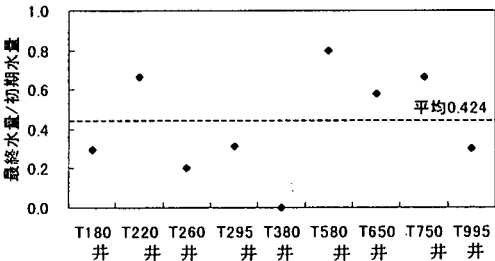


図-8 鉛直水抜き井の湧水量変化図

5. トンネル建設時の湧水に関する情報化施工

5. 1 実施した情報化施工の流れ

トンネル施工においては、トンネル切羽安定のための湧水対策のみならず、濁水処理設備・ポンプ能力を最終予測湧水量に基づいて、初期設定しなければならないことが多い。そこで、本トンネルにおいては、図-9 の流れに従って、本坑の湧水量を推定した。

これまで述べてきた事項を含め、まとめると以下ようになる。

① 本坑到達部湧水量の事前予測

本トンネル工事においては、地表ボーリングが数箇所行われており、そこで得られた水頭と湧水圧試験結果による透水係数 $4.75 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ を用いて湧水量 $0.053 \text{ m}^3/\text{sec}$ を予測した。

② 本坑到達部湧水量の再評価

斜坑中間部(511m 地点)において、湧水量が増加したため、そこでの湧水量 $0.025 \text{ m}^3/\text{sec}$ から透水係

数 5.93×10^{-7} m/sec を逆算し、本坑到達部の湧水量 $0.0666 \text{ m}^3/\text{sec}$ を推定した。

③ 本坑下部被圧帯水層における地下水対策

本坑下部にあらわれた被圧帯水層の地下水対策としての鉛直水抜き井を用いた揚水試験において、被圧帯水層の透水係数 3.4×10^{-5} m/sec を算定し、被圧帯水層の減圧が不可欠であることを明らかにした。

④ 斜坑湧水量と本坑掘削時湧水量予測値の合算

本坑到達部において得られた斜坑湧水量 $0.0333 \text{ m}^3/\text{sec}$ を用いて、透水係数 2.97×10^{-7} m/sec を逆算し、本坑掘削時の湧水量 $0.136 \text{ m}^3/\text{sec}$ を予測し、斜坑湧水量と合算して最終湧水量 $0.169 \text{ m}^3/\text{sec}$ を設定した。

なお、本坑掘削時に新たな対策を講ずる必要のあった被圧帯水層の減圧に起因する湧水量は、最終的に $0.062 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり、トンネル全体の湧水量は、被圧帯水砂層における湧水量を考慮しなければ、 $0.167 - 0.062 = 0.105 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。これは、予測値 $0.169 \text{ m}^3/\text{sec}$ の 62% であり、斜坑掘削時においても見られた（予測値 $0.0666 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対して、実測値 $0.0333 \text{ m}^3/\text{sec}$ ）ように、トンネル掘削時の時間経過による周辺地山の不飽和度の変化、すなわちトンネル全体としての透水係数の低下による湧水量の減少と考えられる。

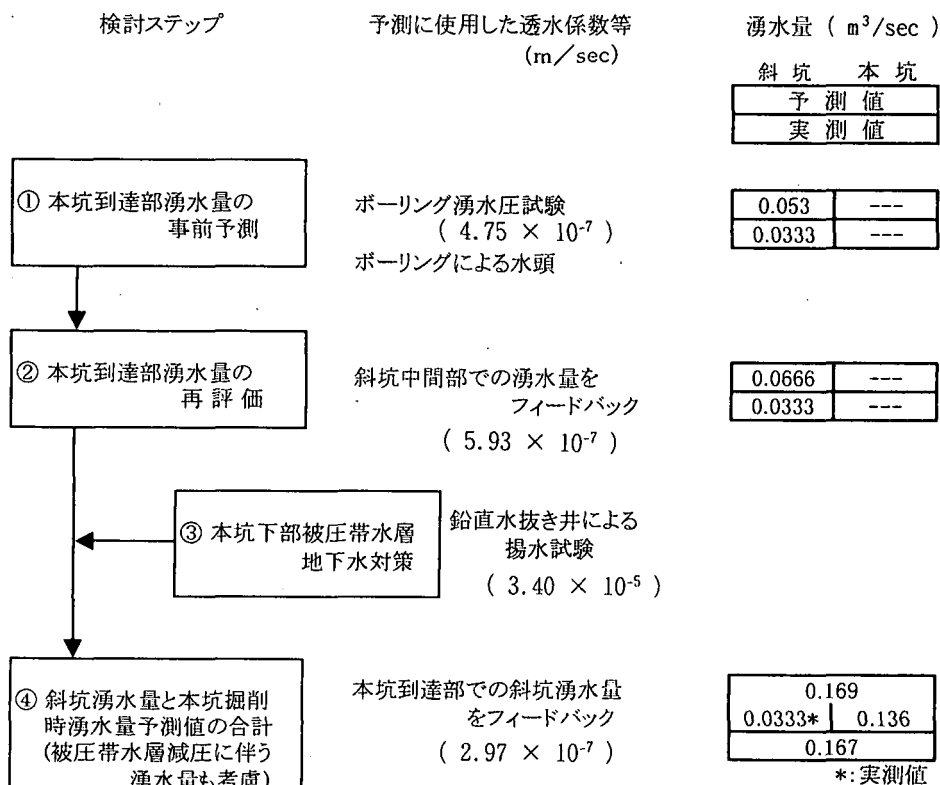


図-9 実施した情報化施工の流れ

5. 2 濁水処理設備への反映

実際、本坑到達時に $0.033 \text{ m}^3/\text{sec}$ であった湧水は、本坑の掘削が進むにつれ増加し、高崎方 1,000m 掘削時点でピークを迎え、湧水量 $0.167 \text{ m}^3/\text{sec}$ に達した。本トンネルの斜坑は、高低差 102m、延長距離 928m あるため、斜坑底に 150kw の特注ポンプ 7 台を設置できる水槽¹⁾（貯水量 300 m^3 を持つ長さ 26m、断面積 33 m^2 の

水槽坑を交差部付近に設置)を設けて対処した。トンネル全体の湧水量と濁水処理設備との関係を、図-10に示す。濁水処理設備は、図に示すように湧水の増加に従って順次増設していった。初期の段階においては、設計数量である $0.017 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $0.033 \text{ m}^3/\text{sec}$ の設備とした。斜坑511m段階において、本坑到達時の湧水量予測が $0.0666 \text{ m}^3/\text{sec}$ となつ

たことおよび将来の突発湧水に備えて、安全サイドに考え、 $0.0833 \text{ m}^3/\text{sec}$ の能力のものを設置した。本坑における被圧帯水砂層の存在が確認されたのち、濁水処理能力を $0.125 \text{ m}^3/\text{sec}$ にアップした。さらに、被圧帯水砂層に対する水抜きボーリングを続けるうちに、濁水処理施設だけでは処理できない湧水量となり、本坑で1,000m掘削した段階において、清濁分離して濁水処理量 $0.125 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、清水処理量 $0.092 \text{ m}^3/\text{sec}$ の合わせて $0.217 \text{ m}^3/\text{sec}$ の設備とした。

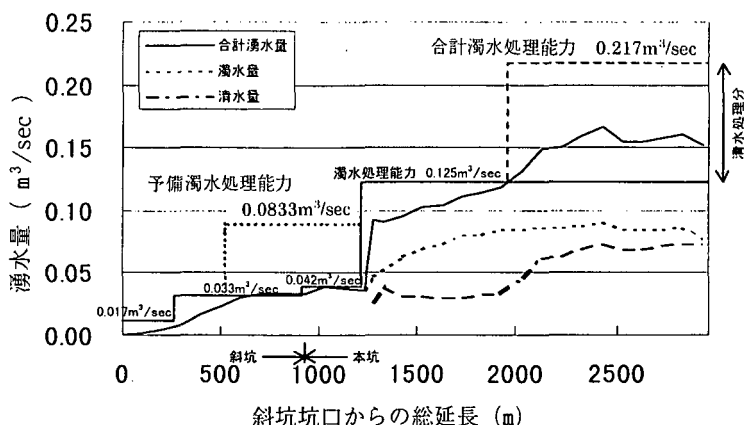


図-10 トンネル全体の湧水量と濁水処理能力

6. 結論および今後の課題

今回得られた結論は、以下の通りである。

- ① 斜坑掘削によって、事前調査のデータとあわせて、途中フィードバックした透水パラメーターにより、固結部における全体的な湧水量すなわち恒常的な湧水量を推定できた。
- ② 被圧帯水砂層が本坑掘削時にあらわれ、坑内揚水試験により帯水層パラメーターを把握し、鉛直水抜き井および水平ボーリングにて調整しながら処理した。その結果、水抜きによる減圧効果の大きいことが確認された。
- ③ トンネル湧水量を施工段階ごとに見直すことにより、適切な規模の濁水処理施設容量を設置できただけでなく、地質状況から将来の湧水量を予測することで、突発的な湧水量増加にも対応しうる情報化施工の一例を示すことができた。

トンネル現場においては、設計において想定する湧水量と施工段階で実際に出現する湧水量と乖離する場合が多い。その際、現場で得られた湧水量を基に、逐次トンネル全体の透水係数を逆算し、情報化施工を行うことは大変有益と考えられる。ただし、被圧帯水層に対する考え方や時間的経過によるトンネル全体としての透水係数低下の考慮など、さらに精度を上げていく必要があろう。

今回は、比較的容易な方法によって、トンネル湧水量を推定するなど、主に現場で得られたデータや事象に基づき検証してきたが、今後は、さらにシュミレーション手法の適用など別の観点からのアプローチを試みたい。

参考文献

- 1) 北川鉄蔵, 今津雅紀, 森直樹: 水圧と膨圧を各種補助工法で克服 北陸新幹線 御牧原トンネル中工区, トンネルと地下, 第28巻, 第3号, pp.17—27, 1997.3
- 2) Goodman, R.E. et.al.: Ground water inflows during tunnel driving, Eng.Geol., 2, pp.39—56, 1965.
- 3) Freeze, R.E. and Cheny, J.A.: Groundwater Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., p490, 1979.