

# 山岳トンネル建設工事における地下水環境影響評価 —中央自動車道長野線岡谷・塩尻トンネルの場合—

Assessment of Groundwater Condition Change due to Tunnelling in a Mountainous Area  
(Case Study on Okaya and Shiojiri Tunnels of the Nagano Route of the Chuo Expressway)

うえ 植 した 下 かのう 協\* だい 大 とう 東 けん 憲 じ 二\*\*

## 1. まえがき

鉄道や道路の路線が、トンネルで山岳地域を通過するとき、トンネル掘削に伴う地下水状態の変化に関連した問題がしばしば発生する。最近では、湧水や井戸の枯渇が、騒音、振動、地盤変位などの問題とともに、建設工事における公害問題として注目されるようになってきており<sup>1)</sup>、特に、土被りが大きい山岳地域に掘削されるトンネルでは、湧水が広範囲に発生する場合がある<sup>2),3)</sup>。このような湧水により、周辺住民の生活に影響が生じる場合、事前に湧水を予測し、その対策を立てていた場合とそうでない場合とでは、住民に対する迷惑度に大きな差を生じ、その問題処理に要する時間的、経済的な負担も大きく異なってくる。したがって、湧水現象に関する事前調査と予測は、トンネル掘削工事の環境影響評価における重要な検討項目として認識されつつある<sup>4)</sup>。

日本道路公団では、昭和54年当時、中央自動車道長野線の岡谷トンネルと塩尻トンネル(図-1参照)を施工しようとしていたが、これらの道路トンネルに先行して、ほぼ平行した路線で工事が進められていた旧国鉄の塩嶺トンネルで湧水問題が発生して、地元住民との間に大変なトラブルを起こしていたこと<sup>5),6)</sup>、道路トンネルの建設前から、すでに地元から地下水問題関連の要望がいろいろと出されていたことから、日本道路公団としては、道路トンネルの地下水問題で、科学的・客観的仲裁者の存在を必要としていた。

そこで、日本道路公団名古屋建設局は、土木学会中部支部にこの科学的・客観的仲裁者の役割を依頼し、昭和55年度に「土木学会中部支部中央自動車道長野線トンネル湧水調査委員会」(委員長 植下協)が発足した。この委員会には、土質工学の専門家だけでなく、地質学、地下水学、水質分析の専門家も参加した<sup>7),8)</sup>。以後、この委員会は、岡谷・塩尻両トンネルが完成する昭和61年度までの7年間にわたって、トンネル掘削にともなって発生するであろう地下水位の低下と地表湧水の減少の状況を地盤工学的シミュレーション手法により予測し、実測結果と併せて客観的

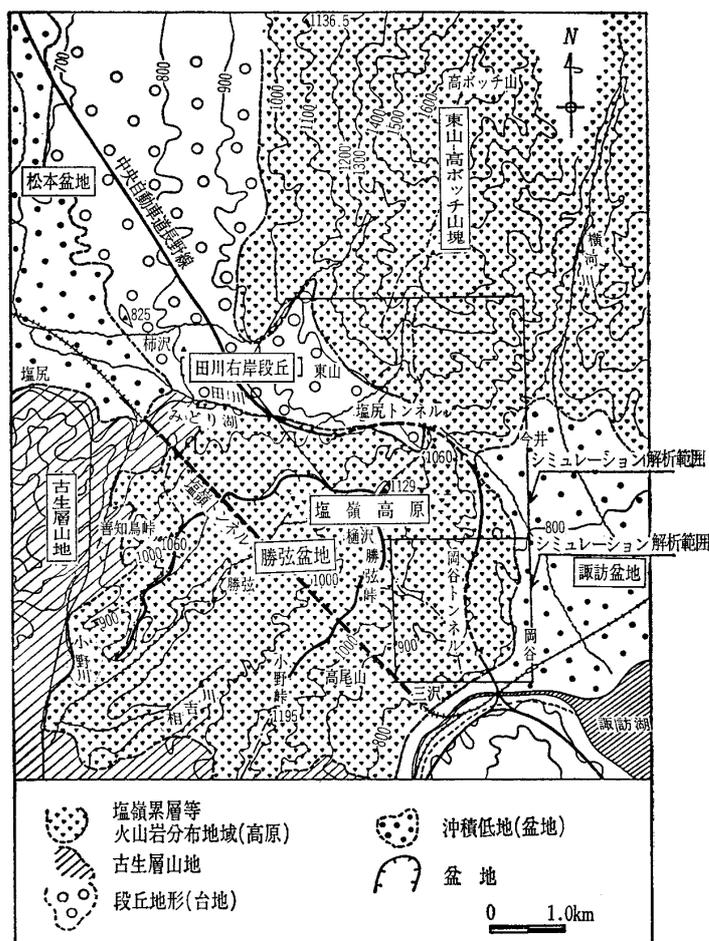


図-1 中央自動車道長野線の岡谷トンネル・塩尻トンネルの地形・地質的環境とシミュレーション解析範囲

資料として提供し続けた<sup>9)</sup>。

この委員会で検討した岡谷トンネルと塩尻トンネルの路線付近は地下水が豊富であり、周辺住民は井戸水や湧泉水を飲料水や農業用水として利用している。湧泉の中には、信仰の対象となっているものもある。このような地域でのトンネル掘削ということで、地下水状態の変化に伴う湧水問題がトンネル掘削前から懸念され、入念な調査と検討が行われた。

岡谷トンネル建設予定地域の地下水流動解析作業を開始した昭和55年当時は、トンネル掘削工事に伴う周辺地下水状態への影響を予測するためには、高橋の方法<sup>10)</sup>がよく用いられていた。しかし、この方法は、地形・地質の情報に

\*名古屋大学教授 工学部地盤工学教室  
\*\*名古屋大学助手 工学部地盤工学教室

基づきトンネル湧水量を予測するもので、実際の湧水現象の影響範囲を説明するためには十分な方法とは思えなかった。そこで、この委員会では、数種の地下水流動の数値シミュレーションを試行した上で、地質構造が複雑なこの地域の地下水流動状態の変化を解析するためには、三次元有限要素モデルを用いなければならないと判断した。このような山岳トンネル掘削工事の周辺地下水状態への影響を、断層の存在も考慮した三次元モデルにより予測して環境影響評価に役立てた実例は、その当時では報告例がなかった。

岡谷トンネルと塩尻トンネルの地下水問題を審議した7年間の土木学会中部支部の委員会活動に関連して、多くの研究（地盤調査におけるリモートセンシングの利用<sup>11),12)</sup>、トンネル掘削の周辺地下水状態への影響についての非常計算手法<sup>13),14)</sup>、地山の透水係数と比貯留率の求め方<sup>15),16)</sup>、その他の関連調査研究<sup>17)~24)</sup>）がなされ、可能な限り各種の学会や研究会でそれらを公表し、調査研究成果の紹介をすると同時に、各方面からの批判をいただくように努力してきた。

本報告では7年間にわたる「中央自動車道長野線トンネル湧水調査委員会」<sup>8),9)</sup>で検討された地下水に関する環境影響評価手法を紹介する。今回紹介する山岳道路トンネル建設工事と同じような自然的・社会的条件下でトンネル建設工事が行われる場合、地下水問題に関する環境影響評価の一例として参考になれば幸いである。

## 2. 地下水環境影響評価方法の概要

岡谷トンネルと塩尻トンネルの掘削に伴う地下水状態変化の予測に用いたこの委員会の方法を図-2に示した。これらの手順の概要は、次のとおりである。

- 1) 建設が計画されているトンネルによる地下水変動の影響が予想される範囲を含む領域において、格子状に地盤断面図を作成する領域を決定する。
- 2) 地盤状態と地表水、地下水状態を可能な限り調査し、三次元的に整合のとれた格子状の地盤断面図を作成する。
- 3) 前記の地盤断面図を基にして、三次元有限要素モデルを作成する。この場合、各要素の地下水に関する性質は、現場透水試験結果を参考にして、マクロ的なダルシー則の透水係数で表すこととする。また、対象地域に存在する断層は、透水性断層または遮水性断層のいずれであるかを判断してモデルに考慮する。
- 4) 上記の三次元有限要素モデルに地下水の境界条件を与えて、解析領域内の地下水状態を計算する。
- 5) トンネル掘削前の計算地下水状態と、現地の湧水状態や地下水観測井戸等による実測地下水状態との一致度が不十分な場合は、三次元地盤モデルの構成、その透水性、境界条件などについて適否を検討し、実測と計算結果の一致度が良くなるまでモデルの改善を行う。

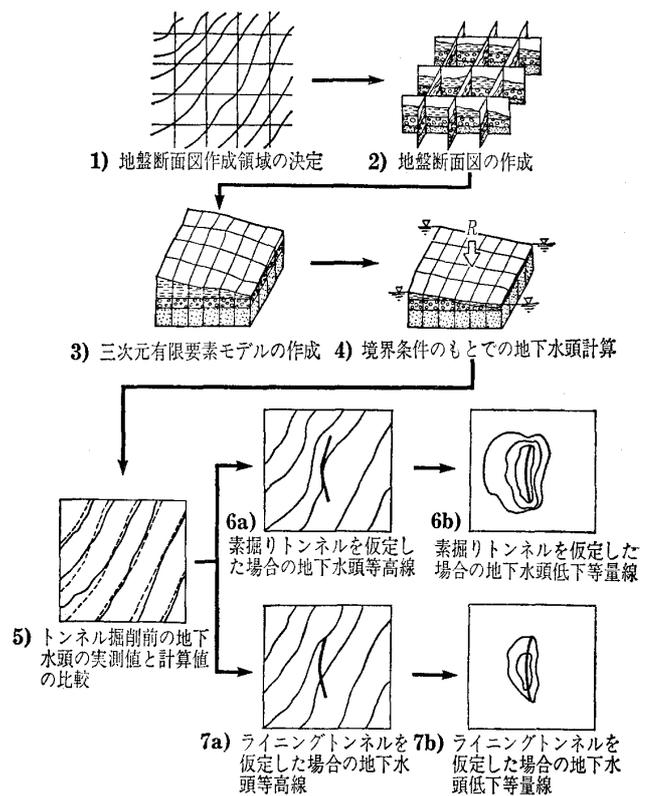


図-2 予測手法の流れ

次に、トンネル掘削前の地下水状態によって検定された三次元地盤モデルにトンネルを掘削した場合の影響を、次のように評価する。

- 6a) 計画トンネルが素掘り状態で、地下水がトンネル位置において、大気圧状態で完全に排水されて定常状態となった場合を仮定して、低下した地下水状態を計算する。
- 6b) 上記の計算地下水状態とトンネル掘削前の計算地下水状態との差により、最も大きく見積もった地下水位低下等量線を描くことができる。
- 7a) 計画トンネルにライニングが施され、トンネルにおける排水量が前記の素掘り状態と比較して少ない状態となった場合、トンネルにおける排水量を計算条件として、低下した地下水状態を計算する。今回は、ライニングトンネルの排水量が、素掘りトンネルを仮定した場合のトンネル排水量の3分の1になると仮定した。
- 7b) 上記の計算地下水状態とトンネル掘削前の計算地下水状態との差により、実際により近いトンネル完成後の地下水位低下等量線を描くことができる。

## 3. 地下水流動解析の基礎式と境界条件

山岳地域の地下水問題は、一般には、表土から岩盤までを含めた浸透流の問題である。岩盤内の浸透流については、岩盤の亀裂に注目して、これらの亀裂をモデル化することにより岩盤内の浸透流解析を行う方法も提案されているが、

岩盤に発生している亀裂の実態把握が難しく、仮に亀裂の詳細を知ることができても、それを現実規模のモデルに適用することは困難である。また、解析領域と亀裂の大きさを比較した時、岩盤内の水は、亀裂の存在にミクロ的に支配されながら流れているとしても、解析領域の大きさにバランスした近似的議論としては、ダルシー則を用いるマクロ的方法が有効であると考えた。

また、今回の計算では、人間行為を加える前と、加えた後の定常状態の比較を行えばよいので、解析対象領域の地下水流動に対し、次の基礎式を用いることとした。

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \dots\dots(1)$$

ここに、 $h$ は地下水頭、 $k_x, k_y, k_z$ はそれぞれ $x, y, z$ 方向の透水係数である。

式(1)に対してガラーキン法を適用し、有限要素法の式に定式化する。重み関数を $N_i$ とすると、式(1)は次式のようになる。

$$\int_V N_i \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial h}{\partial z}) \right\} dV = 0 \dots\dots(2)$$

ここに、 $V$ は四面体要素の体積であり、 $i$ は四面体要素の頂点( $i=1\sim 4$ )を表している。ここで、 $k_x, k_y, k_z$ が要素内で変化しないと仮定すると、式(2)より次式が導かれる。

$$\int_V \left( k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial h}{\partial z} \right) dV - \oint_S N_i \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z \right) dS = 0 \dots\dots(3)$$

ここに、 $S$ は四面体要素において境界条件が与えられる面の面積であり、 $l_x, l_y, l_z$ はそれぞれこの面の外向き法線の方向余弦である。

境界条件は、以下の式で表される。

1) 水頭固定条件  
 $h = \text{const.} \dots\dots(4)$

2) 不透水条件  
 $k_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z = 0 \dots\dots(5)$

3) 地下水涵養条件 (地下水面上の境界条件)  
 $k_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z = -\alpha r \dots\dots(6)$

ここに、 $\alpha$ は降雨浸透率、 $r$ は年間降雨強度 (mm/year)を左辺の流量流速の単位と同じ単位で表現したモデル地域の平均降雨強度である。

$\alpha$ は次式によって求められる。

$$\alpha = \frac{R - E - D}{R} \dots\dots(7)$$

ここに、 $R$ はモデル地域の年間降雨量、 $E$ はモデル地域の年間蒸発散量、 $D$ はモデル地域の年間流出量である。

上記の式を、実際の岡谷・塩尻トンネル掘削工事に適用するために、地盤の三次元有限要素モデルを作成した。以下では、岡谷トンネルを例にとり、モデルの作成方法を説明する。

岡谷トンネル周辺では、工事に先立ち、地盤の水理地質構造を明らかにするために、ボーリング調査を始めとする数多くの調査が行われ、その調査に基づいて地質専門家により、図-3に示すような東西、南北各200m間隔の地質断面図が作成された。次に、これらの地質断面図をもとにして図-4、5に示すような、断層も要素として考慮した1200節点、5376四面体要素によって構成される解析対象領域の三次元地盤モデルを作成した。この地盤モデルにおいて、岡谷トンネルは、トンネル掘削底面の位置に一致す

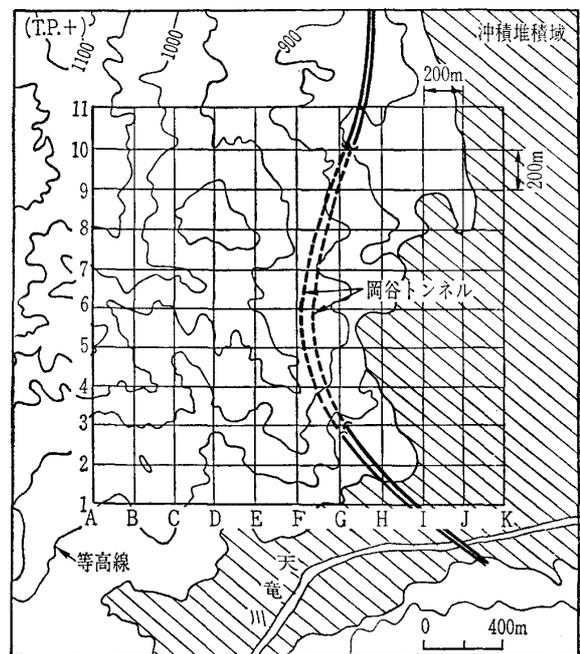


図-3 岡谷トンネルの路線と地質断面図の位置

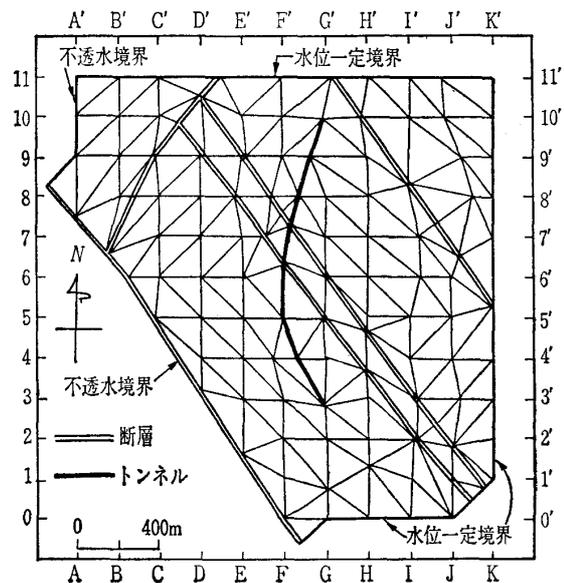


図-4 岡谷トンネル周辺地盤の三次元FEMモデルの要素分割平面図

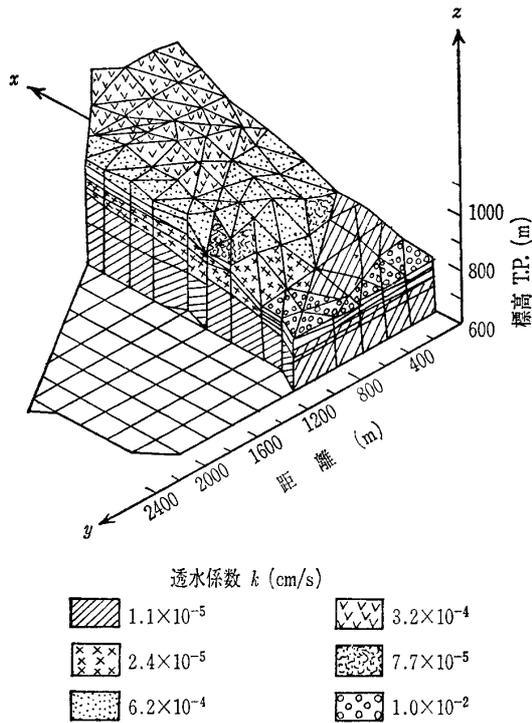


図-5 岡谷トンネル周辺地盤の三次元 FEM モデルの立体図

る10個の節点によってモデル化されている。この地盤モデルは、事前調査結果に基づいて作成したものであり、実際にトンネルが掘削され、トンネル工事によって知ることができた地質状態が、事前調査結果と異なっていることが明らかになった場合には、この地盤モデルを修正することになる。岡谷トンネルの場合は、7年間の委員会の検討の中でそのような対応を行っている<sup>9)</sup>。

地盤モデルの周辺における境界条件は、トンネル掘削の影響が及ばないと想定した北側境界，ならびに湖と河川により地下水位が一定とみなし得る東側と南側の境界では，地下水位一定の条件を与え，断層により遮水状態とみなし得る南西側の境界と，地下水の分水嶺とみなし得る西側境界には不透水条件を与えた。また，トンネル位置よりも約250m 深い標高600m の位置に不透水性の基盤面を仮定した。

各地質の透水係数については，ボーリング孔を用いた孔内湧水圧測定試験，微流速測定試験および揚水試験等の原位置透水試験結果<sup>9)</sup>を参考にしながら図-6に示すように設定した。断層の透水性は，事前調査の段階では不明であるので，当初は断層を単なる地質の不連続面と仮定して，断層の左右いずれかの地質の透水係数を与えて計算した。掘削工事中に透水性が大きいと推定できた断層については，地盤モデルの修正過程において，より実測に近い計算結果が得られるような透水性の大きい係数を与えた。

降雨による地下水面への地下水涵養量は，解析対象領域内の幾つかの流域に対して(7)式を適用して得られた降雨浸

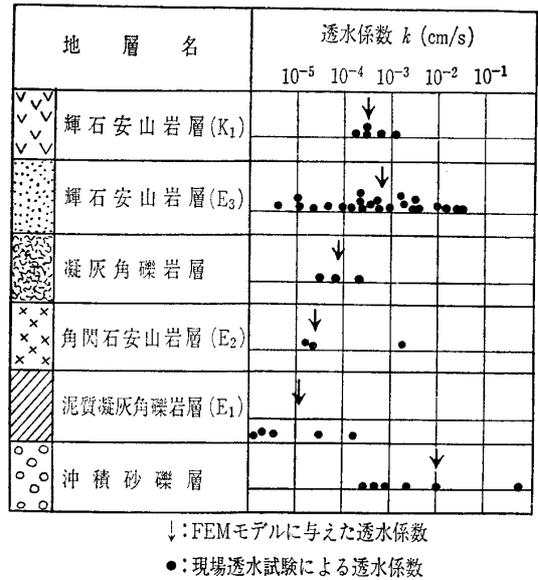


図-6 各地層の透水係数

透率  $\alpha = 0.3$  により，年間降雨量の3割が年間地下水涵養量であると示した。

#### 4. 解析結果

前章で述べた諸条件のもとで，トンネル掘削に伴う地下水状況の変化を解析した。その解析結果の一部を以下に述べる。

岡谷トンネルは，昭和61年3月25日に供用が開始されたが，昭和61年3月31日時点での岡谷地域の流量観測点と地下水位観測用ボーリング孔での影響の程度と FEM 解析による地下水位5mの低下域との比較を示したものが図-7

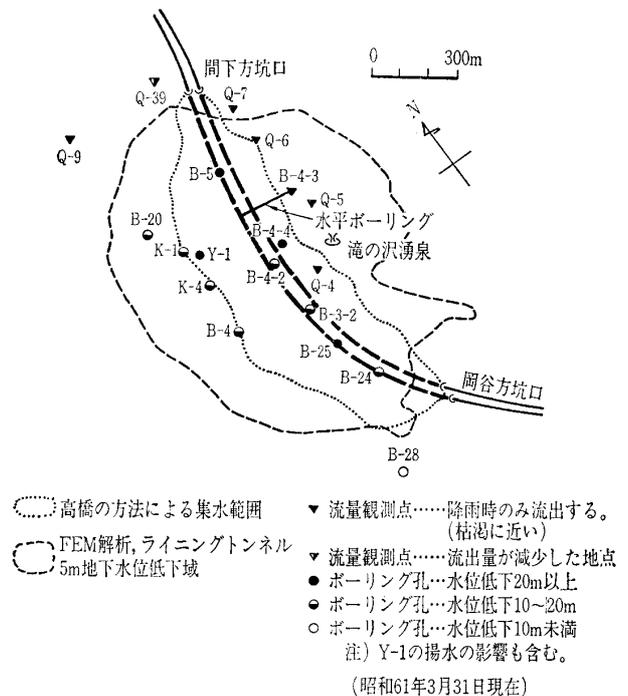


図-7 岡谷トンネル周辺の流量観測地点ならびに観測井の観測結果と影響予測との比較

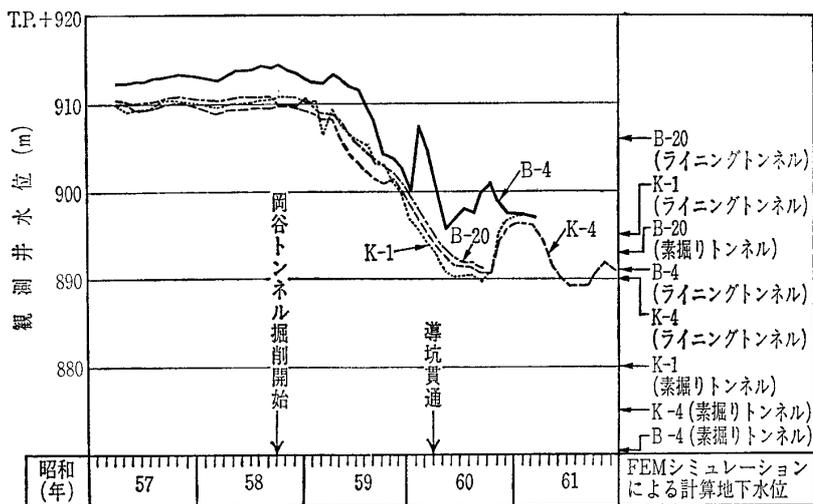


図-8 高橋の方法による岡谷トンネル集水範囲の境界線付近またはその外側にある観測井実測水位への影響と FEMシミュレーションによる予測値

である。また、図-7 に示した高橋の方法による岡谷トンネル集水範囲の境界線付近またはその外側にある観測井 K-1, K-4, B-4, B-20 の孔内水位の経時的変化を図-8 に示す。これらの図から、実際のトンネル掘削の影響が、高橋の方法による集水範囲を越えて広範囲に伝播したことが分かる。図-8 には、FEM シミュレーションによる各観測井地点の計算地下水水位も示した。観測井 B-20 では、実測地下水水位は素掘りトンネルを仮定した計算地下水水位にほぼ等しく、他の観測井では、実測地下水水位がライニングトンネルを仮定した計算地下水水位にほぼ等しい。FEM シミュレーションによる予測法も、地盤ならびに施工条件の複雑さを考慮して、解析結果に若干の幅をもたせて解釈しなければならないが、図-8 は、トンネル掘削の地下水水位への影響予測として、FEM シミュレーションによる方法が、従来から用いられている高橋の方法より確かな手法と

して用い得ることを示している。

また、岡谷市の水道水源の一部となっていた滝の沢湧泉を含む東西断面における計算地下水水位と高橋の方法による予測集水範囲を図-9 に示した。この図には、滝の沢湧泉は、高橋の方法による集水範囲には含まれていないが、シミュレーション計算によると、完全に枯渇することが示されている。そして、実際に滝の沢湧泉は、岡谷トンネルの掘削中に枯渇した。

また、図-9 には、この東西断面の位置に近い観測井 B-3-2, B-4, B-4-4 の昭和 61 年 3 月時点の孔内水位も併せて示したが、トンネルライニング後の計算地下水水位は、これらの実測地下水水位をかなりよく推定している。

これらの結果から、FEM シミュレーションによる予測が適切であったとすることができよう。

塩尻トンネルは、昭和61年12月末に本体工事が完了したが、その昭和61年12月31日時点での塩尻トンネル付近の地下水水位観測用ボーリング孔または浅井戸への影響の程度と FEM 解析による 5 m 地下水水位低下域との比較を示したものが図-10 である。

石船観音(図-10)に示す流量観測点 Q-19)の地下水状態への影響がないであろうことについては、高橋の方法でも今回の FEM シミュレーションでも予測できているが、図-10によると、高橋の方法による集水範囲の外側にあるボーリング孔の孔内水位が低下したことが示されている。特に塩尻トンネルの南側では、高橋の方法による集水範囲を越えてトンネル掘削の影響が伝播したことが分かる。FE

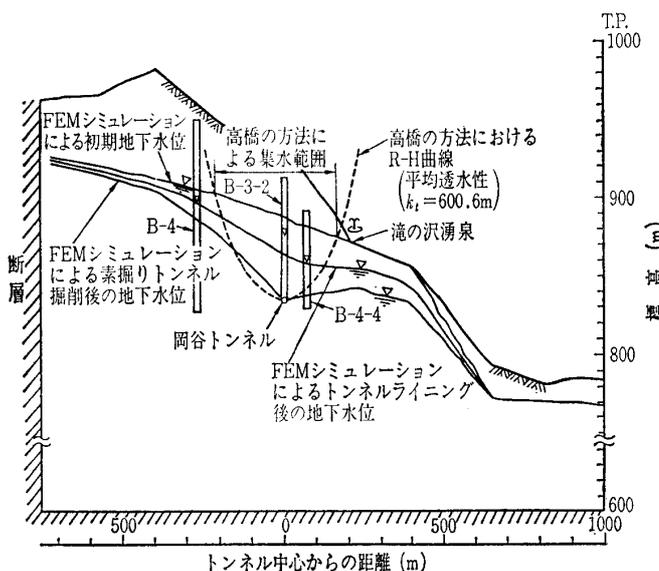


図-9 滝の沢湧泉を含む東西断面における計算地下水水位と実測地下水水位の比較

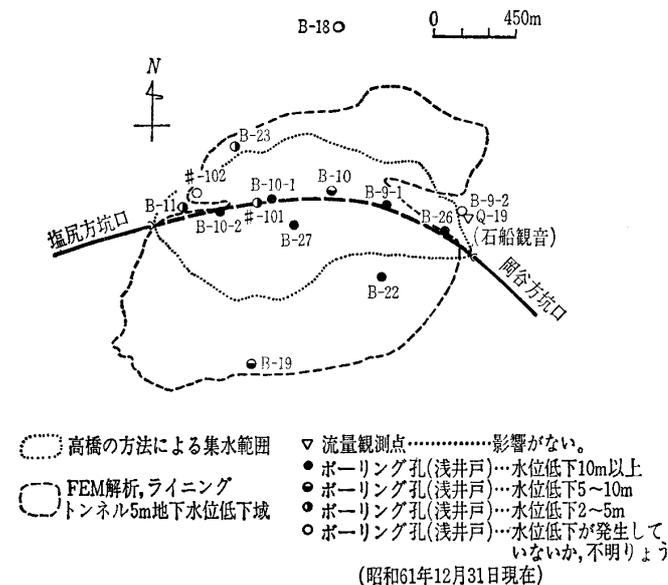


図-10 塩尻トンネル周辺の流量観測地点ならびに観測井の観測結果と影響予測との比較

Mシミュレーションによる地下水位低下範囲は、孔内水位が低下したこれらの観測井の位置も含んでおり、調査委員会のFEM解析による予測<sup>9)</sup>は適切であったと判断される。

## 5. あとがき

山岳地域におけるトンネル掘削工事では、地盤の状態が複雑なために、地下水状態の変化を正確に推定することは難しい。このような状況の中で、中央自動車道長野線トンネル湧水調査委員会<sup>8),9)</sup>では、地盤を三次元有限要素法によるモデル化によって、この問題を解決することを試みた。この方法においては、計算機の大記憶容量と長時間の計算時間が必要であるが、トンネル掘削と生活用水の枯渇の関係を客観的に明らかにする重要な環境影響評価の作業であったので、委員会では、その時点で使用可能と判断された以上の方法を用いた。

FEMによるシミュレーションの結果から、岡谷トンネル周辺の湧泉や井戸がトンネル掘削の影響を受けることが予想された。この結果をもとにして、水道水源となっていた滝の沢湧泉の枯渇に備えて、事前に地下水位低下の影響の少ない地域に代替水源となる揚水井を掘削したり、井戸の補償をしたりすることによって、事業者である日本道路公団は、工事による周辺住民への重大な影響を与えることなく工事を完了することができた。また、信仰の対象となっている石船観音の湧水への塩尻トンネルの影響が懸念されていたが、FEMによるシミュレーションの結果から、塩尻トンネル掘削の影響はほとんど受けないとの結論を出して関係者にも安心していただき、今日では、その予測の正しかったことも実証された。

今後のトンネル掘削工事においても、周辺地下水への影響評価が重要な課題となる場合には、ここで述べた予測方法が役に立つと思われる。

本報告をまとめる上で、貴重な資料を提供していただいた日本道路公団名古屋建設局の関係各位に感謝の意を表します。また、昭和55年以来、岡谷・塩尻トンネルの周辺地下水への影響をともに検討・審議された土木学会中部支部中央自動車道長野線トンネル湧水調査委員会の委員ならびに協力者(参考文献<sup>8),9)</sup>に、委員会の総括名簿が示されている)の各位に心から感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 土質工学会：建設工事と地下水，土質基礎工学ライブラリー19，pp.6～12，1980。
- 2) 石崎昭義：日本における鉄道トンネル工事に伴う湧水事例の研究の動向，国際トンネルシンポジウム'78論文集，B-3-1，1878。
- 3) Fukuoka, M.: Ground surface water decreased due to long tunnel excavation, Proc. Specialty Session on Geotechnical Engineering and Environmental Control, 9th

Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 2, pp. 83～85, 1977.

- 4) 大島洋志・西森紳一：トンネル工事を対象とした水文地質調査法の研究，鉄道技研報告，No. 1108，1978。
- 5) 早川敏彦・西川直輝：長大トンネル工事に伴う環境対策，鉄道土木，Vol. 22，No. 3，pp. 169～172，1980。
- 6) 早川敏彦ほか：地下水盆下のトンネル施工と水文調査，トンネルと地下，Vol. 11，No. 2，pp. 25～34，1980。
- 7) 植下 協・今泉繁良：中央自動車道長野線岡谷・塩尻トンネル湧水調査について，土木学会中部支部昭和56年度研究発表会講演概要集，pp. 206～207，1982。
- 8) 植下 協：中央自動車道長野線トンネル湧水調査委員会について，土木学会中部支部10年（昭和52年度～昭和61年度）の記録，土木学会中部支部，pp. 210～222，1988。
- 9) 土木学会中部支部中央自動車道長野線トンネル湧水調査委員会：中央自動車道長野線岡谷・塩尻トンネル湧水調査総括報告書，1987。
- 10) 高橋彦治：トンネル湧水に関する応用地質学的考察，鉄道技研報告，No. 279，1962。
- 11) 植下 協ほか：建設工事へのリモートセンシングの適用について，第20回土質工学研究発表会講演集，pp. 83～84，1985。
- 12) 植下 協ほか：広域建設計画における空からのリモートセンシング技術の利用，土と基礎，Vol. 33，No. 7，pp. 21～24，1985。
- 13) 大東憲二ほか：定常一非定常計算のカップリングによる地下水流動解析，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 265～266，1985。
- 14) 大東憲二ほか：山岳トンネル掘削に伴う地下水状態変化ならびにトンネル出水の予測，土と基礎，Vol. 34，No. 11，pp. 39～44，1986。
- 15) 大東憲二・岡島充典：孔内湧水圧測定試験（JFT）による透水パラメーターの推定について，第21回土質工学研究発表会講演集，pp. 1647～1648，1986。
- 16) Daito, K. and Ueshita, K.: A New Method of Determining Parameters of an Aquifer, Proc. of the 8th Asian Regional Conference on Soil Mech. and Found. Eng., pp. 33～36，1987。
- 17) 植下 協ほか：山岳トンネル掘削による湧水現象予測に関する研究，第17回土質工学研究発表会講演集，pp. 2365～2369，1982。
- 18) 芳賀宏二・大西宣二：岡谷・塩尻トンネル掘削に伴う周辺地下水状況の変化予測，第15回日本道路会議論文集，pp. 169～170，1983。
- 19) Ito, Y. and Shinagawa, M.: Dry-up of ground-water due to the Okaya Tunnel construction, Proc. Int. Symp. of Underground Works, Man and Environment, pp. 305～313，1983。
- 20) 大東憲二・広瀬裕行：山岳トンネル掘削工事による地表湧水量変化の予測，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 425～426，1984。
- 21) Ueshita, K. et al.: Prediction of tunnelling effect on groundwater condition, Proc. 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 2, pp. 1215～1219，1985。
- 22) 大東憲二ほか：山岳トンネル建設地域における地下水状態変化の原因分析について，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 777～778，1986。
- 23) 代田武夫ほか：糸静構造線の湧水地帯にトンネルを掘る（中央自動車道長野線岡谷トンネル），トンネルと地下，第17巻1号，pp. 19～28，1986。
- 24) 大東憲二・植下 協：山岳トンネル掘削による地下水状態変化の三次元FEM予測法，第22回土質工学研究発表会講演集，pp. 1585～1588，1987。

(原稿受理 1989. 2. 19)