

特別
寄稿

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・塩尻トンネルを例として—

大東地盤環境研究所 所長 大東 憲二

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。湧水や井戸の枯湯が、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¹⁾、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^{2), 3)}。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が生じ、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⁴⁾。最近では、リニア中央新幹線静岡工区の南アルプストンネル掘削に伴うトンネル湧水による大井川の流量減少やトンネル上部の地表生態系への影響が懸念され、トンネル掘削工事に着工できない事態も生じている。

本稿では、著者が1980年代に行った山岳トンネル掘削に伴う地下水環境影響評価に関する研究の一部を紹介する。これらの研究から得られた知見は、2020年(令和2年)4月に国土交通省が設置したリニア中央新幹線静岡工区有識者会議でも活かされており、著者も本有識者会議に委員として参画している。

日本道路公団(現NEXCO)では、1979年(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-1-1参照)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^{5), 6)}、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、1980年(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^{7), 8)}。以後、この委員会は、岡谷・塩尻両トンネルが完成する1986年(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資料として提供し続けた⁹⁾。

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

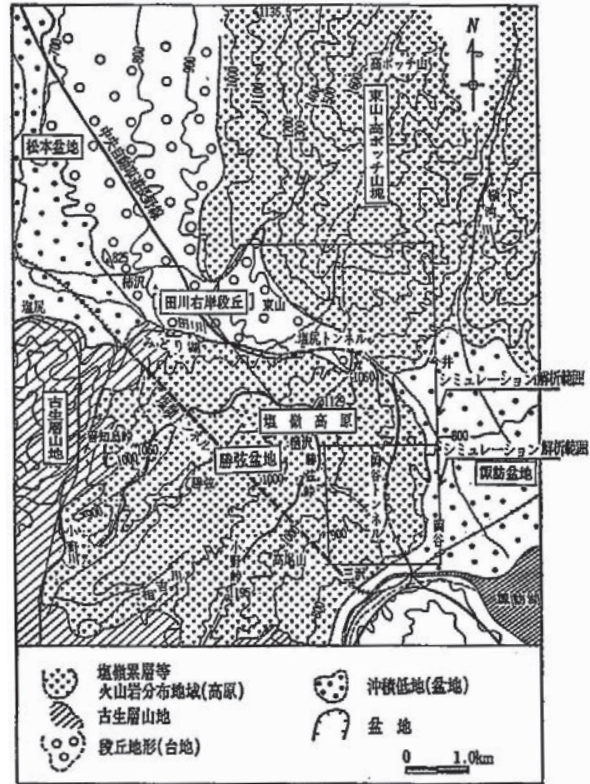


図-1.1 中央自動車道長野線の岡谷トンネル・塩尻トンネルの地形・地質的環境とシミュレーション解析範囲

泉水を飲料水や農業用水として利用していた。湧泉の中には、信仰の対象となっているものもあった。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1980年(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¹⁰⁾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^{11), 12)}、トンネル掘削の周辺地下水状態への影響についての非定常計算手法^{13), 14)}、地山の透水係数と比貯留率の求め方^{15), 16)}、その他の関連調査研究^{17)~24)})がなされ、可能な限り各種の学会や研究集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。

本稿では、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」^{8), 9)}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の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-2-1に示した。これらの手順の概要は、次のとおりである。

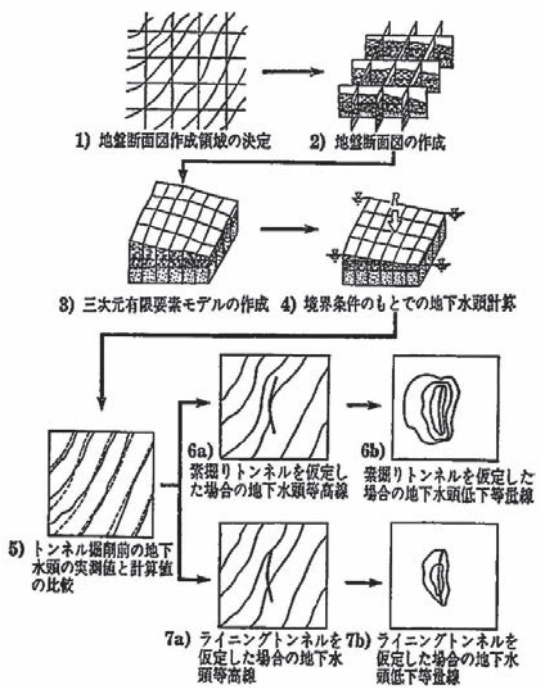


図-2.1 予測手法の流れ

- 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。

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、実際に近いトンネル完成後の地下水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。

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

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。

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

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。

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

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、 α 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。

α 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

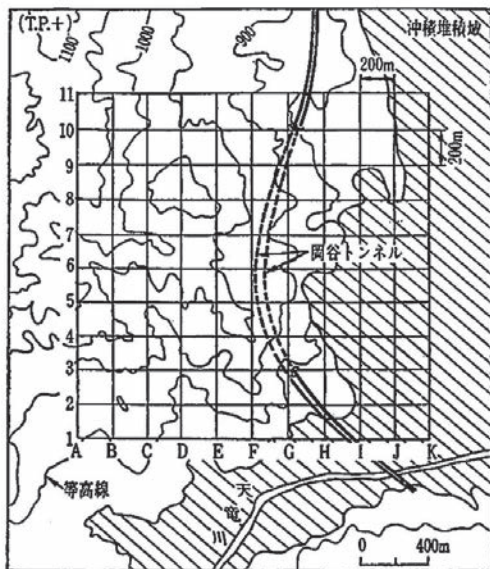


図-3-1 岡谷トンネルの路線と地質断面図の位置

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-3-1に示すような東西、南北各200m間限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-3-2、図-3-3に示すような、断層も要素として考慮した1,200節点、5,376四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監に一致する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⁹⁾。

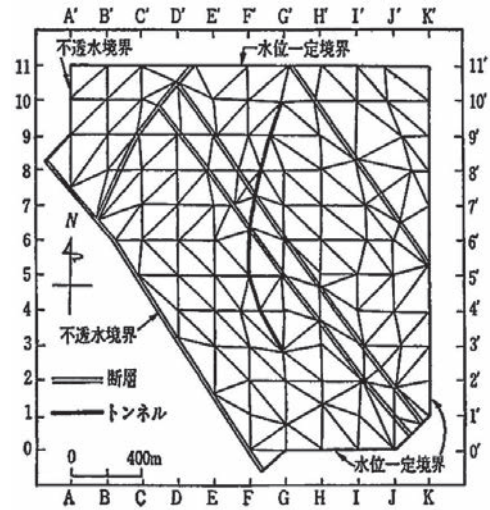


図-3-2 岡谷トンネル周辺地盤の三次元FEMモデルの要素分割平面図

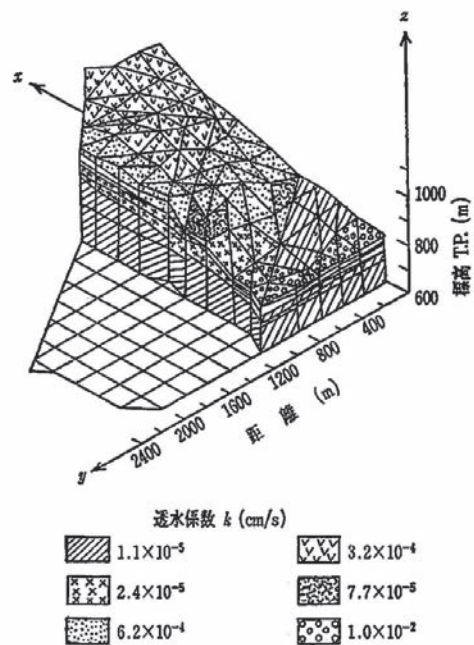


図-3-3 岡谷トンネル周辺地盤の三次元FEMモデルの立体図

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、トンネル位罫よりも約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⁹⁾を参考にしながら図-3-4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した。

地層名	透水係数 k (cm/s)				
	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
輝石安山岩層 (K_1)			↓		
輝石安山岩層 (E_3)	●	●	●	●	●
凝灰角礫岩層			↓		
角閃石安山岩層 (E_2)		↓			
泥質凝灰角礫岩層 (E_1)	●	●	●		
沖積砂礫層					↓

↓: FEMモデルに与えた透水係数
●: 現場透水試験による透水係数

図-3-4 各地層の透水係数

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、1986年(昭和61年)3月25日に供用が開始されたが、1986年(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-4-1である。

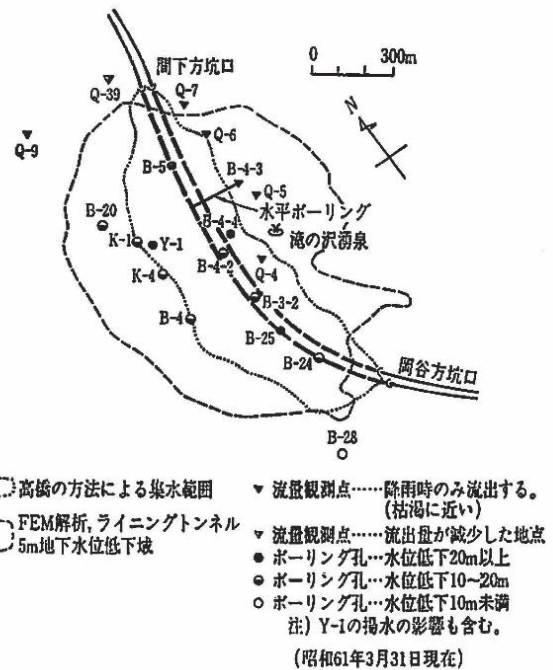


図-4-1 岡谷トンネル周辺の流量観測地点ならびに観測井の観測結果と予測結果との比較

また、図-4-1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の孔内水位の経時変化を図-4-2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-4-2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位も示した。観測井B-20では、実測地下水位は素掘りトンネルを仮定した計算地下水位にほぼ等しく、他の観測井では、実測地下水位がライニングトンネルを仮定した計算地下水位にほぼ等しい。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-4-2は、トンネル掘削の地下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。

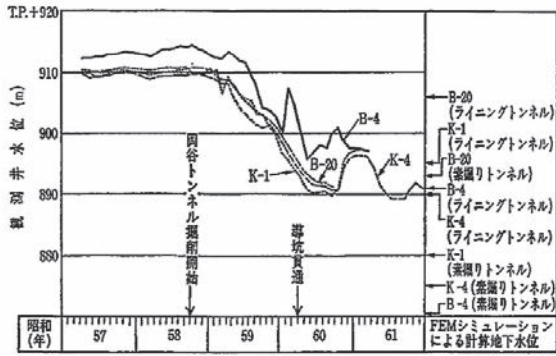


図-4-2 高橋の方法による岡谷トンネル集水範囲の境界線付近またはその外側にある観測井実測水位への影響とFEMシミュレーションによる予測値

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位と高橋の方法による予測集水範囲を図-4-3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。

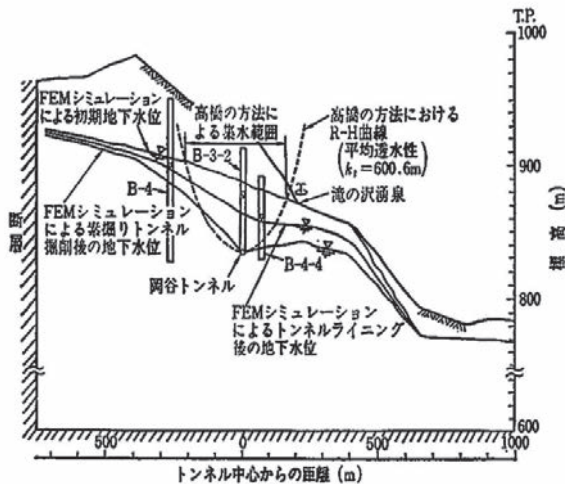


図-4-3 滝の沢湧泉を含む東西断面における計算地下水位と実測地下水位の比較

また、図-4-3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1986年(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面は、これらの実測地下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。

FEM以外にも、山岳トンネル掘削に伴う地下水環境影響評価を行うことの出来るシミュレーション手法は幾つかある。その一つの水収支ブロック法について、次章以降で述べる。

5 水収支ブロック法による地下水環境影響評価

5.1 水収支ブロック法の概要

トンネルが掘削される山岳地域の水収支の概要を模式的に示せば、図-5-1-1のようになる。

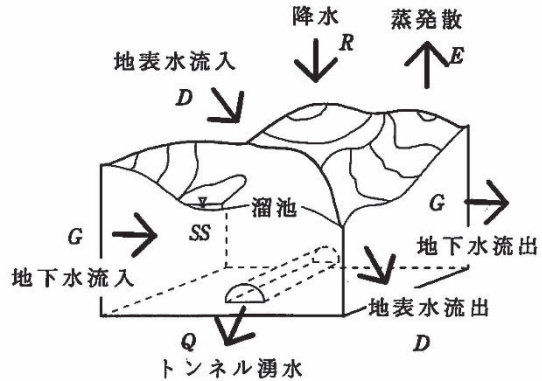


図-5-1-1 水収支の模式図

この図において、降水(R)、蒸発散(E)、地表水流入出(D)、地下水流入出(G)、トンネル湧水(Q)および地盤内貯留(SS)の関係は次式で示される。

$$R = E + D + G + Q + SS \quad (8)$$

ここに、 R は降水量(降雨量または降雪量)、 E は水面、土壌からの蒸発量と植物からの蒸散量との和、 D は高所から低所へ河川や山腹斜面に沿って流下する地表水の流入量、 G は高所から低所へ向って流下する地下水の流入量、 Q はトンネルから流出する湧水量、 SS は地表の凹部や土壌中の水分貯留量である。

この水収支の考え方を、解析対象領域の地盤モデルを構成する要素ブロック全てに個別に適用し、要素ブロック相互の水収支を関連付ける方法が水収支ブロック法である。この方法は、微分形式の地下水流動の基礎方程式を用いず、地盤モデルを構成する要素ブロック内の水の過不足のみを扱うため、計算時間が有限要素法と比較しても大幅に短縮される。

水収支ブロック間の相互関係は以下ようになる。まず、水収支ブロック間の相互関係の模式図を、図-5-1-2に示した。図-5-1-2は、トンネルが存在する場合の横断方向断面を模式的に示したもので、トンネル断面より大きなマス目でブロック化されている。個々のブロックは、固有の透水係数、有効空隙率、および地下水頭を有し、地表面の存在する地表ブロックは、地表面流量と地下水浸透量を求めるためのタンクモデルの諸係数と地盤標高を有している。

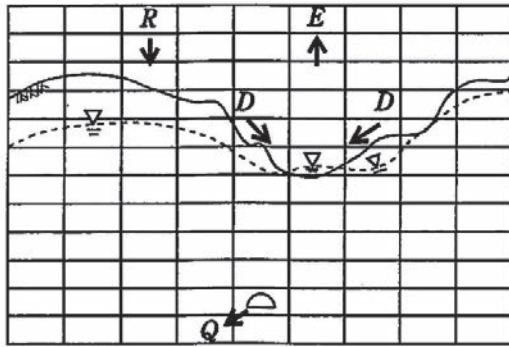


図-5-1-2 水収支ブロックの鉛直断面模式図

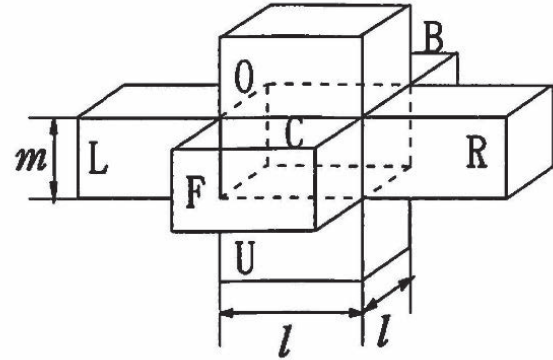


図-5-1-3 水収支ブロックの相互関係説明図

この水収支ブロックモデルでは、トンネルを掘削しない時には、気象現象(降水量, 気温, 風速)の変化によって、地下水位と地表流量に変動が生じるだけであるが、トンネルを掘削した時の影響の現れ方は、次のようになる。

- 1) トンネル掘削によって、トンネルの存在するブロックではトンネル湧水が発生する。
- 2) トンネル湧水が発生すれば、まずトンネルの存在するブロックの地下水頭が低下する。さらに、この影響は、トンネルの存在するブロックを中心として隣接する上下前後左右の6方向のブロックへ及ぶ。
- 3) この影響によって、トンネルの存在するブロックに隣接するブロックの地下水頭が低下する。
- 4) この地下水頭の低下の影響が地表面ブロックにまで達すると、隣接するブロックの地下水位が地表面標高よりも高い場合に生じる湧水地点での地表流量に影響を及ぼす。しかし、湧水地点以外の地表流量は、タンクモデルによって求められているために影響はない。

このように、この水収支ブロックモデルでは、①トンネル湧水に関するブロックの地下水頭変化と、②地表条件によるブロックの地下水頭変化の2つを考えればよい。①トンネル湧水に関するブロックの地下水頭変化トンネル湧水量は、トンネル周辺地山の透水係数, 地下水頭, トンネル直径, ブロック内のトンネル延長, トンネル施工基面高をもとにして求めることができる。

トンネル湧水が発生すると、トンネルの存在するブロックの地下水頭は低下する。ブロックの平均的な地下水頭低下量(Δh)は、次式で表される。

$$\Delta h = q/n_e \quad (9)$$

ここに、 q はトンネル湧水量、 n_e は:有効空隙率である。

次に、図-5-3-1において、中心ブロックCを囲む上下前後左右の6ブロック(F, R, B, L, O, U)が、中心ブロックCの水頭変化に関係していると仮定する。

各々のブロックの地下水頭(h)、透水係数(k)、および有効空隙率(n_e)分かれば、単位時間内におけるブロックCの地下水頭変化は、Darcyの法則によって求められるブロックCとF, CとR, CとB, CとL, CとO, CとUの間の地下水頭変化の総和として与えることができる。例えば、中心ブロックCがトンネルを有するブロックであるならば、このブロックCの地下水頭は、周囲のブロックの地下水頭に対して低下しているため、ブロックCは、周囲のブロックからの地下水の補給を受けて地下水頭が回復することになる。しかし、その補給された量に相当する分だけ周囲のブロックの地下水頭は低下することになる。

各ブロックの地下水頭(h)、透水係数(k)、および有効空隙率(n_e)を各ブロックの記号を添字して表示することにする(例えば、ブロックCでは、 h_c, k_c, n_{ec})。また、全てのブロック底面の1辺の長さを l 、有効断面高さを m とすると、相対するブロックCとFの平均的な透水係数(k_{cf})は、次式で表される。

$$k_{cf} = 2k_c k_f / (k_c + k_f) \quad (10)$$

したがって、ブロックFからブロックCへの単位時間当りの流入量(ΔQ_{CF})は、次式で表される。

$$\Delta Q_{CF} = \{k_{cf} (h_f - h_c) / l\} l m \quad (11)$$

これにより、ブロックFの地下水頭は、 $\Delta Q_{CF} / n_{eF}$ だけ低下し、 $h_f - \Delta Q_{CF} / n_{eF}$ となり、ブロックCの地下水頭は、 $\Delta Q_{CF} / n_{eF}$ だけ上昇して、 $h_c + \Delta Q_{CF} / n_{eF}$ となり、両ブロックの地下水頭差は小さくなる。同様にして、この計算を隣接する他の5ブロックに対しても行い、 $\Delta Q_{CB}, \Delta Q_{CL}, \Delta Q_{CR}, \Delta Q_{CO}, \Delta Q_{CU}$ を求めれば、中心ブロックCの地下水頭上昇量(Δh_c)は、次式で表される。

$$\Delta h_c = (\Delta Q_{CF} + \Delta Q_{CB} + \Delta Q_{CL} + \Delta Q_{CR} + \Delta Q_{CO} + \Delta Q_{CU}) / n_{eC} \quad (12)$$

②地表条件によるブロックの地下水頭変化

地下水面より上にあるブロックでは、ブロックの代わりにタンクがあると仮定する。地下水面があるブロックへの地表面からの浸透量は、タンクの諸係数, 降水量, 気温, 風速をもとにして求めることができる。

地表面からの浸透量によって、地下水面があるブロッ

クの地下水頭は上昇する。このブロックの地表面からの浸透量による平均的な地下水頭上昇量(Δh)は、降水浸透量(G)と有効空隙率(n_e)によって次式で表される。

$$\Delta h = G/n_e \quad (13)$$

ここまで述べてきた水収支ブロックモデル法では、以下のような情報が解析に必要である。

- 1) 地表ブロックに関して: タンクモデルの諸係数
- 2) 他のブロックに関して: 透水係数, 有効空隙率, 地下水頭
- 3) 気象に関して: 降水量, 気温, 風速
- 4) トンネルに関して: トンネル直径, 経時的切羽位置, 施工基面高

これらの情報の相互関係をまとめると、図-5-1-4のようである。

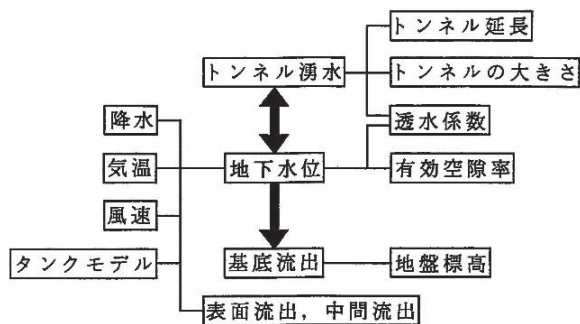


図-5-1-4 水収支ブロック法による計算に必要な情報の相互関係

5.2 解析に必要なパラメータ

水収支ブロック法を用いた水収支シミュレーション計算を行うには、降水、地表水、地下水、トンネル湧水等のパラメータについて、詳しく考察する必要がある。以下にこれらの因子について説明する。

1) 降水量

降水量は、経緯度、標高、地形、気温、気圧配置等の諸因子によって左右されるものである。したがって、既存のデータから対象地域の降水量を予測するためには、長期観測データのある地点と対象地域の降水量の相関関係を調べ、適宜に補正する必要がある²⁵⁾。また、山岳地域を対象とする場合には、冬期の雪氷に対する考慮が必要である。降水が雨ではなくて雪氷の場合、それが地表に流出したり、地下へ浸透したりするのは、気温が上昇し、融解した時である。したがって、降雪量はそのまま降水量として扱うのではなく、気温が上昇して積雪が融けて流出や浸透に寄与できるようになった時期に、融雪量を降水量に置換する必要がある。例えば、雪氷を考慮する際に次のように仮定できる。

- ① 降水は、平均気温が0°C以下ならば雪氷とする。
- ② 融雪は気温のみに左右される。

気温と融雪量との関係は、経験的に、雪面の温度 T_s

(°C)と雪面上1mの高さの気温 T_i (°C)、風速 V_i (m/s)がわかれば、顕熱伝達量 Q_A は次式で表される²⁶⁾。

$$Q_A = 1.59(T_i - T_s)V_i \quad (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}) \quad (14)$$

雪氷を1g融解するのに必要なエネルギーは、約333.15J(79.7cal)であるので、顕熱伝達量で融解する雪氷量 M_s は次式で表わされる。

$$M_s = 1.14(T_i - T_s)V_i \quad (\text{mm/day}) \quad (15)$$

今回は、雪面の温度 T_s を0°Cと仮定し、上式によって降水が雪氷である場合を考慮する。

2) 蒸発散量

地表面から大気中へ失われる水蒸気の輸送過程は、

- ① 自由水面からの蒸発
- ② 土壌面からの蒸発
- ③ 植物の葉などによって遮断された降水の蒸発
- ④ 植物による蒸散

であり、これらを一括して蒸発散という。蒸発散の推定方法として、水収支法、渦相関法、熱収支法、空気力学法などがあり、その計算方法として、

- ① 蒸発計による蒸発量に経験的な定数を乗じる方法
- ② 気候資料から可能蒸発散量を求め、実蒸発散量を計算する方法

の2通りの方法がある。蒸発散量の測定はしていないが気候資料がある程度揃っている場合には、②の方法で推定することが実用的である。推定式²⁷⁾としては、ソーンズウェイトの式、ハモンの式、ペンマンの式等があるが、今回は、ソーンズウェイトの式が夏から秋にかけて過大、冬から春にかけて過小の推定値を与えるという欠点を改良したハモンの式によって蒸発散量を推定する。ハモンの式は、次式で表される。

$$E_{PT} = 0.140D_o^2 q_t \quad (16)$$

ここに、

E_{PT} : 月平均日蒸発散量(mm/day)

D_o : 日照時間(12hr/day)

q_t : 月平均気温に対する飽和絶対温度(g/m^3)

3) 地表流

地表流の成分としては、地表面に貯留された降水が、貯留の限界に達した時に直接流出する地表面流出、地表面から浸透した降水が地下水面に達する前に不飽和帯から流出する中間流出、および地下水面が地表面と交差する部分から流出する基底流出がある。これらの流出量は、以下のようにして求めることにする。

① 地表面流出, 中間流出

地表面流出と中間流出は、タンクモデルを用いて求める。タンクモデルは、洪水の流出解析のために菅原²⁸⁾が提案した手法であり、このモデルでは、長期流出を表す場合には、図-5-2-1に示す4段のタンクが用いられる。

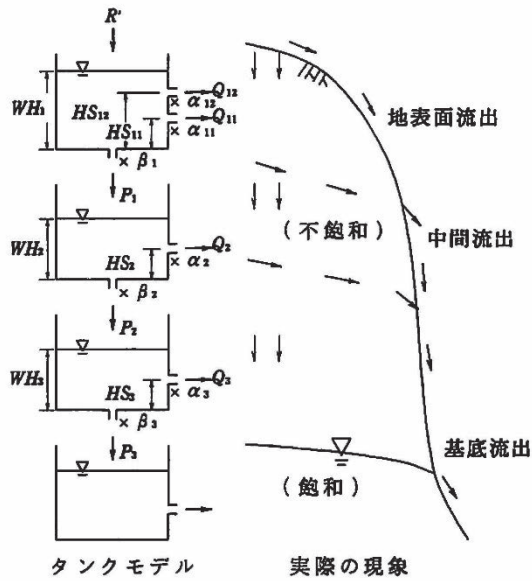


図-5-2-1 タンクモデルの概要

$$\left. \begin{aligned} Q_{11} &= a_{11}(WH_1 - HS_{11}) \\ Q_{12} &= a_{12}(WH_1 - HS_{12}) \\ Q_2 &= a_2(WH_2 - HS_2) \\ Q_3 &= a_3(WH_3 - HS_3) \\ P_1 &= \beta_1 WH_1 \\ P_2 &= \beta_2 WH_2 \\ P_3 &= \beta_3 WH_3 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここに、 HS_{11} 、 HS_{12} 、 HS_2 、 HS_3 はタンクの底面から各流出孔までの高さ(mm)、 α_{11} 、 α_{12} 、 α_2 、 α_3 は各流出孔からの流出率(1/day)、 β_1 、 β_2 、 β_3 は各浸透孔からの浸透率(1/day)である。

水収支シミュレーションでは、 Q_{11} 、 Q_{12} を表面流出、 Q_2 、 Q_3 を中間流出と仮定する。

②基底流出

地下水面と地表面とが交差することによって生じる基底流出を考慮、できるように、図-5-2-2に示すようなモデルを考える。

1段目のタンクからの流出は地表面流出、2段目、3段目のタンクからの流出は中間流出、4段目のタンクからの流出は基底流出を表していると考えられる。一般に、タンクモデルでは、基底流出部分を流域によって一定の値としているために、地下水位変動の影響を十分に再現しているとはいえない。そこで、今回は、基底流出は次項で説明する方法により求めることとし、表面流出量と中間流出量の推定のみでタンクモデルを適用する。地表面から地下水面までの深さが浅い場合には、中間流出が無く、表面流出と基底流出だけであると考えられるので、1段のタンクを用い、また、地表面から地下水面までの深さが深い場合には、中間流出を考慮した3段のタンクを用いることとした。

3段のタンクモデルにおける連続式は、それぞれ以下のように表される。

$$\frac{dWH_1}{dt} = R' - (Q_{11} + Q_{12}) - P_1 \quad (17)$$

$$\frac{dWH_2}{dt} = P_1 - Q_2 - P_2 \quad (18)$$

$$\frac{dWH_3}{dt} = P_2 - Q_3 - P_3 \quad (19)$$

ここに、 Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_2 、 Q_3 は各流出孔からの流出量(mm/day)、 P_1 、 P_2 、 P_3 は各タンク下部の浸透孔からの浸透量(mm/day)、 R' は降水量から蒸発散量を引いた量(mm/day)、 WH_1 、 WH_2 、 WH_3 は各タンクの水位である。また、各孔からの流出量および浸透量の運動式は以下のように表される。

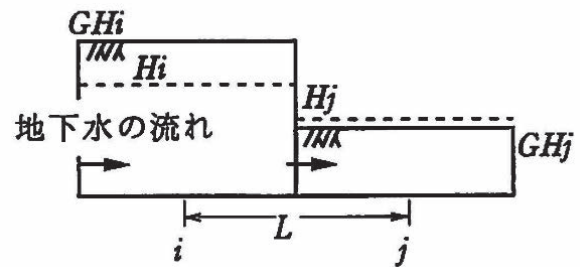


図-5-2-2 基底流出の模式図

このモデルでは、基底流出は、Darcyの法則に従って、地下水位の高い所から低い所へ向かって流出するので、 j ブロックで湧水が発生する(地下水位が地盤標高よりも高い場合)ならば、 j ブロックよりも地下水位の高い*i*ブロックからの流入量が*j*ブロックにおける基底流出による湧水量と考えられる。これより、基底流出量(Q_B)は、次式で示される。

$$Q_B = 2k_i(H_i - H_j)A/L \quad (21)$$

ここに、 k_i : i ブロックの透水係数、 H_i 、 H_j :各ブロックの地下水頭、 A :通水断面積、 L :各ブロック中心間の距離である。

4) 地下水流

例として、図-5-2-3に示す3個のブロックの中心ブロック*j*における地下水の流入・流出を考えてみる。

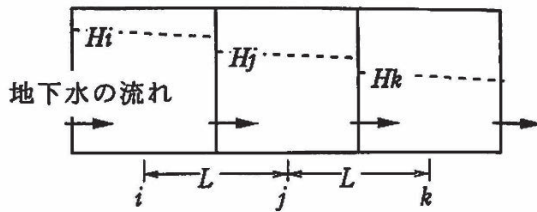


図-5-2-3 地下水流入出の模式図

地下水の流動がDarcyの法則に従うものとする、 i ブロックから j ブロックへ流入してくる単位時間当りの地下水流入量(G_{IN})と j ブロックから k ブロックへ流出する単位時間当りの地下水流出量(G_{OUT})は次式で示される。

$$G_{IN} = k_{AV(i-j)}(H_i - H_j)A/L \quad (22)$$

$$G_{OUT} = k_{AV(j-k)}(H_j - H_k)A/L \quad (23)$$

ここに、

$k_{AV(i-j)}$: i ブロックと j ブロックの平均透水係数
 $(=2k_i k_j / (k_i + k_j))$

$k_{AV(j-k)}$: j ブロックと k ブロックの平均透水係数
 $(=2k_j k_k / (k_j + k_k))$

k_i, k_j, k_k : i, j, k の各ブロックの透水係数
 H_i, H_j, H_k : i, j, k の各ブロックの地下水頭
 A : 通水断面積

L : 各ブロック中心間の距離

5) 地下水浸透

地下水は、絶えず地表における降水や融雪による涵養を受けている。一般に、地表水と地下水の間には空気が存在しているために不飽和浸透を考える必要がある。

不飽和浸透は、浸透領域内に空気層がある分だけ飽和浸透よりも浸透速度が遅くなると考えられている。しかし、その他の傾向は、Darcyの法則に従うとみなされるので、不飽和透水係数(k')を用いると、単位時間内の地表面から地下水面への浸透量(ΔG)は、

$$\Delta G = k' \quad (24)$$

と表すことができる。不飽和透水係数は、飽和度と強い相関関係があることが知られているが、地盤の飽和度を測定し、不飽和透水係数を求めることは、容易でない。

そこで、タンクモデルを用いて簡便に不飽和浸透量を算定することとした。地表面から地下水面までの深さが浅い場合には1段のタンクモデルを用い、深い場合には3段のタンクモデルを用いることにしたので、それぞれの場合の地下水面への浸透量(ΔG_{TANK})は、式(20)の P_1, P_3 と等しい。

タンクモデルを地下水面への浸透量の算定に用いる長所は、以下の点である。

①降水量と流域での流量の観測結果があれば、モデル作成は比較的簡単であるので、計算対象領域内の数箇所の

流域でモデルを設定すれば、地形、地質を考慮することにより、流域の観測結果がない流域についても、浸透量を算定することができる。

②日々の降水量に応じて浸透量が求められるために、非定常的な解析に都合がよい。

以上より、地下水流入量(G_{IN})と地表からの浸透量(ΔG_{TANK})によるブロック j における単位時間内の地下水頭の変動量(Δh)は、次式で表される。

$$\Delta h = \{(G_{IN} - G_{OUT}) + \Delta G_{TANK}\} / n_e \quad (25)$$

ここに、 n_e : ブロックの有効空隙率である。

6) トンネル湧水

トンネル湧水量を推定する計算式は、境界条件の与え方の違いにより多くの式が提案されているが²⁹⁾、これらの式はいずれも、地下水位、地盤の透水性、トンネル直径、トンネル延長の関数となっている。例えば、トンネル掘削時の湧水量を求める方法として、集水暗渠の式³⁰⁾を用いる場合には、以下ようになる。

図-5-2-4に示すように、 x 軸と y 軸をとると、地下水面 $x=0$ が等ポテンシャル線であるためには、 $(+x_1, 0)$ にある吸水源と対象の位置 $(-x_1, 0)$ に、同じ強さの湧水源をおけばよい。したがって、速度ポテンシャル ϕ は、次式で表される。

$$\phi = C_0 \ln \frac{(x-x_1)^2 + y^2}{(x+x_1)^2 + y^2} \quad (26)$$

これより、 $(+x_1, 0)$ の位置における速度ポテンシャル $\phi_{x=x_1}$ は、次式で表される。

$$\phi_{x=x_1} = kh_{x=x_1} = 2C_0 \ln \frac{r_0}{2x_1} \quad (27)$$

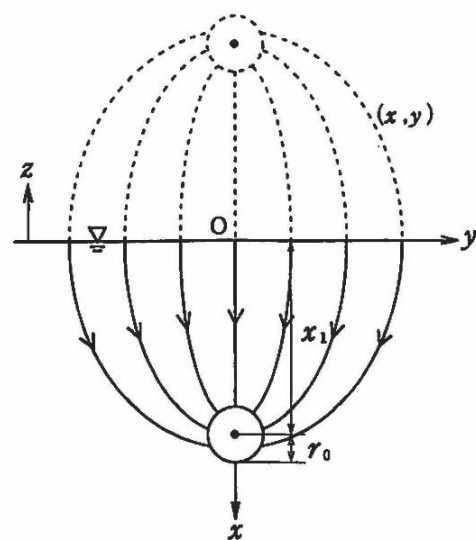


図-5-2-4 集水暗渠周囲の流線

また、単位長さ当りの集水量(q)は、次式によって求められる。

$$q = 2 \int_0^{\infty} u_{r=0} dy = -2 \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{r=0} dy = 8C_0 x_1 \int_0^{\infty} \frac{dy}{y^2 + x_1^2}$$

$$= 8C_0 x_1 \left(\frac{1}{x_1} \tan^{-1} \frac{y}{x_1} \right)_0^{\infty} = 4\pi C_0 \quad (28)$$

式(27)と式(28)から C_0 を消去すると次式が得られる。

$$q = - \frac{2\pi k h_{x=x_1}}{\ln \frac{2x_1}{r_0}} \quad (29)$$

ここに、

x_1 : 地下水面からトンネル中心までの距離

$h_{x=x_1}$: 地下水面の位置座標をゼロとして測定したトンネル中心における全水頭

k : トンネルの存在するブロックの透水係数

r_0 : トンネルの半径

水収支シミュレーションに用いるトンネル湧水量は、式(29)にブロック内の掘削長を乗じて求めることができる。

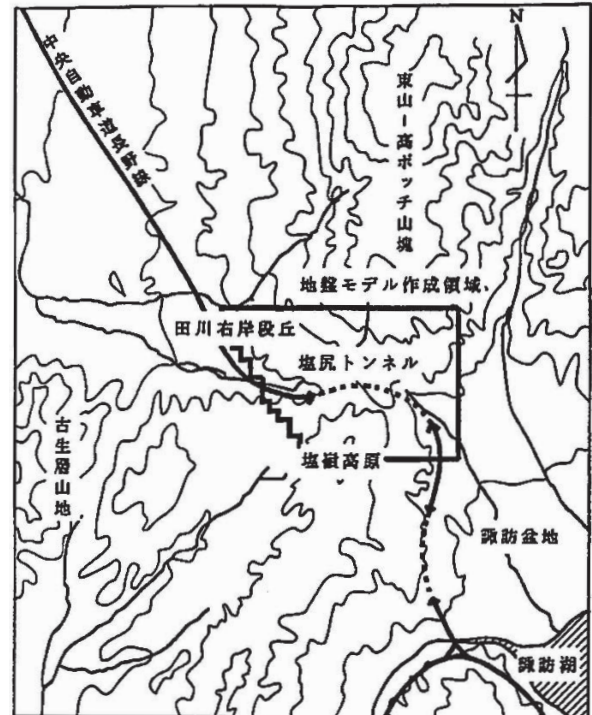


図-6-1-1 塩尻トンネル周辺地域の地形概要と地盤モデル作成領域

6 水収支ブロック法の適用例 (塩尻トンネル)

6.1 解析対象地域の水文概況

中央自動車道長野線の塩尻トンネル掘削地域の表流水は飲料用や濯瓶用に利用されているため、トンネル掘削によってこれらの地表水の流量が減少または枯渇すると重大な問題となる。したがって、トンネル掘削に伴う地下水状態への影響を事前に予測し、地表水への影響が避けられないならば、事前に対策を講じておくことが必要であった。そこで、前章で説明した水収支ブロック法を用いて、この地域の非定常浸透流解析を実施することにした。塩尻トンネル周辺地域の地形概要と地盤モデル作成領域を図-6-1-1に、また、解析対象地域内を流れる河川とその流域を図-6-1-2に示した。

図-6-1-2において、流域S-11～S-22を流れる小河川は、合流して塚間川を形成し、また流域S-23～S-32を流れる小河川は、合流して田川を形成している。これらの流域は、B-20を除いて、水源の大部分を降水とする河川が流れる流域であり、地表流量は降水量に直接的に反応した変動傾向を示す。流域B-20は、解析対象地域内の代表的な湧水地点である石船観音からの湧水を地表水的主要な水源としており、その流量は穏やかな季節変動を示している。

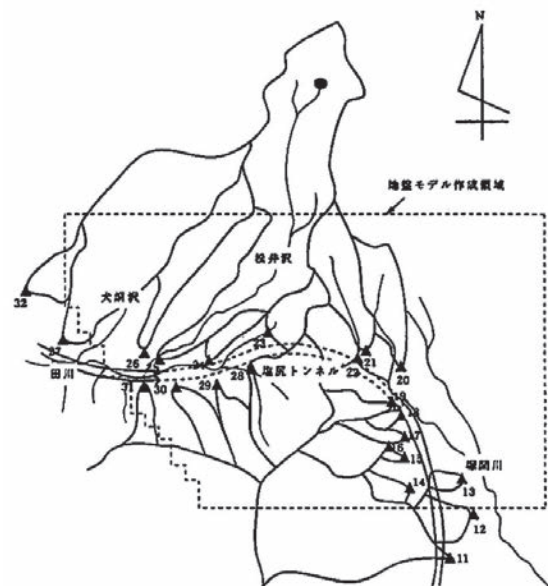


図-6-1-2 解析対象領域内の河川とその流域

6.2 解析手順

今回行う水収支ブロック法による地下水流動解析は、以下の流れで行う。この流れについて以下に説明する。

1) 地形・地質調査地域と地盤モデル作成領域の設定

塩尻トンネルを中心として、東西・南北それぞれ約4kmの地形・地質調査地域を設定し、その中で200mごとの地盤断面図を作成した。地盤モデルの作成領域は、図-6-2-1に示した範囲(東西:3,600m, 南北:2,200m, 面積:7.09km²;但し、南西部は一の谷断層を境界とする)である。

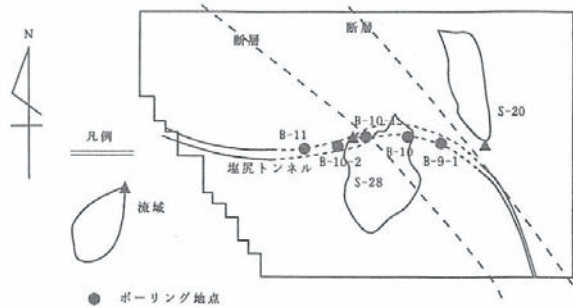


図-6-2-1 地盤モデルの作成領域

2) 地盤モデルとタンクモデルの作成

地盤モデルは、図-6-2-2に示すような100m×100m×50mの水収支ブロックを10,635個用いて作成した。そして、地盤断面図をもとにして、地盤モデルの構造が実際の地盤構造とできるだけ対応するように、図-6-2-3に示すような地質領域の区分を層厚50mの各層ごとに行った。また、各地質の透水係数と有効空隙率は、水文地質調査結果を基にして設定した。

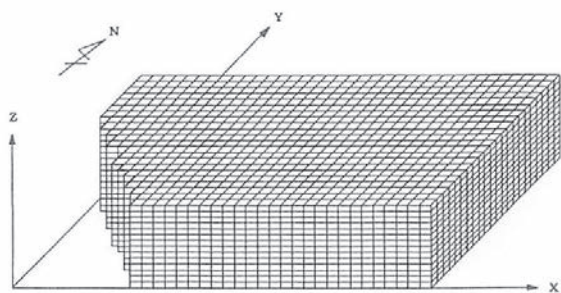


図-6-2-2 水収支ブロックで分割された地盤モデルの鳥瞰図

図-6-1-2に示された流域内では、8箇所の堰で毎日流量が観測されていた。これら8箇所の流量と流域の地形・地質条件を参考にして、地表面を含む水収支ブロックに与えられているタンクモデルに入力すべき諸定数を設定した。なお、地表面から地下水面までの深さが30m未満の水収支ブロックでは、タンクモデルの段数を1段とし、地表面から地下水面までの深さが30m以上の水収支ブロックでは、タンクモデルの段数を3段とした。

3) 地盤モデルに与える境界条件の設定

地盤モデルに与えた境界条件は、次のとおりである。

- ① 東西南北全ての境界ブロックでは、地盤断面図に示された地下水位を与えて一定とした。
- ② トンネル掘削に伴う地下水状態の変化がほとんどないと思われるトンネル標高よりも約230m深い標高600mの面を不透水面と仮定した。

4) 初期地下水位の計算と地盤モデルの修正

まず、トンネル掘削条件を与えずに、年平均の降水量のみを与えて、各水収支ブロックの地下水位が一定の値に収束するまで水収支ブロック間の地下水流動解析を

行った。そして、地下水位観測を行っている各ボーリング孔の地点における計算地下水位とトンネル掘削前の実測地下水位とを比較し、計算地下水位が実測地下水位に近づくように地盤モデルの透水係数と有効空隙率を修正した。また、このようにして求めた地下水位を非定常浸透流解析の初期地下水位とした。

5) トンネル掘削前の地表流量と地下水位の計算と地盤モデルの修正

トンネル掘削前の期間に観測された気象データ(降水量は塩尻峠、気温と風速は諏訪測候所で観測されたデータ)を入力して、地表流量、地下水位の経時変化を1日ごとに計算した。これらの計算値と実測値を比較して、計算値が実測値に近づくように地盤モデルに与える透水係数と有効空隙率を修正した。このとき、透水係数が地下水位の絶対値に大きく関係しており、有効空隙率が降雨浸透に伴う地下水位の変動速度に大きく関係していることを考慮した。

6) トンネル掘削中の地表流量、地下水位およびトンネル湧水量の計算と地盤モデルの修正

トンネル掘削中の期間に観測された気象データ(降水量は塩尻峠、気温と風速は諏訪測候所で観測されたデータ)とトンネル掘削条件を入力して、地表流量、地下水位およびトンネル湧水量の経時変化を1日ごとに計算した。これらの計算値と実測値を比較して、計算値が実測値に近づくように再度地盤モデルに与える透水係数と有効空隙率を修正した。

7) 水文環境変化の将来予測

諏訪測候所における過去30年間の記録に基づいた平年値の降水量や気温などの気象データを入力してトンネル完成後5年間の地表流量、地下水位およびトンネル湧水量の経時変化を予測し、トンネル掘削に伴うこれらの水文環境変化の予測を行った。

6.3 トンネル掘削前の地下水位と地表流量の計算結果

トンネル掘削前の期間である1983年(昭和58年)4月1日から1984年(昭和59年)3月31日におけるボーリング孔B-9-1とB-10の地点における地下水位の経時変化の実測値と計算値を比較した。また、流域S-20における地表流量の経時変化の実測値と計算値も比較した。なお、流域S-20の実際の流域面積は0.226km²であるのに対して、地盤モデル上の流域面積は、100m×100mの正方形の集合として表されるために、実際よりも広い0.290km²となることから、地表流量の計算値を実測値と比較するために、地盤モデルの流域面積と実際の流域面積の比である0.779を地表流量の計算値に掛けて補正を行った。また、この計算で地盤モデルに与えた透水係数と有効空隙率は、前場調査結果を基にして推定した。これらの結果から、以下のことが分かった。

1) ボーリング孔B-9-1とB-10の地点における地下水位は、ともに降水量には敏感に反応しておらず、計算値は実測値とほぼ同じような水位変動を示していた。

2) 流域S-20の地表流量は、前述のように、湧泉からの地下水流出成分が大部分であるため、実測値はかなり穏やかな変動傾向を示していた。この変動傾向は、計算値にもよく現れていた。

以上の結果より、今回の地盤モデルは、トンネル掘削前実際の地下水位の変動傾向をかなりよく再現できていると考えられた。なお、地下水位と地表流量の絶対値は、実測値と計算値とで完全には一致していないが、これは地盤モデルを構成する個の水収支ブロックの大きさが100m×100m×50mであり、その水収支ブロックの中心で地下水位を代表させたことが原因の一つとして考えられた。

6.4 トンネル掘削中の地下水位と地表流量の計算結果

トンネル掘削中の地下水流動解析で用いた地盤モデルに与えた透水係数と有効空隙率は、トンネル掘削中の地表流量や地下水位の経時変化の計算値を実測値に近づけるために修正した。

また、地盤モデル上のトンネルルートのご略を図-6-4-1に示した。トンネル掘削条件は、実際の施工計画を基にして、岡谷側と塩尻側の両坑口から掘削するようにトンネル各区間の施工期間を設定した。

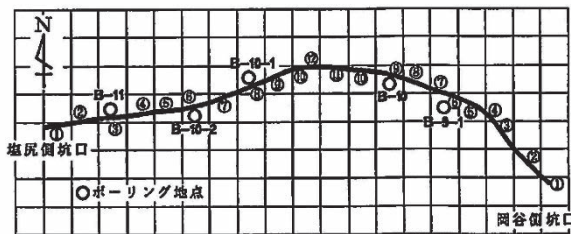


図-6-4-1 塩尻トンネルルートのご略図

トンネル掘削前および掘削中の期間である1984年(昭和59年)4月1日から1985年(昭和60年)11月30日のボーリング孔B-9-1の地点における地下水位の経時変化の実測値と計算値を図-6-4-2に示した。

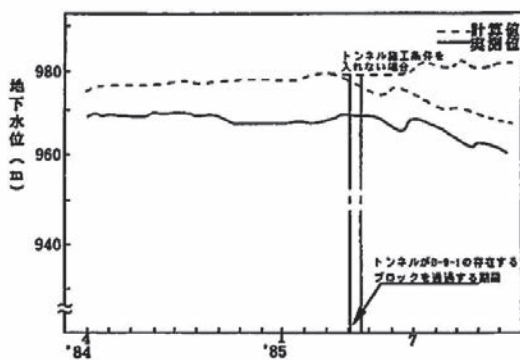


図-6-4-2 ボーリング孔B-9-1の地点におけるトンネル掘削中の地下水位の計算値と実測値

また、トンネル掘削条件を与えない場合の計算値も比較のために同図に示した。

この図から、以下のことが分かる。

1) ボーリング孔における地下水位の計算値の変動傾向は、実測値の変動傾向とよく一致している。

2) トンネル掘削条件を与えた場合と与えなかった場合の計算値に差が生じる時期から判断すると、ボーリング孔B-9-1は、トンネル掘削の影響が掘削とほぼ同時に現れるボーリング孔である。

なお、地下水面の存在する地層は、トンネル掘削の影響を顕著に受けているボーリング孔であるB-9-1では、透水性の高いAny(E₃)層であり、図では示さなかったが、トンネル掘削の影響があまり現れていないボーリング孔B-11では、透水性のやや低いTby層であった。

トンネル掘削に伴う解析領域全体の地下水位の低下状況を把握するために、トンネル掘削直前の1984年(昭和59年)12月2日の計算地下水位を基準とした地下水位低下等量線図を図-6-4-3(a), (b)に示した。

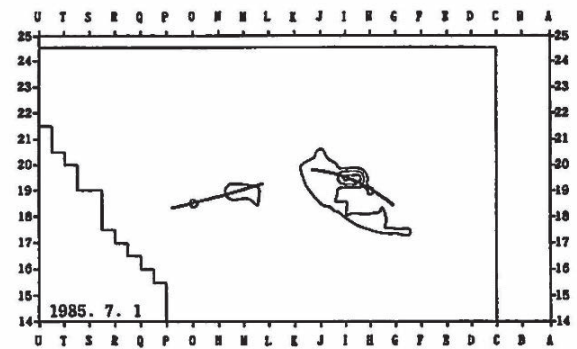


図-6-4-3 (a) 1985年7月1日時点の地下水位低下等量線の計算値(2m間隔)

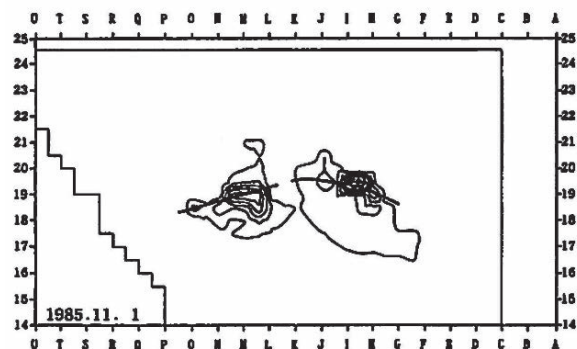


図-6-4-3 (b) 1985年11月1日時点の地下水位低下等量線の計算値(2m間隔)

これらの図から、以下のことが分かる。

① トンネル掘削に伴い地下水位の低下域が広がっており、特に、トンネルの南側に大きく広がっている。

② NW-SE系の断層で分断されているトンネルの北側の地域では、ほとんど地下水位低下が見られず、この地域では、トンネル建設の影響はほとんどないと考えられる。

次に、流域S-20における地表流量の経時変化の実測値と計算値を図-6-4-4に示した。流域S-20は、前述の

ように、この地域の代表的な湧水地点である石船観音を有する流域であり、トンネル掘削の影響を正確に評価する必要のある流域である。

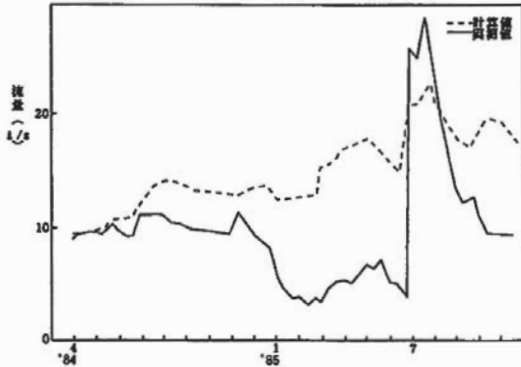


図-6-4-4 流域S-20におけるトンネル掘削中の地表流量

この図から、以下のことが分かる。

①流域S-20では、地表流量の計算値は、実測値とほぼ同じ変動傾向を示している。実測値では、1985年(昭和60年)2月から1985年(昭和60年)7月にかけて一時的に流量が減少しているが、これは、後述するトンネル湧水量がピークになる時期ともずれており、トンネル掘削の影響であるとは考えられない。おそらく、この時期の降水量が異常に少なかったためであると思われる。その後、実際の地表流量は回復しており、計算値にもトンネル掘削の影響による流量の減少は現れていない。

したがって、図-6-4-3(a), (b)に示すように、トンネル掘削の影響で流域内の地下水位は低下しているにもかかわらず、地表流量には影響がほとんど現れていない。

②トンネル南部の地下水位低下域が広がっている地域では、地下水の流出である基底流出が枯渇する可能性はあるが、トンネル北部の地域では、地下水位はほとんど低下していないので、基底流出が枯渇することはなく、流域S-20と同様にトンネル掘削による地表流量への影響はほとんどないと考えられる。

6.5 トンネル湧水量の計算結果

岡谷側坑口と塩尻側坑口のそれぞれの湧水量と両坑口の湧水量を合計した総湧水量の実測値と計算値を図-6-5-1に示した。

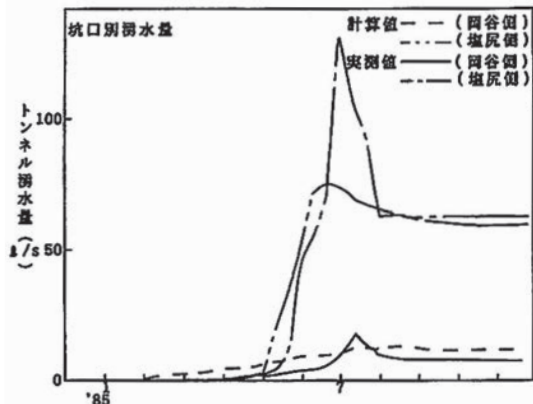


図-6-5-1 塩尻トンネルの坑口別トンネル湧水量

この図から、以下のことが分かる。

1) 岡谷側坑口工区について

①岡谷側工区では、トンネルが通過している水収支ブロックは、全てTby層であり、途中で地質が変化していないために、区間別の湧水量は、水収支ブロック内のトンネル通過長にほぼ比例した量となっている。

②坑口湧水量の実測値は、トンネル掘削が⑩工区に進む1985年(昭和60年)6月上旬頃から急激に増加しているが、計算値は、トンネル掘削開始直後からトンネル掘進長にほぼ比例した湧水量が出続けている。これは、実際の地表面標高と地盤モデルの地表面標高の違いによって、岡谷側坑口付近で、計算上の地下水位が実際の地下水位よりも高くなっていたためであると考えられる。

③坑口湧水量の実測値は、1985年(昭和60年)7月10日頃にピークとなった後、漸減する傾向を示しているが、計算値では明瞭なピークが現れていない。これは、水収支ブロック法では1個の水収支ブロック内の地質を均質としているために、水収支ブロック内に存在する小断層の影響を十分に反映できないためであると考えられる。

2) 塩尻側坑口工区について

①塩尻側工区では、トンネルが通過している水収支ブロックの地質は、坑口からTr層、Any(E₃)層、Tby層の順となっており、透水性の高いAny(E₃)層を通過する工区(④~⑥)では、他の工区よりも湧水量がかなり大きくなっている。

②坑口湧水量の実測値と計算値は、ともに1985年(昭和60年)7月上旬にピークを示しており、全体的な変動傾向は一致しているが、ピーク時の湧水量はかなり異なっている。これは、岡谷側と同様に水収支ブロック法では断層の影響を十分に反映できないためであると考えられる。

これらより、トンネル湧水量の計算値は、突発的な集中湧水量(断層によると考えられる)を完全に再現できていないが、トンネル湧水量の経時変化は、かなりよく再現できていると考えられる。

以上のように、今回の地下水流動解析により求めたトンネル掘削中の地下水位、地表湧水量およびトンネル湧水量の経時変化は、実測値の変動傾向をかなりよく再現できていることが分かった。

6.6 水文環境変化の将来予測結果

トンネル掘削中の地下水流動解析に用いた地盤モデルと、諏訪測候所における平年値の降水量や気温などの気象データを用いて、異常気象が発生しないと仮定した場合の1986年(昭和61年)1月から5年間の水文環境変化の予測を行った。トンネル湧水量の経時変化の予測結果を図-6-6-1に示した。また、ボーリング孔B-9-1、B-10-2およびB-11の地点における地下水位の経時変化の予測結果を図-6-6-2に示した。さらに、流域S-20の地表流量の経時変化の予測結果を図-6-6-3に示した。

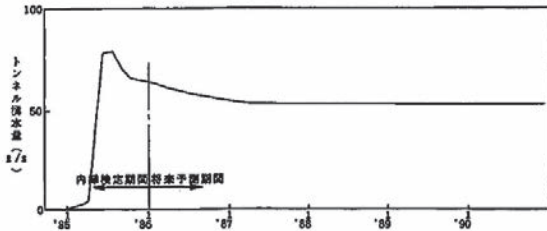


図-6-6-1 塩尻トンネルのトンネル湧水量の変化予測

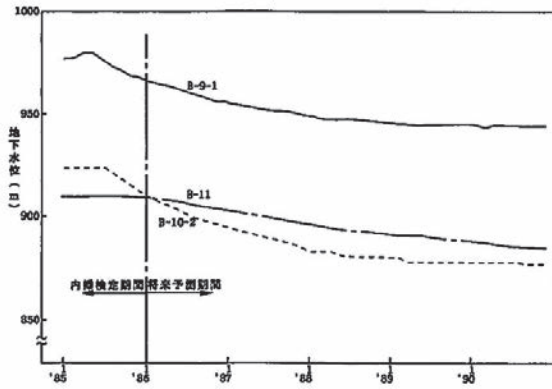


図-6-6-2 代表的なボーリング孔の位置における地下水位の変化予測

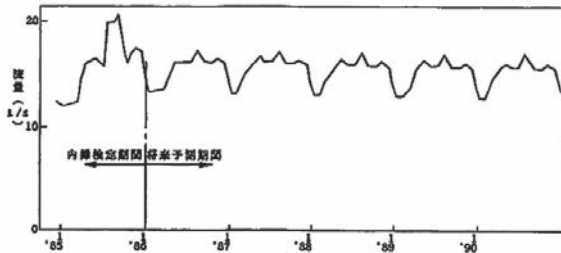


図-6-6-3 流域S-20における地表流量の変化予測

これらの図より、以下のことが分かる。

- 1) トンネル湧水量は、トンネル貫通後約1年間は減少し続け、1987年(昭和62年)4月頃からほぼ一定値(53 L/s)に落ち着く。
- 2) トンネル掘削の影響が著しかったボーリング孔B-9-1とB-10-2の地点における地下水位は、トンネル貫通後約3年経った1989年(平成1年)頃から一定値に落ち着く。また、トンネル掘削中に影響がほとんど現れなかったボーリング孔B-11の地点における地下水位は、計算期間中継続して低下し続けており、トンネル掘削の影響が時間的遅れを伴って生じると思われる。
- 3) 流域S-20の地表流量は、季節的な変動を示すだけで、トンネル掘削の影響は現れていない。

次に、トンネル掘削直前の1984年(昭和59年)12月2日時点の計算地下水位を基準とした1987(昭和62年)年1月1日、1988年(昭和63年)1月1日、1989(昭和64年)年1月1日および1990年(平成2年)1月1日時点の地下水位低下等量線図を図-6-6-4(a)~(e)に示した。

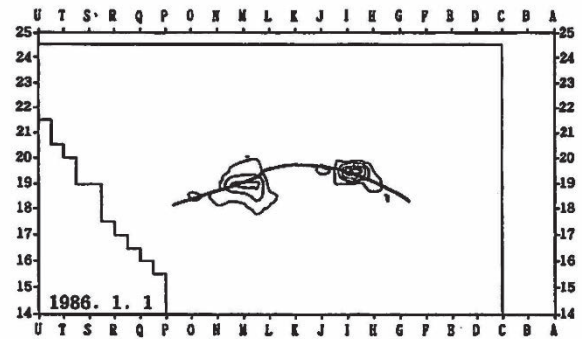


図-6-6-4 (a) 1986年1月1日時点の地下水位低下等量線の計算値(5m間隔)

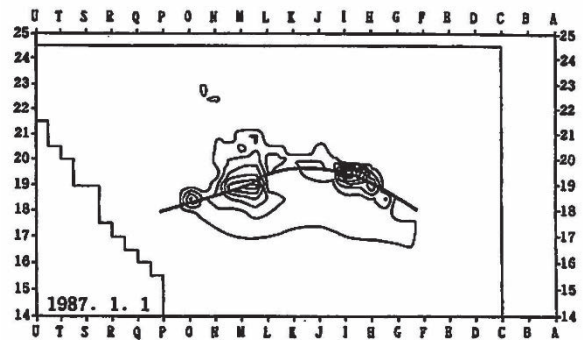


図-6-6-4 (b) 1987年1月1日時点の地下水位低下等量線の計算値(5m間隔)

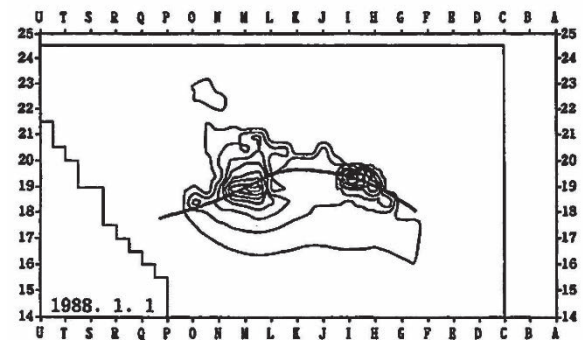


図-6-6-4 (c) 1988年1月1日時点の地下水位低下等量線の計算値(5m間隔)

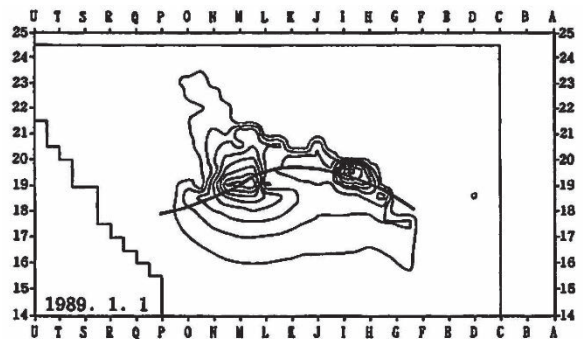


図-6-6-4 (d) 1989年1月1日時点の地下水位低下等量線の計算値(5m間隔)

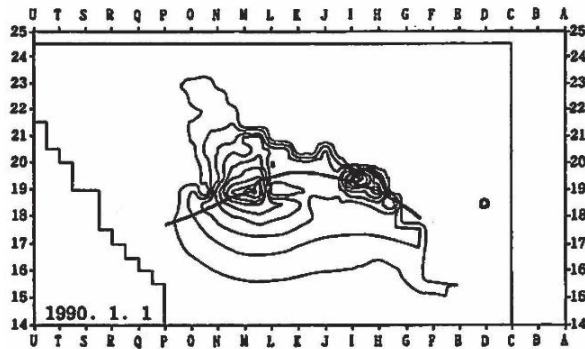


図-6-6-4 (e) 1990年1月1日時点の
地下水位低下等量線の計算値(5m間隔)

これらの図より、以下のことが分かる。

- 1) 地下水位の低下域は、年々トンネルの南側に広がっていき傾向があるが、トンネル貫通後3年経った1989年(平成1年)以降はほとんど広がっていない。
- 2) NW-SE系の断層で分断されているトンネルの北側の地域には、トンネル掘削に伴う地下水位の低下は生じていない。

したがって、以上のことを総合して判断すると、トンネル掘削によって生じた地表水や地下水などの水文環境の一時的な非平衡状態は、トンネル貫通後約3年間は継続するが、それ以降は、トンネル湧水を含めた新たな水文環境の平衡状態が形成され、一定の状態に落ち着くことが予想された。また、トンネル北側のNW-SE系の断層で分断されている地域にはトンネル掘削に伴う地下水位の低下は生じないと予想され、この地域の代表的な湧泉である石船観音の湧水もほとんど影響を受けないであろうと思われた。

なお、塩尻トンネルが完成して5年を経た1992年(平成4年)6月に現地調査を行ったところ、石船観音の湧水にほとんど変化は見られず、予測結果が正しかったことが確認された。

7 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^{8), 9)}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上記の方法を用いた。

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だけでなく、水収支ブロック法によるシミュレーション結果からも、塩尻トンネル掘削の影響はほとんど受けないと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。

本稿をまとめる上で、貴重な資料を提供していただいた元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、1980年(昭和55年)～1986年(昭和61年)の間、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^{8), 9)}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) 石崎昭維: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-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訓, 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・大西宜二: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.
- 25) 地下水ハンドブック:建設産業調査会, pp.20-21, 1979.
- 26) 大島洋志:トンネル掘削に伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究, 鉄道技術研究報告, No.1228, 1983.
- 27) 水理公式集:土木学会, pp.111-112, 1971.
- 28) 菅原正己:流出解析法, 共立出版, 1972.
- 29) 石橋弘道:トンネル湧水の算定方法, 地質と調査, Vol.7, pp.50-54, 1981.
- 30) 荒木正夫・椿東一郎:水理学演習下巻, 森北出版, pp.298-300, 1977.