

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

Prediction for change of groundwater condition and discharged
water due to tunnelling in a mountainous area

だい とう けん じ* い こま なお き**
大 東 憲 二* 生 駒 尚 己**
うえ した かろう***
植 下 協***

1. ま え が き

現在、中央自動車道長野線の建設が進められており、路線地域である諏訪湖西岸から塩尻峠付近で、岡谷・塩尻の二つのトンネルが掘削されている。岡谷トンネルは昭和61年3月に供用が開始され、塩尻トンネルも昭和61年7月に下り線が貫通し、上り線も秋に貫通を目指して工事が進められている。これら二つのトンネルが位置するこの地域は、中央構造線と糸魚川―静岡構造線という2大地質構造線が会合する地域にあたり、地形・地質は非常に複雑である。過去に、本路線の西側で、国鉄が塩嶺トンネルを掘削した際には、大量の地下水がトンネル内へ流入し、勝弦盆地を中心とする周辺地域の湧水問題が生じている^{1),2)}。そこで、中央自動車道長野線の岡谷・塩尻トンネルの掘削工事に先立つ昭和55年度に、日本道路公団の委託により、地質学や地盤工学などの専門家を中心とした中央自動車道長野線トンネル湧水調査委員会が、土木学会中部支部の中に設置された。

この委員会が対象とした岡谷・塩尻トンネルの周辺地域は、地下水の湧出量が豊富であり、特に、岡谷トンネルの東に位置する滝の沢と呼ばれる湧泉からは、常時日量1 100 m³程度の地下水が湧出しており、岡谷市の水道水源となっていた。また、沢を流れる水は、農業用水として重要な役割を果たしており、信仰と結びついた湧泉も数箇所存在していた。このような地域でのトンネル掘削ということで、トンネル掘削に伴う地下水状態の変化が地表の湧泉水に及ぼす影響を予測・評価し、事前に適切な対応をとることが必要であった。そのために、湧水調査委員会を中心として、地質構造の解明とトンネル掘削に伴う地下水状態変化の予測、ならびにその対策について、昭和55年以来、検討が重ねられてきた。

筆者らは、この委員会において、トンネル掘削に伴う地山の地下水状態の変化と、地表湧水が影響を受ける範囲を、トンネル掘削前に予測する計算作業を担当してきた。筆者らがこの作業を開始した当時は、実際のトンネル掘削工事において、トンネル湧水量と湧水範囲を求めるためには、

周辺流域の湧水比流量と平均比高を利用する高橋の方法³⁾がよく用いられていた。しかし、この方法では、地山の地質構造を考慮した地下水の水理学的な考察に基づいていないために、予測された湧水範囲の信頼性に疑問があった。そこで筆者らは、地盤調査結果をもとにして三次元有限要素地盤モデルを作成し、地下水状態の数値解析を行うことにした。この三次元地盤モデルは、地盤調査による新しい情報が得られるごとに見直しをなされ、岡谷トンネルの掘削が開始された昭和58年10月までに、トンネル掘削工事の地下水影響評価のための地盤モデルが完成し、地下水低下範囲の予測が行われた。定常解析に基づくその予測法の詳細は、別途に報告している^{4),5)}。

しかし、トンネル掘削工事が進むにつれて、当初予想していた地盤状態と実際の地盤状態との相違も明らかにされた。それに応じて、湧水調査委員会では、より正確な湧水範囲を求めるために、地盤モデルの修正を行い、影響予測の精度を上げた。また、岡谷トンネルの掘削工事が最盛期であった昭和59年は、降水量が異常に少なく、地表湧水の枯渇の原因がトンネル掘削であるのか、異常に少ない降水量によるのかが問題となり、その原因を明らかにするための解析も必要であった。筆者らは、これらの要請に応えるべく、新たな三次元地盤モデルを作成するとともに、定常解析だけでなく、降水量の経時変化に伴う地下水涵養速度の変化を、タンクモデルによって考慮した非定常解析も行った。

本報告では、岡谷トンネルを例として、トンネル掘削による地下水位の低下と降水量の変化による地下水位の変動を説明するとともに、掘削中のトンネルへの出水予測の試みについて紹介する。

2. 地下水流動解析の基礎式

岡谷トンネルが掘削された地山は、主に安山岩と凝灰角礫岩から成っており、地下水は、これらの岩盤内の空隙や亀裂などを流路として、ミクロ的には複雑な動きをすると推測されるが、考察対象とする三次元的空間内でのマクロ的現象把握の立場で、Darcy (ダルシー) 則に基づく次の基礎式を用いることとした。

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

*名古屋大学助手 工学部地盤工学教室

**駒熊谷組 海外事業部 (元・名古屋大学大学院生)

***名古屋大学教授 工学部地盤工学教室

$$= s_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

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、 s_s は比貯留量である。

式(1)に対して Galerkin (ギャラーキン) 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。

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

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。

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

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

$$h = \text{const.} \dots\dots\dots(4)$$

2) 不透水条件

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

3) 地下水涵養条件 (地下水面上の境界条件)

(a) 涵養速度を一定と仮定する場合

$$k_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z = -\alpha r \dots\dots\dots(6)$$

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。

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

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。

(b) 涵養速度の経時変化を考慮する場合

$$k_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z = -P(t) \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 $P(t)$ は経時変化を考慮した涵養速度で、現実的な $P(t)$ をタンクモデルを用いて求める方法については、次章で説明する。

3. タンクモデルによる地下水涵養速度の推定

地下水の状態を解くためには、地表面からの降水による涵養速度を実際に即して与えなければならない。この地下水涵養速度の経時変化を求めるために、筆者らはタンクモデルを用いた流域の流出解析を別途行った。タンクモデルは、河川の流出解析のために菅原⁶⁾が提案したモデルである。長期流出を表す場合、図-1に示す4段のタンクを用いる。1段目のタンクからの流出は地表面流出、2段目および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おり、不飽和領域の浸透を表すのは、3段目までのタンクである。上部3段のタンクにおける連続式は、それぞれ以下のように表される。

$$\frac{dWH_1}{dt} = R' - (Q_{11} + Q_{12}) - P_1 \dots\dots\dots(9)$$

$$\frac{dWH_2}{dt} = P_1 - Q_2 - P_2 \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{dWH_3}{dt} = P_2 - Q_3 - P_3 \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 Q_{11} , Q_{12} , Q_2 , Q_3 は各流出孔からの流出量 (mm/d), P_1 , P_2 , P_3 は各タンク下部の浸透孔からの浸透量 (mm/d), R' は降水量から蒸発散量を引いた量 (mm/d), WH_1 , WH_2 , WH_3 は各タンクの水位である。各パラメーターの関係は以下のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} Q_{11} &= \alpha_{11}(WH_1 - HS_{11}) \\ Q_{12} &= \alpha_{12}(WH_1 - HS_{12}) \\ Q_2 &= \alpha_2(WH_2 - HS_2), Q_3 = \alpha_3(WH_3 - HS_3) \\ P_1 &= \beta_1 WH_1, P_2 = \beta_2 WH_2, P_3 = \beta_3 WH_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

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 (l/d), β_1 , β_2 , β_3 は各浸透孔からの浸透率 (l/d) である。

地表面から地下水面までの深さが十分深い地域では、3段目のタンクから下方への浸透速度 P_3 を地下水面への涵

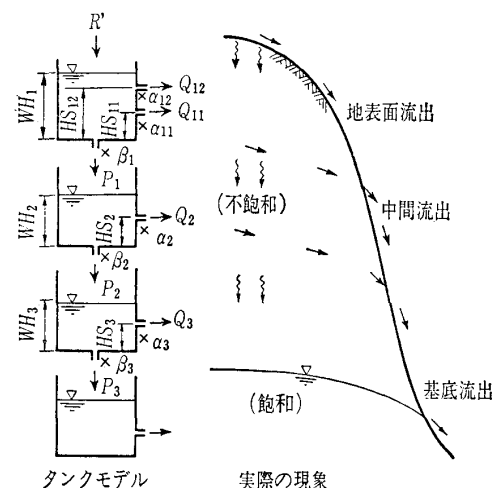


図-1 タンクモデルの概念図

養速度と考え、式(8)の左辺の流量流速の単位と同じ単位で表現して $P(t)$ とする。しかし、地表面から地下水面までの深さが浅い地域では、中間流出がなく、表面流出と基底流出だけであると考え、タンクを1段とする。そして、1段目のタンクから下方への浸透速度 P_1 を地下水面への涵養速度と考え、前記と同様にして $P(t)$ とする。

4. 降雨とトンネル掘削による地下水位の変動解析

岡谷トンネル周辺の三次元非定常浸透流解析を行うにあたって、定常解析によって得られたトンネル掘削段階ごとの水位低下域をもとにして、その掘削段階での低下域のみを非定常解析の解析領域とする方法を先に提案した⁷⁾。この方法の解析手順を、以下に説明する。

- 1) 定常解析を行い、トンネル掘削段階ごとの地下水位低下等量線図を作成する。
- 2) 各掘削段階ごとの水位低下域の大きさの変化を考慮して、非定常計算を行う領域を数種決定する。領域は、対応する掘削段階における水位低下域を囲む形で、定常計算に用いた平面分割図のメッシュに沿って作成する。また、各領域における計算をステップと呼ぶことにする。
- 3) 2)で作成した各領域の境界条件は、次のとおりである。標高600mの面を三次元地盤モデルの不透水底面とする。領域を囲む側面は、定常計算によって得られた水頭に固定する。河川と一致する節点の地下水頭は、河川標高に固定する。地下水面には、タンクモデルにより得られた地下水涵養速度を与える。
- 4) 定常計算により得られたトンネル掘削前の地下水頭値を、第1ステップの非定常計算における初期値とする。
- 5) トンネルの境界条件は、トンネル位置に対応する節点の水頭値をトンネル標高に固定する。この境界条件は、トンネル切羽が通過した節点に適用し、トンネル掘削の速度は、工程計画または掘進実績から推定する。
- 6) 3)~5)に示した条件のもとで非定常計算を行い、地下水頭分布とトンネル排水量を求める。
- 7) 6)で得られた領域内の地下水頭値を、次のステップでの初期値とする。
- 8) 3)~7)の計算を繰り返し、地下水頭とトンネル排水量の経時変化を求める。

解析領域の三次元地盤モデルの説明図を図-2に、また、定常解析および非定常解析を行った領域を図-3に示した。各地質の透水係数は、原位置透水試験を参考にして求めたが、比貯留量については、トンネル掘削前の地下水位観測値と降水との応答特性から求めた⁹⁾。

比貯留量を同定するための解析領域には、図-3の第2ステップの解析領域を用いた。解析期間は、比貯留量の同

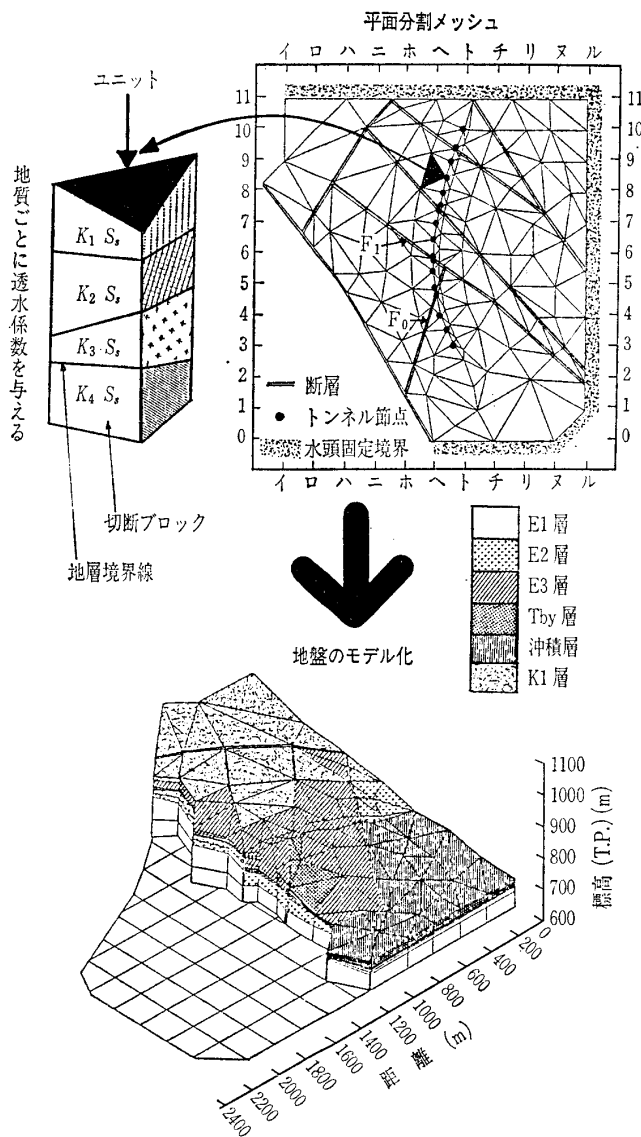


図-2 三次元地盤モデル

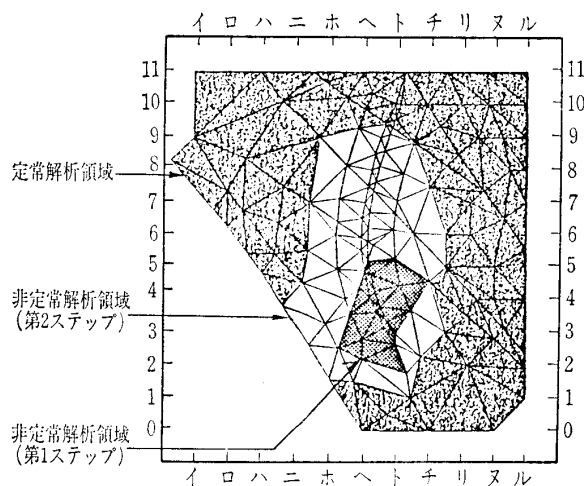


図-3 定常および非定常解析領域

定が容易である降水量の多い夏期(昭和58年6月10日~昭和58年8月21日)とした。比貯留量の仮定値を変えた場合のボーリング孔B-4-4の位置(図-4参照)における計算上の降水量と地下水位との応答を図-5に示した。こ

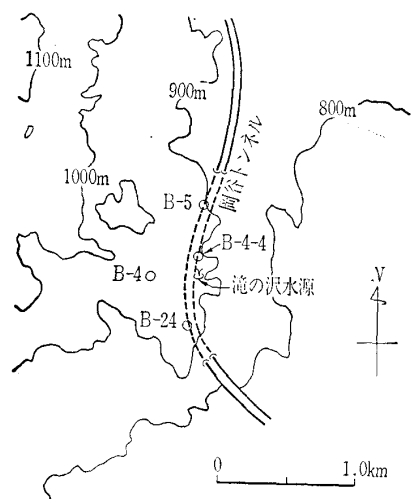
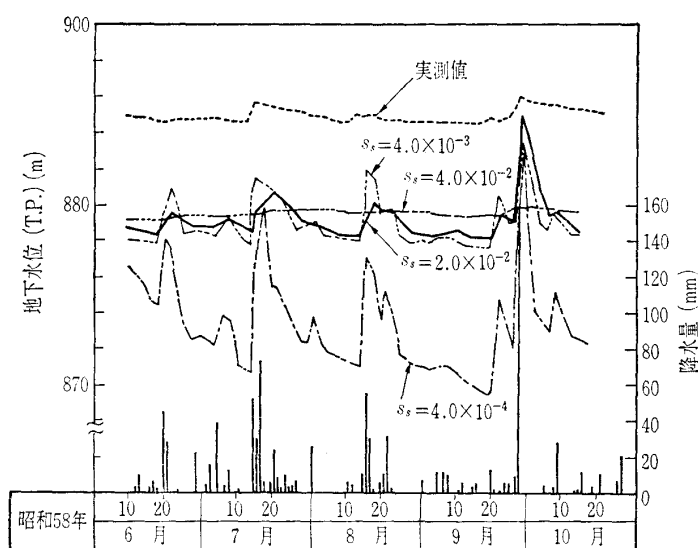


図-4 解析結果の検討に用いたボーリング孔の位置

図-5 モデルに仮定した比貯留量 s_s (単位: l/m) による地下水位の降水応答特性と実測値との比較

の図より、B-4-4の位置の比貯留量は、 $2.0 \sim 4.0 \times 10^{-2} (l/m)$ が最も実測値に近い応答を示すことが分かる。このようにして、各ボーリング孔の位置の比貯留量を同定した。また、透水係数も、実測地下水位に近い計算結果が得られるように、原位置透水試験結果の範囲内で修正して同定した。

以上のようにして求めた各地質の透水係数と比貯留量を

表-1 各地質の透水係数と比貯留量

地 質	透水係数 (m/d)	比貯留量 (l/m)
E1 層	9.50×10^{-3}	4.0×10^{-3}
E2 層	2.07×10^{-2}	1.0×10^{-2}
E3 層	4.61×10^{-1}	2.0×10^{-2}
Tby 層	8.38×10^{-2}	2.0×10^{-2}
沖積層	8.64×10^0	2.0×10^{-2}
K1 層	4.12×10^{-1}	1.0×10^{-2}
透水性断層 F_0	8.64×10^0	1.0×10^{-2}
非透水性断層 F_1	1.47×10^{-3}	1.0×10^{-2}

注) F_1 , F_0 以外の断層は、断層自体の透水性を考慮せず、地質の不連続面として扱った。

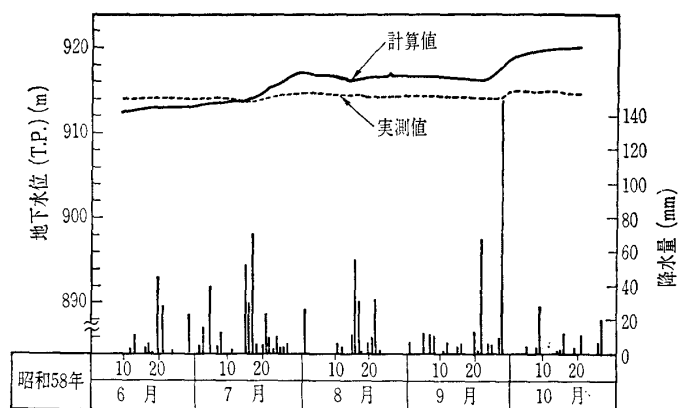


図-6(a) ボーリング孔B-4におけるトンネル掘削前の地下水位

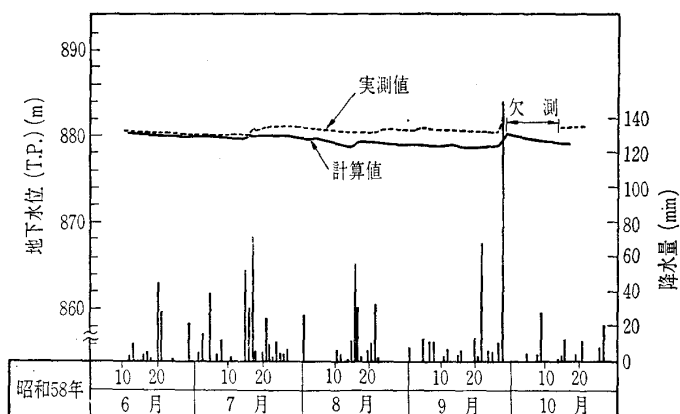


図-6(b) ボーリング孔B-5におけるトンネル掘削前の地下水位

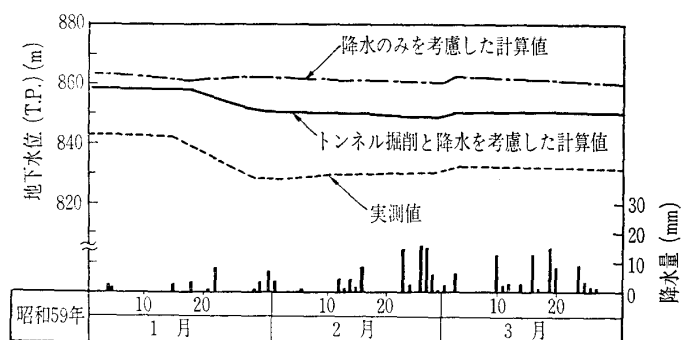


図-7(a) ボーリング孔B-24におけるトンネル掘削中の地下水位

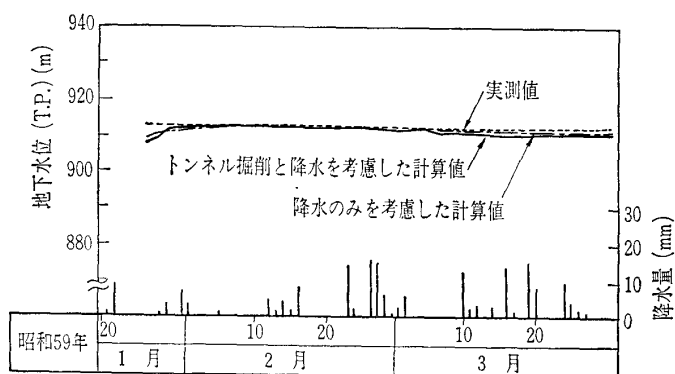


図-7(b) ボーリング孔B-4におけるトンネル掘削中の地下水位

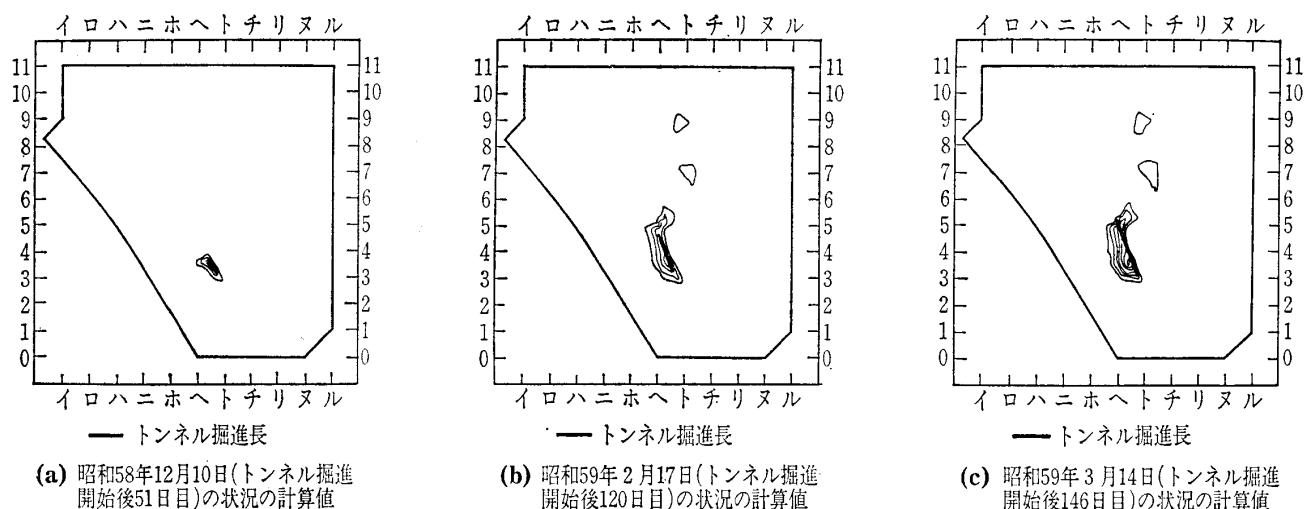


図-8 トンネル掘削に伴う地下水位低下域の拡大(低下等量線はマイナス5 m間隔)

表-1に示した。また、これらの値を用いて計算したトンネル掘削前の地下水位の計算値と実測値を図-6(a), (b)に示した。各ボーリング孔の位置は、図-4に示してある。

次に、トンネル掘削中の代表的なボーリング孔内の地下水位の変化を図-7(a), (b)に示した。同図には、トンネル掘削条件がない場合の計算結果も示しており、これより、トンネル掘削と降水量が地下水位の変化に及ぼす影響の程度を判断することができる。各ボーリング孔の地下水位変化の特徴は、以下のとおりである。

図-7(a)に示したボーリング孔B-24は、トンネルルート沿いにあり、トンネル掘削の影響を受けやすいと考えられるボーリング孔である。実測地下水位は、ボーリング孔付近をトンネル切羽が通過する前後から急激に低下しており、トンネル掘削の影響が明瞭に現れている。トンネル掘削条件を与えた計算値は、実際の水位低下傾向をよく表している。また、トンネル掘削条件を与えない場合の計算値は、降水量の変化に伴って変化している。したがって、トンネル掘削による水位の低下量は、二つの計算値の差として表すことができる。

図-7(b)に示したボーリング孔B-4は、トンネル切羽から離れており、しかも切羽との間に断層が存在するために、実測値を見る限り、トンネル掘削による水位低下は見られない。トンネル掘削条件を与えた計算値と与えない計算値とが接近していることから、トンネル掘削による影響を受けていないことが分かる。

この解析を行うことによって、トンネル掘削と降水量が地下水位の変化に及ぼす影響を分離することができた。これより、降水量の変化は、地下水位にそれほど大きな変化を生じさせていないことが分かり、地下水位の低下には、トンネル掘削による影響の大きいことが確認された。

また、トンネル掘削前の地下水位に対する、地下水位低

下等量線の経時的な変化を図-8に示した。トンネル掘削に伴って、低下域が徐々に広がっていく様子が分かる。

5. トンネル出水量の経時的変化

非定常計算によって得られたトンネル坑口における排水量の計算値と実測値を、図-9に示した。この図より、以下のことが分かる。

- 1) 計算では、トンネル掘削開始と同時にトンネル出水が始まる予測となったが、実測では、掘削開始後50日目からトンネル出水が始まっている。この原因は、この解析において、トンネルの坑口付近の事前の水頭値が実際より大きく仮定されていたためであると考えられる。
- 2) 実測では、100日目にトンネルが断層を通過したために、突発的な出水が発生したが、計算ではその突発出水量が予測できていない。しかし、出水量が増加する時期は予測できている。

本解析では、降水による地下水涵養速度や地下水の三次元的な流動状態を考慮した三次元地盤モデルによって、掘削されるトンネルの排水量を計算しているので、トンネル

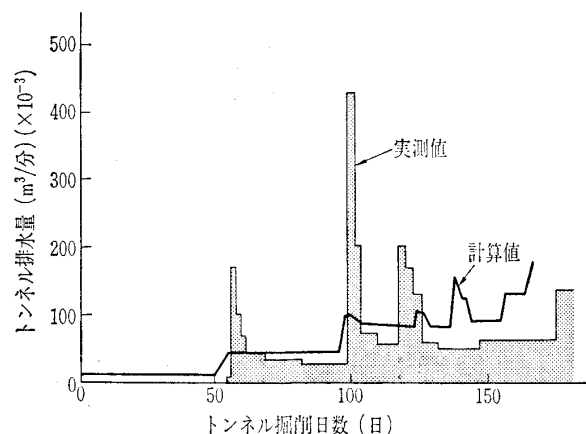


図-9 トンネル掘削に伴う坑口排水量の変化

の掘進に伴う切羽の地質状態は、かなり正確に表現できていると考えられる。それでもなお、突発的なトンネル出水を、常に精度良く予測することは容易ではなかった。したがって、トンネル出水に関しては、本解析法による予測結果を参考にし、特に大量の出水が発生する可能性があると予測された場所では、切羽前方の地質を調査しながら施工する必要がある。

6. あとがき

本報告では、地下水涵養タンクモデルと三次元有限要素地盤モデルを組み合わせた解析法によって、山岳地域に掘削されるトンネルと降水量の変化が及ぼす周辺地下水状態への影響を評価する方法、ならびにトンネル工事中の出水を予測する方法を示し、それらの計算結果と実測値との比較を、岡谷トンネルにおける事例から紹介した。以下に、本報告のまとめを示す。

- 1) 山岳地域での降水の地下水面への経時的地下水涵養速度を、タンクモデルを用いることによって、簡単に推定できることを示した。
- 2) タンクモデルを組み合わせた三次元有限要素法解析によって、降水量と地下水位の変動の応答性を調べたところ、地下水位の変動特性は地盤の比貯留量に大きく依存することが分かった。この特性を利用することによって、モデル地盤の比貯留量が、降水量と地下水位の観測値を用いて同定できることを示した。
- 3) トンネル掘削時の周辺地下水位の変動状況を、降水量の変化による変動と、トンネル工事での排水条件の変化による変動に分離して、その影響を説明し得ることを示した。
- 4) トンネルからの出水量は、トンネル掘進長や掘削対

象となっている地盤の透水性や地下水貯留能力、および地下水位状況など多くの要因によって決まるものであり、その出水量を正確に推定することは容易ではない。しかし、本報告で示した三次元地盤モデルで、トンネル掘進に伴って変化する切羽の地質状況に対応したトンネル出水状況を、ほぼ推定できることを示した。

本報告をまとめるにあたって、貴重な資料を提供して下さいた日本道路公団名古屋建設局建設部、ならびに松本工事事務所の関係各位に謝意を表します。また、昭和55年以来、岡谷トンネルの周辺地下水への影響をともに検討・審議し、筆者らの計算作業に貴重な助言と協力を与えて下さっ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各委員、ならびに関係各位に心から感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 植下 協ほか：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，土木学会論文報告集（投稿中）
- 6) 菅原正己：流出解析法，共立出版，1972.
- 7) 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.
- 8) 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.

（原稿受理 1986. 7. 29）

学会発行図書案内

土 質 工 学 会 編
大阪地盤編集委員会

大 阪 地 盤

——特に洪積層の研究とその応用——

B5判415ページ 送料400円

会員特価 6,000円 定価 7,800円

発行：土質工学会

東京都千代田区神田淡路町2丁目23番 菅山ビル4階
〒101 電話 03-251-7661(代表)