

掘削に伴う都市トンネル内湧水の予測法に関する研究

Study on Prediction of Groundwater Inflow into Urban Tunnel during Excavation Process

村里 静則*・蒋 宇静**・首藤 茂満***・棚橋 由彦**

Sizunori MURASATO, Yujing JIANG, Shigemitu SHUTOU and Yosihiko TANABASHI

The prediction of groundwater inflow into urban tunnels during construction is important for determining the capacities of drainage system and evaluating the influence on social environment due to the ground movement raised with the changes of underground water level. This study deals with the establishment of a three-dimensional simulation method of groundwater inflow during tunnel excavation based on the visualization of the complex geological features of ground and the investigations of the groundwater behavior. Application to a real urban tunnel is performed for the verification of the proposed approach.

Key Words : Groundwater inflow, Urban tunnel, 3D simulation, Geological features, Excavation

1. はじめに

近年、社会基盤整備により都市部にトンネルの建設例が増加している。このような場所では地下水が生活用水等に使用されていることがあり、トンネル掘削による地下水の変動など周辺の地下水環境への影響が懸念される。また、自然環境保全の見地から、これまで以上の管理が要求されるケースが増えており、地盤状況を的確に把握し、地下水変動の影響を予測・評価することは重要な課題となる^{1), 2)}。このような現状から本研究は、掘削に伴う都市トンネル内湧水の予測法について検討し、実トンネルへの適用を試みる。まずは、国土地理院の数値地図と複数のボーリングデータに基づく地盤状況の三次元可視化法を示す。つぎに、三次元非定常浸透流解析を実施し、掘削に伴う地下水の変動とトンネル内への湧水量について考察を行う。なお、検討事例として現在建設中の長崎県出島バイパスの中心となるオランダ坂トンネルを対象として考える。

2. 対象となるオランダ坂トンネルの概要

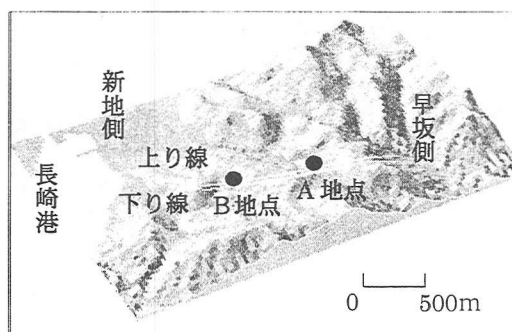
長崎市は、地形的な制約から、慢性的な交通混雑を呈している。オランダ坂トンネルは地域の活性化およ

キーワード：トンネル湧水、都市トンネル、三次元モデリング、地質状況、掘削

* 長崎県土木部道路建設課

** 正会員 工博 長崎大学工学部社会開発工学科

*** 学生員 長崎大学大学院生産科学研究科



図－1 研究対象領域

び地域間交流の促進を図るために計画された出島バイパスの中心となるもので、上り線（全長 2918.0m）、下り線（全長 2961.5m）として建設されている。トンネルは住宅密集地の下を掘削し、新地側では地表面までの土被りが小さい所で 10 数mの場所が存在する。また、このトンネルルート周辺には現在使用されている井戸が約 400 箇所及び、これらの井戸の大半は新地側坑口より約 1km 区間に集中して分布しており、井戸が社会生活に密着している。トンネル掘削により、トンネルルートの 2 箇所(図－1 の A、B 地点)で湧水量が著しく増加し、周辺地域の井戸や観測用ボーリングでの水位低下が確認された。そのため、トンネル掘削に伴う地下水変動の影響により井戸の枯渇や地盤沈下などで、社会環境に与える影響が懸念されている。

3. トンネル湧水量と井戸水位との関係

現場調査によれば、井戸水位は、

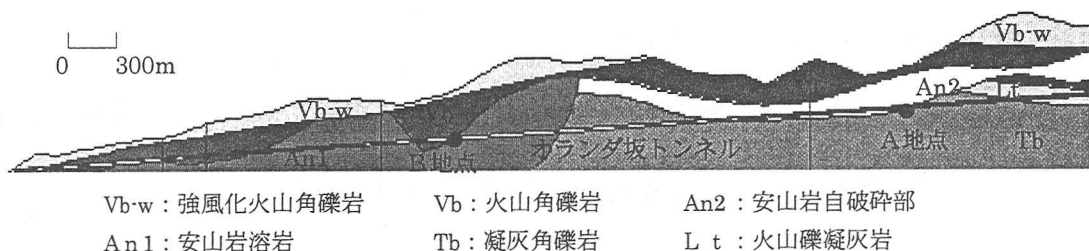
- ①A地点の影響(早坂側坑口から 1,100m掘削)により水位変化が生じたもの
- ②B地点の影響(早坂側坑口から 1,800m掘削)により水位変化が生じたもの
- ③トンネルとは関係なく水位変動が見られないもの

の 3 パターンが見られる。図－2 に示した地質状況図から分かるように、

①の場合では、トンネル周辺には凝灰角礫岩が主に分布しており、トンネル内の時間当たり湧水量は 40t/h 発生した。地下水はゆっくりと低下し、トンネルから側方約 500m離れた地点でも水位の変化が観測された。

②の場合では、トンネル周辺には火山角礫岩が主に分布しており、トンネル内の時間当たり湧水量は上り線で 60t/h、下り線で 140t/h が発生した。

一方、③の場合では、トンネルに近接していても水位変化が見られなかった。



図－2 トンネル縦断方向の地質状況断面図

上下線湧水の計測結果を考察すると、A地点までは、ほぼ同量である。A～B間は、下り線の方が30～40t/hと多い。また、B地点からは下り線における湧水量の増加が大きく上下線の差は、約80t/hにも及んでおり、図-3にA地点とB地点の横断面図を示す。このように大量湧水が発生した、A、B地点の共通点は両者とも地質の替り目である。特にB地点の下り線は地層境界面に接しており、この地層境界面がなんらかの湧水に関する影響を及ぼしているものと考えられる。地層境界面が地下水流動における水みちとなり、大量湧水を誘発したと考えられる。このように、湧水の著しい増加は地質状況の変化とその替り目となる地層境界の状態や透水係数に関連している可能性が大きい。

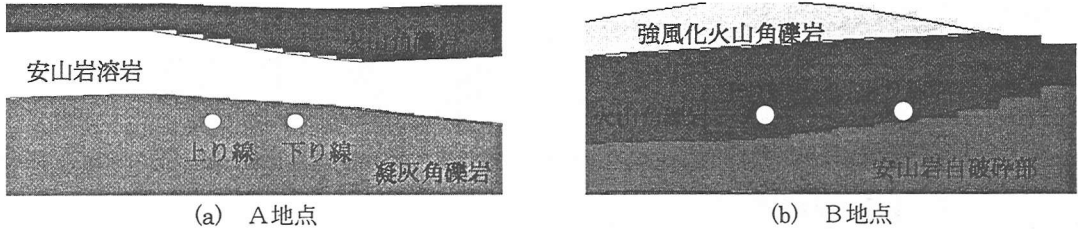


図-3 トンネル横断方向の地質状況断面図

4. 地盤状況の三次元可視化について

トンネルは地下深部の細長い線状構造物であるため、直接その位置の地質情報が得られにくく、特に、日本の地質構造は複雑で変化に富んでいるなど、地質調査によってその相互関係を把握することは困難である。したがって、合理的に地質調査を実施した上で、トンネル周辺の地盤状況を把握することが安全に施工を進めるために重要である。本研究ではトンネル周辺地域の調査ボーリングデータなどに基づいて地層相互の関係を推定し、地盤状態の三次元可視化を試みる。

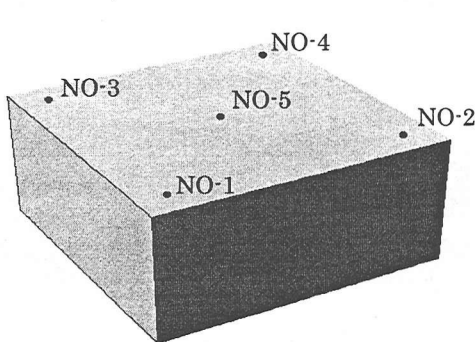
4. 1 経緯度から平面直角座標への変換

前述した図-1は国土地理院発行の数値地図(50mメッシュ)により解析領域トンネル周辺の地形を示したものである。数値地図とは地図情報を数値化したものであり、正確な位置を表すために数値地図情報では経緯度、UTM座標、平面直角座標などの座標系が用いられている。50mメッシュの数値地図は経緯度による座標系であるが、浸透流解析のためのモデル作成や各種データ挿入を容易に行うために、本研究では経緯度を平面直角座標系に変換する。

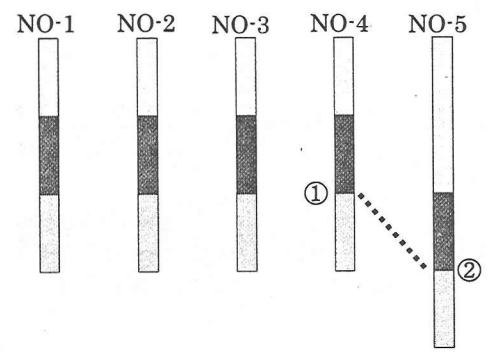
4. 2 地質分布の推定方法

次に解析領域における地盤状況の地形・地質分布の推定方法について説明する。国土地理院発行の数値地図より地形データを入力し(図-1参照)、調査ボーリングデータに基づき内挿を行う。地質分布の推定例を以下に示す。図-4のボーリングデータ(b)を(a)のように配置する。(a)に入力したボーリングデータだけでは、単にばらばらのデータであるため地質モデル作成のために必要なデータとはいえない。地質データを作成するためには、データ間での関連付けが必要である。(b)中の①、②部分は同じ地質データであるが、両者に同じ属性を持たせることによって、地層境界面を表すことが出来る。(c)、(d)は、データ間の関連付けを行い、地質モデルを作成した一例である。また、図-5は断層を表現した例であるが、断層と仮定した面

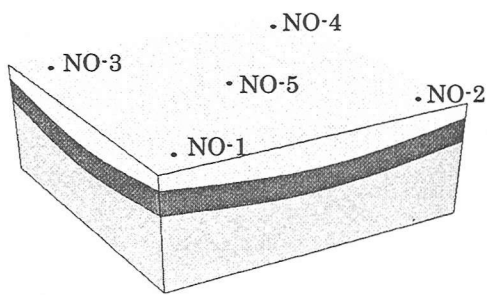
に重みを持たせることによって、地層面 i、ii は断層と交差した点で区切られている。このように、属性や重みといった各種の定義付けを行った上で地質データをボーリングデータなどの方法によって内挿することで地質分布の推定を行った。



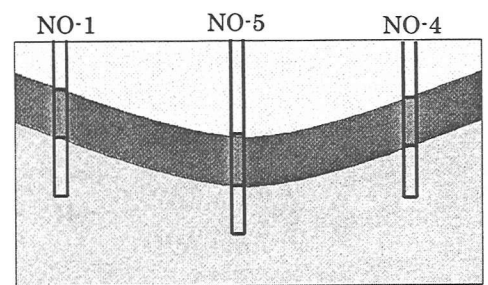
(a) ボーリングの位置関係



(b) ボーリング間の内挿



(c) 推定された地層分布



(d) ある断面内の地層状況

図-4 ボーリングデータに基づく地盤状況の推定方法

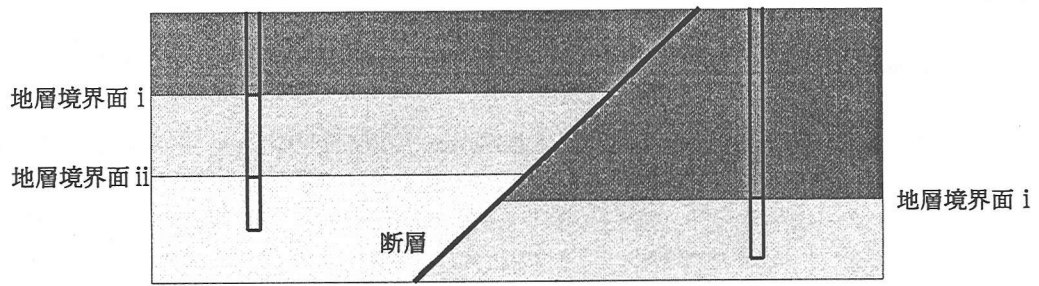


図-5 断層分布を推定した例

4. 3 地質概要

対象領域のトンネルの縦断方向に沿った断面図（図－2）に示したように、6 層の地層からなっており、地質概要を表－1 に示す。また、以下に各地層の概況を示す。

表－1 地質概要

記号	地 質	透水係数(cm/s)	単位体積重量(kN/m ³)	有効間隙率
Vb-w	強風化火山角礫岩	2.4×10^{-4}	19	0.10
Vb	火山角礫岩	8.4×10^{-5}	22	0.12
An2	安山岩自破碎部	3.7×10^{-4}	21	0.20
An1	安山岩溶岩	1.4×10^{-3}	22	0.05
Tb	凝灰角礫岩	9.1×10^{-5}	21	0.10
Lt	火山礫凝灰岩	1.0×10^{-5}	22	0.10

強風化火山角礫岩・・・火山角礫岩が強風化し、角礫混じり土砂状を呈する。礫は硬質な安山岩礫からなり、基質は未固結～半固結の砂質土からなる。

火 山 角 礫 岩・・・調査地に広く分布する。径 5～50cm(最大 2m)の安山岩礫を主体とし、礫間を凝灰岩～凝灰質砂が埋める。部分的に層理の明瞭な砂層を挟む。

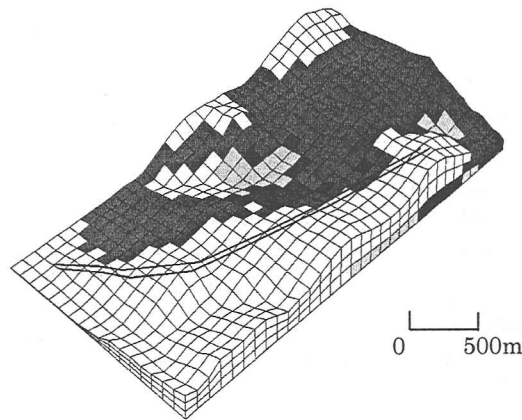
安 山 岩 自 破 碎 部・・・暗灰色～灰色を呈し、角礫～割れ目の多い岩塊の集合体としてみとめられる。

安 山 岩 溶 岩・・・早坂町に分布する。暗灰色の堅硬な安山岩で 2～10cm 間隔の板状節理が発達することが多い。

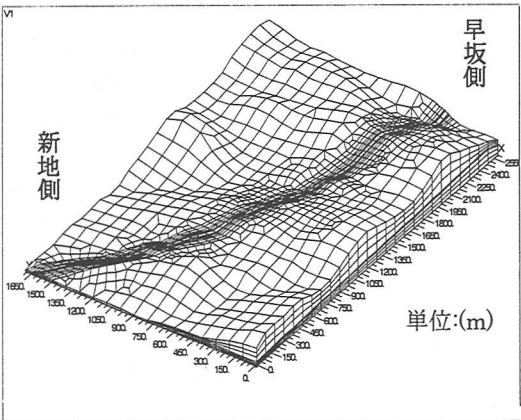
凝灰角礫岩・火山礫凝灰岩・・・主に早坂町に分布する。火山角礫岩と比較し、礫径は 10cm 以下と小さく、また堅硬な礫は含まない。

5. 三次元浸透流解析に基づくトンネル湧水の予測

解析対象であるトンネルは、両側に標高約 200m 前後の山地が形成されており、ちょうど谷のような部分に位置している。この位置関係から図－5 に示すような解析範囲を決定した。前節に示した地盤状況の可視



図－5 三次元浸透流解析モデル



図－6 トンネル部分を再分割したモデル

化法を用いて作成した三次元地盤モデルを 100m×100m でメッシング(図-5)したものにトンネル部のメッシュを再分割すれば(図-6)、掘削に伴う地下水の変動・トンネル内の湧水のための解析モデルができる(作業のフローは図-7 参照)。なお、トンネル部分の解析メッシュについては、解析範囲が広範囲に及んでいること、地形面の標高差が最大で 200m に及ぶことなどから、トンネル断面(幅 10m、高さ 7.6m)を 4 角形要素で分割して表現した。また、トンネル周辺におけるメッシュの再分割についてはトンネル付近の地下水の変動をより正確に表現するため、トンネル側面から約 80m までの範囲で要素を 20m 前後まで再分割した。この解析モデルに現場観測や室内試験に基づいて得られた地層ごとの透水係数などの各種パラメータを入力し、非定常浸透流解析を行う。トンネル湧水の解析フローを図-7 に示す。

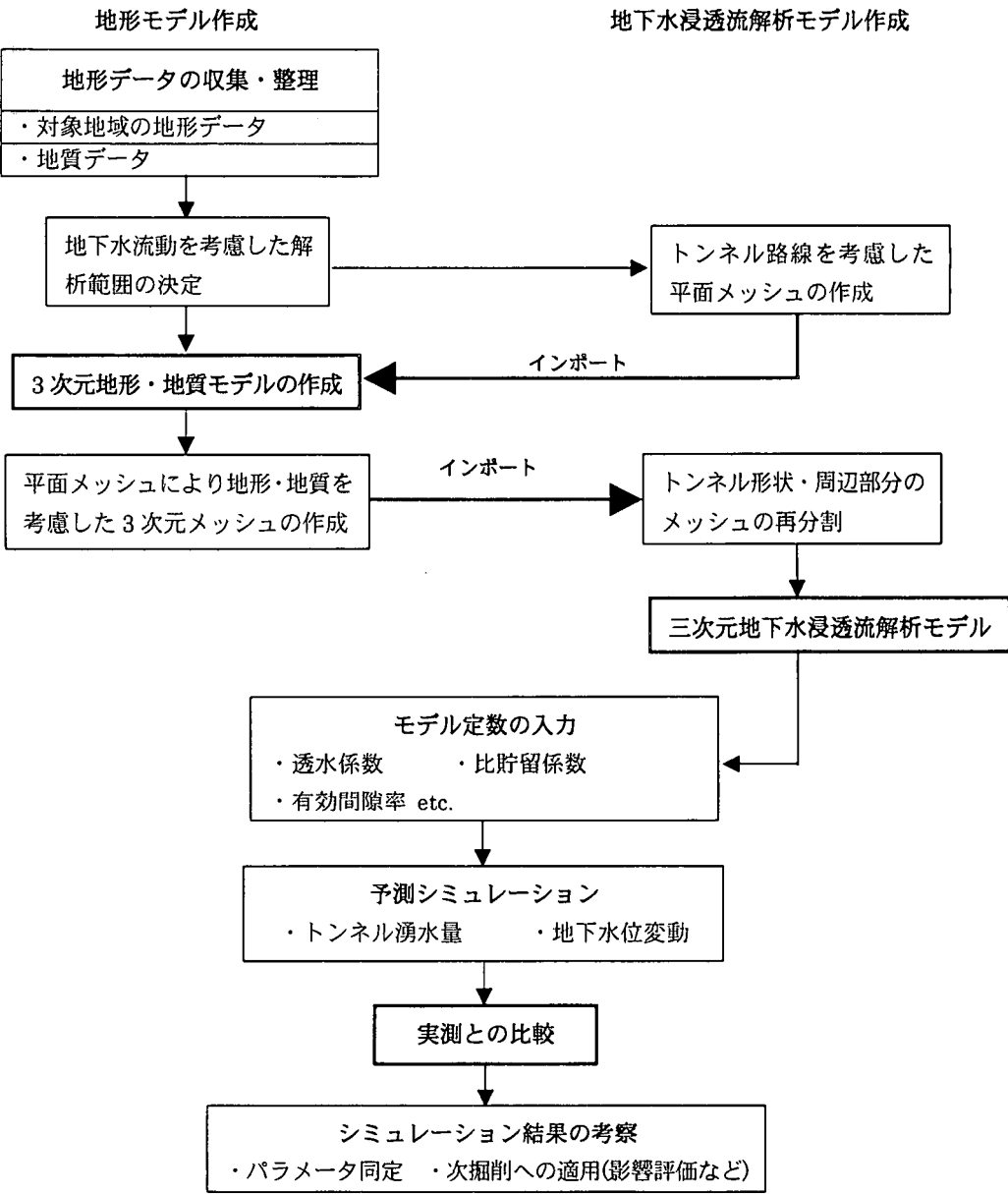


図-7 トンネル湧水解析シミュレーションフロー

5. 1 三次元浸透流解析の基礎方程式

飽和不飽和領域内の浸透を支配する基礎方程式^{3) - 5)}は、質量保存則と Darcy の運動方程式から導かれ、つぎのようになる。

$$-\frac{\partial v}{\partial x_i} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

$$v = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

ここで、 θ : 体積含水率、 v : 流速、 x_i : x, y, z 座標、 t : 時間、 $k(\theta)$: 透水係数、 h : 全水頭

式(1)、(2)より、方程式(3)が導かれる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (i, j=1,2,3) \quad (3)$$

さらに、式(3)を圧力水頭による方程式に変換する。次に、圧力水頭変化による水の圧縮を無視し、不飽和領域において圧力水頭変化による間隙圧の変化がないものと仮定すると、最終的に3次元飽和・不飽和浸透流の支配方程式が次のように求まる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + k_{i3} \right) = (C(\phi) + \beta S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (i, j=1,2,3) \quad (4)$$

ここで、 $C(\phi)$: 比水分容量、 ϕ : 圧力水頭、 S_s : 比貯留係数($=\frac{d\phi}{dt}$)、 β : 係数で、飽和領域 $\beta=1$ 、

不飽和領域 $\beta=0$ である。 $C(\phi)$ は圧力水頭の増分に対する堆積含有率を表しており、浸透が進行して飽和になると $C(\phi)=0$ となり、式(4)は飽和不飽和領域の浸透流を支配する方程式となる。

5. 2 境界条件

支配方程式(4)を解くために初期条件および境界条件を次のように定める。

解析対象領域における初期の圧力水頭分布あるいは全水頭分布が既知であるとする (式(5))。また、境界条件として、次のことが考えられる。

(1) 境界面上で水頭が既知の境界

この境界条件は、境界面での水頭が一定あるいは時間の関数として与えられる境界条件である (式(6))。

(2) 流出入量が既知である境界

流出入量が一定あるいは時間の関数として与えられる境界条件である。これは、境界条件での流出入量がゼロである不透水境界など流出入量が既知の境界である (式(7))。

$$\phi(x_i, 0) = \phi_0(x_i) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (5)$$

$$\phi(x_i, t) = \phi_b(x_i, t) \quad (6)$$

$$-\left(k_{ij}(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + k_{i3} \rho_r\right) \cdot \hat{n} = q_b(x_i, t) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

ρ : 水の密度、 $\hat{n}$: 境界面からの垂直ベクトル、 q : 流量

以上より、式(5)～(7)の条件下で支配方程式(4)を解くために、重み付き残差法による有限要素法の定式化を行い、未知水頭を各節点で解く。なお、本研究に示した解析例では、覆工を打設する前の湧水予測のため、トンネル側壁面については地山の透水係数によってその浸透能力を表すが、トンネル内に覆工が施された場合、覆工表面が不透水境界として与えられる。

5. 3 解析結果と考察

トンネルの掘進速度が地質状況によって異なるが一般に 4m/day 前後であるため、解析ではトンネルの掘削速度を 100m/month と設定し、掘削はトンネル部の要素を取り除くことで表現した。トンネル切羽面(幅 10m、高さ 7.6m)が 9 つの 4 角形要素に分割されたので、トンネル切羽面からの湧水量は、16 個の節点(上下線合わせて 32 節点)からの流速ベクトルと面積から、100m 掘削ごとに計算する。なお、解析では、表-1 に示したパラメータを用いた。解析領域の地下水分布については、調査ボーリングなどの地下水位の計測結果(図-8)や地形特性に基づいて推定を行い、解析全領域の全水頭分布は図-9 に示す。図-9 に示したようにトンネル路線全体に地下水位が分布している。大量湧水の発生した B 地点の全水頭、圧力水頭、流速ベクトル図をそれぞれ図-10、11、12 に示す。図-10 の全水頭図を見ると、切羽周辺で全水頭が小さくなっており、特に切羽面付近でそれが顕著に表れている。図-11 の圧力水頭図において、圧力水頭が 0(ゼロ)の時、地下水位の位置を示している。この図から、トンネル掘削によって地下水位が低下していることが読み取れる。図-10 での全水頭値が切羽周辺で 40 数 m と小さいことから分かるように、流速ベクトル(図-12)は、切羽周辺域でトンネル切羽を巻き込むように発生しており、地下水流動の様子が伺える。上下線の切羽湧水量と掘削長との関係(図-13)を見ると、A 地点における大量湧水の発生した箇所、湧水量が増加していることがグラフより読み取れる。今後は、解析的予測と現場計測との比較によりモデルと入力パラメータを修正し、さらに降雨量と湧水の関連性、トンネル地質状況による湧水発生パターンの違いなどについて検討を行い、また地下水位の変動による周辺環境への影響についても解析的評価を行う。

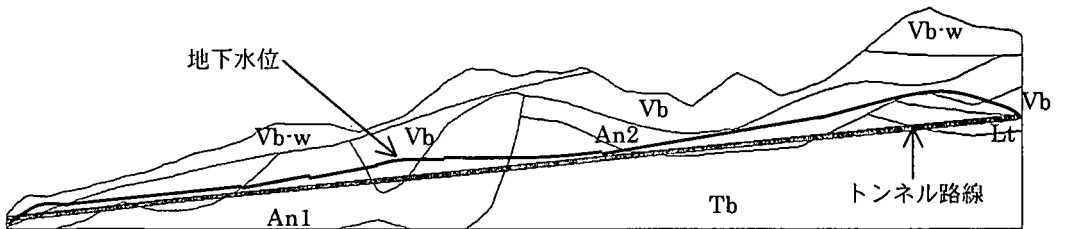


図-8 トンネル路線断面における地下水位分布図

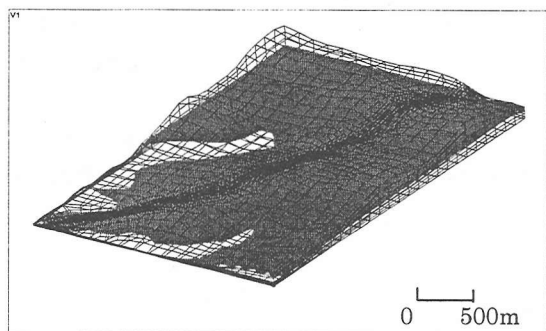


図-9 地下水位図

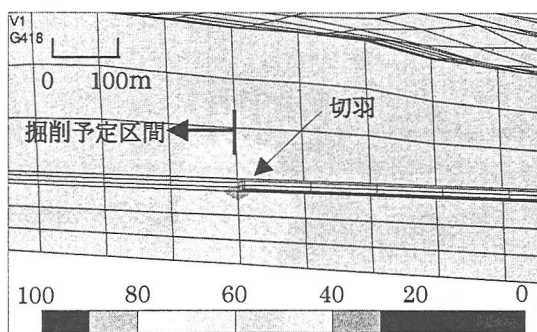


図-10 全水頭図 (単位: m)

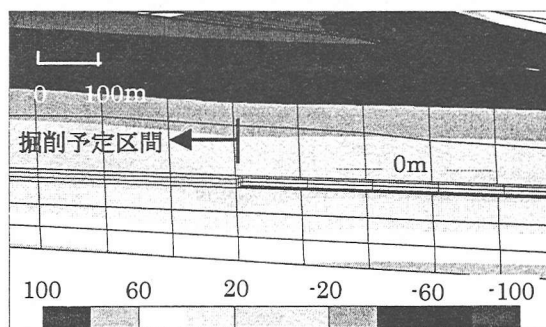


図-11 圧力水頭図 (単位: m)

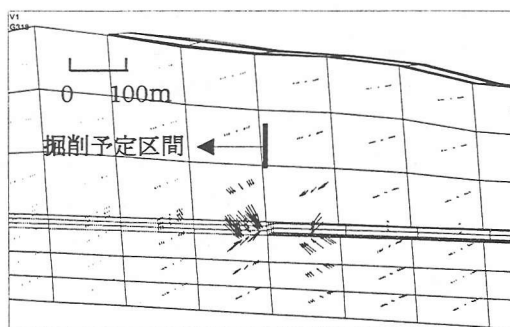


図-12 流速ベクトル図

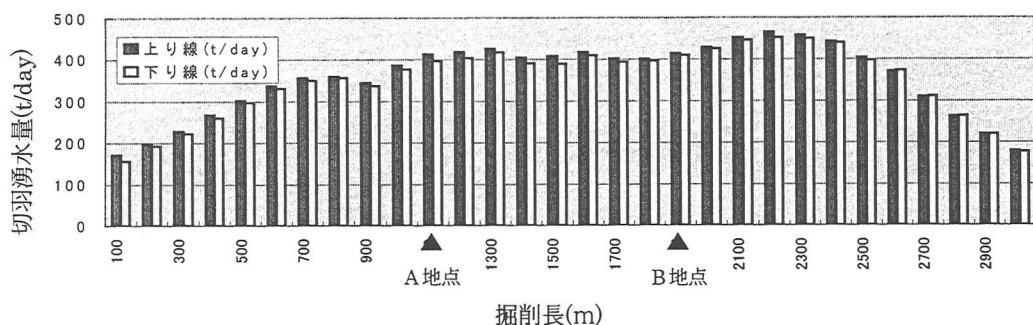


図-13 掘削に伴うトンネル切羽湧水量と掘削長の関係

6. おわりに

本研究では、トンネル掘削に伴う地下水位変動を評価するための三次元地盤状況モデリングの方法を示し、実現場への適用を行った。地盤状況モデリングにおいては、本研究に示した手法で地盤状況を三次元的に捉えることができ、トンネル路線位置など実現場に対応したものとなった。また、トンネル湧水解析を実施することにより、トンネル切羽湧水量を予測することが出来た。しかしながら、地質状況の三次元可視化では、地盤状況をトンネル路線上のボーリングデータを用いて推定したため、広範囲にわたる解析領域の地質状況

の推定には次のような問題点が挙げられる。広範囲にわたって断続的な地質状況を一致させているものであり必ずしも実地盤と一致しているとは言い切れない、地質分布が広範囲にあるため、透水係数などのパラメータの算定が難しいなどである。

今後は、解析と実計測との比較によりモデルおよび入力パラメータの修正を行い、信頼性の高いモデリングを行うことにより、地盤状況と湧水量に見られる関連性を明らかにしていく。また、降水量と浸透による湧水量の関係を的確に予測することにより排水施設の選定やトンネル湧水の水資源としての再利用の可能性について更に検討していく。

7. 参考文献

- 1) 大島洋志(1983)：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，pp.1－23.
- 2) 近藤達敏(2000)：地質調査の不確実性とトンネル工事のリスク要因評価，応用地質，Vol.40，No.6，pp.340－345.
- 3) (株)CRC 総合研究所(2000)：CatsFLOW Version2.0 ユーザーズマニュアル.
- 4) W.キンツェルバッハ(1993)：パソコンによる地下水解析，森北出版，pp.177－277.
- 5) P.S.フヤコーン・G.E.ピンダー(1987)：地下水解析の基礎と応用(上巻，基礎編)，現代工学社，pp.205－206.