

# 準三次元浸透流解析による地表流出量と 空洞湧水量の評価法

鈴木 誠<sup>1</sup>・百田 博宣<sup>2</sup>・神野 健二<sup>3</sup>・長谷川 誠<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 清水建設(株) 和泉研究室 (〒100-0011 千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

<sup>2</sup> 正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

<sup>3</sup> 正会員 工博 九州大学大学院 環境システム科学研究センター (〒812-8185 福岡市東区箱崎 6-10-1)

<sup>4</sup> 正会員 工博 清水建設(株) 土木本部技術第2部 (〒105-8007 港区芝浦 1-2-3 シーバンス S館)

トンネルや空洞の建設は、広域の地下水流や地下水位に影響を与えるばかりでなく、地表の降水の流出状況にも影響を与える場合がある。このため、広域の地形地質を反映できる水理モデルを用い、両者の相互関係を考慮して同時推定することが重要である。本研究では、準三次元浸透流解析手法を対象に、トンネル等の建設後の地表流出量に対する推定方法を提案し、従来の準三次元解析では困難であった地下水位変動に伴う空洞湧水量も算出できるように拡張した。また、ダム貯水池周辺の観測データに提案手法を適用し、広域の地下水状況と地表流出状況を的確に評価できることを示した。さらに、空洞の建設を想定した数値シミュレーションを行ない、空洞湧水量の影響検討に適用できることを示した。

**Key Words :** rock; groundwater, intake system, seepage, runoff, rain

## 1. はじめに

トンネル・空洞などの建設は、数 km 平方～数十 km 平方の地下水流動や地下水位分布に何らかの影響を与えるばかりでなく、地表流出量や河川流量などの水文・流出状況にも影響を与える場合がある。代表的な事例として、丹那トンネル、六甲トンネル、福岡トンネルにおける沢水の枯渇や地表湧水群の減少などが挙げられるが、トンネル建設による水文・流出状況への影響については多くの事例があり、検討の重要性が指摘されている<sup>1),2),3)</sup>。しかし、水文・流出状況は地下水状況と相互に関連しているため、検討に際しては、両者を同時に三次元問題(または広域問題)として解析することが理想的である。解析手法については、浸透流 FEM 解析を適用することが想定されるが、水文・流出状況の解析に適用するためには、降水条件下において、地表面のすべての部分で飽和または不飽和地表面の条件を満足するように(以下、地表境界処理と称す)、降水の浸透成分を求める必要がある。

飽和・不飽和領域を対象とした浸透流 FEM 解析については、トンネルや空洞などの建設に伴う湧水量や地下水流は主に断面二次元解析で検討されているが、三次元解析理論も早くから研究されており<sup>4)</sup>、三次元 FEM 解析を地下水状況と水文・流出状況の同時推定に適用することが理想的である。このよう

な飽和・不飽和の浸透流 FEM 解析は収束計算を必要とする非線形解析であり、収束性の観点から細かな要素分割が望ましいが、三次元モデルでは計算容量上の制限から粗い要素分割にならざるを得ない。このため、三次元 FEM 解析では解の収束性が低下する。さらに、不飽和地表面に降水が作用すると物性の非線形のため収束性が低下し、地表境界処理の精度が低下することになる。この精度低下は、降水の浸透成分と表面流出成分の分離精度に影響するため、水文・流出状況の解析に三次元 FEM 解析を適用することは実際的ではないと考えられる。

これに対し、要素分割は平面内でよいため、比較的小さい計算容量で詳細な解析モデルを作成できる準三次元浸透流 FEM 解析(以後、準三次元解析と称す)を、地下水状況と水文・流出状況の同時推定に適用することが考えられる。この準三次元解析は、準一様流仮定を用いて広域の浸透流を解析するもので、1980年代から精力的に研究されており<sup>5)~9)</sup>、泉州北部の地下水位低下問題<sup>7)</sup>、菊間実証プラント(岩盤内原油備蓄タンク)の広域地下水問題<sup>8)</sup>、トンネルにおけるウエルポイント等の地下水処理工法の検討<sup>9)</sup>などに広く利用されている。準三次元解析では、物性が節点の深さ方向の積分値で取り扱われるため(たとえば透水係数が積分されて透水量係数)、地下水位変動に対する物性の非線形性が弱く、解の収束

性は三次元解析の場合に比べて格段に向上する。このため、降水条件下でも準三次元解析は地表境界面処理に適した計算精度をもつと考えられる。しかし、これまで降水の浸透成分と表面流出成分を推定する一般的な地表境界処理法は提案されていないことが現状である。また、準三次元解析は準一様流仮定を用いているため、トンネルや空洞などの湧水量は事前情報として与えられる必要があるなど、適用範囲に制限がある。降水条件と空洞湧水量を考慮した準三次元解析の代表的な研究が、前述の菊間実証プラントの研究であるが<sup>8)</sup>、降水の浸透成分や表面流出量の推定はなされておらず、空洞湧水量についても実測データを与えて広域の地下水位変動を扱っている。一般に空洞湧水量は地下水位変化に伴う未知量であるため、準三次元解析を地下水状況と水文・流出状況の同時推定に適用する場合には、空洞湧水量の推定法と共に地表境界処理方法を提案する必要がある。

次に浸透流解析以外に注目すると、水文状況や流出状況の代表的な検討手法としてタンクモデル<sup>10)</sup>があげられる。タンクモデルは洪水などの河川流量の流出予測には単純で使いやすいモデルであるが、概念モデルであるため流出過程や地下水流の物理的把握が困難と考えられる。また、トンネルや空洞などを設置すると、湧水が発生して系に変化が生じるため、水文・流出状況の変化を予測することは難しく、地下水状況との同時推定への拡張はさらに困難と考えられる。

以上のように、トンネルや空洞の建設に伴う広域の地下水状況と水文・流出状況を同時に推定する解析手法を調査した。その結果、三次元または準三次元浸透流解析やタンクモデル等は、いずれも現状では適用性に課題があるものと考えられるが、本研究では準三次元浸透流解析を適用することを試みる。すなわち、準三次元浸透流解析による広域の地下水流の算出と同時に、降水時の地表流出量と空洞湧水量の近似的評価が可能な解析法を開発することを目的とする。このため、準三次元解析における地表境界処理方法と地表流出量の算出法の理論的取り扱いを示すと共に、従来の準三次元解析では困難であった地下水位変化に伴う空洞湧水量の推定法を提案する。また、本提案手法をダム貯水池周辺の花崗岩盤の降水・流出(河川流量)データに適用して、地表流出量と地下水流の算出結果を論じると共に、同サイトに空洞掘削を想定した数値シミュレーションを行い、地下水位に伴う空洞湧水量の推定結果について検討する。

## 2. 準三次元浸透流解析における地表流出、空洞湧水の近似評価法

準三次元モデルにおいて、降水条件下で地表流出や中間流出等を評価するときには不飽和域を考慮することが望ましい。既に著者等の一人は、飽和・不飽和の準三次元浸透流理論を2層地盤で誘導している<sup>6)</sup>。ここでは同理論を説明後、地下水位変化に伴う空洞湧水量の推定方法、降水条件下における地表流出量および河川流量の推定法を誘導する。

### (1) 飽和・不飽和の準三次元浸透流

今、水平面上に  $x, y$  軸、鉛直上方に  $z$  軸を設定し、地下水の圧力水頭とピエゾ水頭をそれぞれ  $h_p, h$  とした図-1 に示す2層地盤モデルを考える。モデルの底面は不透水層で水平な基準線とし、この底面上に座標原点を置くとともに、地下水面が第2層中にある条件とする。また、各層の厚さ、飽和透水係数、比貯留量を層番号を  $i$  とし、 $b_i, K_i, s_i$  で表し、第2層の不飽和浸透特性を図-2 に示す。この条件下で、飽和・不飽和の3次元浸透流の基礎方程式を、地下水流を準一様流と仮定して、 $z$  軸に関して  $0 \sim b$  (地層厚さ) まで積分すれば、不飽和浸透を考慮した準三次元浸透流の基礎方程式が式(1)のように得られる<sup>6)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + V_b - V_0 + \int_0^b q dz = (S_A + S_B) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、

$$V_b = \left[ K \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{z=b}, \quad V_0 = \left[ K \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{z=0} = 0$$

また、 $t$  は時間、 $q$  は湧出しが正值の湧水率、 $V_b$  は地表における降雨浸透量、 $V_0$  は第1層下面の鉛直流速で0である。また、図-1, 2の記号を使えば、 $T, S_A, S_B$  は次のように算定できる<sup>6)</sup>。

$$\begin{aligned} T &= \int_0^b K dz \\ &= K_1 b_1 + K_2 b_2' + K_2 \int_{-b_2'}^0 K_r dh_p \\ S_A &= \int_{h-b}^0 \frac{d\theta}{dh_p} dh_p = [\theta_0 - \theta_b] \\ S_B &= \int_0^h s dh_p = s_1 b_1 + s_2 b_2' \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)では、 $K_r$  は図-2 に示した第2層の不飽和透水係数比であり、 $\theta_0$  と  $\theta_b$  は地下水面位置と地表面

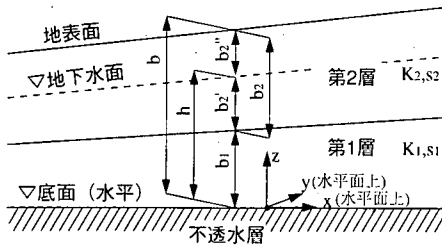


図-1 地盤モデルの定義

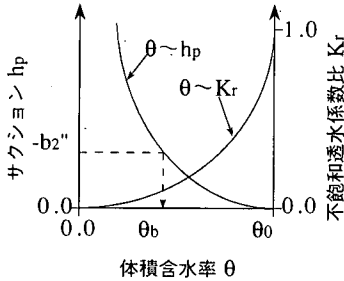


図-2 第2層の不飽和浸透特性

位置の体積含水率を表し、 $T$ と $S_A$ に不飽和領域が考慮されている。なお、ここでは2層地盤で理論を示したが、さらに多層地盤でも $T, S_A, S_B$ は誘導可能である。

次に、式(1)を空間に関してはガラキン法で離散化し、時間微分項に差分法を用いれば、飽和・不飽和の準三次元浸透流の有限要素解析は、各節点の地下水位であるピエゾ水頭 $h$ を未知量とする連立一次方程式で与えられる。しかし、 $T, S_A, S_B$ が $h$ に依存する非線形問題となる。したがって、初期条件と境界条件を与え、各時刻毎に全節点のピエゾ水頭 $h$ (仮定値)と連立方程式の解 $h$ (計算値)が収束するまで反復計算を行えば、所要の解が得られ、各節点まわりの要素の支配面積を考慮した節点流量 $Q'$ も算出できる。また降水量と空洞湧水量は、それぞれ式(1)の $V_b, q$ で考慮されるため、どちらも解析上の入力条件になる。

## (2) 空洞湧水量の推定法

前述のように、準三次元解析では空洞湧水量は入力条件であり、実測データがある場合を除けば、空洞設置に伴う地下水位変動を解析する場合は、空洞湧水量を合理的に設定する必要がある。しかし、空洞湧水量は準三次元解析の解である地下水位と相互に関連しているため、地下水位に対応した湧水量の合理的な推定は一般的に困難である。これは、準三

次元解析を用いた空洞設置に伴う地下水位算出にも課題が残ることを意味する。

このため、準三次元解析においては、空洞湧水量と地下水位の相互関係を考慮して評価することが必要である。本研究では、両者の相互関係を簡便に考慮するため、「平均地下水位 $H$ と空洞湧水量 $Q_c$ の関係(または、平均地下水位と空洞の水頭差 $\Delta H$ と空洞湧水量 $Q_c$ の関係)を利用した準三次元解析による空洞湧水量の評価法を提案し、準三次元解析における空洞湧水量と地下水位の同時推定を可能にすることを目的とする。

まず、空洞湧水量と地下水位の相互関係を考慮するため、空洞周辺に湧水量推定用の節点の範囲を設定し、この範囲の平均地下水位 $H$ と空洞湧水量 $Q_c$ の関係を考える。空洞長さが長く、空洞湧水量の三次元性が比較的小さい条件を対象にすると、図-3のように空洞横断面上の湧水量推定用の節点範囲における $H$ と $Q_c$ の関係は、 $H$ をパラメータとした断面二次元解析の定常計算にて求めることができる。一方、空洞長さが短く湧水量の三次元性が強い条件下の場合は空洞を取り囲む平面領域を湧水量推定用の節点範囲とすれば、 $H$ と $Q_c$ の関係は $H$ をパラメータとした三次元解析の定常計算で同様に求めることができる。このように、 $H$ と $Q_c$ の関係は、準三次元解析とは別途に解析する必要があるが、水位変化のない定常計算であるため三次元解析でも比較的簡単に行うことができる。

ここでは別途設定した $H$ と $Q_c$ の関係(または $\Delta H$ と $Q_c$ の関係)を、次のようなアルゴリズムで準三次元解析の計算過程に導入する手法を提案する。この手法は後述する図-6の準三次元解析のフローに組込んでいるが、 $H$ と $Q_c$ の関係を満足した条件で解が得られるため、準三次元解析による空洞湧水量と地下水位の同時推定が可能になる。

- (a) 各時刻毎に、 $h$ (仮定値)より $H$ (仮定値)と $\Delta H$ (仮定値)を求め、図-3より $Q_c$ (仮定値)を推定する。
- (b) 空洞の水平面積を $A_c$ とし、 $Q_c$ の荷重強度 $q_c$ (仮定値)は、 $Q_c$ (仮定値)/ $A_c$ で求める。また、 $q_c$ に各節点の支配面積を考慮した量を $q'_c$ とし、 $q'_c$ (仮定値) =  $q_c$ (仮定値) × (各節点の支配面積)を算出する。
- (c)  $q'_c$ (仮定値)や降水量および境界条件を考慮して、連立方程式を解き、 $h$ (計算値)を算出する。非線形連立方程式のため、全節点について $h$ (仮定値) =  $h$ (計算値)を満足するまで反復計算を実施する。この反復計算過程では、 $h$ (仮定値)の

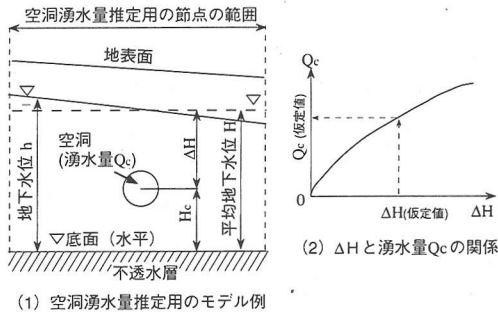


図-3 空洞湧水量の入力条件

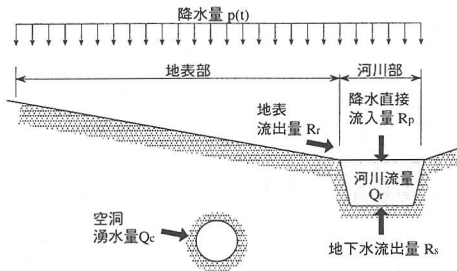


図-4 河川流量および空洞湧水量の概念

変更に伴う  $H$  (仮定値) と  $\Delta H$  (仮定値) の変更,  $Q_c$  (仮定値) と  $q_c$  (仮定値) および  $q'_c$  (仮定値) の変更を行う。

- (d) 全節点で  $h$  (仮定値)  $\doteq$   $h$  (計算値) を満足すれば, 必然的に  $H$  (仮定値)  $\doteq$   $H$  (計算値) になる。したがって, 最終的な  $Q_c$  (仮定値) と  $H$  (計算値) は図-3 の  $H$  と  $Q_c$  関係を満足することから, 地下水位変動に伴う空洞湧水量が算出できたことになる。

(3) 地表境界処理方法と地表流出量および河川流量の推定法

準三次元モデルの鉛直断面において, 降水量  $p(t)$  の条件下における地表流出量および空洞湧水量等の関係を概念的に図-4 に示す。

図-4 のように, 河川流量  $Q_r(t)$  は, 地表流出量  $R_r(t)$ , 河川への降水直接流入量  $R_p(t)$ , 河川への地下水流出量  $R_s(t)$  の総和と与えられる。

$$Q_r(t) = R_p(t) + R_r(t) + R_s(t)$$

$$R_r(t) = R_{r1}(t) + R_{r2}(t) \quad (3)$$

ここに,  $R_{r1}(t)$  は降雨浸透能  $P_{out}$  を超える降水の直接流出量 (地表面が飽和または不飽和のいずれの場合も生じる流出量),  $R_{r2}(t)$  は飽和地表面で地下に浸透できない降水量および地表湧出量である。  $P_{out}$

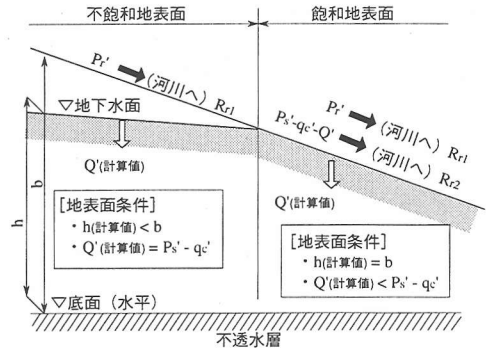


図-5 地表面の境界条件と地表流出成分と地下浸透成分

は有効空隙率, 飽和度等で変化するが, ここでは便宜的に一定値とする。また,  $p(t)$  は  $P_{out}$  を超える降水成分  $P_r(t)$  と  $P_{out}$  以下の降水成分  $P_s(t)$  の和とすれば,  $p(t)$  は大きさに応じて, 次式のように表現できる。

$$p(t) \leq P_{out} : \quad P_s(t) = p(t), P_r(t) = 0$$

$$p(t) > P_{out} : \quad P_s(t) = P_{out}, P_r(t) = p(t) - P_{out} \quad (4)$$

次に, 図-5 のように地表面を不飽和域と飽和域に分け, それぞれの領域における地表流出量と地下浸透量を示す。図中の各流量値は有限要素法と対応させるため,  $Q'$  や  $q'_c$  と同様に節点の支配面積を考慮して表示し,  $P_r, P_s$  の節点流量値は  $P'_r, P'_s$  と表している。不飽和地表面に位置する節点では  $P'_r$  が地表から流出し,  $q'_c$  が空洞に湧出し,  $P'_s - q'_c$  が地下浸透量となる。また, 飽和地表面に位置する節点では地下に浸透可能な量は解析で得られる  $Q'$  で,  $q'_c$  が空洞に湧出するため,  $P'_r$  と  $(P'_s - q'_c - Q')$  が地表流出量となる。このため, 不飽和地表面と飽和地表面の満足すべき地表面の境界条件は, 次のように表せる。

[不飽和地表面を有する節点]

$$h < b, \quad Q' = P'_s - q'_c$$

[飽和地表面を有する節点]

$$h = b, \quad Q' < P'_s - q'_c \quad (5)$$

式 (5) は, 降水と空洞湧水がない条件では, 不飽和地表面または飽和地表面を有する節点では, それぞれ  $Q' = 0, Q' < 0$  となり, 既に著者等が無降水条件で示した地表面の境界条件と一致する<sup>11)</sup>。

したがって, 各時刻毎にピエゾ水頭  $h$  の収束条件と式 (5) の地表面条件を満足するまで反復計算を行

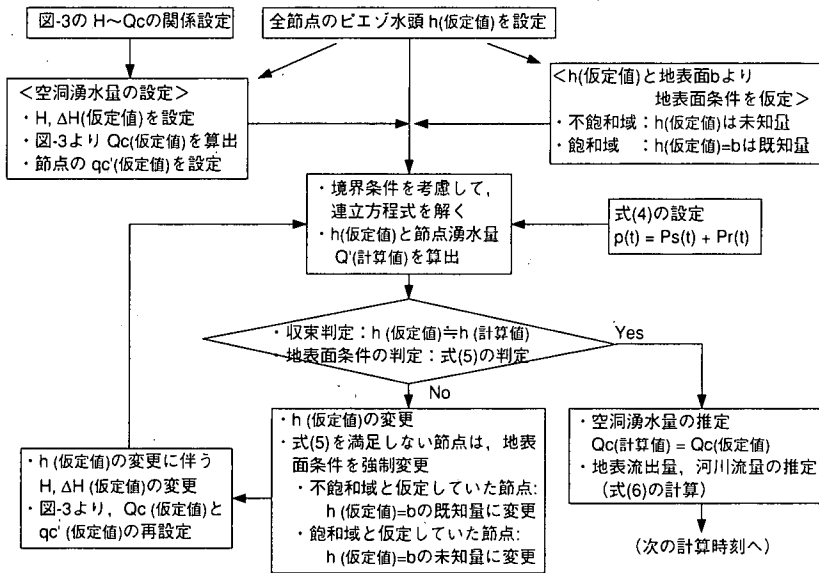


図-6 特定時刻における準三次元解析フロー

例えば、各節点毎に地下浸透量と地表流出量が同時に得られ、式(3)は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 Q_r(t) &= R_p(t) + R_r(t) + R_s(t) \\
 R_p(t) &= \sum_k p'(t) \\
 R_s(t) &= -\sum_k Q'(t) \\
 R_r(t) &= R'_r(t - \delta) \\
 R'_r(t) &= \sum_m P'_r(t) + \sum_n (P'_s(t) - q'_c(t) - Q'(t))
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

ここに、 $p'$  は節点の支配面積を考慮した節点降水量であり、 $\sum_k$  は河川が位置する節点に関する総和、 $\sum_m$  は河川を除く全節点に関する総和、 $\sum_n$  は飽和地表面を有する節点に関する総和、 $\delta$  は地表流出量の河川流量に対する時間遅れを意味する。

また、 $\delta$  は  $P'_r(t)$  や  $(P'_s(t) - q'_c(t) - Q'(t))$  が得られた各節点の地表面と河川との距離等に起因した時間遅れであり、各節点と河川との距離も個々に異なるため時間遅れも個々に異なるが、近似評価の観点から平均的な遅れを  $\delta$  を用いて式(6)を示している。なお、地表流出量  $R_r(t)$  は河川流量のピーク成分に相当すると考えられることから、観測記録の各降雨と河川流量のピーク成分の時間遅れから、 $\delta$  は推定できるものと考えている。

#### (4) 地表流出量と空洞湧水量の推定を考慮した準三次元解析フロー

空洞湧水量、地表流出量の推定法を個々に説明してきたが、両者の推定を考慮した準三次元解析はかなり複雑になる。ここでは、非定常計算の特定時刻ステップにおける解析フローを図-6に示す。

図-6のフローにより、本論で提案した推定法を用いて、空洞湧水量と地表流出量・河川流量の近似的評価も可能な準三次元浸透解析が行なえる。ここで提案する準三次元解析は、広域かつ複雑な地形地質条件でも比較的簡単に解析モデルが作成できるため、地下水状況や水文流出状況および空洞湧水の水環境への影響等の実際的な検討に広く利用可能と考えられる。

### 3. ダム貯水池周辺の花崗岩盤に対する提案手法の適用

#### (1) 降水量・流出量の観測記録と解析条件

対象とする M ダムは、堤高 45m(重力式粗石コンクリート形式)で総貯水量 260 万  $m^3$  の上水用のダム貯水池であり、流域内は中生代の花崗岩類で構成されている。観測記録として、M ダムの 1991 年から 5 年間にわたる日降水量と日流出量を図-7に示す。観測記録によれば、一雨降水と流出量のピークの時間的遅れは、 $\delta = 1 \sim 2$  日であり、基底流量は概ね 20000  $m^3/day$  である。また、水収支を評価

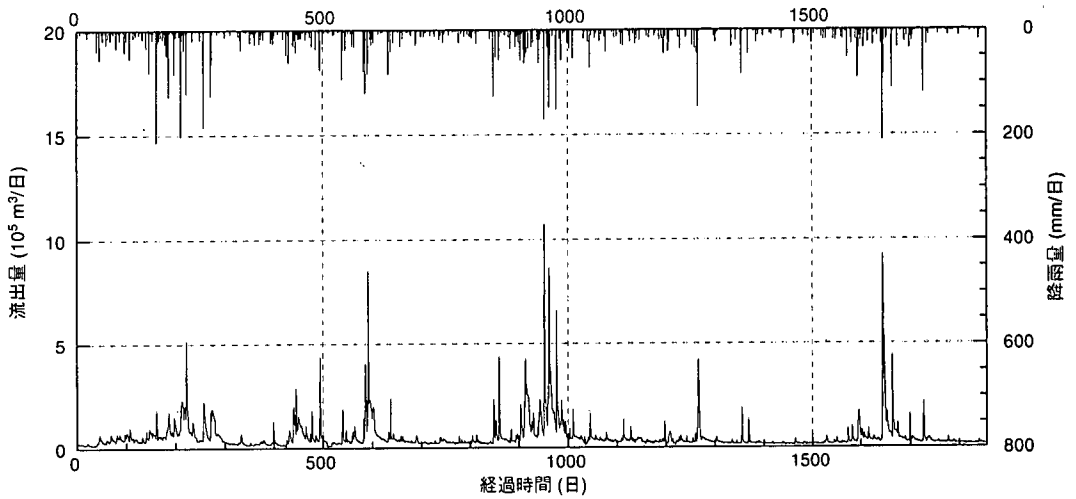


図-7 観測された日流出量と日降雨量

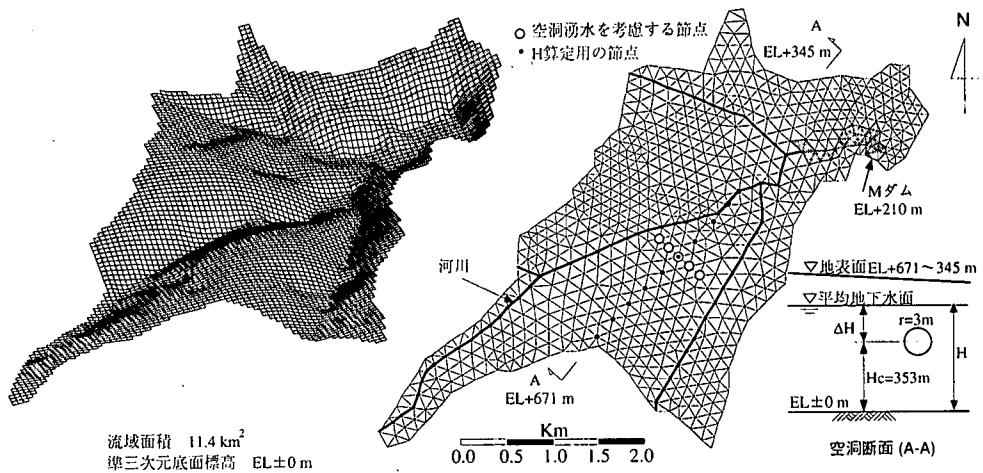


図-8 鳥瞰図と準三次元解析モデル

する上で必要となる蒸発散量は、文献<sup>12)</sup>により 2.356mm/day と推定されている。

次に、図-8にMダムの水収支域の鳥瞰図と準三次元 FEM 解析の解析モデルを示す。水収支域となる流域面積は 11.4Km<sup>2</sup>であり、山容は南から北に向かって地表標高が低くなり (EL+1000m~200m) 平均標高は EL+600m 程度あり、解析上の底面は EL±0m としている。

地質は花崗岩岩盤であり、地表から 20~30m 程度まで風化が進んでおり、リニアメント系も比較的発達した状況にあるが、透水性データや地下水位等のデータも得られていない。ここでは、降水量・ダ

ム流出量の観測記録を保有する M ダムの水収支域に対して、提案する準三次元解析法を適用して、流出量評価への適用性と地下水状況を示す。また、対象水収支域内に仮想の空洞モデル (空洞長 730m) を設置し、空洞湧水量の推定と流出量と地下水状況への影響検討を行う。解析ケースを表-1 に示している。

ケース 6 は空洞設置ケースで、図-8 に湧水を考慮する節点位置を「○」、湧水量推定に用いる平均水位  $H$  算定用の節点を「・」として示している。空洞は 730m と長く、空洞湧水の三次元性はそれ程強くないと考えられるので、ここでは平均地下水位  $H$

表-1 解析ケース

ケース	地層構成	空洞設置	浸透能 $P_{out}$	飽和透水係数 $K$ (cm/s)
1	一層モデル	なし	$\infty$	$1.0 \times 10^{-3}$
2	一層モデル	なし	$\infty$	$1.0 \times 10^{-4}$
3	一層モデル	なし	$\infty$	$1.0 \times 10^{-5}$
4	一層モデル	なし	100	$1.0 \times 10^{-4}$
5	二層モデル	なし	$\infty$	上層 $1.0 \times 10^{-4}$
6	二層モデル	あり	$\infty$	下層 $1.0 \times 10^{-5}$

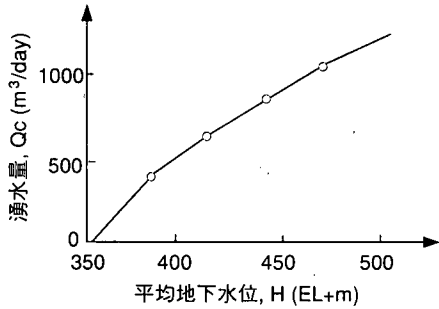


図-9 ケース6の  $H$  と  $Q_c$  の関係

と空洞湧水量  $Q_c$  の関係は、図-8のA-A断面を対象とした断面二次元浸透流解析で別途算出した。これを図-9に示しているが、図中にプロットした平均地下水水位  $H$  ごとに、定常計算により空洞湧水量  $Q_c$  を求めている。

解析は、底面から地表面までの1層モデルを基本とするが、地表の表土・風化層を考慮した2層モデルの場合は、新鮮岩盤に対応する下層を底面～地表面下20m、表土・風化層に対応する上層を地表面下20m～地表面とする。飽和透水係数  $K$  は  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  cm/s の範囲で設定し、不飽和浸透特性は  $K$  の値に応じて図-10のタイプ-I, IIを用いる<sup>13)</sup>。  $K < 1.0 \times 10^{-4}$  cm/s の場合はタイプ-I、  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s  $\geq K$  の場合はタイプ-IIである。図-10の関係は、  $K = 1.0 \times 10^{-5}$  cm/s の岩盤と  $K = 1.0 \times 10^{-4}, 1.0 \times 10^{-3}$  cm/s の岩盤の空隙率がそれぞれ0.1と0.2で、最大毛管上昇高が共に3mと仮定して、駒田の研究<sup>14)</sup>を基に設定したものである。解析領域周囲は不透水境界で、Mダム貯水池のみ水位を指定した境界で、沢等には水位等を与えない条件とした。蒸発散量を降水量から一律2.356 mm/day差し引くと、5年間の降水量から蒸発散量を引いた総和が河川流量の総和より小さくなる。そこで、両総和を等しくするため、ここでは地表に図-7の降水量から一律1.196 mm/dayの蒸発散量を差し引いて与える。なお、ケース6の場合は、降水量

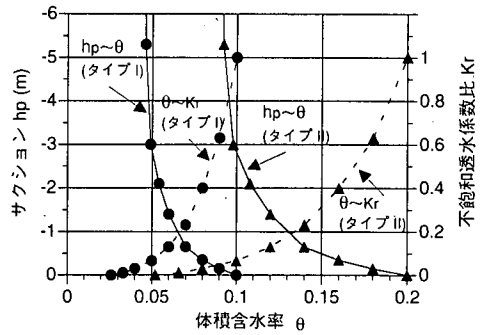


図-10 適用する不飽和浸透特性<sup>13)</sup>

に加えて図-9の  $H$  と  $Q_c$  の関係を考慮する。

以上のケース1から6の全ケースとも、時刻間隔1日の条件で5年間にわたる非定常計算を行うが、初期条件として、初期水位は地表面標高で与えている。

## (2) 解析結果および考察

一層モデルであるケース1からケース3の日流出量を図-11に示す。図中の最上段に降雨量の観測データを示し、その下にケース1～5の日流出量の計算結果を示している。図-7の観測流出量と比較して次のことがわかる。飽和透水係数が大きいときには地下水からの流出量、すなわち基底流量は多くなる。しかし、降水浸透成分が多くなるので、降水時のピーク流出量は低い。飽和透水係数が小さいと、逆の傾向を示す。観測されたピーク流出量からみると、一層モデルではケース2とケース3の間の飽和透水係数が観測結果と対応するものと考えられる。

浸透能の影響を検討するため、ケース4としてケース2の一層モデルに浸透能  $P_{out} = 100$  mm/dayを設定した。このケース4は、ケース2に比べ、降水量が100 mm/dayを超える日の流出量が多くなっていることがわかる。また、地表面から20mの深度までが風化層を想定した最も現実的と考えられるケース5の結果は、風化層の飽和透水係数が同じであるケース2と比較すると、図では差を読み取ることはできないが、基底流量は若干少なくなっている。しかし、ピーク流出量はほぼ観測値を表現できている。

以上のように、これらの5ケースから、本研究で提案した準三次元解析により降水時の流出量が表現できることがわかった。そこで、本解析の特徴である広域の地下水状況や地表流出状況について検討するため、800日経過後の比較的少雨時期と952日後の多雨時期を代表時点として、地下水水位と地表浸出点(飽和地表面)を図化した。図-12は800日経過後、図-13は952日経過後である。左図は地下水水位

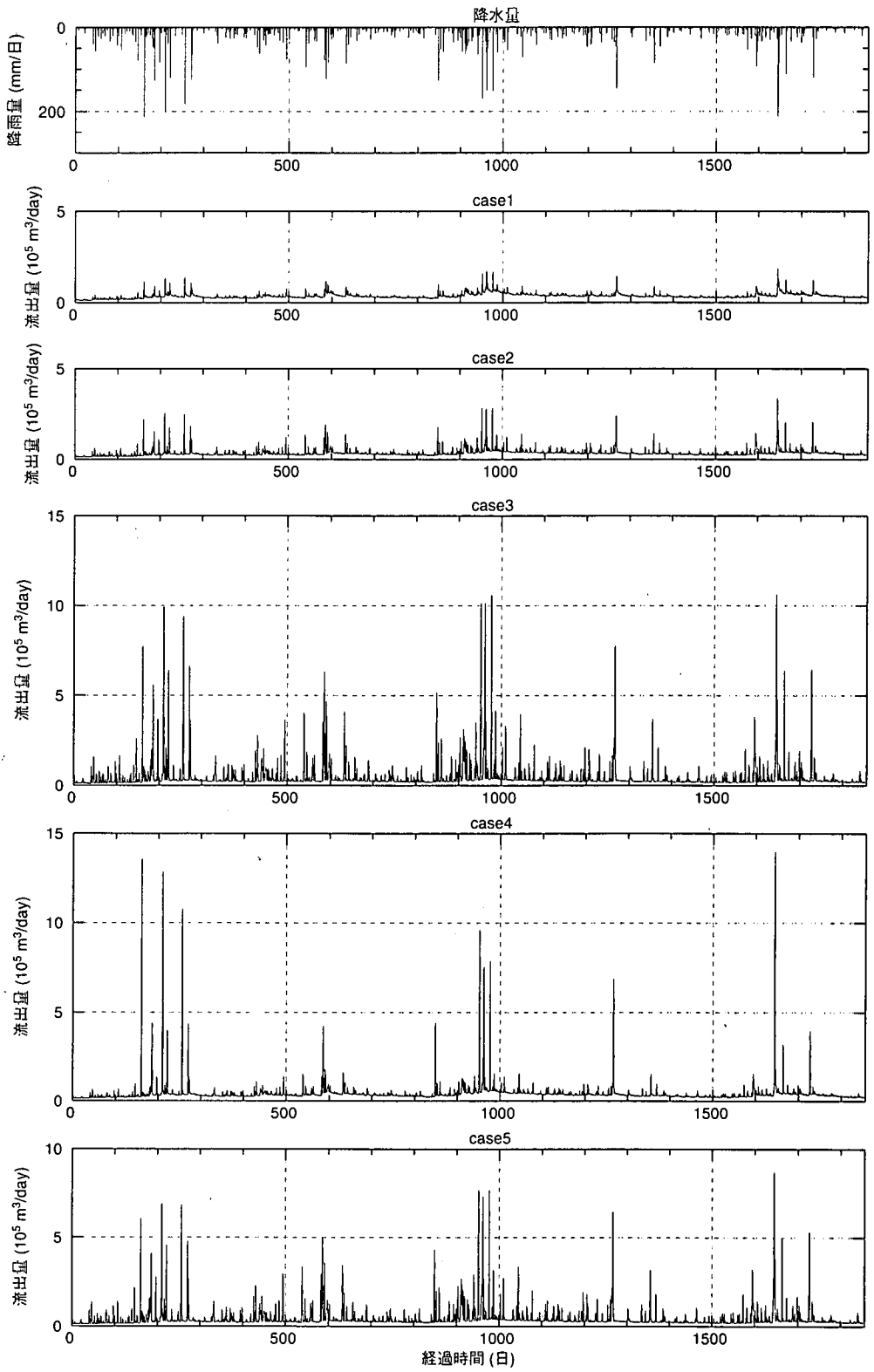
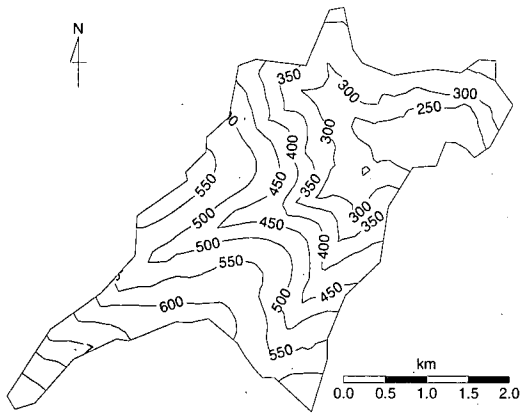
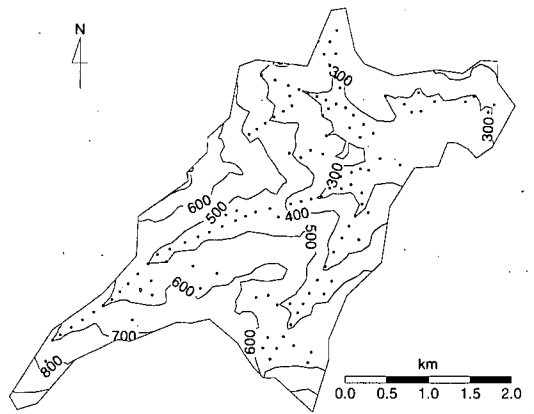


図-11 計算日流出量



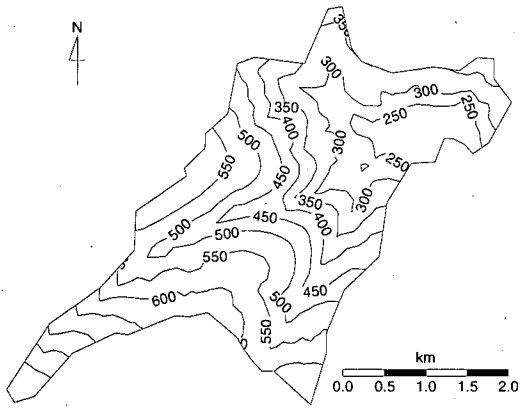


等地下水位線 (単位 EL+m) の分布

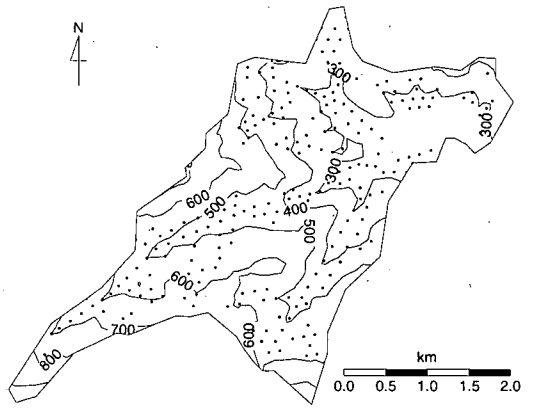


地表面標高 (単位 EL+m) と地表浸出点 (・) 分布

図-12 ケース5の地下水位分布と浸出点(800日後)の算出結果

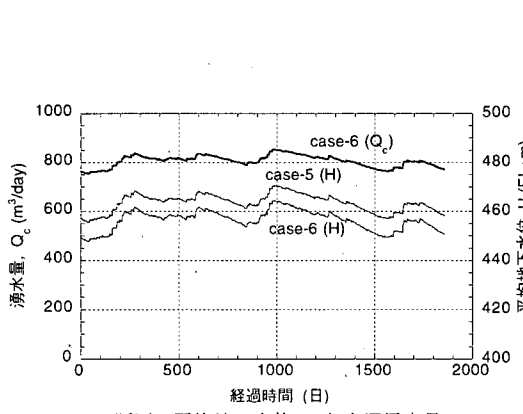


等地下水位線 (単位 EL+m) の分布

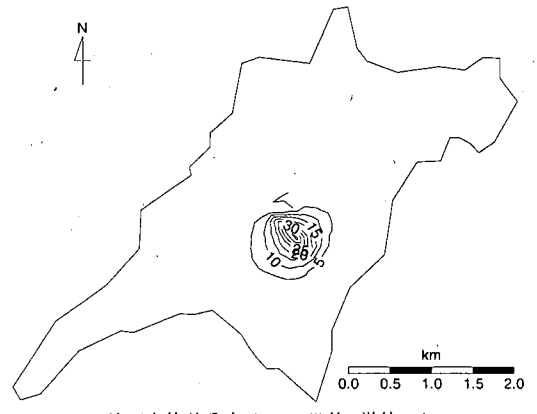


地表面標高 (単位 EL+m) と地表浸出点 (・) 分布

図-13 ケース5の地下水位分布と浸出点(952日後)の算出結果



A-A 断面の平均地下水位  $H$  と空洞湧水量  $Q_c$



地下水位差分布 (1095 日後; 単位 m)

図-14 ケース5とケース6の地下水流動算出結果の比較

分布をコンター表示しており、右図は地表面標高をコンター表示、地表浸出点を「・」で表現した。なお、貯水池の部分については水位境界となっているので、地表浸出点は現れない。図-12と図-13を比較すると、952日経過後の方が地下水位が高く、浸出点も広範囲に多数分布することがわかった。また地表浸出点は、地表面形状から、沢や河川近傍に形成されている様子がわかり、本解析は実際の地形を考慮して地表面処理が行えること、地表浸出点の算出により地下水位も地形を反映させた合理的な結果となることが認められた。

次に、ケース5の二層モデルで、図-8に示すような空洞設置する場合を想定した。このケース6の平均地下水位  $H$  と湧水量  $Q_c$  の経時変化を図-14の左図に示す。 $H$  は図-8のA-A断面の平均水位であり、ケース6に対する比較のためにケース5の平均地下水位  $H$  も併せて示している。空洞長730mを考慮すると、 $Q_c = 750 \sim 850 \text{ m}^3/\text{day}$  の変動をしており、 $H$  とはほぼ線形関係となっている様子やケース5と比べると9m程度低く推移していることがわかる。ケース5とケース6の地下水位分布は、50mピッチの等高線では9m程度の差はほとんど判定できない。そこで、同時刻のケース5とケース6の地下水位差の分布を図-14の右図に示す。この図は1095日経過後の分布であるが、地下水面低下が空洞位置を中心に生じていることがわかる。また、両ケースの  $H$  の差は9m程度で時刻にかかわらず一様であることから、どの時刻の地下水位差もほぼ同様であり、ケース6の日流出量もケース5とほぼ同じ結果になることがわかる。以上の両ケースの比較によって、空洞の設置による地下水状況や水文・流出状況への影響を定量的に把握できた。今回の解析の範囲では、平均水位の低下量は比較的小さく、日流出量への影響も小さかったが、提案手法はトンネル・空洞を設置する場合の地下水状況や水文・流出状況への影響検討に広く利用可能なものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、トンネルや空洞を設置した場合の広域地下水流動と水文・流出状況を同時に解析するとこの観点から、降水の地表面処理方法を示すと共に、地表流出量・空洞湧水量を評価可能な準三次元解析を提案し、同解析を実サイトに適用した。第1章で論じたように、従来の準三次元解析では水位低下に伴う空洞湧水量は算出できず、空洞設置による流出状況の変化もタンクモデル等では解析ができないなど、ここで対象とした解析内容は既往の手法では解

析が困難なものである。得られた提案解析手法の適用性をまとめると以下の通りである。

- (a) 本解析により、岩盤の透水性や降雨浸透能に応じた合理的な地表流出量が得られ、実際のダム流出量を表現できるものと考えられた。
- (b) 本解析で得られた地表浸出点や地下水位分布は、降水量の時系列変化や地形などを反映した合理的なものであった。
- (c) 空洞を設置した条件下においても、空洞位置に応じた地下水面低下や水位低下に伴う空洞湧水量および地表流出量が得られ、空洞設置に対する適用性も確認された。
- (d) 以上の適用結果から、本論で提案した地表面処理法、地表流出算定法および空洞湧水量推定法の合理性が示され、地表流出と空洞湧水を評価可能な準三次元解析の有効性が確認できた。

#### 参考文献

- 1) 村上郁雄, 大島洋志, 塚本正雄: 丹那トンネルの湧水・湧水はどうなっているか, トンネルと地下, Vol.8, No.10, pp.685-695, 1977.
- 2) 大島洋志: トンネル掘削に伴う地下水問題, 応用地質, Vol.38, No.5, pp.312-323, 1977.
- 3) 高橋彦治, 菊池幸吉, 吉川恵也, 桜井孝: 建設工事における地質工学, 鹿島出版会, pp.278-316, 1985.
- 4) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No.264, pp.84-96, 1977.
- 5) 河野伊一郎, 西垣誠: 有限要素法による広域地下水の準三次元解析, 岡山大学工学部土木工学教室 Report, No.82-1, 1982.
- 6) 百田博宣, 佐藤邦明: 割れ目系地山のトンネル・空洞を対象とした地下水の三次元地下水挙動の解析, 土木学会論文集, No.364/III-4, pp.41-50, 1985.
- 7) 岡太郎: 大阪南部地盤沈下地域における地下水解析, 第30回水理講演会論文集, pp.349~354, 1986.
- 8) 百田博宣, 藤城泰行, 青木謙治, 花村哲也: 降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動に関する解析的検討, 土木学会論文集, No.379/II-6, pp.74~82, 1987.
- 9) 矢田敬, 児玉敏雄, 今野裕喜, 西野治彦: 準三次元浸透流解析による復水工法の検討, 佐藤工業中央技術研究所 技術研究所報, No.15, pp.101~108, 1988.
- 10) 菅原正巳: 流出解析法, 共立出版, 1972.
- 11) 鈴木誠, 百田博宣: 準三次元浸透流解析における浸出面処理, 土木学会年次学術講演会, III-570, pp.1180-1181, 1992.
- 12) 近藤純正, 中園 信, 渡辺 力, 桑形恒男: 日本の水文気象 (3), 森林における蒸発散量, 水文・水資源学会誌, Vol.5, No.4, pp.8-18, 1992.
- 13) 百田博宣, 楠本 太: 多孔隙地山の地下空洞を対象とした三次元地下水解析, 第29回水理講演会論文集, pp.739-744, 1985.
- 14) 駒田広也: 飽和-不飽和土中の非定常浸透流解析, 電力中央研究所報告, No.377015, 1978.

(2000. 1. 31 受付)

# QUASI THREE-DIMENSIONAL GROUNDWATER FLOW ANALYSIS CONSIDERING THE APPROXIMATE EVALUATION OF SURFACE FLOW AND DISCHARGE IN CAVAN

Makoto SUZUKI, Hironobu MOMOTA, Kenji JINNO and Makoto HASEGAWA

Construction of tunnels and caverns affects not only groundwater flow and groundwater table over a wide area but also runoff in some cases. Changes in groundwater and runoff conditions during and after such construction should, therefore, ideally be estimated simultaneously by a hydraulic model that can reflect wide area topography and geology. In this study, methods for estimating surface discharge after the construction of tunnels was proposed, and the capacity of conventional quasi three-dimensional groundwater flow analysis methods was enhanced so that calculation of groundwater inflow into caverns due to changes in groundwater level could also be made possible. The proposed method was applied to the granite bedrock around an actual reservoir, and it could accurately evaluate the groundwater and surface discharge conditions during rainfall over a wide area. Applicability of the method to the study of groundwater inflow in caverns and surface discharge was confirmed by numerical simulation.