

## 割れ目系地山のトンネル・空洞を対象とした 地下水の三次元挙動の解析

### THREE-DIMENSIONAL GROUNDWATER ANALYSIS OF TUNNEL AND CAVERN IN FRACTURED ROCK GROUND WITH WEATHERED LAYER

百田博宣\*・佐藤邦明\*\*

By Hironobu MOMOTA and Kuniaki SATO

Until now, the quasi-three dimensional groundwater flow analysis has been used for many kinds of groundwater simulations in this country. However, to apply its computation method to the groundwater flow analysis for the tunnel and cavern in fractured rock masses is not available, because the discharges of both tunnel and cavern are unknown beforehand. In this paper, the authors proposed a new FEM technique for analyzing the flow around tunnel and cavern in fractured rock ground. The groundwater model is composed of some fractures and weathered layer on the rock ground, and the model can be applied to analyze the flow in both saturated and unsaturated aquifers under the assumption that the flow in weathered layer is subjected to the Dupuit's approximation.

#### 1. はじめに

近年、岩盤地下利用の一環として従来のトンネルに加え、燃料用貯蔵空洞や地下発電所などの多様な岩盤空洞が計画・施工されつつある。しかし、用途は別として、これらの地下水に関する主要課題は、トンネルや空洞の湧水量と周辺の地下水位変動をいかに正確に予測・制御するかという点に集約されよう。この種の研究を概観すれば、関連する研究<sup>1)~6)</sup>は必ずしも少ないとはいえないが、三次元的な地下水挙動の取扱いや岩盤地山の水理モデル、など残された問題もある。前者の課題としては、一般に用いられている二次元解析の適用性に関することである。實際上、地山は風化帯と岩盤の二層系で構成されていると考えられる。さらにこの地山構造に加え、トンネルや空洞の掘削によって、地下水は三次元的に挙動するが、二次元解析ではその実際上の再現性に限界がある。この点を考えて、近年三次元解析<sup>7),8)</sup>も開発されつつあるものの、より実用性のある研究開発が望まれるところである。

しかし、岩盤空洞やトンネルの地下水解析は、複雑な岩盤地山構造や幾何形状を考慮するとモデルが複雑となるため計算機の容量やコスト上の短所をもち、現時点では実用性の高い研究は見当たらないように思う。一方、井戸や開削を対象とした地下水挙動に目を転じると、被圧帯水層の地下水の系外からの流入出を考慮した準三次元多層解析<sup>9),10)</sup>と地盤の水理定数を地下水位の関数とした準三次元解析<sup>11)</sup>が開発され、その有用性はすでに認められている。岩盤内のトンネルや空洞の水理解析という場合、どちらかといえば後者の準三次元解析の方が適していると判断される。しかし、空洞やトンネルの湧水量が算定しにくいこと、またその周辺では鉛直流が卓越すること、などの理由により従来の準三次元解析はそのままでは適用しにくいのが実状である。

次に、地山の水理モデルに着目すると、特に割れ目系岩盤内の流れのモデル化が要点となる。こういった観点から既往の解析モデルを大別すれば、通常多孔媒体モデル<sup>1),2)</sup>、割れ目系を対象としたネットワークモデル<sup>12)</sup>、二重空隙モデル<sup>13)</sup>およびロック・ブロック・モデル<sup>3),14)</sup>などの岩盤の変形を考慮したモデルに分類できる。このうち、二重空隙モデルや岩盤変形モデルは岩盤の諸特性を含む優れたモデルではあるが、現時点では実用段階には至っていないと考えられる。この点、多孔媒体モデル

\* 正会員 工修 清水建設(株)大崎研究室  
(〒100 千代田区内幸町2-2-2)

\*\* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部  
(〒338 浦和市下大久保255)

とネットワークモデルは取扱いが簡単で実用性もっている。また、それらは岩盤の支配的な水理モデルと考えられるが、三次元的な地下水挙動を取り扱った例は少なく、また風化帯を連結した実際的なモデルは構築されていない。

このような背景を鑑み、本研究は地山を風化帯と岩盤の二層系で構成されると想定し、割れ目系地山の特性を考慮して三次元的な地下水挙動を簡明に解析することを目的とし、水理モデルを構築後、モデル化した二、三のトンネルや空洞を対象とした地下水挙動を検討するものである。

## 2. 地山の水理モデルの構築

周知のように、トンネルや空洞の対象となる地山は一般に上部は風化土で覆われ、その下部の弱風化層を経て割れ目系をもつ岩盤へと推移している。通常、表土や弱風化層の透水性は岩盤のそれに比べてかなり高く、ここでは両者を総称して風化帯とよんでいる。一方、岩盤の透水性は割れ目系と岩石のそれと決まるが、岩石の透水値はかなり低いため、岩盤の透水性はほとんど割れ目系のそれと決まってしまう。このような地山を対象にトンネルや空洞を掘削したとき、透水現象にかかわる地山を風化帯と割れ目系の2つに分けてモデル化し得よう。

水理的にみて、亀裂の少ない良好な岩盤の場合、岩体自体は不透水体で岩盤内の地下水は主要な割れ目系のネットワークのみを流れるものと考えることができる。これについては川本ら<sup>12)</sup>は二次元の地下水挙動を対象として、割れ目系を一次元のネットワークで表現している。この考え方を拡張すれば、三次元空間内の割れ目系は厚さをもった二次元の割れ目の組合せで表現できるはずである。一方、風化帯に限定すればたとえ岩盤内に空洞等があっても、地下水は平面的準一様流とみなすことができ、準三次元解析が適用できよう。したがって、風化帯と割れ目系岩盤を水理的に連結し、風化帯をもつ割れ目系地山の地下水解析モデルを導入することとし、その概念図を Fig. 1 に示す。図に示すように、本解析は深さ方向の水理定数の変化を考慮した風化帯と任意の走向、傾斜および厚さをもつ割れ目系を連結させたより実際的な地山モデルと考えられる。このモデルでは、Fig. 1 からわかるように、風化帯の地下水は水平方向に流れが卓越する準一様流、岩盤内では各割れ目内の二次元流、と考えて地山全体の三次元的な地下水挙動を簡明に解析することを目指している。また、従来の準三次元解析や割れ目系の解析にはみられない飽和-不飽和の浸透流理論<sup>15), 16)</sup>の導入も併せて試みることにする。

次に、亀裂の間隔が狭く亀裂密度が高い岩盤の場合、岩石自体の透水性がかなり低くても岩盤の水理モデルに

は多孔媒体モデルを採用することが至当であろう。しかし、これにかかわる三次元的な地下水挙動の合理的なモデルを作るにはいくつかの技巧や手法が要求されよう。本論では、風化帯と岩盤という水理定数と条件の異なった二層系地山に水理モデルとして準三次元解析を適用するが、空洞の影響を考慮するため Fig. 2 のように湧水影響領域 (equivalent discharge region) を設定する。この影響領域は、空洞の湧水に対する主要な平面的地下水供給範囲と定義されるもので、空洞の深さの増大に伴って拡大すると考えられ、具体的な検討は 4. (2) で後述する。したがって、本モデルでは Fig. 2 に示すように、空洞湧水量を事前に推定して湧水影響領域から排出すれば、二層系地山の地下水はこれに伴う水面勾配に起因した準一様流と考えられる。また、この水理モデルは任意の形状と鉛直方向の水理定数の変化を考慮した準三次元解析に新たに不飽和浸透を考慮しており、風化帯をもつ二層系地山の地下水解析モデルとみなせる。

このようにして、本研究の解析では次の2つの水理モデルを対象とする。

- (1) 風化帯をもつ割れ目系地山の地下水解析  
(割れ目系地山解析)

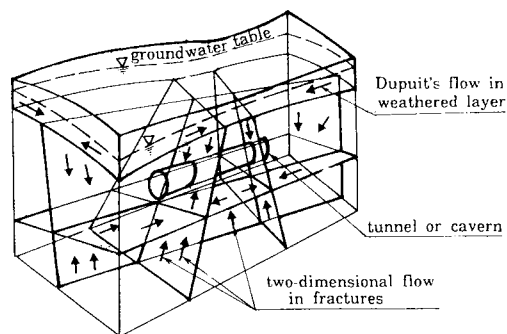


Fig. 1 Schematic presentation of non-uniformly fractured rock ground model with weathered layer.

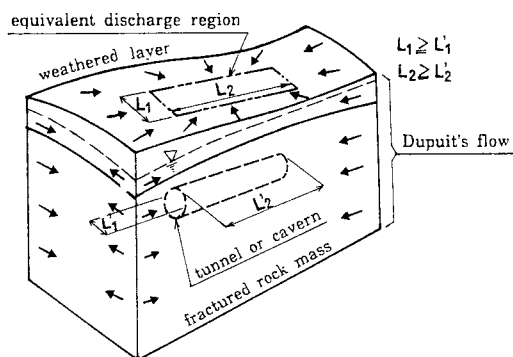


Fig. 2 Schematic presentation of uniformly fractured rock ground model with weathered layer.

(2) 風化帯をもつ二層系地山の地下水解析  
(二層系地山解析)

3. 解析理論の定式化

地下水流の一般式より上述した解析モデル(1),(2)の地下水流の基礎方程式を誘導し、さらにガラーキン法を用いて解析理論の定式化を図る。

いま、水平方向に  $x, y$  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おのおの  $p, h$ 、時間を  $t$  とすれば、飽和-不飽和帯における三次元地下水流の支配方程式は式(1)で与えられる<sup>15)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = (c + \alpha s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $K$ : 透水係数、 $s$ : 比貯留量、 $c$ : 比水分容量、 $q$ : 湧水率、 $\alpha$ : 飽和帯と不飽和帯でおのおの1または0となるダミー変数、である。

式(1)をもとにして、解析モデル(1),(2)の理論をそれぞれ示すが、風化帯をもつ割れ目系地山の解析理論の定式化を先に述べると次のようになる。

(1) 風化帯をもつ割れ目系地山の地下水流

a) 風化帯

Fig. 3 に示すように厚さ  $b$  の風化帯を弱風化層1と風化層2の二層に分け、かつ風化層2中に地下水面が位置する場合を考える。ここで、風化層1, 2にかかわる諸量に添字1, 2を付すこととし、おのおのの厚さを  $b_1$  と  $b_2$ 、飽和透水係数をおのおの  $K_1$  と  $K_2$ 、比貯留量  $s$  をおのおの  $s_1$  と  $s_2$  で示す。また、 $b_0$  は基準線から風化帯下端までの距離、 $b'_2$  と  $b''_2$  はおのおの風化層2中の飽和領域高さと不飽和領域高さとする。Fig. 4 には風化層2に関する不飽和浸透特性として、サクシオン  $p_s$  と体積含水率  $\theta$  および不飽和透水係数比  $K_r$  の関係を示す。

そこで、本地下水解析には不飽和領域も対象とするため、式(1)を  $z$  軸に関し  $b_0 \sim b_0 + b$  まで積分すれば次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{b_0}^{b_0+b} K \frac{\partial h}{\partial x} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{b_0}^{b_0+b} K \frac{\partial h}{\partial y} dz$$

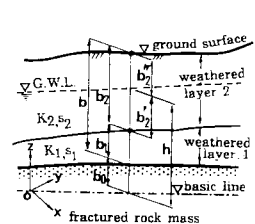


Fig. 3 Weathered layer and hydraulic conditions.

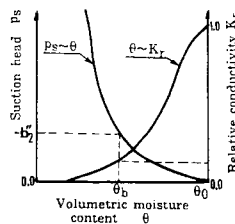


Fig. 4 A typical relationship between  $p_s \sim \theta$  and  $\theta \sim K_r$  in weathered layer 2.

$$+ Q_0 + V_b - V_0 = \int_{b_0}^{b_0+b} (c + \alpha s) dx \quad (2)$$

ここに、

$$V_b = \left[ K \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{z=b_0+b}, \quad V_0 = \left[ K \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{z=b_0},$$

$$Q_0 = \int_{b_0}^{b_0+b} q dz \quad (3)$$

であり、 $V_b$ : 降雨浸透などの地表からの流入水量、 $V_0$ : 風化帯から割れ目系に浸透する地下水量、である。

風化帯中の地下水を準一様流と仮定すれば、 $h$  は  $h = h(x, y, t)$ 、 $p$  は  $p = p(x, y, z, t) = h - z$  で表現でき、これを用いて式(2)を変形すれば、不飽和浸透を考慮した風化帯の地下水流の基礎方程式が次のように得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q - V_0 = (S_1 + S_2) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 $T, S_1, S_2$  および  $Q$  は次のように算定できる。

$$T = \int_{b_0}^{b_0+b} K dz = \int_{h-(b_0+b)}^{h-b_0} K dp$$

$$= K_1 b_1 + K_2 b'_2 + K_2 \int_{-b'_2}^0 K_r dp$$

$$S_1 = \int_{h-(b_0+b)}^0 c dp = \int_{-b'_2}^0 \frac{d\theta}{dp} dp = \theta_0 - \theta_b$$

$$S_2 = \int_0^{h-b_0} s dp = s_1 b_1 + s_2 b'_2$$

$$Q = Q_0 + V_b$$

上式中、 $T$  に関する右辺第三項 ( $K_2 \int_{-b'_2}^0 K_r dp$ ) は地下水面上部の不飽和域の透水量係数に相当する。また、 $S_1 = \theta_0 - \theta_b$  の  $\theta_0$  と  $\theta_b$  は Fig. 4 中に示すようにおのおの地下水面位置と地表面位置での体積含水率を示し、地下水面低下に伴う地表面のサクシオンの増大によって  $\theta_b$  は低下し、 $S_1$  はしだいに一定値に近づく性質をもつ。

b) 割れ目系

Fig. 1 の割れ目系部分の一般形態として、割れ目系が Fig. 5 のように複数の任意厚さをもつ割れ目で構成され、Fig. 6 のように単一成分は平行で厚さを  $w$  の割れ目とする。また、割れ目の厚さ方向の図心面上に局所座標系  $x', z'$  軸を置き、 $y'$  軸を割れ目面の法線方向とする。

そこで、式(1)を局所座標系で  $y'$  軸に関し、

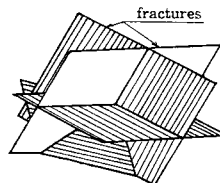


Fig. 5 Geometrical configuration of fractures.

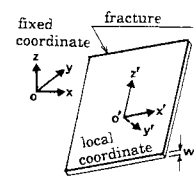


Fig. 6 Schematic explanation of a fracture.

-w/2~w/2 まで積分すれば次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x'} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} K \frac{\partial h}{\partial x'} dy' + \frac{\partial}{\partial z'} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} K \frac{\partial h}{\partial z'} dy' + \left( K \frac{\partial h}{\partial y'} \right)_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} + \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} q dy' = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} (c + as) dy' \dots\dots\dots (6)$$

ここで、岩体は不透水体であるから式(6)中の左辺第三項は零となる。また、 $h$ を $y'$ 軸方向に平均化し $h = h(x', z', t)$ として式(6)に代入すれば、割れ目系の地下水流の基礎方程式は次のように表現できる。

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left( K' \frac{\partial h}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial z'} \left( K' \frac{\partial h}{\partial z'} \right) + Q' = (c' + as') \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$K' = wK, \quad c' = wc, \quad s' = ws, \quad Q' = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} q dy' \dots\dots\dots (8)$$

(2) 風化帯をもつ二層系地山の地下水流

この場合、風化帯および岩盤中の地下水流はともに準一様流と仮定している。よって、不透水性基盤上の二層系地山では、前述の式(4)において $V_0 = 0$ と置けば対象とする地下水流の基礎方程式となる。式(4)は風化帯を二層で分けているため岩盤を連結すればさらに多層な地山となるが、その場合も式(4)と同様にして、その基礎方程式を誘導することができる。

(3) 有限要素法による離散化

一般形式として、(1)の風化帯をもつ割れ目系地山の地下水解析の有限要素法による離散化を初めに述べる。

風化帯および割れ目系の地下水流の基礎方程式は、風化帯に関する式(4)および割れ目系に関する式(7)より、おのおの以下のように表わせる。

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q - V_0 - (S_1 + S_2) \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$L'(h) = \frac{\partial}{\partial x'} \left( K' \frac{\partial h}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial z'} \left( K' \frac{\partial h}{\partial z'} \right) + Q' - (c' + as') \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

さらに、式(9)、(10)をガラーキン法で離散化すれば、おのおの次式が得られる。

$$A_{nm} h_m - B_n + C_n + D_n + E_{nm} \frac{\partial h_m}{\partial t} = 0 \quad (n, m = 1, 2, 3 \dots M) \dots\dots\dots (11)$$

$$A'_{nm} h_m - B'_n + C'_n + E'_{nm} \frac{\partial h_m}{\partial t} = 0 \quad (n, m = 1, 2, 3 \dots M') \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $M$ と $M'$ は風化帯と割れ目系のおのおのの解析領域を有限要素に分割した場合の節点数であり、各係数は次のように与えられる。

$$A_{nm} = \sum_e A_{nm}^e = \sum_e \iint_V \left( \frac{\partial N_n}{\partial x} \cdot T \cdot \frac{\partial N_m}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \cdot T \cdot \frac{\partial N_m}{\partial y} \right) dV \dots\dots\dots (13)$$

$$A'_{nm} = \sum_e A'_{nm} = \sum_e \iint_{V'} \left( \frac{\partial N'_n}{\partial x'} \cdot K' \cdot \frac{\partial N'_m}{\partial x'} + \frac{\partial N'_n}{\partial z'} \cdot K' \cdot \frac{\partial N'_m}{\partial z'} \right) dV' \dots\dots\dots (14)$$

$$B_n = \sum_e B_n^e = \sum_e \iint_V N_n Q dV \dots\dots\dots (15)$$

$$B'_n = \sum_e B_n^e = \sum_e \iint_{V'} N'_n Q' dV' \dots\dots\dots (16)$$

$$C_n = \sum_e C_n^e = \sum_e \int_{\Gamma} N_n U d\Gamma \dots\dots\dots (17)$$

$$C'_n = \sum_e C_n^e = \sum_e \int_{\Gamma'} N'_n U' d\Gamma' \dots\dots\dots (18)$$

$$D_n = \sum_e D_n^e = \sum_e \iint_V N_n V_0 dV \dots\dots\dots (19)$$

$$E_{nm} = \sum_e E_{nm}^e = \sum_e \iint_V (S_1 + S_2) N_n N_m dV \dots\dots\dots (20)$$

$$E'_{nm} = \sum_e E_{nm}^e = \sum_e \iint_{V'} (c' + as') N'_n N'_m dV' \dots\dots\dots (21)$$

式(13)~(21)中、 $N$ と $N'$ は形状関数、 $U$ と $U'$ は境界上の外向き法線流速を表す。また、 $\Gamma$ 、 $\Gamma'$ および $V$ 、 $V'$ に関する積分は、各要素の線積分および面積積分である。

いま、風化帯と割れ目系の交点総数を $M''$ 個とし、 $\Gamma''$ を風化帯と交わる割れ目系の境界部分 $\Gamma''_2$ とそれ以外の割れ目系の境界部分 $\Gamma''_1$ に分ければ、式(18)の $C'_n$ は次のように変形できる。

$$C'_n = C'_{n1} + C'_{n2} = \sum_{m=1}^{M'} \int_{\Gamma''_1} N'_n U' d\Gamma' + \sum_{m=1}^{M''} \int_{\Gamma''_2} N'_n U' d\Gamma'' \dots\dots\dots (22)$$

また、風化帯と割れ目系の地下水流の連続条件より $C'_{n2} + D_n = 0$ .....(23)の関係が成立する。よって、(1)の割れ目系地山解析に関する離散化方程式は式(11)、(12)を重ね合わせ、式(23)の関係を代入することによって未知量 $V_0$ が消去でき、最終的に次のようになる。

$$(A_{nm} + A'_{nm}) h_m - (B_n + B'_n) + (C_n + C'_{n1}) + (E_{nm} + E'_{nm}) \frac{\partial h_m}{\partial t} = 0$$

$$\therefore \bar{A}_{nm} h_m - \bar{B}_n + \bar{C}_n + \bar{E}_{nm} \frac{\partial h_m}{\partial t} = 0 \quad (n, m = 1, 2, 3 \dots M + M' - M'') \dots\dots\dots (24)$$

式(24)中の時間微分項については、時間ステップを $k$ とし、時間増分を $\Delta t (= t^{k+1} - t^k)$ として中央差分を用いれば、式(24)は次の漸化式で表わせる。

$$\left( \bar{A}_{nm}^{k+1/2} + \frac{2}{\Delta t} \bar{E}_{nm}^{k+1/2} \right) h_m^{k+1} = 2(\bar{B}_n^{k+1/2} - \bar{C}_n^{k+1/2})$$

$$-\left(\overline{A_{nm}^{k+1}} - \frac{2}{\Delta t} \overline{E_{nm}^{k+1}}\right) h_m^k \dots \dots \dots (25)$$

なお、 $\overline{E_{nm}}$ についてはNeumanの行った対角化<sup>15)</sup>を用いて算定する。式(25)に対して、流量またはピエゾ水頭に関する境界条件と初期条件を与えれば、各時間ステップごとに $h_m$ を未知量とした非線形連立方程式に帰着し、収束計算により所要の解を得ることができる。

以上の定式化によって、任意の空間構造をもつ風化帯を含んだ割れ目系地山中に空洞等を設けた場合の地下水解析を一般的に行うことができる。たとえば、上述の解析モデル(1)の割れ目系地山解析の場合には、式(25)によって地下水流(水頭)の分布や湧水量の経時変化を算定することが可能である。また、(2)の二層系地山解析の場合には、式(11)で $D_n=0$ と置き、式(25)と同様の時間に関する漸化式を用いることによって地下水流(水頭)の分布および経時変化を求めることができる。

4. 解析結果とその検討

まず、数値解析法の適用性と不飽和浸透の影響を把握するため、性質のよく知られた不圧地下水のTheisの解析解と二層系地山解析を単純化した一層系モデルの解を比較検討する。ついで、風化帯を有する実際の地山内のトンネルや空洞を対象とした地下水挙動について、二層系地山解析の性質と適用性を検討する。さらに、割れ目系地山解析でも同様に、その地下水挙動を明確にするとともに解析法の有用性を把握する。

(1) Theisの解析解による二層系地山解析の検討

本解析の適用性と不飽和浸透の影響を把握するため、Theisの解析解と比較検討する。周知のように、Theisの解析解の基礎方程式、初期条件、境界条件および解は地下水位 $h$ に関して次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} &= \frac{S_0}{T_0} \frac{\partial h}{\partial t} \quad S_0, T_0 = \text{const.} \\ t=0; h &= H \\ r=\infty; h &= H, \quad r=0; Q_p = \text{const.} \\ \Delta h &= H - h = \frac{Q_p}{4\pi T_0} W(\eta) \end{aligned} \right\} \dots (26)$$

ここに、 $r$ :揚水井からの距離、 $Q_p$ :揚水量、 $S_0$ :貯留係数、 $T_0$ :透水量係数、 $H$ :不透水層上の初期水位、 $W(\eta)$ :井戸関数、 $\Delta h$ :水位低下量、である。

この解析解に対し本計算ケースをTable 1、解析解とそれらの非定常時の解析結果をFig. 7に示す。使用した計算モデルの概念図はFig. 7中に示しており、 $T_0$ は飽和透水係数 $K_0$ と式(26)中の $H$ の積で $T_0=500 \text{ m}^2/\text{day}$ 、 $S_0$ は0.1および $Q_p=600 \text{ m}^3/\text{day}$ であり、これらがTheisの解析解の解析条件である。これに対し、本計算

Table 1 Computed hydraulic conditions.

CASE	capillary height h(STM)	notations	
		$\theta^*=0.001$	$\theta_0=0.101$
A	Theis model		
B.1	-0.001		
B.2	-0.500		
B.3	-1.000		
B.4	-2.000		

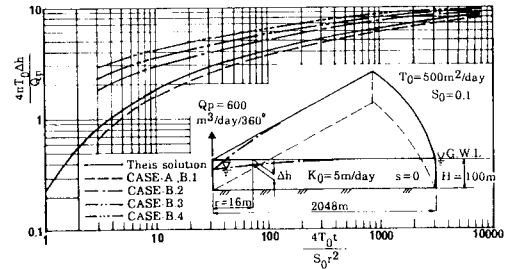


Fig. 7 Comparison of present analyses and Theis analytic solution at radial distance  $r=16 \text{ m}$ .

ではTable 1に示すように、CASE-AはTheisの解析解モデル、CASE-Bでは表中の簡略化した不飽和浸透特性に基づき、毛管上昇高 $h_s$ のみを変えてCASE-B.1~B.4を設定している。Fig. 7は横軸に時間と距離に関する無次元量 $4 T_0 t / S_0 r^2$ 、縦軸には $\Delta h$ に関する無次元量 $4 \pi T_0 \Delta h / Q_p$ をとり、代表位置の $\Delta h$ として $r=16 \text{ m}$ の値をプロットしている。

Fig. 7によれば、CASE-AとB.1はTheisの解析解より幾分低い値で解析初期に10%程度の差異はあるが、時間の経過に伴って定性的かつ定量的によく一致する傾向を示し、本解析は数値計算上必要な精度を有すると考えられる。また、CASE-B.2~B.4では毛管上昇高 $h_s$ が高いものほど水面上部の残留飽和度が高くなるため、水面低下が早くなっており、不飽和浸透の影響を明確に把握できる。

(2) 二層系地山解析と鉛直二次元解析の比較検討

風化帯をもち、かつ均質に割れ目系が十分発達した岩盤地山に空洞やトンネルを掘削した場合の周辺地下水位変動を単純化したモデルで検討するため、空洞の長手方向の地下水挙動を考えない鉛直二次元の飽和-不飽和地下水解析と二層系地山解析を比較して、今回開発した解析の適用性を吟味する。

a) 解析条件

鉛直二次元解析と二層系地山解析の計算モデルは対象性を考慮し、解析半領域をFig. 8に示す。図のように、この計算では地山は水平な風化帯と岩盤の二層系とし、空洞は大気圧条件下にある $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ の矩形断面形状とする。初期水面は風化帯中央に位置し、地山側方は静

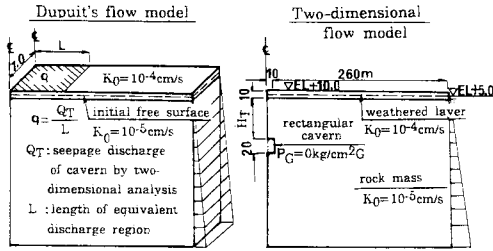


Fig. 8 Uniformly-fractured rock ground model having rectangular cavern.

水圧境界とし、両モデルの非定常解析を実施する。加えて、二層系地山解析の適用性には空洞掘削深さ  $H_T$  が影響すると予測されるため、鉛直二次元解析では  $H_T=20$  m, 60 m, 100 m の 3 ケースを解析の対象とする。他方、二層系地山解析では湧水量  $Q_T$  はすべて鉛直二次元解析で得た値を用いて計算するが、その湧水影響領域長  $L$  は  $H_T$  に応じて拡大すると考え、 $L$  は  $H_T$  ごとにパラメーターとして扱う。すべてのケースで、風化帯と岩盤の飽和透水係数  $K_0$  は、風化帯は透水性の低い砂、岩盤は 1 ルジオン程度の透水性を仮定し、おののお  $K_0=10^{-4}$  cm/s と  $10^{-5}$  cm/s とする。次に、風化帯と岩盤の不飽和浸透特性は Fig. 9 の関係 ( $p_s \sim \theta \sim K_r$  関係 A, B) を仮定した。この関係については、もっぱら砂質土を対象とした研究が行われてきたが岩盤を対象としたものはなく、ここでは計算手法そのものに力点を置き、駒田の推定法<sup>16)</sup>を含む他の結果も併せて両地層の特性を決定した。すなわち、 $K_0$  の値より類推して風化帯と岩盤の間隙率はおののおの 0.2 と 0.1 とし、自然飽和度はこれら間

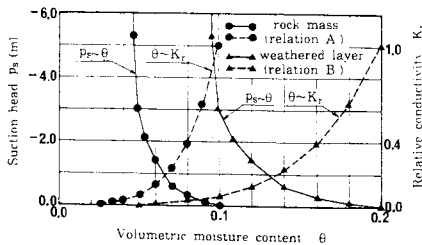


Fig. 9 Relationship between  $p_s \sim \theta$  and  $\theta \sim K_r$  in weathered layer and rock mass.

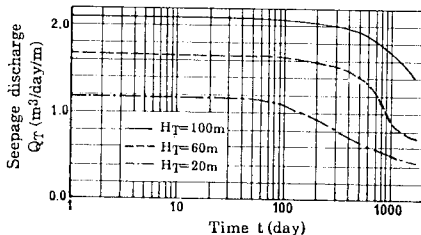


Fig. 10 Computed seepage discharge  $Q_T$  with time  $t$  by two-dimensional flow analyses.

隙率のおののおの半分、また毛管上昇高はともに 3 m とし、 $\theta$  と  $p_s$  の関係を算定している。 $K_r$  については土質の種類に関係なく  $K_r$  は飽和度に関してほぼ一致する性質<sup>16)</sup>を利用して算定している。

b) 解析結果

Fig. 10 に鉛直二次元解析の湧水量  $Q_T$  の経時変化を、Fig. 11 には鉛直二次元解析と地下水面が空洞に到達するまでの二層系地山解析による地下水位変動の算出結果を示す。まず、鉛直二次元解析による地下水挙動について述べる。Fig. 10 によれば、このモデルの  $Q_T$  は初期にはほぼ一定値でかつ  $H_T$  に比例関係であるが、 $t=100$  日付近で  $H_T$  の小さいケースから  $Q_T$  が早期に低減することがわかる。これはちょうど地下水位が風化帯から岩盤に降下する時点と一致している。同様に Fig. 11 でこのモデルの計算結果に着目すると  $H_T$  の小さいものほど水面低下が早期に認められ、水面低下は  $Q_T$  の大きさばかりでなく  $H_T$  にも関係することがわかる。

上述の地下水位変動に着目して二層系地山解析の適用性を Fig. 11 より考察すれば、 $L=10$  m の場合については  $H_T=20$  m を除く本解析の水面低下は鉛直二次元解析結果より早く、その傾向は  $H_T$  が大きいケースほど顕著であることがわかる。この結果は、 $H_T$  の増大に伴って  $L$  を空洞幅より大きくとる必要性を示唆するものである。この観点から、二層系地山解析による水面低下が鉛直二次元解析結果と対応する  $L$  の条件を Fig. 11 より考えれば、経過時間で異なるがおおむね  $L$  は  $H_T$  の 1.0 ~ 1.5 倍程度に設定すればよいと判断できる。

(3) 割れ目系地山解析による地下水挙動の検討

一般に、岩盤内の断層や亀裂系は地質営力や生成過程

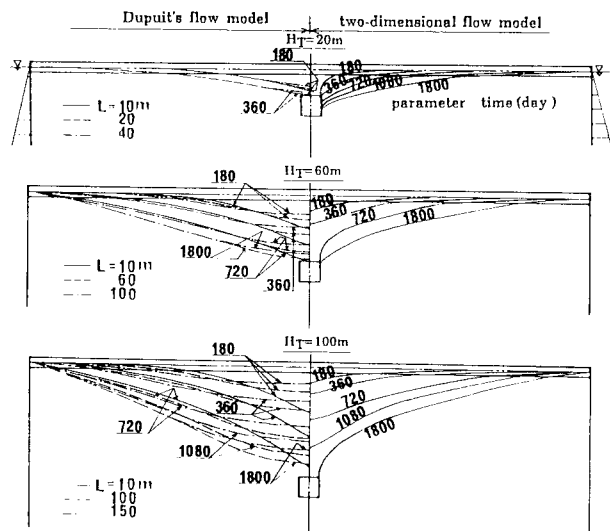


Fig. 11 Comparison of free surface by two-dimensional flow analyses and Dupuit's flow analyses.

に依存し、簡単にその幾何形状や構造形態を形式化して扱うことは困難である。したがって、割れ目系地山解析では開口亀裂から断層までの種々の割れ目の検討が可能であるが、以下に示す計算例ではかなり単純化して湧水に支配的と考えられる小断層規模の割れ目系を設定して解析を進める。また、湧水は空洞の掘削形式にも依存することに注目して、掘削段階を考慮した解析も試みる。

a) 解析条件

Fig. 12 に示すように、地山が風化帯と岩盤の二地層から成り、岩盤が岩体と空洞長手方向の割れ目 a とそれに直交する割れ目 b, c, d で構成された地山に注目する。空洞は 20 m × 20 m の矩形断面形状で長さ 100 m、およびその天端深度は EL-40 m で内圧は大気圧と設定した。初期水面は風化帯中央に位置し、地山側方は全周静水圧境界とした。ここで、Fig. 12 に示す割れ目 a~d は幅 2 m で通常粘土充填物を含んだ小断層を想定しており、空洞の縦断および横断方向の地下水挙動に最も影響する鉛直で格子状の断層系とする。

この Fig. 12 に基づき解析する場合、岩体が微少な亀裂を多くもつときは多孔媒体地山モデル、岩体が不透水体とみなせる場合は本論で提案している割れ目系地山解析モデルとする。この両者の全ケースを Table 2 に示すが、CASE-1 が断層 a~d を無視した多孔媒体モデル、CASE-2~4 が割れ目系地山モデルである。ここで、地下水解析の主要量となる湧水量を算出するため、

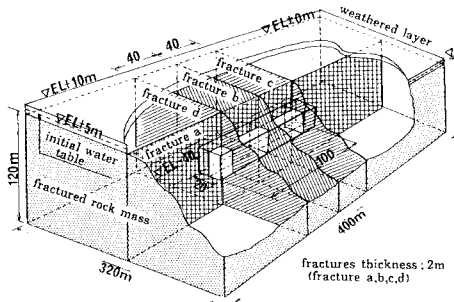


Fig. 12 Fractured rock ground cavern model used in computations.

Table 2 Hydraulic properties and computed cases.

	$K_0$ (cm/s)			relationship $p_s \sim \theta \sim K_r$		
	weathered layer	fractured rock mass		weathered layer	fractured rock mass	
		rock mass	fractures		rock mass	fractures
CASE-1 two-dimensional model of porous media	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.0	relation B	relation A	—
CASE-2 four fractures model	$1.0 \times 10^{-4}$	0.0	$1.0 \times 10^{-4}$	B	—	relation B
CASE-3 four fractures model having excavation steps	$1.0 \times 10^{-4}$	0.0	$1.0 \times 10^{-4}$	B	—	B
CASE-4 two fractures model	$1.0 \times 10^{-4}$	0.0	$1.7 \times 10^{-4}$	B	—	B

CASE-1 には便宜的に鉛直二次元の飽和-不飽和の地下水解析を用いる。これに対し、割れ目系地山解析では断層 a~d を対象とした四断層モデル (CASE-2) に加え、断層 a, b のみを考慮した二断層モデル (CASE-4) も設定している。これら Table 2 中の CASE-1, 2, 4 では空洞を一時に掘削完成するものとする ( $t=0$  日)。しかし、掘削段階時の地下水挙動を知ることは現場では大切となるので、Table 2 に示すように CASE-2 の場合に地山を十段階掘削する CASE-3 のモデルも設定しており、この掘削方式と手順を Fig. 13 に示す。通常、空洞等の掘削は岩質の強度、断面の大きさや形状で種々の方式が採られているが、地下水挙動に最も影響するファクターは切羽の進行と考えられ、Fig. 13 の全断面掘削方式とした。Table 2 中に示した各ケースの飽和透水係数  $K_0$  は CASE-1 の場合は Fig. 8 の条件と同じとし、風化帯と岩盤でおのおの  $K_0 = 10^{-4}$  cm/s および  $10^{-5}$  cm/s とした。一方、CASE-2~4 では風化帯の  $K_0$  は CASE-1 と同じであり、断層系の  $K_0$  の値が重要となる。ここでは、初期の水面低下過程で CASE-2 と CASE-4 のおのおの湧水量  $Q_T$  が CASE-1 の  $Q_T$  と一致するよう両ケースの断層系の  $K_0$  を算定している。CASE-2 では  $K_0 = 1.0 \times 10^{-4}$  cm/s、CASE-4 では  $K_0 = 1.7 \times 10^{-4}$  cm/s である。また、不飽和浸透特性 ( $p_s \sim \theta \sim K_r$  関係) は前述した Fig. 9 の関係を用い、 $K_0 = 10^{-5}$  cm/s の岩盤には  $p_s \sim \theta \sim K_r$  関係 A、 $K_0 = 10^{-5}$  cm/s の岩盤には  $p_s \sim \theta \sim K_r$  関係 B とした。

b) 解析結果

全ケースの湧水量  $Q_T$  の経時変化を Fig. 14 に示す。割れ目系地山解析では空洞湧水は断層系のみで起こるため、Fig. 14 には CASE-3 の掘削進行の量的評価として空洞掘削部分の壁面に現われた断層系の面積  $A_s$  (area of seepage discharge) も併せて示す。CASE-1 の地下水位変動を Fig. 15、CASE-2, 4 の結果を Fig. 16 およ

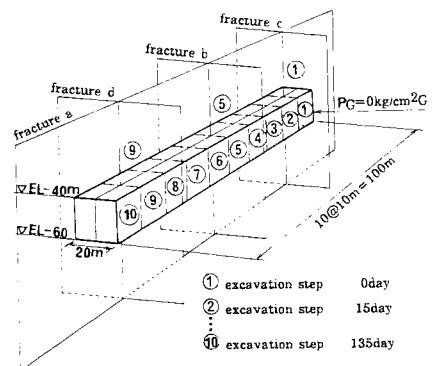


Fig. 13 Excavation process and stages of CASE-3.

び CASE-3 の結果を Fig. 17 に示す。Fig. 15 は空洞横断面位置の地下水位変動、Fig. 16, 17 中の CASE-2, 3 は風化帯の平面水位変動と断層 a~d の各鉛直断面位置での水位変動および Fig. 16 中の CASE-4 は風化帯と断層 a, b 位置での結果を示している。これら Fig. 15

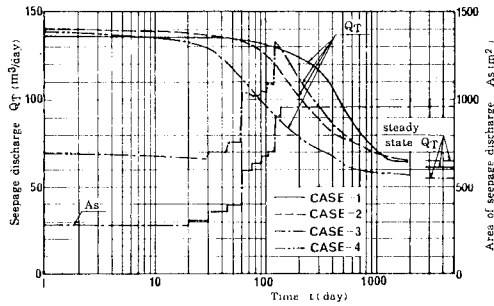


Fig. 14 Seepage discharge  $Q_T$  with time  $t$  by two-dimensional flow analysis and present analyses (in cases of CASE-2 ~4).

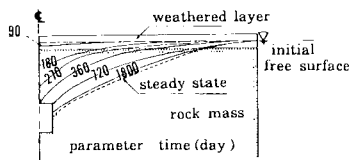


Fig. 15 Free surface change with time in CASE-1 by two-dimensional analysis.

~17 では CASE-3 の断層 a を除いた各結果は対称性を利用し、CASE-2, 4 の風化帯では 1/4 領域で、その他は半分領域で描いている。さらに、風化帯の平面水位変動としては、地下水面が断層系に侵入する EL±0 m の地下水位コンターの経時変化を代表値として示している。

以下に、Fig. 14~17 の結果に注目して割れ目系地山解析と通常の多孔媒体モデル解析の相違および逐次掘削の影響、の2つについてその地下水挙動の性質を述べる。

まず、割れ目系地山解析による地下水挙動に注目し、鉛直二次元モデル(CASE-1)と四断層モデル(CASE-2)および二断層モデル (CASE-4) の結果を比較する。

Fig. 14 によれば、空洞掘削後、湧水量  $Q_T$  は時間の経過に伴い低減するが、その低減は CASE-4, 2, 1 の順に早期に生じ、最終的に三者の  $Q_T$  はほぼ一致することがわかる。また、この湧水量の経時変化は地下水面の低下傾向とよく対応しており、Fig. 15, 16 より CASE-4, 2, 1 の順に地下水面低下が早くなっていることが認められる。たとえば、地下水面の一部が風化帯から岩盤に降下する時点は、CASE-4 では 30 日以下、CASE-2 では 60 日以下および CASE-1 では 90 日以上の結果となり、この時点が Fig. 14 の  $Q_T$  の急激な低減開始時点とほぼ一致していると判断できる。また、多孔媒体モデルと割れ目系地山モデルの地下水面の低下傾向を詳細に吟味すると、両モデルの地下水挙動の違いが明確になる。

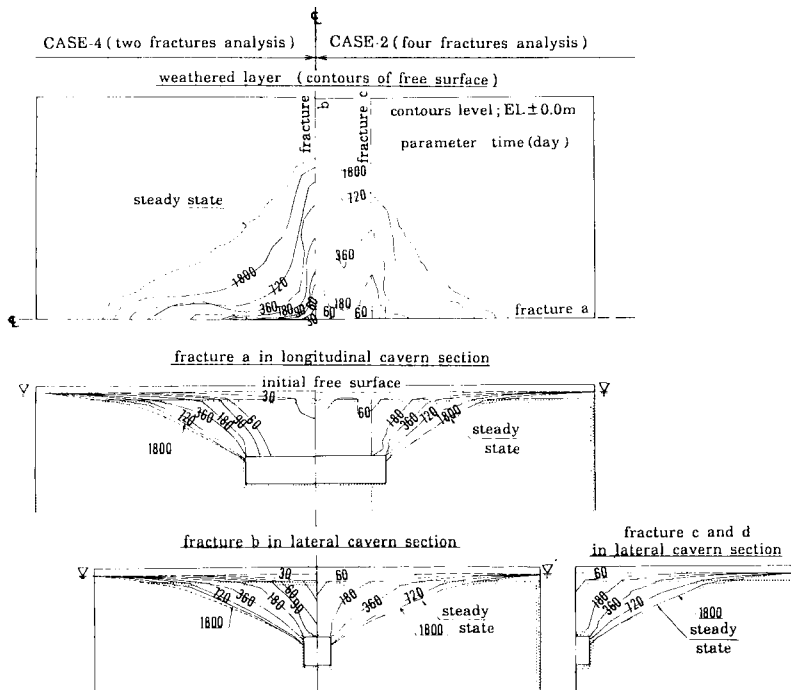


Fig. 16 Free surface withdrawal with time in CASE-2 (four fractures) and CASE-4 (two fractures).



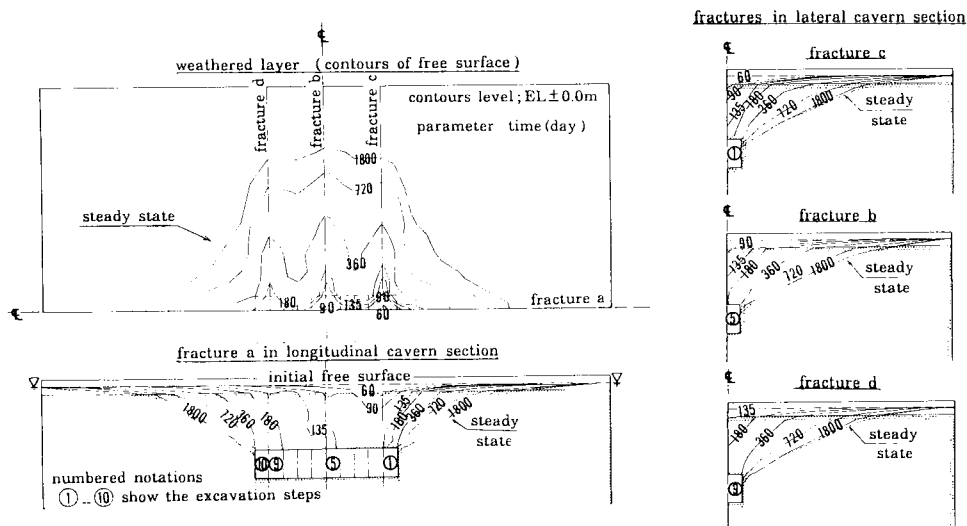


Fig. 17 Free surface withdrawal taking excavation process into consideration with time in CASE-3.

すなわち、Fig. 15 の鉛直二次元モデルは風化帯があるにもかかわらず滑らかで緩やかな水面形で低下するのに対し、Fig. 16 の割れ目系地山解析では風化帯と断層系の境界面で水面形が不連続であること、水面が風化帯から断層系に侵入後空洞上部より急激な水面低下を生じ、水面が空洞に到達後その低下領域が拡大するという興味深い結果が得られている。また、Fig. 16 の結果では風化帯の地下水面低下が鉛直断層系の上部位置から起こる状況を明快に理解できる。これら上述の結果を要約すれば、割れ目系地山解析による地下水挙動の特徴は、多孔媒体モデルと比較して  $Q_T$  や地下水面が早期から低下するとともにその低下・低減傾向が急激な点にあるといえよう。また、Fig. 14~16 から、割れ目系地山解析では断層の数が多くなれば多孔媒体モデルの地下水挙動に推移していくことが予想され、割れ目系地山解析の適用性と其の範囲を示したものと考えられる。

次に、逐次掘削の地下水挙動への影響に目を転じ、四断層モデル (CASE-2) と四断層十段掘削モデル (CASE-3) の解析結果を比較する。湧水量  $Q_T$  の経時変化を示した Fig. 14 によれば、CASE-2 の  $Q_T$  は時間の経過に伴う低減傾向を示すのに対し、CASE-3 では空洞掘削時 (135 日以前) と掘削後 (135 日以降) の二期間で本ケースの特徴的な  $Q_T$  の変化傾向をとらえることができる。すなわち、CASE-3 では空洞壁面上の断層系の面積  $A_s$  の増加に伴って掘削時の  $Q_T$  は増大するが、特に断層 b, d が掘削される五段階掘削時 (60 日) と九段階掘削時 (120 日) は他の掘削段階に比べて  $A_s$  の増加率が高いことに対応して  $Q_T$  の増加率が大きくなっていることがわかる。一方、CASE-3 の掘削後の  $Q_T$  はし

だいに CASE-2 の結果に漸近する推移状況が得られており、掘削時の結果も加えれば、CASE-3 の  $Q_T$  は空洞掘削の影響を端的に示す合理的な結果と考えられる。また、Fig. 17 によれば、CASE-3 では掘削段階の早い断層 c, b, d の順に地下水面が断層に侵入するとともに、掘削終了後、時間の経過に伴って CASE-2 の結果に漸近する地下水面の変化状況が得られている。たとえば、360 日の地下水面に注目すれば、CASE-3 の各断層の水面位置がほぼ一致するとともに、これらは CASE-2 の結果とよく対応していることがわかる。これら CASE-3 の地下水面の推移状況は  $Q_T$  の変化傾向とよく合致した結果と判断でき、空洞掘削時の地下水挙動の特徴は切羽が断層などを貫通する際に生じる比較的短期間の  $Q_T$  の増加と急激な水面低下と考えられる。

### 5. 結 論

割れ目系地山の三次元的な地下水挙動の簡便でより実地的な解析手法の開発を目的として、風化帯をもつ割れ目系地山の地下水解析および風化帯をもつ二層系地山の地下水解析、の 2 つの水理モデルを構築し、飽和-不飽和の浸透流理論と FEM 手法を用いて定式化を行った。さらに空洞を含む地山を対象としてその地下水挙動を検討した。

これら本研究で得られた結果は以下のようになる。

- (1) ここで提案した水理モデルのうち、特に割れ目系地山解析は、風化帯を含む割れ目系地山に空洞を設けたときの地下水挙動が明らかになるばかりでなく、三次元場の水理解析にもかかわらず、従来の二次元解析法と同様な簡便な解析手法といえる。

(2) 理論の検証として、Theisの解析解と二層系地山解析を比較した結果、二層系地山解析の適用性と不飽和浸透の影響の一端を認めることができた。

(3) 二層系地山解析を空洞周辺の地下水位変動解析に適用し鉛直二次元解析と比較した結果、空洞設置深度 $H_1$ に応じた湧水影響領域長 $L$ を適切に設定する必要があると判断された。今回の計算範囲では $L/H_1=1.0\sim 1.5$ と推算された。

(4) 空洞を設置した鉛直二次元の多孔媒体モデルと割れ目系地山解析による地下水挙動を比較した。これにより、割れ目系地山解析は多孔媒体解析に比して湧水量や地下水面の低下が早く、かつ急激な低下・低減傾向を示すことが把握できた。また、割れ目系地山解析では、風化帯と断層系の境界面で水面形状が不連続であり、水面低下は空洞上部より急激に起こることが認められた。

(5) 上述の割れ目系地山解析で空洞の逐次掘削の影響を検討した結果、掘削に応じた湧水量の増加と水面低下が得られ、その影響の一端を知ることができた。特に掘削に伴う湧水量の増加は、報告されている掘削時の異常出水の現象を説明したものと推測され、このような問題に対しても割れ目系地山解析は適用できるものと考えられる。

最後に、本研究における地山の割れ目系モデルには解析を提示する都合上、かなり単純化した形態を用いたが、実際上の複雑な割れ目系空間構造においても割れ目系地山解析は応用され得るものであることを付記しておく。

#### 参 考 文 献

- 1) 駒田広也ほか：水封式燃料地下貯蔵用空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討，土木学会論文報告集，No. 300，pp. 69～80，1980年8月。
- 2) 百田博宣ほか：グリーン公式による浸透流解析法の岩盤タンクへの適用，第26回水理講演会論文集，pp. 601～606，1982年2月。
- 3) Sato, K. et al. : Groundwater analysis of underground cavern by means of rock block model, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 4, pp. 30～44, Dec., 1982.
- 4) 佐藤邦明：岩盤地下空洞の湧水，土木学会誌，pp. 69～75，1983年3月。
- 5) 佐藤邦明ほか：岩盤地下空洞掘削による非定常地下水の近似解法，トンネルと地下，第14巻，第12号，pp. 39～45，1983年12月。
- 6) 伊藤 洋ほか：岩盤地下空洞の地下水に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 342，pp. 97～106，1984年2月。
- 7) Akai, K. et al. : Finite element analysis of three-dimensional flows in saturated-unsaturated soil, 3rd. Inter'l Conf. on Numerical Methods in Geomech., Aachen, 1979.
- 8) 駒田広也ほか：フィルダムの三次元浸透流解析，大ダム，No. 86，pp. 1～15，1978。
- 9) Fujinawa, K. : Finite element analysis of groundwater flow in multi-aquifer model, J. of Hydro., Vol. 33, pp. 349～362, 1977.
- 10) 藤崎克博ほか：準三次元多層および三次元有限要素モデルによる非定常被圧地下水流の解析，地球科学，33巻，2号，pp. 73～84，1979。
- 11) 河野伊一郎ほか：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年12月。
- 12) 川本眺万ほか：亀裂性岩盤内の浸透解析について，発電水力，No. 197，pp. 7～16，1977年3月。
- 13) Barenblatt, G. et al. : Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquid in fissured rock, Prinkl. Matem. Makh., Vol. 24, pp. 852～864, 1960.
- 14) Snow, D. T. : Fracture deformation and change of permeability and storage upon change fluid pressure, Quarterly Colorado School of Mines, Vol. 63, pp. 201～244, 1968.
- 15) 赤井浩一ほか：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年8月。
- 16) 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年2月。

(1984. 7. 24・受付)