

有限要素法によるトンネル・空洞を対象とした岩盤地下水流の解析

百 田 博 宣
(大崎研究室)

§ 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^{1)~6)}は必ずしも少ないとはいえないが、3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。前者の問題としては、一般に用いられている2次元解析の適用性に関することである。実際上、地山は風化帯と新鮮岩盤の2層系で構成されている。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3次元的に挙動するが、2次元解析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3次元解析^{7,8)}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、岩盤空洞等の地下水解析は複雑な岩盤地山構造および幾何形状のため、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、被圧滞水層の地下水の系外からの流入出を考慮した準3次元多層解析^{9,10)}と地盤の水理定数を地下水位の関数とした準3次元解析¹¹⁾が開発され、その有用性が認められている。岩盤内のトンネルや空洞の水理解析という場合、どちらかといえば準3次元解析が適しているように判断される。しかし、空洞やトンネルの湧水量が算定しにくいこと、トンネル等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3次元解析はそのまま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、特に亀裂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、通常の多孔媒体モデル¹²⁾、亀裂系を対象としたネットワークモデル¹²⁾、二

重空隙モデル¹³⁾およびロック・ブロック・モデル^{3,14)}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、多孔媒体モデルとネットワークモデルは取扱いが簡単で実用性を持っている。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、3次元的な地下水挙動を取扱った例は少なく、また風化帯を連結した実際のモデルは構築されていない。

このような背景にかんがみ、本研究は地山を風化帯と新鮮岩盤で構成されると想定し、亀裂系地山の特性を考慮して3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基盤岩の風化土で覆われ、その下部の弱風化層を経て亀裂系を持つ新鮮岩盤へと推移している。通常、表土や弱風化層の透水性は新鮮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呼ぶ。一方、新鮮岩盤の透水性は亀裂系と岩石のそれで決まるが、岩石の透水値はかなり低く、岩盤の透水性はほとんど亀裂系のそれで決まってしまう。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亀裂系の二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新鮮岩盤の場合、岩体自体は不透水体で岩盤内の地下水は亀裂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¹²⁾は2次元の地下水挙動を対象として亀裂系を1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、3次元空間内の亀裂系は厚さを考慮した2次元の亀裂の組合わせで表現できるはずである。一方、風化帯中の地下水はたとえ岩盤内に空洞等があっても平面的準一様流とみなすことができ、準3次元解析が適用できよう。したがって、風化帯と亀裂系岩盤を水理的に連結し、風化帯をもつ亀裂系地山の地下水解析モデルを導入することとし、その概念図を図-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、傾斜および厚さを持つ亀裂系を連結させた、より实际的な地山モデルと考えられる。このモデルでは、図-1から分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、新鮮岩盤では各亀裂内の2次元流と考えて、地山全体の3次元の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3次元解析や亀裂系の解析には見られない飽和-不飽和の浸透流理論¹⁵⁾の導入も併せて試みることとする。

次に、亀裂の間隔が狭く亀裂密度が高い場合は、岩石自体の透水性がかなり低くても新鮮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妥当であろう。しかし、これにかかわる3次元の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、風化帯と新鮮岩盤が水理定数、条件の異なった2層系地山ではあるが、準3次元解析と類似に、空洞

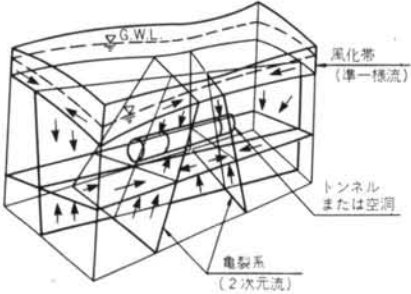


図-1 風化帯をもつ亀裂系地山の地下水解析概念図

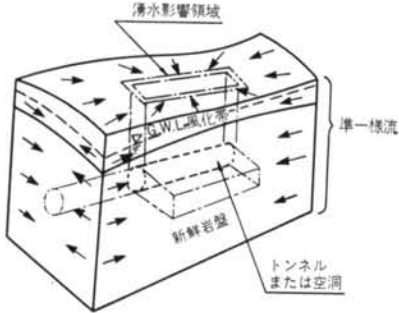


図-2 風化帯をもつ2層系地山の地下水解析概念図

等の湧水量に相当する水量を平面的な湧水影響領域から排出し、2層系地山の地下水流はこれに伴う水面勾配に起因した準一様流とする。この水理モデルは図-2に示すように、任意形状と鉛直方向の水理定数の変化を考慮した準3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2層系地山の地下水解析と称することとする。

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。

- (i) 風化帯をもつ亀裂系地山の地下水解析
(亀裂系地山解析)
- (ii) 風化帯をもつ2層系地山の地下水解析
(2層系地山解析)

§3. 解析理論の定式化

上述の水理モデル(i), (ii)の一般形式として、(i)の亀裂系地山解析の理論の定式化を先に行なうこととし、地下水流の基礎方程式を誘導後、FEM手法を用いて定式化する。

いま、水平方向に x, y 軸、鉛直上向に z 軸を設定し、地下水の圧力水頭とピエゾ水頭を各々 p, h 、時刻を t とすれば、飽和-不飽和帯における3次元の地下水

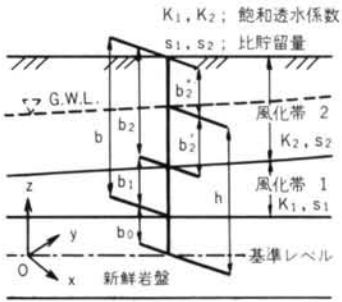


図-3 風化帯の地盤構成

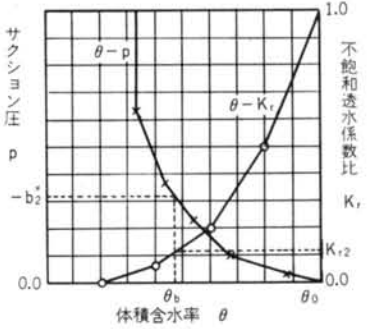


図-4 風化帯2の不飽和浸透特性

の支配方程式は式(1)で与えられる¹⁵⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = (c + \alpha_0 s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 K は透水係数、 s は比貯留量、 c は比水分容量、 q は湧水率を示し、 α_0 は飽和帯($p \geq 0.0$)で1.0、不飽和帯で0.0となるダミー変数である。

以下に、式(1)に基づき、(i)の亀裂系地山解析の風化帯と亀裂系の地下水流の基礎方程式を誘導する。

3.1 風化帯をもつ亀裂系地山の地下水流の定式化

3.1.1 風化帯の地下水流

簡単のため、風化帯は図-3に示す2層系で構成され、かつ風化帯2中に地下水面があり、その不飽和浸透特性は図-4の条件と仮定する。いま、式(1)を z 軸に関し不飽和帯を含めた風化帯の全厚 b で積分すれば、次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{b_0}^{b_0+b} K \frac{\partial h}{\partial x} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{b_0}^{b_0+b} K \frac{\partial h}{\partial y} dz + Q_0 + V_b - V_0 = \int_{b_0}^{b_0+b} (c + \alpha_0 s) \frac{\partial h}{\partial t} dz \quad \dots\dots(2)$$

ここに、

$$V_b = \left[K \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{z=b+b_0}, \quad V_0 = \left[K \frac{\partial h}{\partial z} \right]_{z=b_0}, \quad Q_0 = \int_{b_0}^{b_0+b} q dz \quad \dots\dots(3)$$

であり、 V_b は降雨浸透などの地表流入水量、 V_0 は風化帯から亀裂系に移動する地下水量を示し、 b_0 は図-3中に記した基準レベルから風化帯下端の距離である。

風化帯中の地下水流を準一様流と仮定すれば、 h 、 p は各々次式で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} h &= h(x, y, t) \\ p &= p(x, y, z, t) = h - z \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

式(4)を用いて式(2)を変形すれば、最終的に式(5)が得られ、これが風化帯の地下水流の基礎方程式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q - V_0 = (S_1 + S_2) \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 T 、 S_1 、 S_2 および Q は各々次のように算定できる量で、不飽和帯の影響が加味されている。

$$\left. \begin{aligned} T &= \int_{b_0}^{b_0+b} K dz = \int_{h-(b+b_0)}^{h-b_0} K dp = K_1 b_1 + K_2 b_2' + K_2 \int_{-b_2''}^0 K_r dp \\ S_1 &= \int_{h-(b+b_0)}^0 c dp = \int_{-b_2''}^0 \frac{d\theta}{dp} dp = \theta_0 - \theta_b \\ S_2 &= \int_0^{h-b_0} s dp = s_1 b_1 + s_2 b_2' \\ Q &= Q_0 + V_b \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(6)$$

式(6)中、 b_1 と b_2 は風化帯1と2の厚さ、 s_1 と s_2 は各々の層の比貯留量、および K_1 と K_2 は各々の層の飽和透水係数である。また、 K_r は風化帯2の不飽和透水数比、 b_2' と b_2'' は風化帯2中の飽和領域高さとは飽和領域高さ、 θ_0 と θ_b は地下水面および地表面での体積含水率を示す。これらの各記号は図-3および図-4中に示している。

3.1.2 亀裂系の地下水流

図-5に示す厚さ W の亀裂において局所座標系を x' 、 y' 、 z' とし、 x' と z' 軸を亀裂の厚さ方向の図心面上に、 y' 軸を亀裂面の法線方向に設定する。いま、式(1)を局所座標系で y' 軸に関し亀裂厚さ W ($-\frac{W}{2} \sim \frac{W}{2}$)で積分すれば次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x'} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} K \frac{\partial h}{\partial x'} dy' + \frac{\partial}{\partial z'} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} K \frac{\partial h}{\partial z'} dy' + \left[K \frac{\partial h}{\partial y'} \right]_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} + \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} q dy' = \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} (c + \alpha_0 s) \frac{\partial h}{\partial t} dy' \quad \dots\dots(7)$$

ここで、岩体は不透水体であるから、

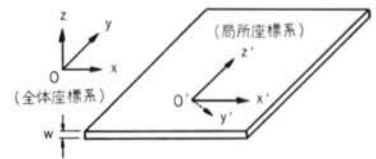


図-5 亀裂の概念図

$$\left[K \frac{\partial h}{\partial y'} \right]_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} = 0 \quad \dots\dots(8)$$

となる。また、 h を y' 軸方向に平均化し、次式で示す。

$$h' = h'(x', z', t) \quad \dots\dots(9)$$

よって、式(8)、(9)を式(7)に代入すれば、最終的に亀裂系の地下水流れの基礎方程式は次のように表現できる。

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(K' \frac{\partial h}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial z'} \left(K' \frac{\partial h}{\partial z'} \right) + Q' = (c' + \alpha_0 s') \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots(10)$$

ここに、

$$K' = WK, \quad c' = Wc, \quad s' = Ws, \quad Q' = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} q dy' \quad \dots\dots(11)$$

3.1.3 有限要素法による離散化と風化帯と亀裂系の水理的連結

風化帯および亀裂系の地下水流れの基礎方程式は、式(5)、(10)より各々以下のように表せる。

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q - V_0 - (S_1 + S_2) \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots(12)$$

$$L'(h) = \frac{\partial}{\partial x'} \left(K' \frac{\partial h}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial z'} \left(K' \frac{\partial h}{\partial z'} \right) + Q' - (c' + \alpha_0 s') \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots(13)$$

式(12)、(13)をガラーキン法で離散化すれば、各々次の形で表わせる。

$$A_{nm} h_m - B_n + C_n + D_n + E_{nm} \frac{\partial h_m}{\partial t} = 0 \quad (n, m = 1 \sim M) \quad \dots\dots(14)$$

$$A'_{nm} h_m - B'_n + C'_n + E'_{nm} \frac{\partial h_m}{\partial t} = 0 \quad (n, m = 1 \sim M') \quad \dots\dots(15)$$

ここに、 M と M' は風化帯と亀裂系の各々の節点数であり、各係数は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} A_{nm} &= \sum_e A_{nm}^e = \sum_e \iint_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \cdot T \cdot \frac{\partial N_m}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \cdot T \cdot \frac{\partial N_m}{\partial y} \right) dV \\ A'_{nm} &= \sum_e A'_{nm}^e = \sum_e \iint_{V'} \left(\frac{\partial N_n'}{\partial x'} \cdot K' \cdot \frac{\partial N_m}{\partial x'} + \frac{\partial N_n'}{\partial z'} \cdot K' \cdot \frac{\partial N_m}{\partial z'} \right) dV' \\ B_n &= \sum_e B_n^e = \sum_e \iint_V N_n Q dV \\ B'_n &= \sum_e B_n'^e = \sum_e \iint_{V'} N_n' Q' dV' \\ C_n &= \sum_e C_n^e = \sum_e \int_{\Gamma} N_n U d\Gamma \\ C'_n &= \sum_e C_n'^e = \sum_e \int_{\Gamma'} N_n' U' d\Gamma' \\ D_n &= \sum_e D_n^e = \sum_e \iint_V N_n V_0 dV \\ E_{nm} &= \sum_e E_{nm}^e = \sum_e \iint_V (S_1 + S_2) N_n N_m dV \\ E'_{nm} &= \sum_e E_{nm}'^e = \sum_e \iint_{V'} (c' + \alpha_0 s') N_n' N_m' dV' \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(16)$$

上式中、 N と N' は形状関数、 U と U' は境界上の外向き法線流速を示す。また、 Γ と Γ' および V と 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、風化帯と亀裂系の交点数を M'' 個とし、 Γ' を風化帯と交わる亀裂系の境界部分 Γ_2' とそれ以外の亀裂系の境界部分 Γ_1' に分ければ、式(16)中の C'_n は次のように変形できる。

$$C'_n = C'_{n_1} + C'_{n_2} = \sum_{M' - M''} \int_{\Gamma_1'} N_n' U' d\Gamma' + \sum_{M''} \int_{\Gamma_2'} N_n' U' d\Gamma' \quad \dots\dots(17)$$

.....(18)

$$\therefore \overline{A_{nm}}h_m - \overline{B_n} + \overline{C_n} + \overline{E_{nm}}\frac{\partial h_m}{\partial t} = 0 \quad (n, m = 1 \sim M + M' - M'') \quad \dots\dots (19)$$
$$\left(\overline{A}_{nm}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{2}{\Delta t} \overline{E}_{nm}^{k+\frac{1}{2}}\right) h_m^{k+\frac{1}{2}} = 2\left(\overline{B}_n^{k+\frac{1}{2}} - \overline{C}_n^{k+\frac{1}{2}}\right) - \left(\overline{A}_{nm}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{2}{\Delta t} \overline{E}_{xm}^{k+\frac{1}{2}}\right) h_m^k \quad \dots\dots (20)$$

B.4 が最もこの特性が強いモデルである。

図-6によれば、Case-Aは解析解より幾分低い値を示すが、両者は概ね良好な一致を示していることが分かる。Case-Bでは、不飽和の浸透特性が強くなるほどサクシオンに対応して徐々に排水が進行する結果、解析解より地下水位低下が早くなっており、不飽和浸透の影響を把握できる。

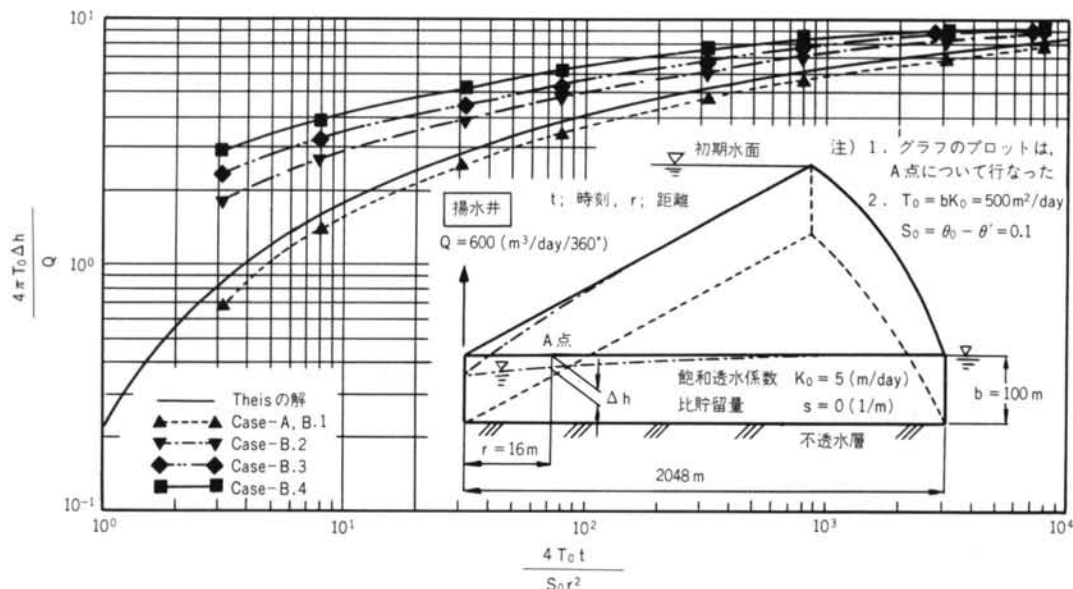
$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T\frac{\partial h}{\partial y}\right)+Q=(S_1+S_2)\frac{\partial h}{\partial t}$$

.....(2)

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

Case	毛管上昇高 S' (m)	備考 ($\theta' = 0.001, \theta_0 = 0.101$)
A	Theisの解析解 モデル	
B.1	-0.001	
B.2	-0.500	
B.3	-1.000	
B.4	-2.000	

図-9に、軸対称および鉛直2次元解析による湧水量の経時変化を示す。図中、ブロック法は節点湧水量、断



図一6 2層系地山解析と Theis の解析解の比較

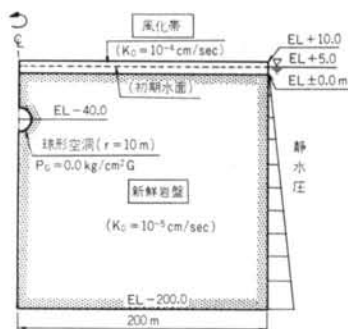
面法は要素流速より算出する方法である。ここで比較のため、鉛直2次元解析による湧水量は球と等価な表面積 ($L=20\text{m}$, $4\pi r^2=2\pi rL$) の値に変換し、図中にプロットしている。図一10には全ケースの地下水位変動を示す。

これらによれば、軸対称解析の湧水量は3次元効果により鉛直2次元解析の2.5倍以上の値を示し、2次元でのモデル化はかなり困難と判断できる。一方、軸対称解析による水面低下は湧水量が大きいかかわらず非常に緩やかであり、3次元効果により地下水面は空洞に到達しないことが認められる。また、2層系地山解析と軸対称解析による地下水面変動を比較すれば、水面低下量および低下速度ともかなり相違し、前者では解析初期に水面低下速度が大きい特徴を有することが分かる。これは、本解析例では空洞の設置深さに対する湧水影響領域 (図一2参照) の拡大効果が適切に考慮されていないことに起因すると考えられる。この点については、今後十分検討する必要がある。

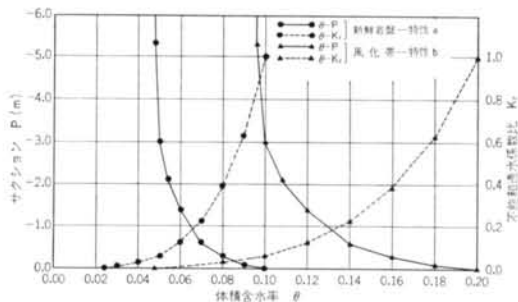
4.3 岩盤空洞に対する亀裂系地山解析の検討

4.3.1 解析条件

図一11に示すように、風化帯の下部の亀裂系が2つの鉛直面 (厚さ2m) と1つの水平面 (厚さ1m) で構成され、かつ図一7と同じ形状の空洞が設置された場合を対象とする。形状寸法、境界条件および初期条件は図一11に示すとおりで、亀裂系の物性より表一2の解析ケースを設定した。表中の不飽和浸透特性は飽和透水係数 K_0 の値に応じて仮定しており、 $K_0=10^{-4}\text{cm/sec}$ の場合



図一7 多孔質岩盤内の球形空洞の解析モデル



図一8 地山の不飽和浸透特性

には特性 b , $K_0=10^{-5}\text{cm/sec}$ の場合は特性 a とした。この特性 a, b については先に図一8に示している。

4.3.2 解析結果

定常時の Case-1~3 の湧水量を表一3に、Case-1 の非定常時の湧水量変化を図一12に示す。また、Case-1

～3 の定常時と Case-1 の非定常時の地下水面位置を算出し、これを図-13にまとめた。さらに、Case-1の90日後、360日後および定常時のポテンシャル（ピエゾ水頭）および流速分布を図-14～16に示す。まず、定常時の地下水挙動について述べる。表-3、図-13によれば、地下水面位置は亀裂系の K_0 の値によって大きく異なり、地下水面が高い場合は K_0 と湧水量 Q_T はほぼ比例するが (Case-2, 3), 地下水面が空洞に到達する Case-1 は Case-3 と同様に比例しなくなることが分かる。また、地下水面位置の低下に伴ない、鉛直亀裂の水平亀裂に対する湧水比は低下することが認められる。これは、地下水面が高い場合は鉛直流れが卓越する結果と考えられる

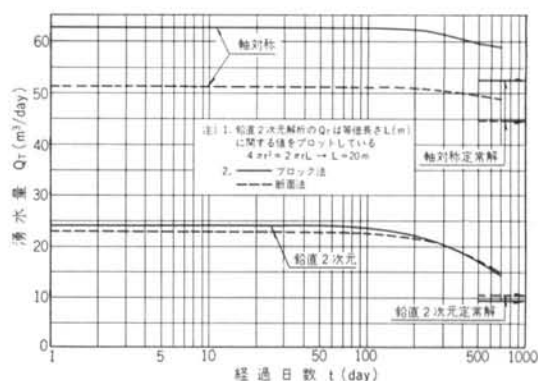


図-9 軸対称および鉛直2次元解析による球形空洞の湧水量の経時変化

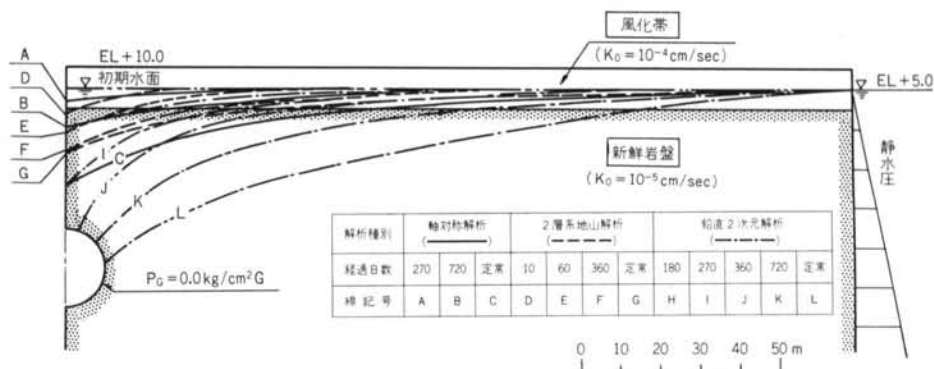
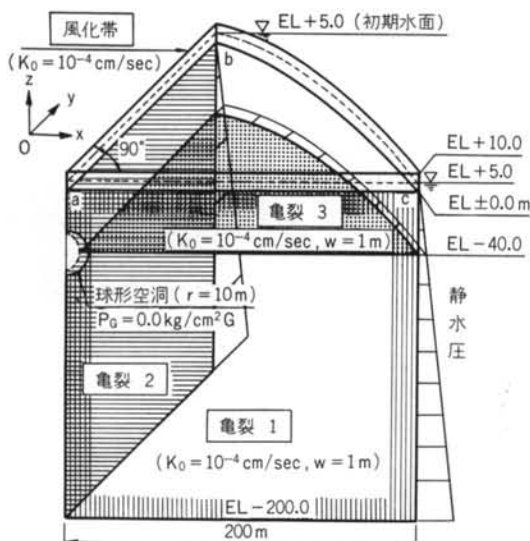


図-10 多孔質体の岩盤空洞の地下水位変動



注) 1. 亀裂1, 2は $w=2m$ であるが対称性より $w=1m$ として上図に記した
2. Case-2, 3の亀裂系の K_0 については表-2 参照

図-11 Case-1 の亀裂系地山解析に対する 1/4 解析モデル

	解析種別	飽和透水係数 K_0 (cm/sec)		不飽和浸透性	
		風化帯	亀裂系	風化帯	亀裂系
Case-1	定常および非定常	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	特性b	特性b
Case-2	定常	1.0×10^{-4}	1.5×10^{-5}	特性b	特性a
Case-3	定常	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	特性b	特性a

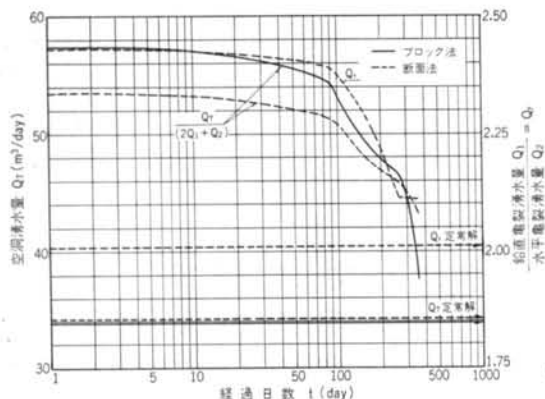
表-2 亀裂系地山解析の解析ケース

ともに、Case-1 の定常時の湧水比がほぼ 2.0 で亀裂幅比に一致する興味深い結果が得られている。

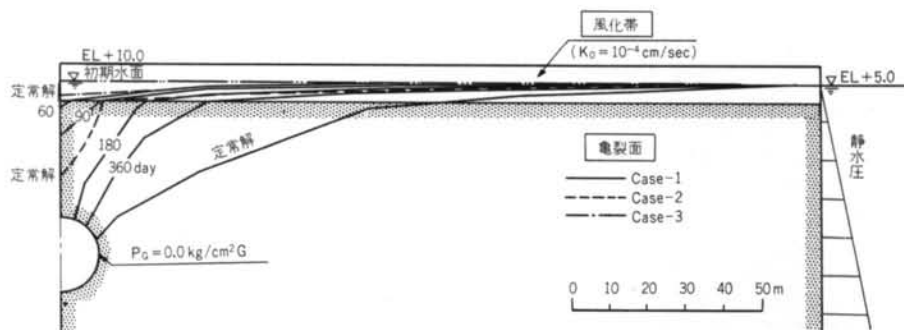
次に、Case-1 の非常時の地下水挙動と 4.2 に示した軸対称の解析結果を比較する。概観すれば、Case-1 と軸対称モデルの初期湧水量にそれ程差異がないにもかかわらず、前者モデルの水面と湧水量低下は後者に比べて非常に早いことが分かる。また、前者モデルでは地下水面が亀裂系に貫入後、空洞上部より急激な水面低下を生じ、その後低下領域が広がる状況を明確に把握できる。これは鉛直亀裂の湧水割合の低下傾向とよく対応してお

	断面法				ブロック法
	鉛直亀裂 $Q_1(\text{m}^3/\text{day}/2\text{m})$	水平亀裂 $Q_2(\text{m}^3/\text{day}/\text{m})$	$Q_r = Q_1/Q_2$	全湧水量 $Q_T = 2Q_1 + Q_2$	全湧水量 Q_T
Case-1	13.665	6.831	2.001	34.160	33.908
Case-2	3.099	1.303	2.379	7.501	7.895
Case-3	2.148	0.888	2.419	5.183	5.519

表—3 亀裂系地山解析による定常時の球形空洞湧水量



図—12 Case-1 の球形空洞湧水量の経時変化



図—13 鉛直亀裂面位置における地下水位変動

§ 5. 結論

岩盤内の3次元的な地下水挙動の簡便な解析手法の開発を目的として、(i)風化帯をもつ亀裂系地山の地下水解析と、(ii)風化帯をもつ2層系地山の地下水解析モデルを構築し、飽和—不飽和の浸透流理論を導入して定式化を行なった。さらに、有限要素法による数値解析法を開発後、主に球形空洞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を要約すると、以下のようになる。

(1) 上述の解析(i)、(ii)のうち、特に(i)の亀裂系地山解析

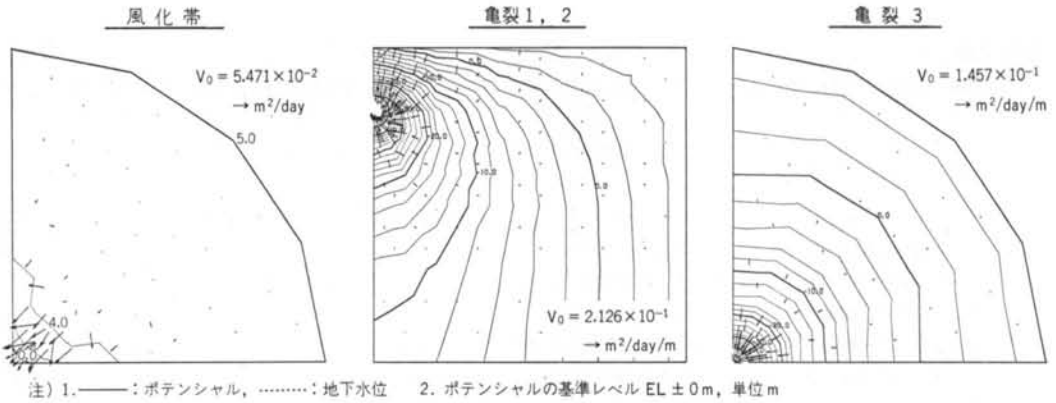
り、合理的な結果と考えられる。最後に、図—14～16より亀裂系地山解析モデルの地下水挙動の変化状況が端的に示されており、それについて簡単に述べる。すなわち、水平亀裂の地下水流は放射流であるのに対し、風化帯では鉛直亀裂面の影響で放射流からかなり変化し、亀裂に向かう地下水流れを認めることができる。また、風化帯の不飽和域が順次拡大しており、この領域内では不飽和透水係数の影響によって流速が小さくなっていることが理解できる。

は3次元解析であるにもかかわらず2次元的な取扱いが可能な簡単な式で表わされており、実用性の高い計算手法といえよう。

(2) 理論の検証として2層系地山解析とTheisの解析解を比較した結果、前者の解析は解析解とよく一致し、かつ不飽和浸透の影響を把握できた。

(3) 多孔質な岩盤内の球形空洞に対して軸対称と2層系地山解析を行なった結果、後者では初期の水面低下が早く、空洞の設置深度に応じた湧水影響領域を設定する必要性が示唆された。

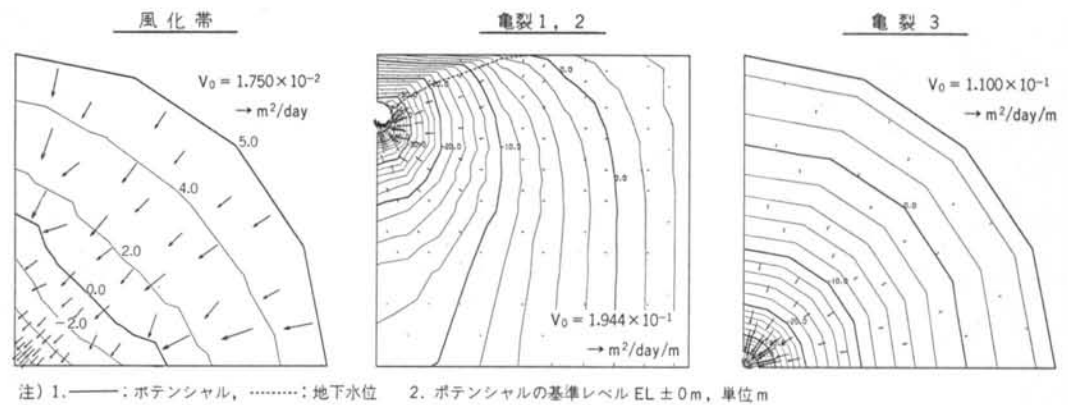
(4) 球形空洞に対する亀裂系地山解析を用いた非定常解析を行なった結果、地下水面は亀裂系に侵入後空洞上部



図一14 Case-1 の90日後のポテンシャルおよび流速分布



図一15 Case-1 の360日後のポテンシャルおよび流速分布



図一16 Case-1 の定常時のポテンシャルおよび流速分布

より急激な低下を生じ、その後低下領域が拡大する傾向が認められた。また、湧水量の低下傾向も上記結果とよく対応しており、合理的な結果と考えられる。

(5)上記解析例の風化帯では、亀裂系の影響による不飽和領域の拡大状況や流れ機構が明確に示せ、本解析モデルの特徴の一端を明示することができたと判断できる。

(6)これまでの計算例より亀裂系地山解析の有用性や実用性が示唆できたと考えられる。

謝辞 本研究を進めるに当り、モデルの構築や理論および結果の吟味について貴重なご助言やご指導をいただいた、埼玉大学工学部助教授佐藤邦明氏に深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 駒田広也他：“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(1980年3月) pp. 69~80
- 2) 百田博宣他：“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(1982年2月) pp. 601~606
- 3) K. Sato, et al.: “Groundwater Analysis of Underground Cavern by means of Rock Block Model” Soil and Foundations, Vol. 22, No. 4 (Dec. 1982) pp. 30~44
- 4) 佐藤邦明他：“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(1983年12月) pp. 1~7
- 5) 佐藤邦明：“岩盤地下空洞の湧水” 土木学会誌(1983年3月) pp. 69~75
- 6) 伊藤洋他：“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(1984年2月) pp. 97~106
- 7) K. Akai, et al.: “Finite Element Analysis of Three-dimensional Flows in Saturated-unsaturated Soil” 3rd. Inter. Conf. on Numerical Methods in Geomech., Aachen, 1979.
- 8) 駒田広也：“フィルダムの三次元浸透流解析” 大ダム No. 86(1978年) pp. 1~15
- 9) K. Fujinawa: “Finite Element Analysis of Groundwater Flow in Multi-aquifer Systems” J. of Hydro., Vol. 33(1977) pp. 349~362
- 10) 藤崎亮博他：“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 第33巻, 2号(1978年) pp. 73~84
- 11) 河野伊一郎他：“有限要素法による広域地下水の準3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) 川本眺万他：“亀裂性岩盤内の浸透解析について” 発電水力 No. 197(1977年3月) pp. 7~16
- 13) G. Barenblatt, et al.: “Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquid in Fissured Rock” Prikl. Matem. Makh., Vol. 24(1960) pp. 852~864
- 14) D. T. Snow.: “Fracture Deformation and Change of Permeability and Storage upon Change Fluid Pressure” Quarterly Colorado School Mines J., Vol. 63(1968) pp. 201~244
- 15) 赤井浩一他：“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. 64(1977年8月) pp. 84~96