

地盤浸透の新しい準三次元解析手法に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY OF A NEW QUASI-THREE DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS FOR HYDROGEOLOGIC PROBLEMS

大西有三*・西垣 誠**・西野賢治***

By Yuzo OHNISHI, Makoto NISHIGAKI and Kenji NISHINO

It is no doubt that the effect of water pressure and of water movement through the pores in geologic materials is of great practical importance. However, the realistic problem in the hydrogeologic modelling has not been analysed until the powerful numerical techniques such as FEM are invented. Solution methods for three dimensional problems are still the big subject to be explored. In this paper a new quasi-three dimensional method (vertical slice method) to analyse groundwater problems is proposed. A medium is modeled by an assembly of arbitrary numbers of vertical or inclined slices which are connected each other by one- or two-dimensional elements. Each slice is discretized by the usual two-dimensional finite element mesh. The whole system is solved by iteration process. The new method is evaluated by comparing with an analytical solution and is applied to the problem of flooding in tunnel excavation.

Keywords : groundwater, quasi-3 dimensional analysis, FEM, hydrogeologic modelling, tunneling

1. はじめに

土質力学および岩盤力学の分野において、地盤内浸透の挙動把握が重要な意味合いをもつことはいうまでもない。特に、わが国の国土においては一般に地下水位が高い地質条件を有することが多く、諸外国との比較においても地下水の処理方法の問題は大きな争点を形成している。また、地下空間の利用として地下発電所、地下貯蔵庫、地下鉄、居住空間としての地下室といった地下構造物の建設が増加しつつある傾向と照らし合わせ、周辺構造物の影響および社会的環境保全の意味からも土中水の影響を的確に把握する方法の確立、ひいては実際地盤への適用が行える手法の開発が必要であると思われる。

1960年代までは、地下浸透流における研究は理論解の探求が主流であったが、きわめて簡単な境界条件、初期条件を設定した問題しか解析できず、複雑な条件の伴う実地盤の解析などとも実行できる状態ではなかった。

一方、1950年代初期に現われたコンピュータの急速な

進歩は差分法や有限要素法などの数値解析法を急速に発達させた。中でも、有限要素法は解析領域の形状、境界条件あるいは構成材料の特性にほとんど影響されないとからきわめて多くの場合に用いられるようになったことは周知のとおりである。しかし、浸透流の解析分野では現在においても主流を占めていると思われる二次元浸透流の解析手法は、次のような理由で実際地盤の適用に難点がある。まず、平面二次元解析においては鉛直方向の流れや条件を考慮できないこと、また鉛直二次元解析では水平奥行き方向（鉛直断面に直交する方向）の流れが取り扱えないことから、三次元的な概念をもつ軸対称モデルがよく用いられるが、これが複雑な地質条件を持つ実地盤に適用できる場合は非常に限定されている。以上のことより、実際の地盤を解析するには二次元解析は不十分であり、この点から近年、三次元解析方法も開発されつつあるものの、現時点ではコンピュータの記憶容量、計算時間、計算コストの面で設計作業に一般的に用いることが困難である。

一方、井戸や開削を対象とした地下水挙動の解析に目を転じると、いくつかの帶水層と加圧層（粘土層）からなる多層帯水層の層間の水の流入出を考慮した準三次元解析^{1)~5)}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^{6),7)}が開発され、その有用性はすでに認められて

* 正会員 ph.D. 京都大学助教授 工学部交通土木工学科(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 岡山大学助教授 工学部土木工学科(〒700 岡山市津島中3-1-1)

*** 国土庁大都市圈整備局計画課
(〒100 千代田区霞が関1-2-2)

いる。前者の手法は、「地下水の流れが帶水層内では水平方向、加圧層内では鉛直方向」という仮定を利用してい る。そこでは、加圧層中の鉛直方向の流れの方程式を解くために一次元の理論解あるいは数値解析解を利用し、帶水層中の水平方向の流れの方程式を解くために二次元の数値解析を行い、両者をカップリングして解析を進めていく。後者は、鉛直方向の流れの成分が微小であるとして無視する Dupuit-Forchheimer の仮定を用い、地盤の水理定数を地下水位の関数として、地下水位を決定する手法である。

本研究では解析領域を目的に応じた任意の枚数の鉛直スライスに分割し、スライス内を鉛直二次元浸透流解析を用いて解析を行い、スライス間の浸透を一次元要素を用いて表現するという手法（鉛直スライス法）を提案する。スライス分割は傾斜しても良いが、水平にスライスを切る場合には特別の工夫が必要になる。従来の準三次元解析では帶水層、加圧層といった地質条件によって解析領域の分割を行っているのに対し、本研究におけるスライスの分割は、有限要素のメッシュを切るのと同じ意味合いをもち、本来連続しているものもある有限な要素を用いて表現している。またスライス内の二次元解析においては、圧力水頭が零の点を連ねた面によって自由水面を取り扱う、飽和-不飽和浸透流解析を用いた。

本研究では、上記の手法の妥当性を理論式との比較により検討し、トンネル掘削による三次元湧水問題への適用性について論議する。

2. 鉛直スライス法による非定常新しい準三次元浸透解析の基礎方程式およびその定式化

(1) 解析手法

三次元地盤内における非定常浸透流問題を簡便に解析する手法として、鉛直スライス法による新しい準三次元浸透解析を説明する。これは従来の準三次元解析が、解析領域を加圧層、帶水層といった地層別に、水平方向のスライスに分割して解析を行う、分類的には水平スライス法ともよべる手法であったのに対し、本手法は三次元地盤を数枚の鉛直方向のスライスに分割し、各スライスをそれぞれ独立に飽和-不飽和二次元浸透流解析を行っておりながら、各スライス間の流量収支を考慮することによって三次元問題を解析するものであって、準三次元と区別するため、新しい準三次元とした。本研究では各スライス間の水の流れは、図-1(a)のような対応する節点間を連結する一次元線要素によるものとしたが、要求される精度と計算コストによっては別の要素（たとえば二次元）を用いることもできる。また、岩盤浸透流解析では、順次各スライス面に高透水性のジョイント要素を入れる

ことで傾斜した大容量流れの断層を表現できるし、スライス面の一部または全体をジョイントネットワークで置き換えることで多数の岩盤割れ目を表わすことも可能である。解析の手順は以下のとおりである。

① 各スライスに対してそれぞれ独立に有限要素法による飽和-不飽和領域を加味した二次元浸透流解析を行い、各スライスの水頭の値を独立に求める。よって各スライスの分割は与えられた境界条件に対し、それぞれ独立に解けるように分割されなければならない。

② 求められた各スライスの水頭の値より、スライス間の流量を求める。

③ 求められたスライス間の流量を考慮した解析を行い、再び各スライスの水頭の値を求める。

④ 求められた水頭の値と、同じタイムステップ内で1回前に求めた水頭の値との差を計算し、あらかじめ設定する許容誤差内に収まっているか調べ、収束していない場合は②～④の手順を繰り返す。

⑤ 許容誤差内にある場合には、その水頭の値を解とし次のタイムステップへと進む。

以上の①～⑤の手順を繰り返すことにより、飽和-不飽和領域を対象とした非定常三次元浸透流問題の解析を行う。なお定式化は Galerkin 法によって行い、各スライスにおいては通常の二次元要素を用いる。

(2) 基礎方程式

図-1(a)のように地盤に対して鉛直方向のスライスに分割を行った場合、 j 番目のスライスに対する基礎方程式は飽和-不飽和領域を含めた圧力基準系の方程式を用いると次のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K^j(\Psi^j) \frac{\partial \Psi^j}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K^j(\Psi^j) \frac{\partial \Psi^j}{\partial z} + K^j(\Psi^j) \right] = [c^j(\Psi^j) + \alpha S_s] \frac{\partial \Psi^j}{\partial t} + \frac{Q^j}{w^j} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 Ψ^j : j 番目のスライスの圧力水頭

$K^j(\Psi^j)$: j 番目のスライスの不飽和透水係数 ($= K_s \cdot K_r(\Psi)$) (図-2 に示す不飽和土の特性曲線より求められる)

K_s : 饱和透水係数

$c^j(\Psi^j)$: j 番目のスライスの比水分容量 ($= \partial \theta / \partial \Psi$) (図-2 に示す $\theta - \Psi$ 曲線 (水分保持曲線) の傾き)

θ : 体積含水率

α : 0 ; 不飽和領域

1 ; 饱和領域

S_s^j : j 番目のスライスの比貯留係数
($= \partial n / \partial \Psi$)

w^j : j 番目のスライスの厚さで座標の関数

そして Q^j は次式で定義される。

$$Q^j = q^j + Q_b^j + Q_n^j \quad \dots \dots \dots (2)$$

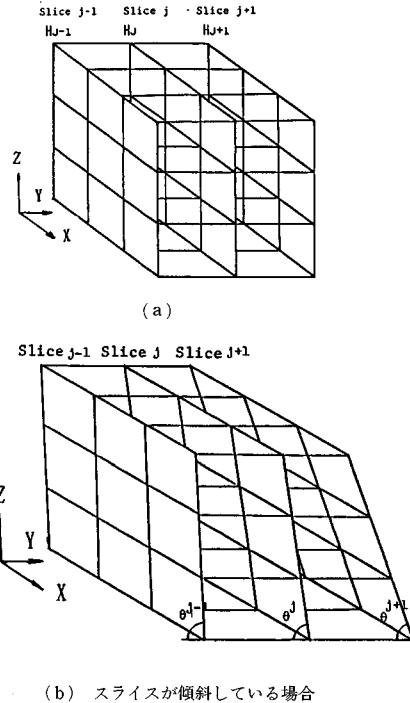


図-1 スライスおよびスライス間における要素分割

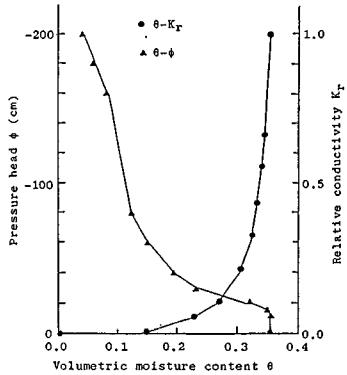


図-2 不飽和浸透特性

ここで、 q^j ：系外部への流出入流量（流入を正とする）

Q_{j-1}^i ：(j-1)番目のスライスへの流出入流量

Q_j^i ：(j+1)番目のスライスへの流出入流量

本研究では各スライスを鉛直であるとして議論を進めしていくが、スライスが傾斜した場合においても、同様な定式化が可能である。図-1 (b)のように j 番目のスライスが θ^j の角度で水平面に対して傾いているとする、基礎式(1)は次式のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K^j(\psi^j) \frac{\partial \psi^j}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K^j(\psi^j) \frac{\partial \psi^j}{\partial z} + \sin \theta^j K^j(\psi^j) \right]$$

$$= [c^j(\psi^j) + \alpha S_s] \frac{\partial \psi^j}{\partial t} + Q_j^i \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 x, z' はスライス内における局所座標系であり、 z と z' には次の関係式が成り立つ。

$$z = z' \sin \theta^j \quad \dots \dots \dots (4)$$

初期条件、境界条件は次のようにになる。

初期条件

$$\psi^j(x_i, 0) = \psi_0^j(x_i) \quad \dots \dots \dots (5)$$

境界条件

1) 水頭既知境界

$$\psi^j(x_i, 0) = \psi_b^j(x_i, t) \quad \dots \dots \dots (6)$$

2) 流量既知境界

$$-K^j \frac{\partial h^j}{\partial n_i} = V_n^j(x, t) \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 h_b^j : j 番目のスライスの境界における既知の水頭

n_i : 境界の外向き法線 n の x_i 方向の方向余弦

V_n^j : 境界における法線の流束

(3) 有限要素法による定式化

重み付き差分法の一つである Galerkin 法を用いて、基礎方程式(1)を離散化すると次式が得られる。

$$A_{nm}^j \psi_m^j + F_{nm}^j \frac{\partial \psi_m^j}{\partial t} = \frac{Q_n^j}{w_n^j} - B_n^j - D_n^j \quad (n, m=1, 2, 3, \dots, N) \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 N : 節点総数

係数マトリックスは次に示すようになる。

a) A_{nm}^j マトリックス

A_{nm}^j は全体剛性マトリックスとよばれるもので以下の式で表わされる。

$$A_{nm}^j = \sum_{e=1}^E w_e^e K_e^j K_{se} \iint N_e^e \frac{\partial N_m^e}{\partial x_i} d\Omega^e \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 K_e^j : 比透水係数、 $d\Omega^e$: 要素内の領域、 K_{se} : 透水係数、 N_e^e : 形状関数。

b) F_{nm}^j マトリックス

F_{nm}^j マトリックスは容量マトリックスとよばれるもので以下の式で表わされる。

$$F_{nm}^j = \sum_e w_e^e \iint \Omega^e N_e^e B^j N_m^e d\Omega^e \\ = \sum_e w_e^e \iint \Omega^e (N_e^e c^j N_m^e) d\Omega^e + \sum_e \iint N_e^e \alpha S_e^j N_m^e d\Omega^e \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 c^j は比水分容量である。

c) B_n^j マトリックス

B_n^j は重力にかかる項であり次式で表わされる。

$$B_n^j = \sum_e W_e^e K_e^j K_{se} \iint \Omega^e N_e^e \frac{\partial N_m^e}{\partial x_i} d\Omega^e \quad \dots \dots \dots (11)$$

d) D_n^j マトリックス

D_n^j はスライス内の吸水および湧水流量を表わす。

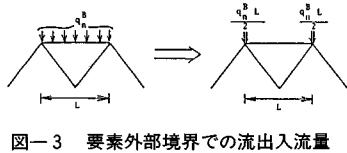


図-3 要素外部境界での流入出流量

$$D_n^j = \sum_e w_e^j \iint \Omega^e S N_e^j d\Omega_e \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

e) Q_n^j マトリックス Q_n^j マトリックスは以下の3つの成分から成る。

$$Q_n^j = Q_n^{JB} + Q_n^{BB} + Q_n^{BN} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

(i) Q_n^{JB} マトリックス

Q_n^{JB} はスライスの境界を横切る流れに関する項であり、図-3に示すように、2つの節点から $q_n^B(L/2)$ ずつ入るとする。 Γ は境界の表面を表わす。

$$\begin{aligned} Q_n^{JB} &= \sum_e \int_r \{N_n^e [A \nabla N_m h_m^j]\} \bar{n}_i d\Gamma \\ &= \sum_e \frac{q_n^B L}{2} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

ここで、 q_n^B ：要素の外部境界を横切って入ってくる流量(ii) Q_n^{BB} マトリックス

Q_n^{BB} は対象となっているスライスの前にあるスライスから流れ込む流量の項であり次式で与えられる。

$$Q_n^{BB} = \sum \frac{A}{3} q_n^{BB} \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

ここで、 A は三角要素の面積である。 Q_n^{BB} はスライス間の水頭の値が線形に分布していると仮定しダルシー則に従うものとすると次式によって表わされる⁷⁾。

$$q_n^{BB} = \frac{k_{j-1} k_j}{l_{j-i} k_j + l_j k_{j-1}} (h_{j-1} - h_j) \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

ここに、 k_j : j 番目のスライスの透水係数 h_j : j 番目のスライスの全水頭 l_j : j 番目のスライスの厚さの 1/2(iii) Q_n^{BN} マトリックス

Q_n^{BN} は対象となっているスライスの後ろにあるスライスから流れ込む流量の項である。

$$Q_n^{BN} = \sum \frac{A}{3} q_n^{BN} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

前に述べた Q_n^{BB} マトリックスと同様に Q_n^{BN} は次式で与えられる。

$$q_n^{BN} = \frac{k_{j+1} k_j}{l_{j+1} k_j + l_j k_{j+1}} (h_{j+1} - h_j) \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

(4) 時間項の取扱い

それぞれのスライスでの飽和-不飽和浸透流の有限要素法による解析は本質的に従来の研究^{8),9)}と同様に取り扱えるため式(9)のように時間項に対して差分法を用い

て漸化式ができる。

$$\begin{aligned} &\left(A_{nm}^{k+1/2} + \frac{2}{\Delta t_k} F_{nm}^{k+1/2} \right) h_m^{k+1} \\ &= 2 Q_n^{k+1/2} - \left(A_{nm}^{k+1/2} - \frac{2}{\Delta t_k} F_{nm}^{k+1/2} \right) h_m^k \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

ここに、 k はある時間段階を表わし、 $\Delta t_k = t^{k+1} - t^k$ である。解析の領域が飽和のときは、後退差分を用いた。なお、スライス間の流入出流量は、式(16)によって計算するが、それぞれの時間ステップでのスライス間の流入出流量はその時間の水頭が未知であるために未知量であるが、その時間の水頭を式(20)のように予測して、式(16)より q を予測し、 i の値を式(19)の Q_n に入れてそれぞれのスライスの h^{k+1} を計算し、この値をもとに反復計算を行って解の精度を良くした。

$$h_m^{k+1} = h_m^k + \frac{\Delta t_k}{\Delta t_{k-1}} (h_m^k - h_m^{k-1}) \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

式(19)より逐次計算の解 h_m^{k+1} を Gauss の消去法を用いて求めることができる。対象としている問題は非線形問題であるため解の精度を良くする目的で反復計算を行った。

3. スライス法による新しい準三次元解析法の妥当性の検討

(1) 定圧揚水問題の理論解

本解析手法に対する妥当性を検討するために被圧地下水の定圧揚水問題の解析を行い、理論解との比較、検討を行った。定圧揚水試験法とは、井戸内水位を一定に保つ試験であり、一定揚水試験の予備試験として行われ、その揚水量の時間的変化より本試験における適切な一定揚水を決定することができる。定圧揚水試験に関する従来の理論式としては、Jacob-Lohman の理論式¹⁰⁾、国司の理論式¹¹⁾等があるが、ここでは国司の理論式との比較を行う。

国司は、厚さ、透水係数、貯留係数が均一な無限帶水層に掘られた揚水井戸の水位を一定に保って揚水試験を行った場合の解は、内側円筒境界の温度を一定とした無限個体中の熱伝導問題の解と類似するとしてこの問題に適用した。

非定常放射流れの支配方程式は次式となる。

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

ここに、 s : 水位低下量 r : 井戸からの距離 S : 貯留係数 T : 透水量係数

この式を以下の境界条件および初期条件のもとに解く。初期条件

境界条件

ここに、 s_0 ：井戸内の一定水位低下量

r_w : 井戸の半径

国司は式(21)を式(22)～(24)の条件のもとで、無次元化した変数に対し Laplace 変換手法により解を求め、定圧揚水試験時の揚水井中心からの距離 r における水位低下量 s と s_0 の比 s^* が以下の式で求められることを導いた。

$$s^* = -\frac{s}{s_0}$$

$$= 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-u^2} \frac{\bar{J}_0(u) Y_0(u \bar{r}) - Y_0(u) J_0(u \bar{r})}{J_0^2(u) + Y_0^2(u)}$$

$$\frac{du}{u} \dots \dots \dots \quad (25)$$

ここに、 $\bar{r} = r/r_u$

$$\tau = Tt/(Sr_w^2)$$

$J_0(u)$: 零次の第 1 種 Bessel 関数

$Y_0(u)$: 零次の第 2 種 Bessel 関数

また揚水量 Q に対しては、

ここに、

$$U(\tau) = \frac{Q}{2\pi Ts_0} = \left[\frac{2}{\pi} \right]^2 \int_0^{\infty} \frac{e}{J_0^2(u) + Y_0^2(u)} \frac{du}{u} \quad \dots \quad (27)$$

(2) スライス法による新しい準三次元数値解析結果

今回用いたモデルの概念図を図-4に示す。ここでは透水係数 $K=1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, 比貯留係数 $S_s=1.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$, 井戸半径 $r_w=10\text{cm}$, 井戸内一定水位低下量 $s_0=8\text{m}$, 帯水層厚 10m , 影響圏半径を 2km という条件下で解析を行った。解析は図-5に示す平面図のように、11枚のスライスを用いて行い、それぞれのスライスの要素分割は図-6に示すような節点数90, 要素数70のものを用いた。なお、本解析では四角形に要素分割を行うが、プログラム内で自動的に三角形に分割して計算を行っている。各スライスの厚さは井戸に近いものから 0.5m , 1.5m , 4m , 14m , 20m , 40m , 60m , 120m , 440m , 600m , 700m とする。

解析における初期条件は、すべてのスライスのすべての節点において、全水頭を 28 m とし境界条件としては、 $t=0$ において図-7でのスライス 1 の x 座標が 0.1 m であるすべての節点で全水頭を瞬時に 20 m まで低下した条件での解析を行った。

揚水量の経時的変化について、理論式(26)、(27)より計算された値、およびスライス法を用いた新しい準三次

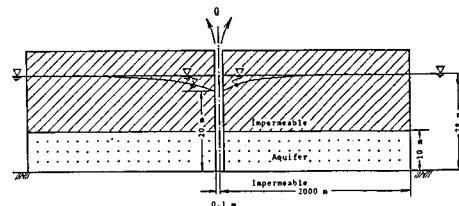


図-4 被圧帯水層における完全貫入井

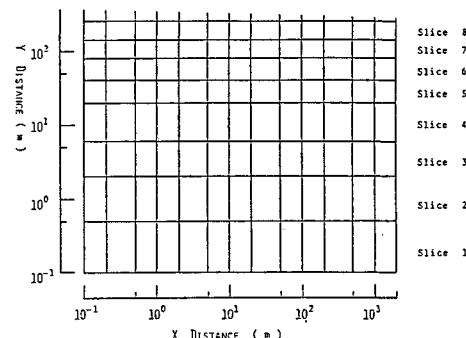


図-5 解析モデル平面図

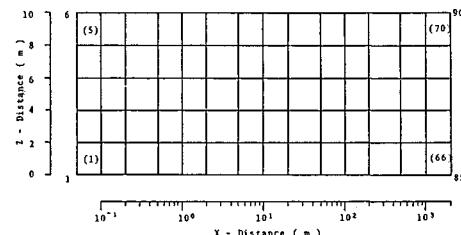


図-6 スライスの要素分割

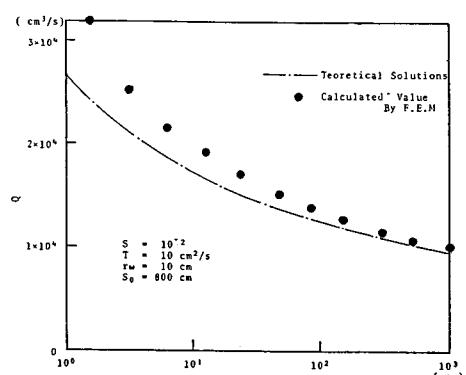


図-7 掘水流の経時的変化(スライス1の厚さ=0.5m)

元解析による解析値とを比較した結果を図-8に示す。これらはほぼ同様の傾向を示し、時間の経過とともに指數関数的に揚水量が減少し、100秒を経過するとほぼ同じ値をとることがわかる。しかしこれで比較すると、初期のタイムステップにおいてスライス法による流量の値が大きく出ている。これは、スライス間における流れに対して貯留係数の影響を考慮せず、Darcy則のみに従うとしたために、貯留効果による水の流れの遅れが考慮されていないことによると考えられる。

また、図-8は、スライス1の井戸中心からそれぞれ0.2m, 0.5m, 1m, 2m, 5m離れた位置における水位低下量の経時的变化を示した図である。理論式(25)から計算された値とスライス法による解析値はほぼ同じ傾向で水位が低下していっているのがわかる。しかし、この場合にも初期のタイムステップにおいては水位低下量が小さく、逆に時間の経過とともに水位低下量が理論式よりやや大きな値となっている。まず初期の水位低下量が小さく出るのは、前述のようにスライス間の水の流れに貯留性が考慮されていないため、スライス1に流入してくれる水の遅れがなく、初期に過剰な流入があるためであると考えられる。また、時間の経過とともに水位低下量が理論値より大きな値を取るのは、1枚のスライス内におけるスライスの面に垂直な方向(y方向)の水位の分布は一定であるという設定のために、隣のスライスからの水の流入による影響が小さく出てきているためであると思われる。つまり地盤をスライスに分割することによって生じた誤差であると考えられる。このような傾向はスライスの分割を大きくとった場合には顕著に現われると考えられる。図-9はスライス1の厚さを3m(それぞれのスライス幅は、3, 6, 1, 20, 40, 60, 120, 440, 600, 700m)にとった場合の揚水量の経時的变化と水位低下量の経時的变化を示したものであるが、先に述べた誤差がより顕著に現われているのがわかる。この現象は有限要素法で要素分割を粗くしたときに類似している。

各スライスについて圧力水頭が24mである点をプロットした図を重ね合わせて、描き直したもののが図-10(a), (b)である。図ではx方向、y方向は対数的軸をとり、z方向は実数軸をとっている。これらの連続の図より、圧力水頭が、井戸を中心として放射的に低下しているのがよくわかる。

以上のことより、完全貫入被圧井戸モデルにおいて、鉛直スライス法による非定常の新しい準三次元浸透流解析手法の精度の妥当性が得られたと考えられる。

4. 三次元トンネル掘削モデル

トンネルの掘削に伴って発生する湧水の問題はトンネル自体の安定のみでなく水源の枯渇など、社会環境問題

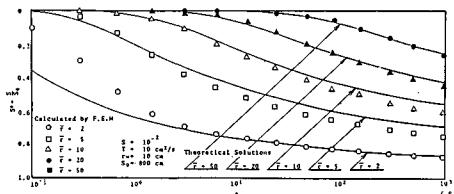


図-8 水位低下量の経時的变化(スライス1の厚さ=0.5m)

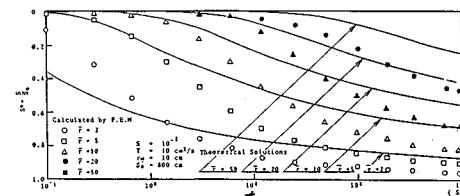
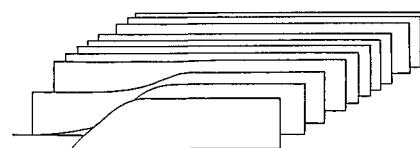


図-9 水位低下量の経時的变化(スライス1の厚さ=3.0m)



(a) time=24.0 s



(b) time=180.0 s

図-10 圧力水頭24mのセンター

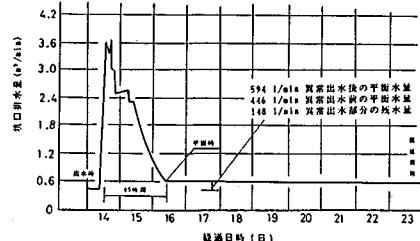


図-11 切羽に集中する地下水の自然減衰曲線
(北陸トンネル：昭和33年4月の坑口より503.5mの地点での異常出水状況)

にまでさまざまな影響を与える。トンネルの湧水の特徴として、掘削初期には高圧、多量の集中湧水(切羽集中湧水)を生じ、次第に減衰してある一定の定常湧水となることが挙げられる。図-11は北陸トンネルの出水の例である¹¹⁾。集中湧水は一般に断層粘土や泥岩などの不連

続層を破って高圧の帶水層に入ったときに生じる。またトンネルは線的に伸びていく構造物であり、掘削部分に流出する浸透流は周辺の地盤から三次元的に集まつくる。以上のことからトンネル掘削に対する浸透流解析は三次元非定常解析が望ましいが、序論でも述べたように、計算時間、コストの面で実用的でない。また従来の平面準三次元解析も、トンネル問題においては鉛直方向の浸透流が卓越すること、あるいはトンネル掘削断面の形状が考慮できないことなど、そのまま適用しにくく、鉛直スライス法による新しい準三次元解析が有効であると考えられる。そこで本手法の解析例として自由水面をもつ不圧状態の地盤に対しトンネルを順次掘削する問題について解析を行った。

(1) 切羽の進行を考慮しない場合

時刻 $t=0$ において切羽が 10 m 進行し、以後切羽が進行しない場合について解析を行う。図-12 に示すモデルに対して図-13 に示す平面図のように 5 m の厚さのスライス 8 枚に分割することにより解析を行う。それぞれのスライスの要素分割は節点数 68、要素数 57 のものを用い、また境界条件、初期条件については以下に示すおりである。

境界条件： $y=0 \text{ m}$, $y=40 \text{ m}$ の掘進方向に垂直な平面は不透水境界、 $x=100 \text{ m}$ の境界では全水頭が 40 m なる水位固定境界。

初期条件：トンネル掘削部（スライス 1, 2 の節点 3, 4, 5, 13, 14, 15）のみ圧力水頭を 0 m に拘束、残りのすべての節点においては初期全水頭 40 m。

また表-1 に示すようにトンネル切羽の前方 10~20 m の材質を変えることで 3 つのケースの解析を行った。すなわち、図-13 のスライス 5, 6 の透水係数が他の部分の透水係数に等しい場合を Case 1, 1/10 の場合を Case 2, 1/100 の場合を Case 3 とした。また飽和領域における透水係数以外の材質条件は以下のとおりである。

$$\text{比貯留係数 } S_s = 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$$

$$\text{有効空隙率 } n_e = 0.35$$

不飽和領域における物性、すなわち体積含水率 (θ)-透水係数 (K_r) 曲線と体積含水率 (θ)-圧力水頭 (ψ) 曲線は一例として図-2 に示す Vachaud によって実施された湿润実験のデータを採用した¹³⁾。

まず切羽からの流量の経時的变化を図-14 に示す。各時間ステップにおいて生じる流量の差は切羽の前方にあるスライス 5, 6 の透水性の差によって生じていることは明らかであり、本解析手法が浸透の三次元的挙動を反映していることを表わしていると考えられる。また Case 2 と Case 3 はほぼ同じ傾向を示しているので、以後 Case 1 と Case 3 との比較をすることで議論を進める。

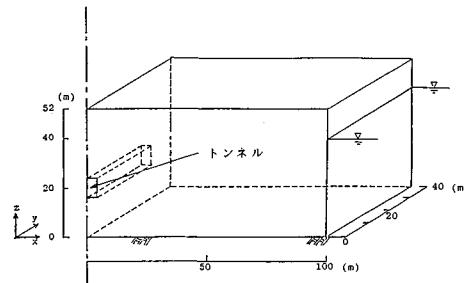


図-12 三次元トンネル掘削モデル

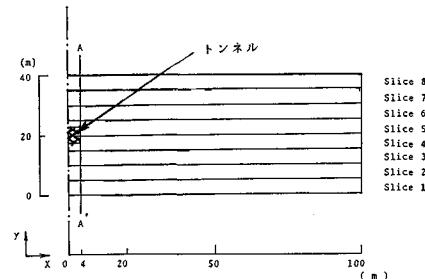


図-13 三次元トンネル掘削モデルの平面図

表-1 各ケースの透水係数

	Conductivity	
	Slice 1~4, 7, 8	Slice 5, 6
Case1	$K = 8.64 \times 10^{-1} \text{ m/day}$	$K = 8.64 \times 10^{-1} \text{ m/day}$
Case2	$K = 8.64 \times 10^{-1} \text{ m/day}$	$K = 8.64 \times 10^{-2} \text{ m/day}$
Case3	$K = 8.64 \times 10^{-1} \text{ m/day}$	$K = 8.64 \times 10^{-3} \text{ m/day}$

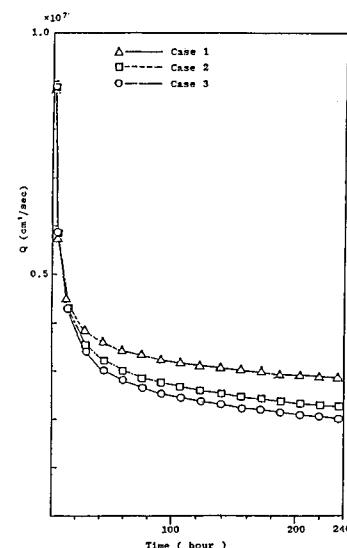


図-14 切羽からの流出流量の経時変化

図-15, 16はそれぞれCase 1, Case 3のタイムステップが324時間後の自由水面を各スライスごとに重ね合わせて描いたものであり、これらの図より、Case 1においてはスライス1から順を追って一様に水面が低下しているが、Case 3においては難透水性のスライス5, 6の手前においてはCase 1より大きな水位低下を示しており、またスライス5, 6, 7, 8はほとんど水位低下を生じていないことが見受けられる。

水位低下の様子をさらに詳しく調べるために図-13のA-A線に沿った自由水面の経時的変化を表わしたのが図-17である。図-17からはCase 1の水位低下は一様なものであり、48時間後から144時間後までの96時間の低下量が、144時間後から240時間後までの96時間の低下量よりも大きく、これは初期の集中湧水の影響であると見受けられる。一方Case 3についてはスライス7, 8において全く水位低下がなく、これはトンネル掘削の影響が難透水層を通してほとんどおよんでいないことを意味している。つまり、トンネル切羽への湧水はスライス5より手前の部分に存在する水によるものであるからだと思われる。そのためスライス1～スライス4において湧水の影響をCase 1より大きく受け、この部分ではCase 1よりも大きな水位低下を示している。

また三次元的な水の挙動を知るために、Case 1のタイムステップが18時間の場合の水の流れが $y=16\text{ m}$ の $x-y$ 断面でどうなっているか調べた。 y 方向の流速は節点間を連結した一次元要素を流れる流量より各節点を流れる水の流速を求め、それらを平均することで要素の y 方向の流速とした。図-18がその図であり、流速ベクトルはいずれも掘削部分に向かっているのが見受けられる。

(2) 切羽の進行を考慮する場合

本節においては切羽が48時間おきに瞬時に5m進行する場合の解析を行った。解析に用いたモデルは前節に用いたものと全く同じものであり、本解析も前節と同様、スライス5, 6の透水性によりCase 1, Case 2, Case 3の3つのモデルに対して解析を行った。トンネルの切羽の進行の表現は、トンネル掘削領域の圧力水頭を0mに拘束することによって行い、掘削ステップを7回に分け、第1ステップでは時刻0のとき、瞬時に5m進み、第2ステップでは時刻が48時間のとき、瞬時にさらに5m進むといったように第7ステップで全掘削行程を終了する場合を対象とした。

図-19は切羽全面からの湧水量の経時的変化を表したものである。Case 1は全領域において材質が一様なモデルであるが新しい掘削ステップごとに集中湧水が生じている。しかし実際の掘削においては瞬時に5mも掘削を行う場合は考えられず、徐々に掘削を行った場合に

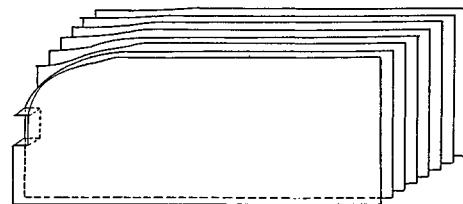


図-15 自由水面の三次元的表示 (Case 1 Time=324 h)

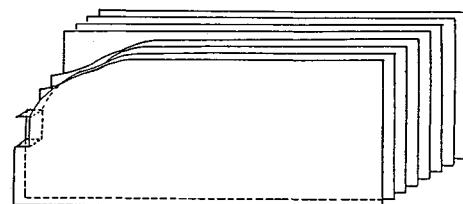


図-16 自由水面の三次元的表示 (Case 3 Time=324 h)

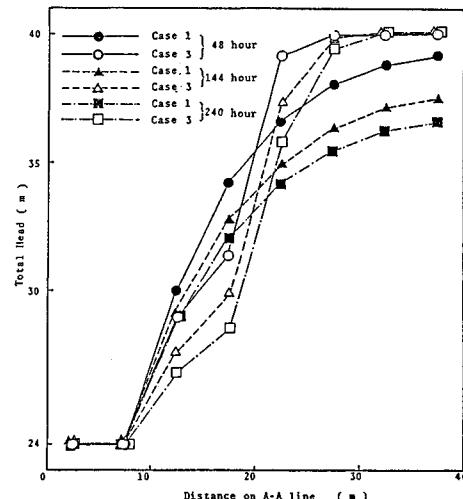


図-17 A-A Line 上の自由水面の経時変化

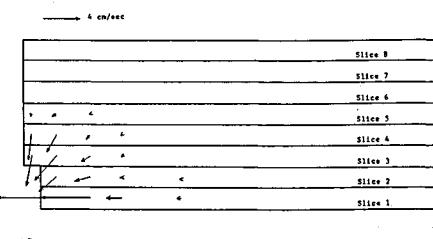


図-18 $x-y$ 平面の流速分布 ($z=16\text{ m}$)

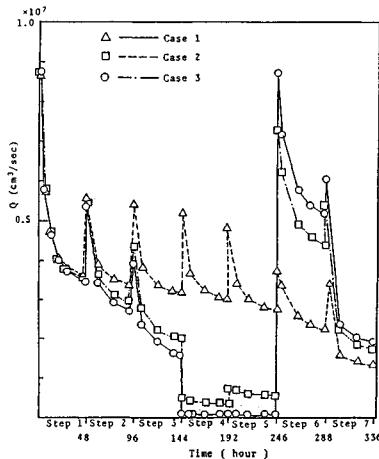
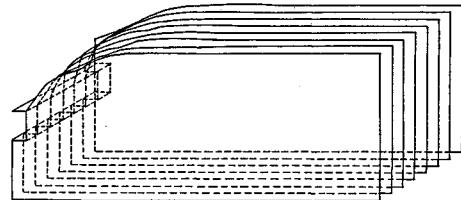
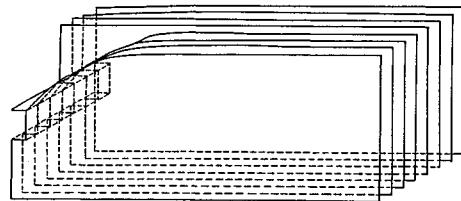


図-19 切羽からの流量の経時的变化

は、各掘削ステップの最も少ない流量の点を連ねた漸近線に沿うものになると考えられる。また Case 2, Case 3 は 5 番目と 6 番目のスライスの透水係数をそれぞれ $1/10$, $1/100$ としたモデルについての解析例であるが、切羽面がスライス 5, スライス 6 に達すると切羽面の透水係数の減少により流量が極端に少くなり、スライス 6 を抜け出したときに集中湧水が発生することが見受けられる。また Case 2において第 5 ステップの流量は第 4 ステップの流量より増えており、これは高透水性の領域が切羽付近に存在することを示していると考えられる。また Case 3 の第 6 ステップにおける集中湧水は第 1 ステップの集中湧水とほぼ同じ量を示している。この理由は次のように考えられる。

図-20, 21 はそれぞれ Case 1 と Case 3 の $t=340$ 時間における自由水面の経時的変化をそれぞれ三次元的に表わしたものである。図-20 は Case 1 において掘削が進むにつれて一様に水面が低下していく様子を表わしている。それに対して図-21においては掘削が進むにつれ、難透水性のスライスより手前のスライスには水位低下がみられるが、スライス 7, 8 において掘削が難透水性スライスに達しても水位低下をほとんどみせず、スライス 7, 8 は初期とほとんど同じ状態で保たれている。そして切羽部分がスライス 7 に達すると集中湧水が生じるのであるが、スライス 7, 8 の水頭の分布は初期のスライス 1, 2 の水頭の分布とほとんど同じであるために、第 1 ステップにおける集中湧水とほとんど同じ量の湧水が生じる。これは集中湧水量が切羽周辺の圧力分布に依存していることを示している。

このようにスライス法による新しい準三次元解析は、トンネル掘削問題における集中湧水を表現でき、また三次元的な水位の経時的变化を表現できることがわかつた。

図-20 自由水面の三次元的表示
(Case 1 Time = 340 h)図-21 自由水面の三次元的表示
(Case 3 Time = 340 h)

た。

5. あとがき

現在においてもなお実際地盤における浸透流の三次元挙動を実用的に解析する手法が確立されているとはいがたく、多層帶水層に対する準三次元解析が、実用的に用いられているのみであると思われる。そこで本研究では、地盤または不連続面を含む岩盤を任意の数の鉛直方向のスライス（傾斜している場合も可能）に分割し、解析を行う方法を提案した。各スライスではそれぞれ独立して、飽和-不飽和領域を対象とした鉛直二次元解析手法を用いており、またスライス間の浸透を一次元の線要素を用いて表現した。この方法を鉛直スライス法による新しい準三次元解析とよび、定圧揚水井戸試験、およびトンネル掘削時における浸透流の挙動に対する解析を行った。

まず定圧揚水井戸問題に対しては国司の理論式との比較を行い、本解析手法が満足できる精度を有していることを確認した。

またトンネル掘削問題の解析については、従来の解析手法において困難であった掘削ステップの考慮が可能であり、切羽における集中湧水現象が恒常湧水状態へと移行していく様子や、自由水面が掘削部分より三次元的に低下していく挙動が確認された。

本手法における鉛直スライスの分割は、有限要素法においてメッシュを切るのと同じ意味をもち、分割の仕方で解析の精度が変わるが、これはスライスの数を減少さ

せることにより、定められた時間、経費、精度内で結果が求められることを意味する。本研究で検討した鉛直スライス法による新しい準三次元解析と従来の水平スライス法による平面準三次元解析を併用すると、従来の二次元解析ではほとんど不可能であった多くの地盤内浸透問題の非定常解析を行うことができる。今後の課題としては、スライス間の流れにおける貯留効果の考慮や、非定常問題における時間増分に対する制約条件の改善などが考えられる。

最後に、本研究を行うにあたって貴重な助言と援助を頂いた岡山大学 河野伊一郎教授ならびに京都大学 足立紀尚教授に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Bredehoeft, J.D. and Pinder, G.F.: Digital analysis of areal flow in multiaquifer groundwater system; A quasi three-dimensional model, Water Res. Res., Vol. 6, No. 3, pp.883~888, 1970.
- 2) Herrera, I. and Rodarte, L.: Integrodifferential equations for system of leaky aquifers and applications 1, the nature of approximate theories, Water Res. Res., Vol. 9, No. 4, pp.995~1005 1973.
- 3) Fujikawa, K.: Finite-element analysis of ground flow in multiaquifer system I. The behavior of hydrological properties for an aquitard while being pumped, J. Hydrology, 33, pp.59~72, 1977.
- 4) Chorley, D.W. and Frind, E.D.: An iterative quasi-three-dimensional finite element model for heteroge-neous multiaquifer systems, Water Res. Res., Vol. 14, No. 5, pp.943~952, 1978.
- 5) Neuman, S.P., Preller, C. and Narasimhan, T.N.: Adaptive explicit-implicit quasi three-dimensional finite element model of flow and subsidence in multiaquifer system, Water Res. Res., Vol. 18, No. 5, pp.1551~1561, 1982.
- 6) 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浸透解析、岡山大学工学部土木工学科教室, 1983.
- 7) 西垣 誠・松本元生：多層地盤における地下水の準三次元解析、第 20 回土質工学会発表講演会, Vol. 2, pp. 1505~1506, 1985.
- 8) Neuman, S.P.: Saturated-unsaturated seepage by finite elements, Proc. ASCE, 99, HY12, pp.2233~2250, 1973.
- 9) 赤井・大西・西垣：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, 第 264 号, pp.87~96, 1977.
- 10) Jacob, C.E. and Lohman, S.W.: Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Transactions, AGU, Vol. 33, No. 4, pp.559~569, 1952.
- 11) 国司秀明：豊井戸による定圧注水及び揚水の理論(Ⅰ), 京都大学防災研究所創立 5 周年記念論文集, pp.75~83, 1956.
- 12) 日本トンネル技術協会：トンネル湧水調査法に関する調査研究(II), p.41, 1980.
- 13) Vachard, G. and Thony, J.L.: Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water content, Water Res. Res., Vol. 7, No. 1, pp.111~127, 1971.

(1989.8.10・受付)