

## 飽和・不飽和浸透流における非定常塩水化現象 の有限要素法解析

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TRANSIENT INTRUSION OF SALINE WATER IN SATURATED-UNSATURATED SEEPAGE

河野伊一郎\*・西垣誠\*\*・田中慎一\*\*\*

By Ichiro KOHNO, Makoto NISHIGAKI and Shinichi TANAKA

### 1. まえがき

近年、わが国の至る所での地下水位の低下が報告されている。その原因として、市街地の舗装や表面排水が完備し、降雨が直接海や川に流出することや水田の宅地化などによって地下水へのかん養量が減少していることと、生活様式の変化により、冷却冷暖房用水の急増や1戸当たりの水使用量の増加などによる水資源の不足を補うために地下水の過剰揚水現象が生じていることなどが考えられる。このような地下水位の低下や集中的な揚水は、海岸滯水層中の淡水地下水と塩水の平衡を乱して地下水の塩水化が内陸部に進行することを助長している。同様の地下水の塩水化現象は沿岸地区での下水処理場などの建設のために地盤を掘削する際にもしばしば遭遇する現象である。この現象は一般に「塩水くさび」とよばれ、価値ある水資源としての地下水を使用不可能なものに変えてしまうために、海岸滯水層内の地下水の浸透および塩分の移流分散現象を把握することはきわめて重要な課題となっており、従来より数多くの研究がなされている。

ここで塩水くさびに関する従来の研究を整理すると大きく次の2つに分類される。

- (1) 塩水と淡水は非混合流体であると仮定して、境界面(Interface)を有する2相流体の浸透を取り扱った研究。
- (2) 塩水と淡水は混合流体であるとして、2つの流体が拡散あるいは移流分散を伴いながら遷移領域(Transition zone)をもって浸透すると考えた研究。前者の研究としては Ghyben や Herzberg らによつて今世紀初頭より先駆的研究が進められ、Hele-Shaw モ

デルによる実験的研究<sup>1), 2)</sup>や複素関数変換などによる解析的研究<sup>3)~6)</sup>が蓄積され、さらに差分法や有限要素法による数値解析手法の研究へと発展して、定常問題<sup>6), 7)</sup>から非定常問題<sup>8), 9), 10)</sup>へと拡張されている。この解析手法は Bear が指摘しているように<sup>11)</sup>、遷移領域が滯水層の厚さに比較して薄い場合には十分に用いられる方法であると考えられる。

しかしながら、厳密には淡水と塩水は混合流体であり、地下水を飲料水や農業用水に利用する場合には、水質が議論のおもな対象となるために後者の異なる混合流体として取り扱う必要がある。この観点よりの実験的研究が 1962 年に Rumer らによって報告がなされ<sup>12)</sup>、試料に砂やガラスビーズを用いた滯水層中の塩分濃度変化を電気伝導度計によっての計測した結果がある<sup>13), 14)</sup>が、このように混合性を考慮した淡水の塩水化の理論解析的研究はきわめて少ない。この原因是対象としている現象の支配方程式が複雑であることより、理論的な解析手法で取り扱うことが困難であるためと考えられる。Pinder らは上記の難点を対処する目的で差分法による数値解析法を導入した<sup>15)</sup>。この数値解法は複雑な境界条件も簡単に考慮することが可能であるために、その後地盤の不均質性や異方性の取扱いがきわめて簡単な有限要素法による定常問題の解法が Lee らによって報告され<sup>16)</sup>、Segol や Pinder は被圧滯水層中の定常浸透流に対して非定常の移流分散方程式を用いて、塩水と淡水の密度勾配による流れも考慮した解析方法を示した<sup>17)</sup>。彼らの解析手法は浸透における流体圧力と Darcy 流速を未知量として浸透解析を行い、求められた Darcy 流速を既知量として移流分散方程式から塩分濃度分布を計算している。同様の手法を Desai<sup>18)</sup>も用いているがこの方法では行列式がきわめて大きくなるために数多い要素分割の問題を解く場合には大容量の計算機が必要となる。この難点を解除する方法として Frind<sup>19)</sup>や川谷<sup>20)</sup>は圧力水頭だけを未知量として浸透流解析を行い、その解析結果より

\* 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 岡山大学講師 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 清水建設(株)

Darcy 流速を計算して、その値より濃度分布を求める手法を示し、特に Frind はこの方法を被圧滞水層中の非定常浸透を考慮した解析手法へと拡張している。

しかし、従来のこれらの研究では多層系の被圧滞水層内での塩分の移流分散現象の解析までが可能となっているが、自由水面を有する地下水での水位の上下による地下水の塩分濃度の変動についてはまだ取り扱われていない。すなわち被圧滞水層のみを対象とした研究である。このような解析方法では地下水の塩水化の防止策の1つとして考えられる地下水への水路などからのかん養により自由水面を上昇させて塩水くさびの浸入を防止する工法（ウォーターカーテン工法）などについての定量的な評価が不可能である。

したがって、本論文では上記の観点より不飽和領域内の浸透や移流分散を考慮することによって不圧滞水層内の地下水の挙動と淡水の塩水化の非定常挙動をシミュレートするための有限要素法による数値解析法について説明する。また、ここで述べる方法を利用することにより従来の手法では解析できなかった自由水面の変動による塩水くさびの浸入状況などが定量的に把握することが可能となり、適切な地下水の塩水化の防止策が検討できると考えられる。

## 2. 密度流の浸透と移流分散に関する基礎方程式とその解析法

### (1) 浸透と移流分散の基礎方程式

飽和-不飽和領域内の浸透を支配する基礎方程式は質量保存則と Darcy の方程式より次式で表わせる<sup>21)</sup>。

$$\rho(C_s(\psi) + \beta S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \rho K_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial X_j} + \rho K_{i3} \rho_r \right) \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ ：流体の密度、 $C_s(\psi)$ ：比水分容量、 $S_s$ ：比貯留係数、 $\psi$ ：圧力水頭、 $t$ ：時間、 $K_{ij}$ ：透水係数、 $\rho_r (= \rho / \rho_f)$ ：淡水の密度 ( $\rho_f$ ) に対する流体の密度比。

$$\beta = \begin{cases} 1 : \text{飽和領域} \\ 0 : \text{不飽和領域} \end{cases}$$

一方、不飽和領域と飽和領域内の移流分散の基礎方程式は<sup>22), 23)</sup>、

$$R_d \frac{\partial \theta c}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial X_j} \right) + \frac{\partial}{\partial X_i} (v_i c) + \left( S_s \frac{\partial \psi}{\partial t} + \lambda \right) R_d \theta c = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\theta$ ：体積含水率、 $c$ ：溶解塩分濃度、 $D_{ij}$ ：拡散および分散係数、 $v_i$ ：ダルシー流速、 $R_d$ ：吸着に関する係数、 $\lambda$ ：減衰係数、 $S_s$ ：比貯留係数。

飽和領域のみを対象とすると、式(2)中の $\theta=n$ （間隙率）となり、

$$n \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left( n D_{ij} \frac{\partial c}{\partial X_j} \right) - \frac{\partial}{\partial X_i} (v_i c) \quad (3)$$

この式(3)は一般に飽和多孔質物質内の移流分散問題の解析によく用いられる式である。ここで濃度 $c$ の変化領域は $0 \leq c \leq 1$ である。またダルシー流速は次式である。

$$v_i = -K_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial X_j} - K_{i3} \rho_r \quad (4)$$

式(1)の浸透に関する式と式(2)の移流分散に関する式とを関連づける式として、次の流体の密度と塩水の濃度との関係式が用いられる。

$$\rho = \rho_f + (1-E)c \quad (5)$$

一般に海水の塩分濃度に対しては $E=0.3$ である。

ここで、色素や污水の土中での移流分散や拡散を取り扱う際には濃度変化によって密度変化が生じないと仮定するために、浸透と移流分散は別々の問題として解析ができる。すなわち、先に浸透の定常なり非定常解析を実施して、式(2)で用いる流速分布や体積含水率分布を計算し終えて、それらの値を用いて移流分散現象を解析すればよいことになる。このような手法による肥料や核種の移流分散の有限要素法解析について2, 3の研究が報告されている<sup>24), 25)</sup>。しかし、淡水の塩水化においては式(5)に示すように溶解物質の濃度が変化することにより、密度が変化する。すなわち、式(1)の右辺第2項の $\rho_r$ の値が変化するために密度勾配による流れが生じ、濃度変化が浸透にも影響を及ぼすことになり解析がより複雑になる。

### (2) 初期条件および境界条件

式(1), (2)を解くための初期条件および境界条件は次のように定める。

#### a) 初期条件

解析の対象領域における初期の圧力水頭分布、濃度分布が既知である。

$$\left. \begin{array}{l} \psi(X_i, 0) = \psi_0(X_i) \\ c(X_i, 0) = c_0(X_i) \end{array} \right\} \quad (6)$$

#### b) 境界条件

境界条件としては、Fig. 1 に示すように次の4種類の条件が考えられる。

##### ① 境界面上で水頭や濃度が既知の境界

$$\left. \begin{array}{l} \psi(X_i, t) = \psi_b(X_i, t) \\ c(X_i, t) = c_b(X_i, t) \end{array} \right\} \quad (7)$$

この境界条件は、境界面上での水頭や濃度が一定、あるいは時間の関数として与えられる境界条件であり、Fig. 1 の海底面 (AB), 河川底面 (JK) に用いられる。また浸透のみに関しては、定水位揚水とすると揚水井内の境界 (EFGH) も同様の境界条件である。

1 の海底面 (AB), 河川底面 (JK) に用いられる。また浸透のみに関しては、定水位揚水とすると揚水井内の境界 (EFGH) も同様の境界条件である。

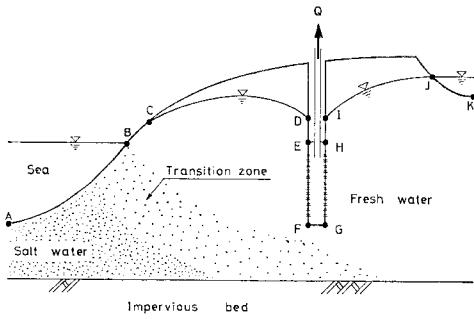


Fig. 1 Vertical section in a coastal aquifer.

② 流出入流量が既知である境界

$$-\left(K_{ij}(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial X_j} + K_{ij}\rho_r\right) \cdot \hat{n} = q_b(X_i, t) \dots (8)$$

$$\left(-\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial X_j} + v_i c\right) \cdot \hat{n} = q_c(X_i, t) \dots \dots \dots (9)$$

ここで  $\hat{n}$  は境界面からの垂直ベクトルである。

式 (8) の条件は、定流量で注入、あるいは揚水する場合の条件である。一方、移流分散の問題では浸透流があるために、濃度だけが一定流量で流出入するという条件はきわめてまれであり、流速に依存して流出入することになる。したがって、Fig. 1 中の  $\overline{EFGH}$  の境界は濃度に関する境界としては、流出流入が既知な境界条件になる。むろんその時々の流速が時間的に変化するため、流出量も変化する。なお、境界での流出入が零である不透水層の境界条件は、この境界の一つである。

③ 浸出面上の境界

$$\psi(X_i, t) = 0 \dots \dots \dots (10)$$

$$\left(-\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial X_j} + v_i c\right) \hat{n} = q_{sc}(X_i, t) \dots \dots \dots (11)$$

Fig. 1 の  $\overline{BC}$  境界がこの境界条件になるが、揚水井内の  $\overline{DE}, \overline{HI}$  も浸出面の境界である。

### (3) 有限要素法による基礎方程式の解析法

飽和・不飽和領域内の浸透方程式 ( $L(\psi)$ ) と移流分散方程式 ( $P(c)$ ) は式 (1), (2) より以下のように表わせる。

$$L(\psi) = \rho(C_s(\psi) + \beta S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial X_i} \cdot \left( \rho K_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial X_j} + \rho K_{ij} \rho_r \right) = 0 \dots \dots \dots (12)$$

$$P(c) = \theta R_d \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial X_j} \right) + \frac{\partial}{\partial X_i} (v_i c) + R_d E_c = 0 \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 $E = \frac{\partial \theta}{\partial t} + S_s \theta \frac{\partial \psi}{\partial t} + \lambda \theta$

式 (12), (13) を式 (6)～(11) の条件のもとで満足する解を求めるためにここでは重みつき残差法の Galerkin

法によって基礎方程式を離散化した<sup>26)</sup>。

$$A_{nm} \psi_m + F_{nm} \frac{\partial \psi_m}{\partial t} - Q_n + B_n = 0 \dots \dots \dots (14)$$

$$G_{nm} c_m + H_{nm} \frac{\partial c_m}{\partial t} + T_{nm} c_m = 0 \dots \dots \dots (15)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A_{nm} &= \sum_{e=1}^N \rho_K K_{ij} K_{l'} \int_{V^e} N_K e N_l e \frac{\partial N_n e}{\partial X_i} \frac{\partial N_m e}{\partial X_j} dV^e \\ F_{nm} &= \sum_{e=1}^N \rho_K \int_{V^e} N_n e N_K e (C_l N_l e + \beta S_s) dV^e \\ Q_n &= - \sum_{e=1}^N \int_{\Gamma^e} \rho_K N_K e v_i N_n e d\Gamma^e \\ B_n &= \sum_{e=1}^N \rho_K K_{ij} \cdot K_{l'} \int_{V^e} N_K e N_l e \rho_r \frac{\partial N_n e}{\partial X_i} dV^e \\ G_{nm} &= \sum_{e=1}^N \int_{V^e} \left[ \frac{\partial N_n e}{\partial X_i} \theta D_{ij} \frac{\partial N_m e}{\partial X_j} - \frac{\partial N_n e}{\partial X_i} v_i N_m e \right. \\ &\quad \left. + N_n e E R_d N_m e \right] dV^e \\ H_{nm} &= \sum_{e=1}^N \int_{V^e} N_n e R_d \theta N_m e dV^e \\ T_{nm} &= \sum_{e=1}^N \int_{\Gamma^e} n_j \cdot N_n e \left( -\theta D_{ij} \frac{\partial N_n e}{\partial X_j} + v_i N_n e \right) d\Gamma^e \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

ここで  $N$  は形状関数であり、アイソパラメトリック要素を用いた。式 (14), (15) の時間項を取り扱うために問題を適当な漸化式に展開して逐次計算を行って全時間にわたる解を求めた。すなわち、任意の時間増分  $\Delta t$  についてそれぞれ次のように表わせる。

$$\left( \frac{F_{nm}^{K+1/2}}{\Delta t} + w A_{nm}^{K+1/2} \right) \psi_m^{K+1} = Q_n^{K+1/2} - B_n^{K+1/2} + \left( \frac{F_{nm}^{K+1/2}}{\Delta t} - (1-w) A_{nm}^{K+1/2} \right) \psi_m^K \dots \dots \dots (17)$$

$$\left\{ \frac{H_{nm}^{K+1/2}}{\Delta t} + w (G_{nm}^{K+1/2} + T_{nm}^{K+1/2}) \right\} c_m^{K+1} = \left\{ \frac{H_{nm}^{K+1/2}}{\Delta t} - (1-w) (G_{nm}^{K+1/2} + T_{nm}^{K+1/2}) \right\} c_m^K \dots \dots \dots (18)$$

$(n, m = 1, 2, 3, \dots, N)$

式 (17), (18) で  $w=1/2$  とすると中央差分になり、 $w=1$  なら後退差分になる。

これらのマトリックス方程式が飽和・不飽和土中の浸透を考慮した移流分散の方程式を有限要素法によって定式化されたものであり、初期条件より、未知量  $\psi_m, c_m$  の値を計算できる。

### (4) 数値解析手法

淡水の塩水化の問題では式 (14), (15) に示すように圧力水頭と濃度の 2 変数を取り扱う必要があり、前述した

ように圧力水頭を求めるためには濃度が既知量であり、濃度を求めるには圧力水頭による浸透流速が既知量でなければならぬ。したがって、本論文ではそれぞれの支配方程式を別々に解く2段階解析法を用いた<sup>17)</sup>。すなわち、

第1段階：濃度を既知量と仮定して式(14)の飽和・不飽和浸透流の方程式より圧力水頭分布を求める。なお、支配方程式の係数が圧力水頭に依存する非線形方程式であるため、繰り返し計算を行って解の収束と誤差の検定をした結果より圧力水頭を計算する方法を用いた<sup>21)</sup>。

第2段階：第1段階で得られた圧力水頭より、不飽和土の水分保持曲線を用いて体積含水率を求め、式(4)より浸透流速を計算して、これらの値より式(15)を用いて濃度を求める。

この2段階の操作を繰り返し行って濃度が満足する値に収束した後、次の時間ステップへ計算を進める方法を採用した。解析手法のフローチャートをFig. 2に示す。

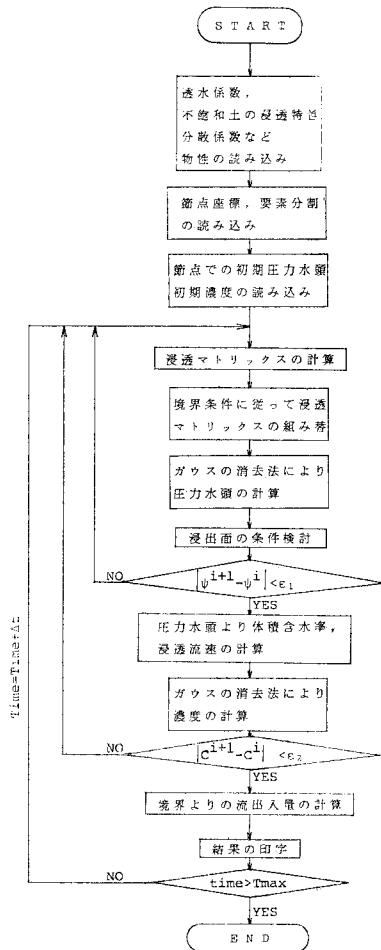


Fig. 2 Flow chart of calculation.

なお、計算機を用いる際の容量を少なくするために浸透解析での浸透マトリックスは対称であることより半バンドマトリックスに対してスカイライン法<sup>22)</sup>を用いたが、移流分散ではマトリックスが非対称であることよりバンドマトリックスを用いた。

### 3. 解析結果と理論解、実験結果との比較検討

前節までに述べた有限要素法による数値解析の解の精度や信頼性を検討するために簡単な境界値問題の理論解や実験結果との比較検討を行った。本論文での数値解析は浸透に関する解析、拡散に関する解析そして移流分散に関する解析と3つの問題を含んでいる。したがってここではそれぞれの解析法についての検討を行う。

#### (1) 非定常浸透現象に関する検討

浸透と移流分散現象を取り扱っている本解析で、移流分散現象を無視して浸透のみを対象とした解析結果とVauclinらが飽和・不飽和領域内の鉛直2次元浸透現象を高い精度で計測した結果<sup>23)</sup>とをまず最初に比較する。Vauclinらの実験ではFig. 3に示すように長さ3m、高さ2m、幅5cmの土槽に最大粒径1mmの試料を充てんして地盤モデルを作製した。このモデルに底面より65cmの高さで初期水位を一定に保った後、上部左端より50cmの間隙に一定流量( $q_0=14.8 \text{ cm/h}$ )の散水を与えることによる自由水面の上昇と不飽和領域内の体積含水率の変化とをそれぞれ圧力変換器、 $\tau$ 線密

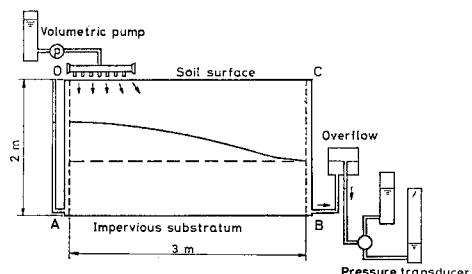
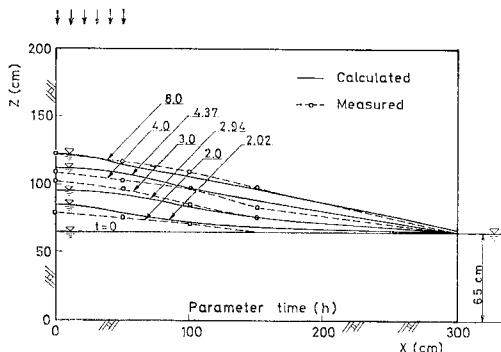


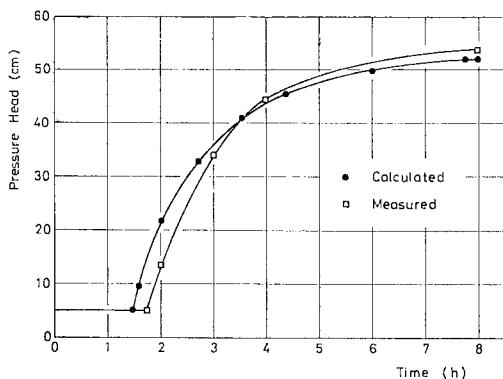
Fig. 3 Experimental details for two-dimensional infiltration.

Table 1 Saturated-unsaturated properties of the soil.

Hydraulic conductivity	$K_s = 35.0 \text{ cm/h}$
Relation between $\psi$ and $K$	$K(\psi) = K_s \frac{A}{A +  \psi B}$ $A = 2.99 \times 10^6$ $B = 5.0$
Effective porosity	$\theta_s = 0.3$
Relation between $\theta$ and $\psi$	$\theta = \theta_s \frac{\alpha}{\alpha +  \psi \beta}$ $\alpha = 4.0 \times 10^4$ $\beta = 2.90$



**Fig. 4** Measured and calculated water table positions at different times.



**Fig. 5** Measured and calculated pressure head at  $X=0$  cm,  $Z=60$  cm.

度検層器により計測している。解析に必要なモデル地盤の浸透特性は **Table 1** に示す値を用いた。

これらの条件より自由水面の上昇について実験値と解析値とを比較した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 5 は、左端の不透水境界上の点 ( $X=0$ ,  $Z=60 \text{ cm}$ ) での圧力水頭の測定結果と数値解析結果を比較

したものである。また Fig. 6 では土槽の左端から 19 cm の所における鉛直方向の体積含水率の分布の時間的变化について実験と解とを比較した結果である。これらの結果を総合すると、浸透に関する本論文での数値解析解は実験結果と比較してよい一致が得られていることより、解析手法の信頼性が実証されたと考えられる。

## (2) 拡散現象に関する検討

移流分散に関する支配方程式である式(2)で、浸透流速がない状態を想定すると、式(2)は分子拡散現象の支配方程式となる。ここで問題をさらに簡単にするために減衰や吸着を無視して一次元の拡散問題を対象とする基礎方程式は次式となる。

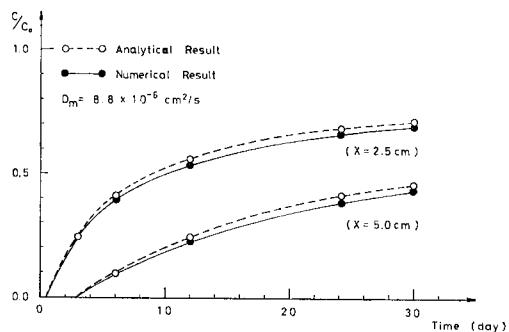
初期条件  $c(X, 0) = 0$ , 境界条件  $c(0, t) = c_0$  での式 (19) の解は周知の次式となる.

ここで  $\operatorname{erfc}(y)$  は余誤差関数である.

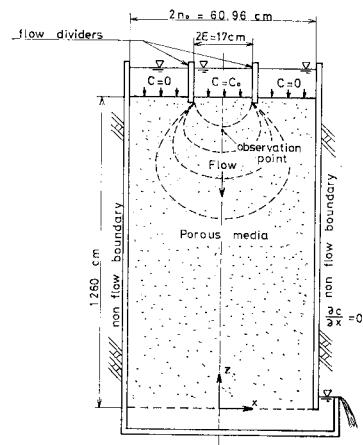
式(20)で仮に  $D=8.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$  として、 $X=2.5 \text{ cm}$ ,  $X=5.0 \text{ cm}$  での濃度の時間的変化の理論解と数値解を比較した結果を Fig. 7 に示す。

### (3) 鉛直2次元分散実験結果と数値解析との比較

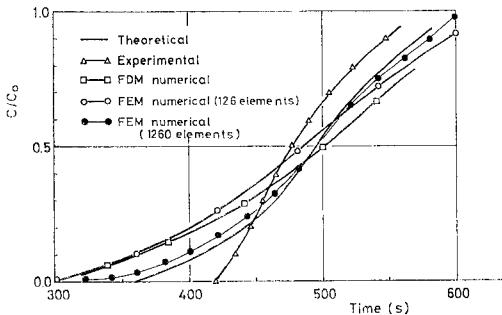
式(2)における浸透流速( $v_i$ )を定常浸透流として、



**Fig. 7** Comparison of theoretical and numerical solutions at  $X=2.5\text{ cm}$  and  $X=5.0\text{ cm}$ .



**Fig. 8** Schematic diagram of the flow domain for dispersion problem.



**Fig. 9** Comparison of theoretical, experimental and numerical results for the position  $X=0$ ,  $Z=91,105$  cm.

濃度変化による液体の密度変化が生じないものと仮定すると、流分散現象だけを取り扱うことになる。ここでは Bruch によって報告されている鉛直 2 次元移流分散実験結果<sup>29)</sup>と本論文での数値解析結果とを比較する。Bruch は Fig. 8 に示すように高さ 126.0 cm、横 60.96 cm、幅 12.7 cm の土槽に平均粒径  $D_{50} = 1.205$  mm の試料を間隙率  $n = 0.39$  で詰めて、 $t < 0$  では土槽の上部より下部へ一定流速で砂糖水を浸透させて、 $t = 0$  において中央の 17 cm の仕切り間に砂糖水と等密度の塩水を流下して、その後の試料内の電気伝導度の変化を測定している。

**Fig. 9** に土槽の中心下 ( $X=0$ ,  $Z=91.105$  cm) での濃度の時間的变化について、理論解<sup>30)</sup>、Bruch の実験結果、差分法による数値解析結果<sup>31)</sup>、そして本論文での有限要素法による数値解析結果とを比較したものを示す。なお、解析に用いた物理定数は

**Table 2** Physical characteristics of the soil for dispersion problem.

$$\begin{aligned}D_{11} &= 0.000\ 859 \text{ cm}^2/\text{s} \\D_{22} &= 0.011\ 863 \text{ cm}^2/\text{s} \\v_s &= 0.058\ 58 \text{ cm/s} \\n &= 0.39\end{aligned}$$

いて有限要素法による数値解は理論解とよく一致している。一方、実験結果と比較すると低濃度部で少し誤差が生じているが全体としては比較的よく一致していると考えられる。この低濃度部での誤差は、浸透流速が拡散や分散速度に比較して速い場合には溶解物質が分散するより先に移流してしまうために濃度が漸変しないで急変することが原因であると思える。

また、Fig. 9 では要素分割が粗な場合（126 要素分割）より密な場合（1260 要素分割）の方が理論解とよく一致していることがわかる。このように要素の代表長さが解の精度や安定性に大きく影響することは、差分法による数値解析ではすでに数学的に説明されており、解の安定性は格子間隔  $\Delta X$ 、時間間隔  $\Delta t$ 、分散係数  $D$  さらに平均流速  $v_s$  などの因子に依存し、一次元の移流分散では次の条件が必要である<sup>32)</sup>。

$$D > \frac{v}{2} \Delta X \left( 1 - v \frac{\Delta t}{\Delta X} \right) \dots \dots \dots \quad (21)$$

さらに近似的には次の条件となる<sup>31)</sup>.

$$\Delta X \leq \frac{2D}{v} \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

有限要素法による解析手法では、まだこのような解の安定性についての数学的な説明はなされていないが、種々の解析の経験から十分条件ではないが必要条件として式(22)と同じ条件が用いられる指摘されている<sup>33)</sup>。

#### 4. 淡水の塩水化防止対策についての検討

沿岸地下水での淡水の塩水化を防止する対策として種々の方法が考えられるが、ここでは地下水に淡水をかん養することによって地下水位を上昇させる方法<sup>5), 8)</sup>と地中に塩水の浸入を防止する遮水壁を設ける方法<sup>34)</sup>について、その効果を定量的に評価して検討する。

### (1) 地下水に淡水をかん養する防止工法

地下水の塩水化は先にも述べたが地下水を過剰揚水することにより地下水位が低下するためと、都市化によりかん養源が減少していることなどが大きな要因となっている。したがって塩水化を防止する方法として人工的に海岸地区に河口貯水池や降雨を集め淡水注入溝を設けることによって地下水へ淡水をかん養して地下水位を上昇させる方法が考えられる。この方法は一般にウォーターカーテン工法とよばれているが、地中にかん養された水は地盤の浄化作用によって再び有効な地下水資源として利用できる利点がある。ここでは Fig. 10 に示す簡単な境界条件のモデル的な地盤を一例として、地盤に

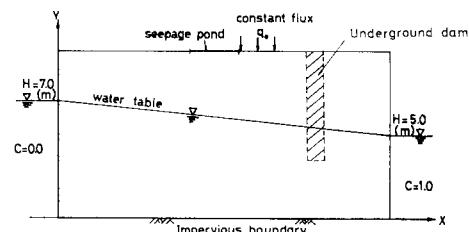


Fig. 10 Schematic diagram of model aquifer.

**Table 3** Table of material properties for numerical calculation.

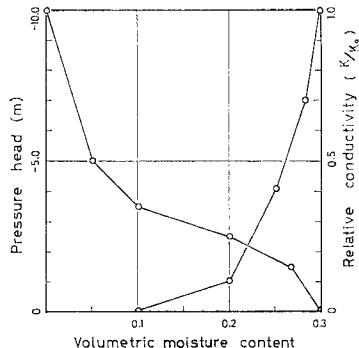
	Material 1	Material 2
Conductivity $K_x \cdot K_y$	0.3 m/day ( $3.47 \times 10^{-4}$ cm/s)	$0.3 \times 10^{-3}$ m/day ( $3.47 \times 10^{-7}$ cm/s)
Porosity $n$	0.3	0.3
Dispersivity $D_x$	$6.6 \times 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /day ( $7.64 \times 10^{-5}$ cm <sup>2</sup> /s)	$6.6 \times 10^{-5}$ m <sup>2</sup> /day ( $7.64 \times 10^{-8}$ cm <sup>2</sup> /s)
$D_y$	$6.6 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /day ( $7.64 \times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /s)	$6.6 \times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /day ( $7.64 \times 10^{-7}$ cm <sup>2</sup> /s)

一定水位でかん養を行った場合と一定流量で注水（散水）を行った場合の2種類のかん養法についてその塩水化の防止策の効果を本研究での解析方法で検討した結果を示す。

なお数値解析に用いた地盤の浸透特性は **Table 3** の材質1の飽和の透水係数を用い、不飽和土の浸透特性には **Fig. 11** の関係を用いた。移流分散に関する物理特性として分散係数が流速の関数である式<sup>11)</sup>を用いることも可能であるが、ここでは **Table 3** に示すように分散係数が一定であるとして解析を行った。

$$\theta D_{ij} = a_T V \delta_{ij} + (a_L - a_T) \frac{V_i V_j}{V} + a_m \tau \delta_{ij} \quad \dots \dots \dots (23)$$

ここで、 $a_T$ ：横分散係数、 $a_L$ ：縦分散係数、 $a_m$ ：拡散係数、 $\tau$ ：屈曲率、 $\delta_{ij}$ ：クロネッカーデルタ。



**Fig. 11** Unsaturated properties of a soil.

**Fig. 12** は初期条件として地盤内の濃度が零で左右の水位が一定である状態の所に、 $t=0$ において左辺の水位が 2 m 上昇し、また右辺の濃度が  $c/c_0=1.0$  になったことによる自由水面の上昇と塩分の移流分散を同時に解析した結果での等濃度線 ( $c/c_0=0.1$ ) の時間的な変化と自由水面の上昇を示したものである。この状態で平衡状態に達したときの自由水面の位置と地盤内での塩分濃度分布を **Fig. 13** に示す。

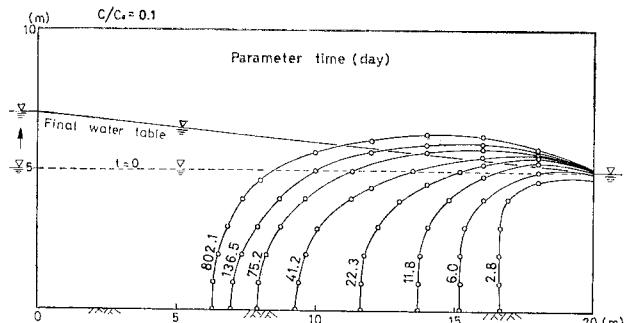
#### a) 定流量注入法

**Fig. 13** の状態を初期条件として、地上より地盤内に一定流量  $q_0$  で散水したことによる地下水の上昇と塩水化領域の後退を **Fig. 14** に示す。なお地表散水の地中浸透速度は地盤の飽和透水係数より小さい値を用いた。図中の破線の初期の濃度分布と比較すると実線での最終状態の濃度分布が水位の上昇によって下流側に大きく後退することがわかる。また、その後退量は濃度化 ( $c/c_0$ ) が 0.1 の等濃度線について検討すると自由水面の上

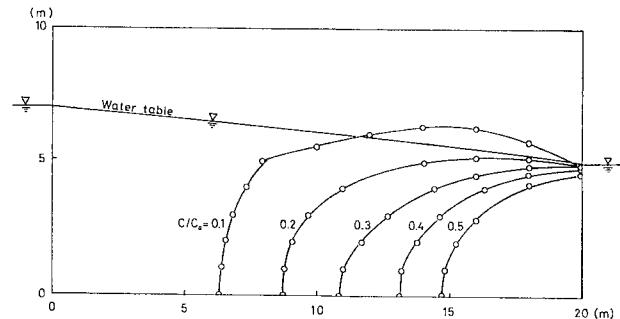
昇量より大きな値となっている。これは、上部より散水しているために地盤内の流速が鉛直方向に大きくなつたことも原因していると考えられる。

#### b) 定水位かん養法

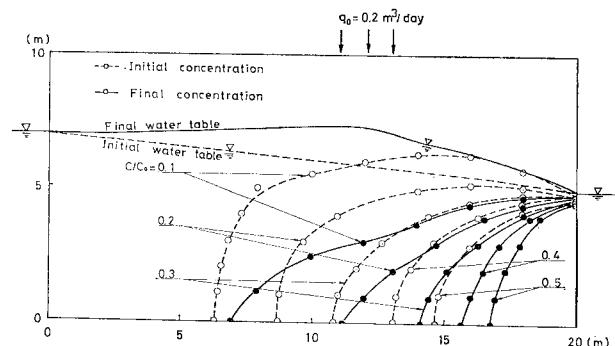
同様に **Fig. 13** を初期条件として、地上より河口貯水池やかん養用水路から一定水位のかん養を実施したことによる地盤内の地下水位の変動と塩分濃度分布の挙動の解析を行った結果の定常状態を **Fig. 15** に示す。この場合には地下水位が地上の一定水位と最終的に連結するためにきわめて高い地下水位となり、当然塩分濃度分



**Fig. 12** Transient positions of isoconcentrations of 0.1 and water table in an unconfined aquifer.



**Fig. 13** Steady state distribution of the concentration in an unconfined aquifer.



**Fig. 14** Steady state distribution of the concentration for constant rate of recharge.

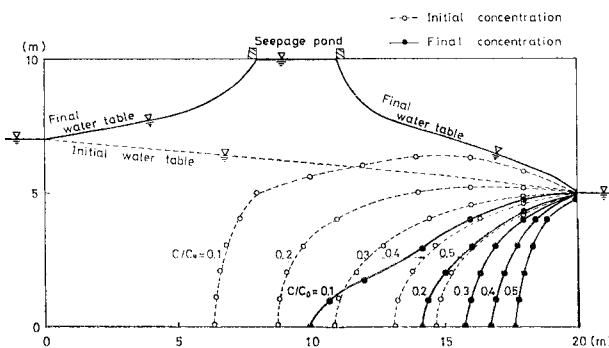


Fig. 15 Steady state distribution of the concentration for constant head of recharge.

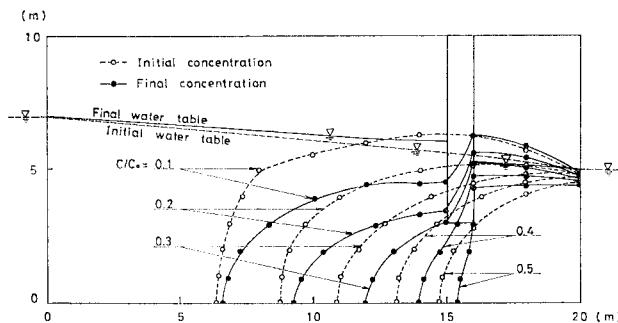


Fig. 16 Steady state distribution of the concentration for underground dam.

布は初期の状態から大きく後退することがわかる。このように地中に降雨や河川水を注入する工法はきわめて恒久的な方法であり、その塩水化防止策としての効果もここで解析した結果で示すように非常に有効であることがわかる。

## (2) 地下水遮水壁を設ける工法

この工法は地下ダム工法ともよばれている工法であるが、地中に矢板や連続壁などによって難透水層を設けることによって滞水層を通って海に流出する地下水を Fig. 16 のようにせき止めて必要な時間に取り出して利用する地下水強化工法である。Fig. 16 は初期条件が Fig. 13 の状態の地盤に地表より  $t=0$  に瞬時に難透水層 (Table 3 の材質 2) を設けたことによる地盤内の地下水位の挙動と塩分濃度の定常状態での分布を示したものである。

Fig. 16 より地下ダムを設けることによってダムの上流側の水位が上昇している。この結果、塩水の上流への分散が抑制されるとともに、地下ダムによって透水性のよい地盤の断面が小さくなるために遮水壁の下の滞水層での下流側への流速が増加して、さらに塩水の淡水中への移流分散が防止されることがわかる。

ここで遮水壁の下流側の背面においては地下水位が低

下するとともに地下水の浸透流速が零近くになるため塩分の拡散が生じて塩分濃度は初期より上昇している点に注意する必要がある。このことより、地下ダムを設ける平面的な位置についても十分考慮しなければならないことがわかる。また、地下ダム工法による塩水化の防止対策もかん養工法と同様に有効な手法であることが本解析によつて検討できたと考えられる。

## 5. 結 論

本論文は、海岸滞水層中の淡水と塩水を密度の異なる混合性流体であるとして取り扱い、特に飽和・不飽和領域を考慮することによって自由水面を有する不圧滞水層中の地下水の塩水化現象について有限要素法による非定常解析について述べたものである。

この研究の特色および得られた結果を要約すれば以下のようになる。

(1) 自由水面を有する地下水の浸透の支配方程式と密度の異なる 2 相流の移流分散方程式を重みつき残差法によって有限要素法による定式化を実施した。

(2) 相互に関連のある 2 つの支配方程式の数値解を求めるために、浸透問題と移流分散問題とを 2 段階の過程で繰り返し計算を用いて解を得る手法を示した。ここで取り扱った解析手法は地下水の塩水化問題の解析だけにとどまらず水温差のある地下水の浸透現象の解析や、濃度差による密度変化を無視すると、地中での汚水の拡散現象の解析にも応用できる。

(3) ここに示す解析手法の妥当性を検討するために鉛直 2 次元飽和・不飽和浸透実験の結果や移流分散実験結果および理論解との比較を行い本研究での手法が種々の問題の解析に適用できることを示した。

(4) 実際の地盤での地下水の塩水化防止策として提唱されているウォーターカーテン工法や地下ダム工法についてのシミュレーションした結果の一例を示して、本解析法により各防止策の効果が定量的に検討できることがわかった。

なお、現実の地盤での解析に本解析法を応用するには地盤内の分散係数や拡散係数についての現地での計測方法を今後確立する必要がある。

## 参考文献

- 1) Columbus, N.: Viscous model study of sea water intrusion in water table aquifers, Water Resour. Res., Vol. 1, No. 2, pp. 313~323, 1965.
- 2) Bear, J. and G. Dagan : Moving interface in coastal

- aquifers, ASCE, HY, Vol. 90, No. 4, pp. 193~216, 1964.
- 3) たとえば, Polubarnova Kochina, Y. : Theory of Ground Water Movement, Princeton University Press, pp. 355~356, 1962.
  - 4) Mualem, Y. and J. Bear : The shape of the interface in steady flow in a stratified aquifer, Water Resour. Res., Vol. 10, No. 6, pp. 1207~1215, 1974.
  - 5) 上田年比古・崎山正常 : 海水飽和地盤における淡水注入溝の浸透, 土木学会論文集, 第 125 号, pp. 1~7, 1966.
  - 6) Kohno, I. : Finite element analysis of interface problem in groundwater flow, Proc. of JSCE, No. 228, pp. 109~116, 1974.
  - 7) Cheng, R.T. and M.H.Hu : Study of fluid movements through causeway, ASCE, HY, Vol. 101, No. 1, pp. 155~165, 1975.
  - 8) Kawatani, T. : Numerical analysis of the groundwater mound and fresh-salt water interface in a coastal aquifer, Proc. of JSCE, No. 238, pp. 89~98, 1975.
  - 9) Sa da Costa, A.A.G. and J.L. Wilson : Coastal seawater intrusion : A moving-boundary problem, The International Conference on Finite Elements in Water Resources, pp. 2.209~2.218, 1980.
  - 10) 河野伊一郎 : 非定常浸透流における境界面問題の有限要素解析とその実験的検証, 土木学会論文報告集, 第 313 号, pp. 65~73, 1981.
  - 11) Bear, J. : Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier Publishing Co., Inc., New York, 1972.
  - 12) Rumer, R.R. and Harleman, D.R.F. : Intruded saltwater wedge in porous media, ASCE, HY, Vol. 89, No. 6, pp. 193~220, 1963.
  - 13) Gelhar, L.W., J.L. Wilson, et al. : Density induced mixing in confined aquifers, Rep. No. 145, Ralph M Parson Lab. for Water Resour. and Hydrodyn., Mass. Inst. of Technol. Cambridge, Massachusetts, 1972.
  - 14) 尾島 勝 : 揚水による塩水化現象の変化に関する解析(II), 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 294~298, 1978.
  - 15) Pinder, G.F. and H.H. Cooper : A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front, Water Resour. Res., Vol. 6, No. 3, pp. 875~882, 1970.
  - 16) Lee, C. and R.T. Cheng : On seawater encroachment in coastal aquifers, Water Resour. Res., Vol. 10, No. 3, pp. 1039~1043, 1974.
  - 17) Segol, G., G.F. Pinder and W.G. Gray : A Galerkin-finite element technique for calculating the transient position of the saltwater front, Water Resour. Res., Vol. 11, No. 2, pp. 353~347, 1975.
  - 18) Desai, C.S. and D.N. Contractor : Finite element analysis of flow, diffusion and salt water intrusion in porous media, Formulation and Computational Algorithms in Finite Elements Analysis, ed. by K.J. Bathe et al., MIT press, pp. 958~983, 1977.
  - 19) Frind, E.O. : Seawater intrusion in continuous coastal aquifer-aquitard systems, 3rd International conference on finite elements in water resources, Mississippi, pp. 2.177~2.198, 1988.
  - 20) Kawatani, T. : Behavior of seawater intrusion in layered coastal aquifers, 3rd International conference on finite elements in water resources, Mississippi, pp. 2.199~2.208, 1980.
  - 21) 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, 第 264 号, pp. 87~96, 1977.
  - 22) Pinder, G.E. and W.G. Gray : Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology, Academic press, pp. 198~199, 1977.
  - 23) Pickens, J.F., R.W. Gillham and D.R. Cameron : Finite-element analysis of the transport of water and solutes in tile-drained soils, J. of Hydrology, Vol. 40, pp. 234~264, 1979.
  - 24) Gaymon, G.L., V.H. Scott and L.R. Herrmann : A general numerical solution of the two-dimensional diffusion-convection equation by the finite element method, Water Resour. Res., Vol. 6, No. 6, pp. 1611~1617, 1970.
  - 25) 駒田広也・林 正夫 : 地下式原子力発電所の想定事故時における核種の地中格納効果の評価手法, 土木学会論文報告集, 第 288 号, pp. 115~126, 1979.
  - 26) Zienkiewicz, O.C. : The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill, New York, 1971.
  - 27) Bathe, K.J. and E.L. Wilson : Numerical Methods in Finite Element Analysis, Prentice Hall, INC., 1976.
  - 28) Vauclin, M., D. Khanji and G. Vachaud : Experimental and numerical study of a transient two-dimensional unsaturated-saturated table recharge problems, Water Resour. Res., Vol. 15, pp. 1098~1101, 1979.
  - 29) Bruch, J.C. JR. : Two-dimensional dispersion experiments in a porous medium, Water Resour. Res., Vol. 6, No. 3, pp. 791~800, 1970.
  - 30) Bruch, J.C. and R.L. Street : Two-dimensional dispersion, ASCE, SA, Vol. 6, pp. 17~39, 1967.
  - 31) Shamir, U.Y. and D.R.F. Harleman : Numerical solutions for dispersion in porous media, Water Resour. Res., Vol. 3, No. 2, pp. 557~581, 1967.
  - 32) 土木学会編 : 土木工学における数値解析/流体解析編, サイエンス社, pp. 59~72, 1974.
  - 33) コナー/ブレビア共著, 奥村敏恵監訳 : 流体解析への有限要素法の応用, サイエンス社, pp. 199~207, 1980.
  - 34) 松尾新一郎・河野伊一郎 : 地下止水壁による地下水規制の実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 178 号, pp. 53~61, 1970.

(1982.6.4・受付)