

浸透層条件が不圧浸透地盤内の塩水侵入に及ぼす影響について

SEAWATER INTRUSION AFFECTED BY BOUNDARY CONDITIONS IN UNCONFINED AQUIFERS

杉尾 哲*・森 耕司**

By Satoru SUGIO and Kohji MORI

The characteristics of seawater intrusion are examined on the various aquifer conditions. Numerical positions of fresh-saltwater interface are obtained with using Residual Flow Procedure that was proposed originally to solve unconfined groundwater flow. A simulated result of fresh-saltwater interface is confirmed by sand model test in case of two-layered aquifer. From the simulated results, the followings are clarified, that is; seawater easily intrude to the two-layered aquifers in case that the high permeable layer overlies on the low permeable layer. The intruded saltwater region is relatively small in case of both the stratified aquifers separated by a semi-permeable layer and the anisotropic aquifers having low permeability in vertical direction, but that is relatively large in both the two-layered aquifer and the stratified aquifer of which the upper layer is closed by the impermeable wall.

Keywords: groundwater, seawater intrusion, numerical simulation

1. ま え が き

海岸に面した浸透地盤における地下水の塩水化障害は、特に離島などの、地下水を唯一の水資源とする地域の住民にとっては、生命や生産活動に直接にかかわるきわめて深刻な問題である。このため、これまでも数多くの研究者たちによって、さまざまな解析が行われてきた。それらの代表的なものとしては、たとえば Bear and Dagan による侵入機構の理論解析¹⁾、Pinder and Cooper による分散解析²⁾、Strack による平面解析³⁾などがある。わが国においても Tamai and Shima による淡塩境界面形状の理論解析⁴⁾、Kawatani⁵⁾や藤野⁶⁾、佐藤ほか⁷⁾による淡塩境界面形状の数値解析、河野ほか⁸⁾や柿沼ほか⁹⁾、靱井ほか¹⁰⁾による分散解析などがみられる。しかし、それらは均質等方性の理想的な浸透地盤を対象にしたものであり、実際の地盤に多くみられるような、鉛直方向に種々の透水性の地層が分布する多層地盤あるいは鉛直方向と水平方向とで透水性が異なる異方性地盤についての塩水侵入の検討は少ない。わずかに Collins and Gelher¹¹⁾や Mualem and Bear¹²⁾などが難透水層を

挟む二層地盤について、また佐藤・渡辺¹³⁾や尾島・鐘ヶ江¹⁴⁾が難透水層を挟まない成層地盤について、いずれも準一様流の仮定を用いて解析している程度にすぎない。したがって、不均質地盤において塩水の侵入現象がどのような傾向を示すのかについては、十分に明らかにされていないといえる。

次に、塩水侵入に対する防御工法¹⁵⁾としては、地盤中に地下ダムや止水矢板などの遮水壁を設ける方法や、井戸あるいは溝などから淡水を注入する方法など種々の方法がある。このうち、遮水壁を設ける方法については、浸透層を完全に遮水できない場合に、塩水侵入に対してどの程度の防御効果があるのか、あるいは遮水壁の位置や遮水率の違いによって防御効果がどのように変わるのかなどが問題になるが、この点についてもまだ明らかにされていない。

以上のような塩水侵入問題を検討する際には、これまで2種類の解析が行われてきた。1つは淡水領域と塩水領域との間の混合領域の存在を考慮したもので、他方は混合領域の存在を無視したものである。ここに、浸透層内においては淡水と塩水との間には必ず混合領域が存在するが、野外の観測結果を参照すると、混合領域の厚さは浸透層の厚さ等の他の代表長さ比べて非常に小さいことが多く¹⁶⁾、混合領域内の流れが、全領域の流れに影

* 正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部土木工学科
(〒889-21 宮崎市学園木花台西 1-1)

** 学生会員 宮崎大学大学院工学研究科 (同上)

響を及ぼすほど支配的にならない場合が多い。また実地盤における分散係数の評価には困難な点も多い。したがって、厳密な分散解析を行わず、混合領域の存在を近似的に考慮する程度の解析で塩水侵入の傾向を十分に検討できると考える。

本研究では、上記のような不圧浸透地盤における塩水侵入現象について種々の検討を行うことを目的として、残差流手法 (Residual flow procedure) を用いた定常解析を行った。この残差流手法は、自由地下水面より上側の不飽和帯の浸透特性を活用して不圧地下水流を簡便に解く方法として、Desai and Li¹⁷⁾ によって提案された一種の飽和-不飽和解析手法であり、地下密度流の境界条件を加味することによって、自由地下水面と淡塩境界面をもつ流れの場の解析にも有効である¹⁸⁾。この解法のもう1つの特徴は、透水性が空間的に複雑に分布する流れの場に対しても有効であることであり、これらの点で本研究の解析手法として最適であると考えられる。

本論文においては、以上の解法を用いて、不圧浸透地盤の地層条件が塩水侵入にどのように影響するかを検討するために、まず、浸透層が二層地盤で上下のいずれかが難透水層の場合、中央に薄い難透水層を挟む場合、そして透水性に異方性がある場合について検討した。ついで、矢板等の遮水壁が不完全貫入状態で設けられた場合について解析を行い、遮水壁の塩水侵入に対する防御効果についても検討した。

2. 残差流手法

これまでの不圧地下水流の飽和解析においては、自由地下水面が解析領域の境界となるために、その位置を探すための境界条件式を解く必要があり、その位置の修正あるいは動的変動に伴って解析領域を変形する必要があった¹⁹⁾。一方、飽和-不飽和解析 (たとえば、赤井ほか²⁰⁾) においては、不飽和帯を含めた全領域を解析するので、自由地下水面が解析領域の境界とならず、したがって、その位置を追跡する必要はないが、浸透層パラメーターとして体積含水率が加わるので、不飽和透水係数と体積含水率および圧力水頭と体積含水率の間の関係を知る必要があった。

残差流手法は自由地下水面を解析領域の境界とせず、Fig. 1 のように、自由地下水面より上側の不飽和領域を含めた全領域を解析対象とするが、不飽和領域内の体積含水率を変数として扱わず、Fig. 2 のように透水係数を圧力水頭の関数と考えることによって、飽和-不飽和解析と同様の解析を行うものである。すなわち、全領域を飽和領域とみなして与えられた境界条件で解くと、負の圧力をもつ飽和領域が得られるが、この部分を不飽和領域とみなし、透水係数を正圧の部分に与える透水係数よ

りも小さな値を与えて解析する。このことにより、結果的に飽和-不飽和解析と同じ結果が得られると考えている。解析上は、小さな透水係数を与えることによって残差流成分が生じ、この成分を利用して解析することに、この解析手法の特徴がある。この解析手法は、次のように考えると、Fig. 3 の塩水領域にも適用できる。

Fig. 3 の浸透領域右側の海水中に小さな淡水塊を仮想し、その位置水頭を z として淡水水頭 ϕ を考えると、水圧は周囲の塩水圧に等しいから、塩水と淡水の密度をそれぞれ ρ_s, ρ_f とすると、

$$\phi = z + \rho_s(H_2 - z)/\rho_f = \rho_s H_2 / \rho_f - z(\rho_s / \rho_f - 1) \cdots (1)$$

となって、 ϕ は深さ方向にしたいに大きくなる分布を示す。また、この水頭分布は淡塩境界面上の水頭分布をも表わしている²¹⁾。ここで塩水領域を、淡塩境界面上と浸透領域下流端境界上で、式 (1) と同じ水頭分布をもつ仮想上の淡水領域に変換すると、淡水だけの流れとみなして全領域を解くことができる。このとき、淡塩境界面の上側の淡水が淡塩境界面を横切ることについては制限されなければならないから、淡塩境界面の近傍を含めて、

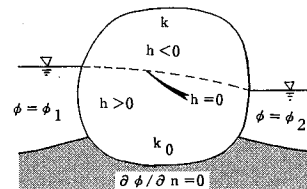


Fig. 1 Analytic domain of residual flow procedure.

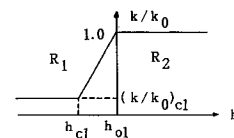


Fig. 2 Permeability distribution in unsaturated region.

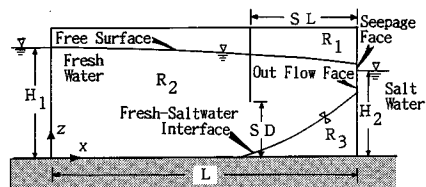


Fig. 3 Schematic diagram of analytic domain.

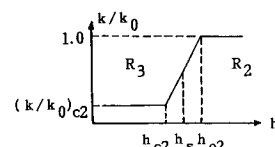


Fig. 4 Permeability distribution in saltwater region.

その下側では透水係数に小さな値を与える。解析上は、このことによって残差流成分が生ずるから、飽和-不飽和解析と同じアルゴリズムで、Fig. 3 の塩水侵入問題を解けることになる。

3. 基礎方程式

まず、Fig. 3 の不飽和領域および塩水領域をそれぞれ淡水の飽和領域に変換する。すなわち不飽和領域 R_1 は、飽和領域 R_2 の透水係数 k_0 よりも小さな $k_0 - f_s(h)$ の透水係数で流動する飽和領域と考える。同様に塩水領域 R_3 は、 $k_0 - f_s(h)$ の透水係数で流動する淡水の飽和領域と仮想する。

このように考えると、Fig. 3 の流れは、Darcy 式と定常状態の連続式より、淡水水頭 ϕ について式 (2) で表現される。

$$\text{div}(k(h)\text{grad } \phi) = 0 \quad (2)$$

$$k(h) = \begin{cases} k_0 - f_s(h) & : \text{領域 } R_1 \ (h < 0) \\ k_0 & : \text{領域 } R_2 \ (h \geq 0) \\ k_0 - f_s(h) & : \text{領域 } R_3 \ (0 < h < h_s) \end{cases}$$

ここに $k(h)$ は圧力水頭 h の関数として表現した透水係数であり、その変化は、領域 R_1 については不飽和帯の透水係数の変化を考慮して Fig. 2 のように、領域 R_3 については二層流における混合領域内の相対透水 (Relative permeability) の変化²²⁾を考慮して Fig. 4 のように与える。 $k(h)$ を一般的に $k_0 - f$ で表わすと、式 (2) の汎関数は式 (3) で表現される。

$$\Pi(\phi) = \int_R \left[\frac{1}{2} (k_0 - f) \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] dR \quad (3)$$

四角形一次要素内の水頭分布を $\phi^E = [N] \{e\}$ で表わし、

$$[B] = \begin{Bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial z \end{Bmatrix} \{N_1 N_2 N_3 N_4\}$$

とおいて、式 (3) を最小とおくことにより有限要素式を求めると

$$[k_0] \{e\} - [k_F] \{e\} - [k_S] \{e\} = 0 \quad (4)$$

となる。ここに逆行列を添字 T で表わすと、

$$[k_0] = \int_R [B]^T [K] [B] dR$$

$$[k_F] = \int_R [B]^T [F] [B] dR$$

$$[k_S] = \int_R [B]^T [S] [B] dR$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{0x} & 0 \\ 0 & k_{0z} \end{bmatrix}, [F] = \begin{bmatrix} f_{FX}(h) & 0 \\ 0 & f_{FZ}(h) \end{bmatrix}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} f_{SX}(h) & 0 \\ 0 & f_{SZ}(h) \end{bmatrix}$$

であり、式 (4) の第 2 項と第 3 項が残差流成分である。

4. 数値解析手法

式 (4) の数値解析はマトリックス $[k_F]$ と $[k_S]$ が未知であるから、Iteration を用いて次のように行う。

H_1 を Fig. 3 の上流端の水頭とすると、1 回目の計算では全領域で $\phi = H_1$ とおき、 $[k_F] = [k_S] = 0$ とおいて式 (4) を解く。 $n-1$ 回目の計算で求めた $\{e\}^{n-1}$ から各要素について平均圧力水頭 h_m を算定する。 h_m の値が $h_m \geq h_{01}$ ($=0$) であれば、その要素は R_2 領域に属するものと判定し、 $f_{FX}(h) = f_{FZ}(h) = 0$ とする。逆に $h_m < h_{01}$ であれば、 R_1 領域に属する要素と判定し、 f_F の値を Fig. 2 に示された透水係数分布に従って与える。すなわち $h_m < h_{c1}$ の場合は $f_{FX}(h) = [1 - (k/k_0)_{c1}] k_{0x}$ 、 $f_{FZ}(h) = [1 - (k/k_0)_{c1}] k_{0z}$ とし、 $h_{c1} < h_m < h_{01}$ の場合は h_m による内挿計算によって f_{FX} 、 f_{FZ} を算定する。領域 R_3 については、要素の重心位置と同じ高さにおける海水中の圧力水頭 h_s を求め、Fig. 4 の $h_{c2} < h_m < h_{02}$ の要素は混合領域に属するものと判定し、 $h_m < h_{c2}$ の要素は塩水領域に属するものと判定して、 R_1 領域と同じ方法で f_s の値を与える。以上の計算を全領域で行った後、 n 回目の計算を式 (5) を用いて行う。

$$[k_0] \{e\}^n = [k_F] \{e\}^{n-1} + [k_S] \{e\}^{n-1} \quad (5)$$

$[k_0]$ は不変であるから、 $[k_F]$ と $[k_S]$ だけを修正しながら式 (6) の収束条件を満足するまで実行する。

$$|e^n - e^{n-1}| / |e^{n-1}| \leq \epsilon \quad (6)$$

以上の計算に付随して、自由地下水面と淡塩境界面の位置が決定される。すなわち自由地下水面の位置は、各節点の圧力水頭 h を用いて、自由地下水面の境界条件 $h=0$ を満足する位置を内挿計算により算出することによって得られる。また淡塩境界面の位置は、淡塩境界面の境界条件 $h=h_s$ を満足する位置を内挿計算により算出して得られる。

ここで、自由地下水面と淡塩境界面の位置の決定における従来の解析の課題に、下流端境界上での自由地下水面の浸出面と淡塩境界面の流出面の処理がある。これについては、これまでにも種々の方法が考案されてきているが (たとえば、Kono²³⁾、佐藤ほか²⁴⁾)、そのほとんどは図形的な処理であり、力学的な観点からは説得力に乏しい欠点があった。この点について、本研究においては次のような処理を行う。すなわち浸透領域の下流端境界よりも下流側に、領域内の要素幅に比べて格段に狭い幅の要素を増設し、その透水係数を領域内のそれに比べてオーダー的に大きい値に設定する。これを人工屈折帯とよび、その下流側の節点に下流端境界で与えるべき境界条件を与える。このことによって、計算で得られる下流端境界の水頭は人工屈折帯の下流側で境界条件として与えた水頭よりわずかに大きいから、透水係数の不連続性

による流線の屈折が生じた後に人工屈折帯の下流側で自由地下水面と淡塩境界面が下流水面と一致するようになる。したがって人工屈折帯を設けることにより、下流端境界に浸出面と流出面をもった自由地下水面と淡塩境界面が決定されることになる。

5. 解析手法の検証

本解析手法を塩水侵入問題へ適用することの妥当性は、すでに均質地盤について、矢板を設けた場合も含めて、確認しているので¹⁸⁾、ここでは二層地盤について、淡塩境界面の数値解析結果を砂モデルによる実験結果と比較してみよう。砂モデルによる実験はFig. 5に示すような透明アクリル板製の浸透水槽を使用して行い、上下流の水位を固定して約3時間後の定常に達した淡塩境界面を観測した。塩水は淡塩境界面の形状を観察するために、過マンガン酸カリウムを用いて着色している。このとき、塩水と淡水の比重は $\rho_s=1.028$, $\rho_f=0.998$ であり、境界水頭は $H_1=43.8$ cm, $H_2=40.0$ cmであった。また上層は10%粒径 $d_{10}=0.27$ mm, 均等係数 $U_c=3.2$ の川砂を空隙率 $n=43\%$ に充填し、下層は $d_{10}=0.52$ mm, $U_c=1.6$ の珪砂を $n=48\%$ に充填している。透水係数は、同じ砂を使用してほぼ同じ空隙率で充填された扇形水槽による別の実験結果で求められた値を使用し、川砂は $k_0=0.253$ cm/s, 珪砂は $k_0=0.959$ cm/sとした。

本解析手法による淡塩境界面の解析結果を実験結果と比較したものがFig. 6であり、解析結果は実験結果と良

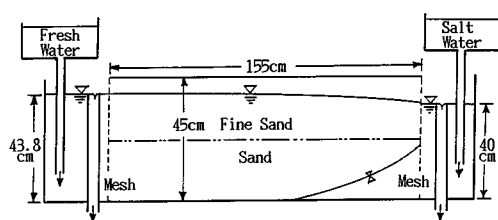


Fig. 5 Schematic diagram of sand model.

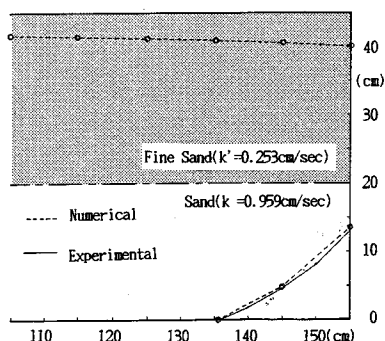


Fig. 6 Comparison of fresh-saltwater interface in two-layered aquifer.

く一致している。このことから、本解析手法は二層地盤においても十分な精度で淡塩境界面の位置を表現し得ることが確かめられたものと考えられる。

なお本論文においては、人工屈折帯については、屈折帯幅を領域内の要素幅の1/5とし、透水係数を領域内の15倍にして計算している。これらの値は、たとえば屈折帯幅を領域内要素幅の1/10としても、あるいは透水係数を領域内の20倍にしても、計算結果はあまり相違しない。またFig. 2, 4の透水係数分布については、Fig. 2ではDesaiらの研究¹⁷⁾で使用された値を参照して $(k/k_0)_{c1}=0.1$, $h_{c1}/H_2=-0.25$ とし、Fig. 4においては均質地盤では $(k/k_0)_{c2}=0.1$ とするが、多層地盤では透水係数比率の1/10とし、 h_c は計算の収束状況を考慮して $(h_{02}-h_s)/H_2=(h_s-h_{c2})/H_2=2.5 \times 10^{-4}$ としている。

6. 解析結果

以下に、種々の場合について淡塩境界面の位置を求め、塩水の侵入傾向を調べてみよう。なお結果を相互に比較するために、地盤長さ L と上流端水頭 H_1 は一定とし、下流端水頭 H_2 で無次元化して、 $L/H_2=3.75$, $H_1/H_2=1.075$ としている。また塩水および淡水の密度はそれぞれ $\rho_s=1.03$, $\rho_f=1.0$ とする。

(1) 矢板が設置されていない場合

Fig. 7~9は3種類の地盤条件について求めた解析結果を示したものである。Fig. 7は二層地盤について求めたもので、上層と下層の透水係数の比率が1/10:1で上層が難透水性の場合と、逆に1:1/10の場合について求めている。また比較のために、均質地盤の結果も合わせて描いている。下流端境界上の淡水水頭は、先に述べたように、式(1)で表わされ、海水面から深い位置ほど数値が大きくなる。ここに上層が難透水性の場合(破線)には、流れの主流が下層に偏るから、淡水の大部分は上下層の境目よりも下の部分から流出するが、この淡塩境界面の流出面位置は、均質地盤の場合(点線)の位置よりも深いから、流出面位置の淡水水頭が均質地盤の場合よりも大きくなる。したがって領域内の水頭が、均質地盤の場合に比べて全体的に大きくなり、そのために塩水が侵入しにくくなっている。傾向的には下層だけが浸透層の被圧地盤への塩水侵入に類似した侵入状況を示している。逆に下層が難透水性の場合(実線)には、淡水流量が均質地盤の場合よりも少なくなるために、淡塩境界面の流出面位置は、均質地盤の場合よりも上になる。したがって領域内の淡水水頭が、均質地盤の場合に比べて全体的に小さくなり、そのために塩水が侵入しやすく、塩水の侵入域が均質地盤の場合に比べて広がる傾向にあることがわかる。

Fig. 8は浸透層の中央部分に厚さ $t/H_2=1/8$ の難透水

層を水平に挟む場合についての解析結果で、難透水層の透水係数 k' が浸透層の k に対して $k'/k=1/2, 1/10, 1/100$ の場合について求めている。 $k'/k=1/2$ の場合には、難透水層内の上向流があまり制限されないために、上下層間の水頭の平均化が進み、結果的に侵入塩水の先端位置は均質地盤の場合の結果 (Fig. 7 の点線) とほとんど変わらなくなっている。しかし $k'/k \leq 1/10$ 程度になると、難透水層内の上向流が弱くなるために、難透水層を挟んで上下に淡塩境界面が分かれる傾向にあり、難透水層の透水性が小さいほど、塩水の侵入域は下層では小さくなるが、上層では大きくなっている。 $k'/k=1/$

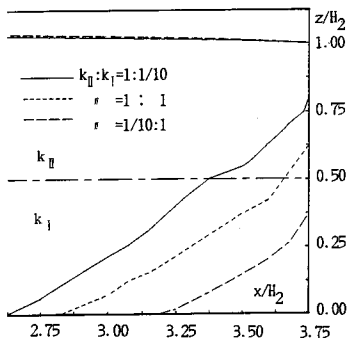


Fig. 7 Fresh-saltwater interface in two-layered aquifer.

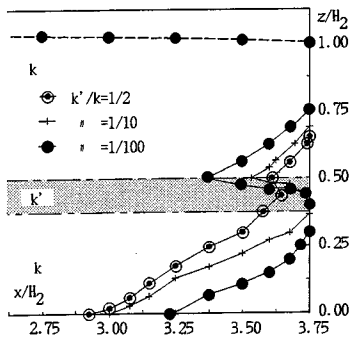


Fig. 8 Fresh-saltwater interface in stratified aquifer.

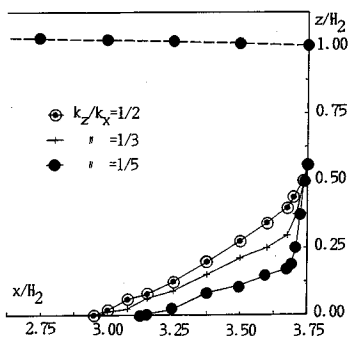


Fig. 9 Fresh-saltwater interface in anisotropic aquifer.

100 の場合には、下層の淡塩境界面の形状は Fig. 7 の上層が難透水性の場合の形状と類似し、上層の形状は Fig. 7 の下層が難透水性の場合の上層の形状と類似している。

なお、 $k'/k=1/10$ および $1/100$ の場合の難透水層内の淡塩境界面の形状については、同様の境界条件について、種々の論議がある。Mualem and Bear⁽²⁾ は、淡塩境界面が難透水層内に形成され、淡塩境界面を横切った淡水が塩水と混合しながら鉛直に上昇していくと考えたのに対し、Hoorn⁽²⁴⁾ は、淡塩境界面が難透水層の上面で薄い膜状に形成され、上流側に後退して上層の淡塩境界面に接続するとした。これらを Fig. 8 と比較すると、本解析結果では、淡塩境界面は難透水層内に形成されており、Hoorn の解析とは傾向が異なっていることがわかる。この原因は、Hoorn の研究が平板間隔を変化させた Hele-shaw モデルによる実験観察に基づいていることによるものと考えられる。すなわち、Hoorn は透水性の変化を平板間隔の変化で表現して実験したが、そのような Hele-shaw モデルでは、透水性の不連続による淡塩境界面の屈折形状について砂モデルと異なった実験結果を与える場合があり、この場合にも同様の相違が生じたものと考えられる。たとえば、難透水性の鉛直遮水壁を通過する不圧地下水流について実験を行ったところ、遮水壁部分の平板間隔を狭めた Hele-shaw モデルで得られた淡塩境界面の実験形状は⁽²⁵⁾、遮水壁の下流側で急激に低下して解析結果と一致しなかったのに対し、砂モデルで得られた実験形状⁽²⁶⁾ は、遮水壁内で急激に低下して解析結果と一致した。このように、透水性の不連続による淡塩境界面の屈折現象については、Hele-shaw モデルと砂モデルとで異なった実験結果を与える場合があることに注意しなければならない。

Fig. 9 は、透水性に異方性がある場合についての結果で、鉛直方向の透水係数 k_z が水平方向に対して、 $k_z/k_x=1/2, 1/3, 1/5$ と小さい場合について求めている。

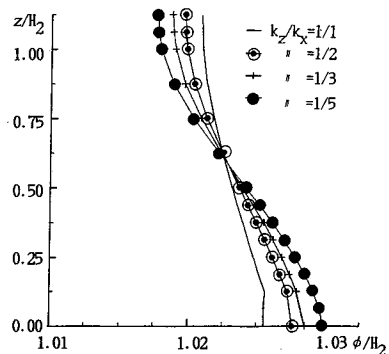

 Fig. 10 Distribution of hydraulic head in anisotropic aquifer at $x/H_2=3.15$.

Fig. 10 に異方性地盤の場合の地盤内の鉛直方向の水頭分布を示しているが、これからわかるように、異方性が顕著な場合には水頭の鉛直方向の平均化が起りにくい。そのために、浸透層下部の水頭が等方性地盤の場合に比べて大きくなり、これによって塩水が侵入しにくくなっている。一般の浸透地盤ではこのような異方性がある場合が多いと考えられるから、従来のように均質等方性地盤として解析した場合には、解析結果よりも塩水が侵入しにくい傾向にあることがわかる。

(2) 矢板が設置された場合

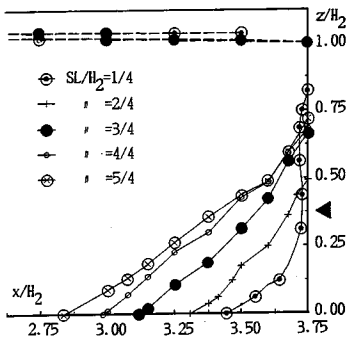


Fig. 11 Fresh-saltwater interface in various position of impermeable wall.

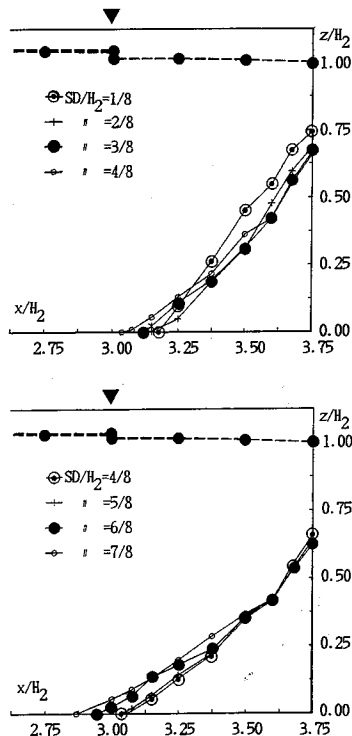


Fig. 12 Fresh-saltwater interface in various clearance of impermeable wall.

Fig. 11, 12 は、均質地盤に矢板などの遮水壁を設けた場合について求めた解析結果で、Fig. 11 は矢板の開口高さを $SD/H_2 = 3/8$ と一定にして (図中の ◀印が、矢板の下端高さ)、海から矢板までの水平距離を種々変化させたものである。下流端境界から矢板までの水平距離を SL とすると、 SL によって淡塩境界面の位置は大きく変化することがこの結果からわかる。ただ $SL/H_2 = 5/4$ などのように、下流端境界から離れた位置に矢板を設置しても、淡塩境界面の位置は、矢板を設置しない場合 (Fig. 7 の点線) とほぼ一致してしまい、矢板の塩水侵入に対する防御効果が現れない。逆に $SL/H_2 \leq 3/4$ のように海に近い位置に矢板を設置すると、防御効果が顕著に現れることがわかる。

Fig. 12 は Fig. 11 とは逆に、矢板の設置位置を $SL/H_2 = 3/4$ と一定にして (▼印が矢板の設置位置)、開口高さ SD を種々変えたものである。淡塩境界面の位置に Fig. 11 のような大きな変化はみられないが、 SD を小さくするほど、せき上げ効果によって矢板直上流部の水頭が高くなり、その分だけ淡塩境界面の位置は海側へ後退させられる傾向にある。しかし $SD/H_2 = 1/8$ の場合は、矢板による淡水流れへの遮水効果が顕著に現れるために、淡水流量が減少し、淡塩境界面の流出位置が上昇して、矢板下流域の水頭が小さくなった分だけ $SD/H_2 = 2/8$ の場合に比べて塩水の侵入域が拡大する。このため $SD/H_2 = 2/8$ の場合に塩水侵入域が最も小さくなっているようである。また $SD/H_2 \geq 6/8$ ではせき上げ効果が顕著でないために、矢板を設置しない場合とほぼ一致する。以上の結果から、矢板の塩水排除に対する効果は $SL/H_2 \leq 3/4$ で $SD/H_2 = 2/8$ の場合に顕著に現れることがわかる。Fig. 13, 14 は、矢板が $SD/H_2 = 3/8$, $SL/H_2 = 3/4$ の条件で設置された場合の、多層地盤についての解析結果である。Fig. 13 は上下層の透水係数の比率が $1/10:1$ と $1:1/10$ の場合を示したもので、比較のために均質地盤の結果も合わせて描いている。上層が難透水層の場合には上層の透水性が小さいほど上層が被圧層に相当して、下層が被圧帯水層とみなすことができるが、この結果にも、その傾向は十分に現われていて、淡塩境界面の位置は矢板を設置しない Fig. 7 の破線とほぼ同じ位置になっている。したがって、この場合の上層部分の矢板の設置効果はきわめて小さいことになる。下層が難透水層の場合には、下層では均質地盤よりも矢板の設置効果が大きく現われる。しかし矢板が上層を完全に締め切っているため、矢板先端を迂回する際に大きな水頭の損失が起り、矢板下流側の上層で水頭が低下して、塩水の侵入域が非常に拡大してしまうことがわかる。次に Fig. 14 は浸透層の中央部分に難透水層を挟む場合を示したものである。 $k'/k = 1/2$ 程度であれば、

矢板の設置によって、淡塩境界面の位置はFig. 8 よりも海側へ後退させられ、矢板の防御効果が認められるが、 $k'/k \leq 1/10$ では上層で淡塩侵入域がFig. 8 よりも拡大している。すなわち下層ではFig. 8 と同じ傾向を示して、難透水層の透水性が小さいほど塩水の侵入域が小さくなるが、上層ではFig. 13 の下層が難透水性の場合（実線）と同じで、塩水の侵入域が非常に拡大する。 $k'/k = 1/100$ の場合には、矢板下流部の上層は完全に塩水化されてしまう。自由地下水面部分に独立した淡水領域が算

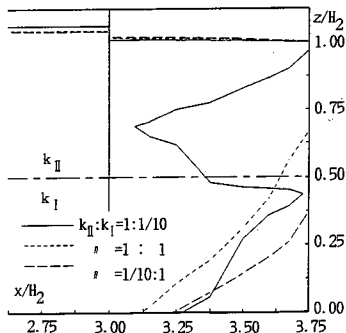


Fig. 13 Fresh-saltwater interface in two-layered aquifer in wall condition.

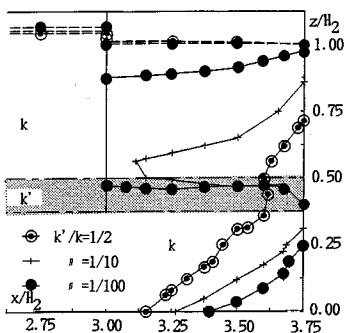


Fig. 14 Fresh-saltwater interface in stratified aquifer in wall condition.

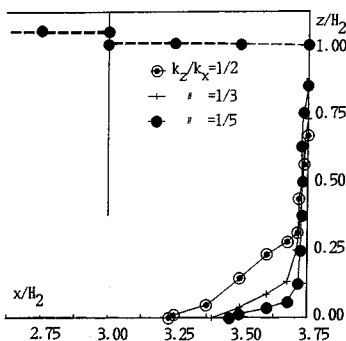


Fig. 15 Fresh-saltwater interface in anisotropic aquifer in wall condition.

定されているが、降雨などによる淡水の補給を受けないかぎり、この部分もついには塩水化されてしまうと考えられる。以上の結果から、多層地盤で良透水層を矢板で締め切った場合には、矢板下流側で塩水の侵入域が非常に拡大することがわかる。

Fig. 15 は透水性に異方性がある場合についての解析結果で、Fig. 9 と同様に、鉛直方向の透水係数 k_z が水平方向に対して、 $k_z/k_x = 1/2, 1/3, 1/5$ と小さい場合について求めている。傾向的にFig. 9 と類似しているが、Fig. 13 の均質地盤の場合（点線）よりも矢板の防御効果が顕著に現われている。なおFig. 15 の結果がFig. 11 の $SL/H_2 = 1/4$ の場合と類似していることから、傾向的には k_x が k_z に比べて大きい分だけ水平方向の水頭損失が小さくなり、 SL が見掛け上小さくなったと解釈できることを示している。以上の結果から、異方性地盤では矢板を設置することによって、塩水の侵入を有効に防止できることがわかる。

7. 結 び

以上のように、不圧浸透地盤における塩水侵入現象について、残差流手法を用いて定常解析を行い、種々の検討を行った。その結果、浸透層の地層条件は塩水の侵入に大きな影響を与え、矢板などの遮水壁の設置によっても複雑に変化する傾向にあることが明らかになった。以上の検討結果を整理すると、以下ようになる。

- (1) 下部に難透水性の浸透層が存在する地盤では、均質地盤よりも塩水侵入域が大きい傾向にある。
- (2) 中央部分に難透水層が介在する浸透地盤においては、均質地盤よりも塩水侵入域が小さい傾向にある。
- (3) 鉛直方向の透水性が低い異方性地盤では、等方性地盤よりも塩水が侵入しにくい傾向にある。
- (4) 矢板の塩水排除に対する効果は、均質地盤の場合には $SL/H_2 \leq 3/4$ で $SD/H_2 = 2/8$ の場合に顕著に現われる。
- (5) 多層地盤で良透水層を矢板で締め切った場合には、矢板下流側で塩水の侵入域が非常に拡大する。
- (6) 異方性地盤では、矢板を設置することによって塩水の侵入を有効に防止できる。

このほかに、Hele-shaw モデル実験と砂モデル実験による淡塩境界面形状の相違についても述べたが、この相違については、三次元解析を行ったうえで改めて検討するつもりである。また混合領域内の圧力分布が塩分濃度分布とどのように対応するかについても興味深い。この点についても、分散解析あるいは塩分濃度分布の測定値と比較検討を行う予定である。最後になったが、以上の解析は、Arizona 大学の Desai 氏より提供を受けた不圧地下水流解析用の残差流手法のプログラム (SEEP 2

D-RFP) を使用し、これを塩水侵入解析用に改良して行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Bear, J. and Dagan, G. : Moving interface in coastal aquifers, ASCE, HY, Vol. 90, No. 4, pp. 193~216, 1964.
- 2) Pinder, G. F. and Cooper, H. H. : A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front, Water Resour. Res., Vol. 6, No. 3, pp. 875~882, 1970.
- 3) Strack, O. D. L. : A single-potential solution for regional interface problem in coastal aquifers, Water Resour. Res., Vol. 12, No. 6, pp. 1165~1174, 1976.
- 4) Tamai, N. and Shima, S. : Salt-water wedge in unconfined coastal aquifers, Trans. JSCE., No. 139, pp. 31~38, 1967.
- 5) Kawatani, T. : Numerical analysis of the ground water mound and fresh-salt water interface in a coastal aquifer, Proc. JSCE., No. 238, pp. 89~98, 1975.
- 6) 藤野和徳：境界要素法による地下密度流の数値解析および遮水壁の塩水侵入抑制の効果について，日本地下水学会誌，第 27 巻，pp. 51~60, 1985.
- 7) 佐藤邦明・福原輝幸・伊藤 洋：境界積分方程式法による地下空洞への海水侵入予測，土木学会論文集，第 387 号/II-8, pp. 57~66, 1987.
- 8) 河野伊一郎・西垣 誠・田中慎一：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，土木学会論文報告集，第 331 号，pp. 133~141, 1983.
- 9) 柿沼忠男・岸 洋介・井内国光：海岸地下水における淡塩水境界面モデルと分散モデル，日本地下水学会誌，第 27 巻，pp. 141~155, 1985.
- 10) 榎井・神野・上田・伊藤・細川・平野：不飽和領域を考慮した海岸自由地下水の塩水の侵入・分散の数値解析，日本地下水学会誌，第 28 巻，pp. 103~112, 1986.
- 11) Collins, M. A. and Gelher, L. W. : Seawater intrusion in layered aquifers, Water Resour. Res., Vol. 7, No. 4, pp. 971~979, 1971.
- 12) Mualem, Y. and Bear, J. : The shape of the interface in steady flow in a stratified aquifer, Water Resour. Res., Vol. 10, No. 6, pp. 1207~1215, 1974.
- 13) 佐藤邦明・渡辺邦夫：成層帯水層における地下塩水楔の挙動，第 19 回水理講演会論文集，pp. 127~132, 1975.
- 14) 尾島 勝・鐘ヶ江敏樹：吉野川下流域自由地下水帯における流況と塩分挙動に関する準三次元解析，第 33 回水理講演会論文集，pp. 205~210, 1989.
- 15) Todd, K. T. : Groundwater Hydrology, 2nd ed., John Wiley & Son, pp. 510~515, 1980.
- 16) Sugio, S. *et al.* : Subsurface seawater intrusion barrier analysis, Jour. Hydraulic Eng. ASCE., Vol. 113, No. 6, pp. 767~779, 1987.
- 17) Desai, C. S. and Li, G. C. : A residual flow procedure and application for free surface flow in porous media, Adv. in Water Resour., Vol. 6, pp. 27~35, 1983.
- 18) Sugio, S. and Desai, C. S. : Residual flow procedure for seawater intrusion in unconfined aquifers, Int. Jour. for Numerical Methods in Eng., Vol. 24, pp. 1439~1450, 1987.
- 19) 神野健二・上田年比古：地下水における定常状態近傍の自由水面および 2 層境界面の有限要素法による非定常解，第 21 回水理講演会論文集，pp. 209~218, 1977.
- 20) 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.
- 21) 上田年比古・杉尾 哲：暗きよからの淡水注入による淡塩境界面の解析，土木学会論文報告集，第 225 号，pp. 43~52, 1974.
- 22) Bear, J. : Two-Liquid Flow In Porous Media, Advances in Hydrosience, Vol. 6, Academic Press, pp. 141~252, 1970.
- 23) Kono, I. : Finite element analysis of interface problem in groundwater flow, Proc. of JSCE, No. 228, pp. 109~116, 1974.
- 24) Hoorn, ten W. H. C. : The shape of a freshwater-lens in the case of two quifers separated by a semi-previous layer, Sveriges Geologiska Undersökning Rapporter och meddelanden nr 27, pp. 249~261, 1981.
- 25) 杉尾 哲・中田欣也・白地哲也：グラウト壁を通る淡塩境界面の非定常解析，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 152~153, 1983.
- 26) 中田欣也・杉尾 哲・泊 清志：完全貫入遮水壁を通過する淡塩境界面の非定常解析，第 38 回土木学会年次講演会講演概要集，pp. 33~34, 1983.

(1989.1.9・受付)