

九州産業大学 正員 杉尾 哲
東 和 大学 正員 中田 欣也

1. まえがき

海岸付近の透水層内においては、塩水楔が形成されている。そこで、筆者らはこれまでに、準一様流の仮定を用いて淡水位急降下に伴う塩水楔の侵入過程について、検討を重ねてきた。しかし、これまでの解析方法は、淡塩境界面が不透水層面の下側にも連続して存在するものと仮想して解析する方法であったため、解の発散性が強く、長時間の計算とすることが困難であった。そこで本報は、塩水楔先端部の計算方法について検討を行い、塩水楔の侵入、排除の過程について解析結果と実験結果を比較したものである。

2. 基礎方程式

①非定常解 図-1.の解析領域において、淡水密度 ρ_f 、塩水密度 ρ_s 、 $\Delta\rho=\rho_s-\rho_f$ 、空けき率 n 、淡水領域の透水係数 K_f 、塩水領域の透水係数 K_s 、陸部の長さを L とすれば、非定常解析の基礎方程式は次のようになる。

(淡水領域)

$$\frac{\partial H}{\partial T} = \frac{K_f}{K_S} \left[(H-h_f) \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] + \frac{\rho_f}{\rho_s} \left[h_f \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] + \frac{\Delta\rho}{\rho_s} \left[h_s \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} \right)^2 \right]$$

(塩水領域)

$$\frac{\partial h_f}{\partial T} = \frac{\rho_f}{\rho_s} \left[h_f \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] + \frac{\Delta\rho}{\rho_s} \left[h_s \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

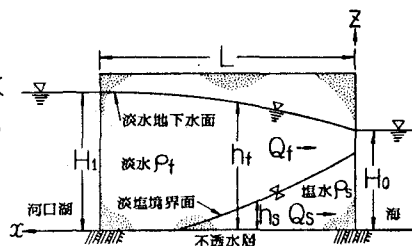


図-1. 地下密度流断面図

ここに、 $X=x/L$ 、 $H=h/L$ 、 $h_f=h_f/L$ 、 $T=t/(\frac{L^2}{K_f})$ などの無次元量であり、 t は時間変数である。なお、(1)式と(2)式を差分近似し、陽解法で解析した。解の安定条件は、 $r=\Delta T/(\Delta X)^2 \leq \frac{1}{2}$ とした。

b)定常解(初期条件) 図-1.の解析領域において、 H_0 と不透水層から海面までの高さ、 H_1 と不透水層から河口湖面までの高さ、 $\varepsilon=\Delta\rho/\rho_f$ とすれば、河口湖から流出する単位幅あたりの淡水の流量 Q_f は $Q_f=K_f \{H_1^2 - (1+\varepsilon)H_0^2\}/2L$ である。定常状態の淡塩境界面の水面形 $h_s(X,0)$ については、海側境界付近で鉛直流速を考慮した式

$h_s(X,0)=H_0 - \sqrt{2Q_f X / \varepsilon K_f + 0.5Q_f^2 / \varepsilon^2 K_f^2}$ (4)を用いた。次に、淡水地下水面の水面形 $h_f(X,0)$ については、一般的に $h_f(X,0)=H_0 + \sqrt{2\varepsilon Q_f X / (1+\varepsilon) K_f}$ という式が知られている。しかし、この式では河口湖側境界で淡水地下水面が河口湖面と一致しないため、本報では(1)式を $K_f=K_s$ 、 $\frac{\partial H}{\partial T}=0$ とにおいて整理した式に、(4)式で求まる $h_s(X,0)$ の値を代入して収束計算を行って求めた値を用いた。

3. 塩水楔先端部および海側境界値の算定方法

a)塩水楔先端部の算定 前報では淡塩境界面が不透水層面よりも下側まで連続的に存在するものと仮想して解析した。本報ではこの点を改良して、式-2については、図-2.に示すように $h_{i,j} < 0$ と $h_{i+1,j} > 0$ の条件を同時に満足する分割点 i から右側の領域について計算する方法を用いた。この解法は、塩水楔の先端部分の形状が直線的であると考え、初期定常解を用いて分割点 $i+1$ 、 $i+2$ の2点から $i-1$ 、 i の2点の値 $h_{i-1,j}$ 、 $h_{i,j}$ を直線的に外挿しておいて、その後の計算過程では、 i と $i+1$ の2点から $i-1$ の値 $h_{i-1,j}$ のみと外挿して計算を繰り返すという方法である。

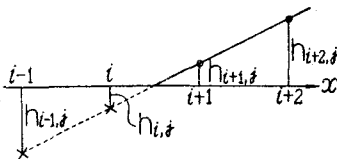


図-2. 塩水楔先端部

b) 海側境界値の算定 海側境界の淡塩境界面の位置は、分割点番号 i と河口湖側を 1 とし、順次番号をつけ海側境界の分割点番号を M とすると、 $M-1, M-2, M-3$ の 3 点で曲線形状の 2 次方程式を立てて ΔX が等間隔に分割されていることを考慮して整理した算定式に、補正係数 γ を乗じて求めることにした。それを示すと、 $h_{M,i} = \gamma \cdot (3h_{M-1,i} - 3h_{M-2,i} + h_{M-3,i}) \dots \dots (5)$ である。ここに、補正係数 γ は定常状態の淡塩境界面について、(4) 式と (5) 式の算定結果が一致するように導入した補正係数であり、 $\gamma = 1.03$ であった。なお、この値は非定常時にも変わらないものとした。また、淡水地下水水面については、両境界で浸出面がないと考えて、それぞれ海面および河口湖面に等しいとして解析を行った。

4. 実験による検証

実験装置は図-3に示すような、左右にヘッドタンクをつけた平行平板の間隔が 2.3mm の透明塩化ビニル板製の Hele-Shaw モデルを用いた。実験に用いた液体は、カルボキシメチルセルロースナトリウムの水溶液で、塩水は砂糖を混入して密度差をつけ過マンガン酸カリウムで着色した。実験方法は、図-3の左方に淡水、右方に塩水を入れて、最初に 1 時間程度待って定常状態の塩水楔を形成させておき、瞬間的に淡水水位を低下させて実験を行った。

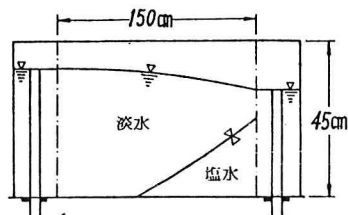


図-3. 実験装置

なお、本報では非定常時の両水位差を 1cm にとって、初期定常から非定常の過程を経て、再び定常状態に達するまでの解析と実験を行ない、さらに、塩水楔が排除される過程についても検討した。

図-4を見ると、塩水楔が侵入してゆく途中の全体的な形状については、解析値と実験値はよく一致しているが、楔先端部分では差が生じていることがわかる。また、40分で再び定常状態になったが、楔先端位置、形状ともよく一致している。なお、この時点のレイノルズ数を $M-1, M$ 断面の中間断面の淡水領域で計算すると、 $Re = 0.75$ であった。

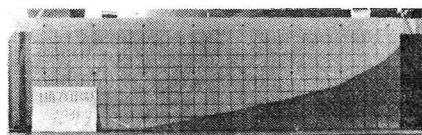


写真-1. 実験状況(40分時)

次に、図-5を見ると、海側境界付近では現象をよくとらえているけれども、塩水楔の先端付近においては一致していない。このことから、侵入過程、排除過程とも、楔先端の移動速度が実験値よりも計算値が早いことがわかる。また、実験結果を見ると、淡塩境界面は、(4) 式で表わされるような X の平方根の関数関係ではなく、途中に変曲点のある形状となっている。したがって、図-2. の外挿において、曲線的に外挿を行なう必要があるのではないかと考えている。

今後は、初期定常解、解析方法などについて検討をしていきたいと考えている。

【参考文献】1) 杉尾・中田・白地：淡水流出幅と考慮した2次元地下密度流の数値解析，第36回年講，第2部，P.392, 1981.

2) 嶋 裕之：地下水(密度流的諸問題)，水工学に関する夏期研修会講義集，土木学会水理委員会，P.A-8-1, 1971.

3) 川谷 健：海岸帯水層内の地下水位と淡塩境界面に関する数値解析(英文)，土木学会論文報告集，NO. 238, 1975.

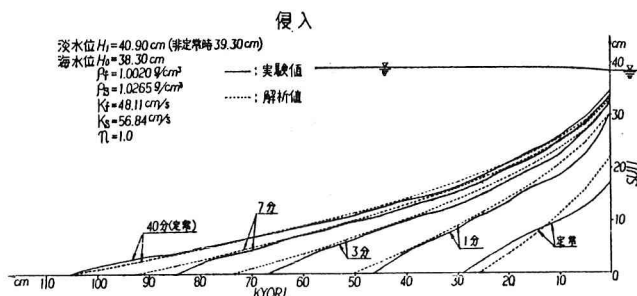


図-4. 実験値と解析値の比較(侵入過程)

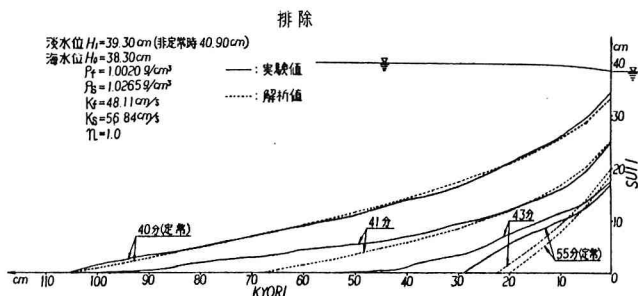


図-5. 実験値と解析値の比較(排除過程)