

九州大学 〇学生員 平野 文昭
九州大学 正員 藤野 和徳
九州大学 正員 上田 年比古

1. まえがき

右岸帯水層における地下塩水楔の時間的変化の解明は、海岸付近の地下水淡水取水の重要な課題である。特に海岸付近で井戸取水をする場合や海岸付近の構造物建設時掘削部を揚水する場合には地下塩水楔が進行しその地域の地下水の塩水化が考えられる。このような塩水楔の非定常時の解として、2次元現象については Bear & Dagan¹⁾、玉井・嶋²⁾および嶋³⁾の理論的解析がある。また、谷は浸透雨量の増減時の塩水楔の形状の数値解を行っているが、楔先端を固定した場合をとり扱っている。また3次元現象については計算過程が複雑になり、その数値解はあまりみられない。本報は、準一様流の仮定を用いて、2次元、3次元問題を1次元、2次元の近似式にし、地下塩水楔先端の移動を比較的容易に算定しうる数値解析を試み、次いでこの数値解の結果を2次元問題では、室内実験と比較し、3次元問題では、海岸付近のある地点で掘削揚水する実際の事例について算定し、その結果を述べたものである。

2. 基礎方程式(図-1 参照)

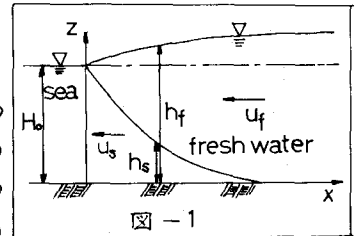
3次元問題における連続の式は、淡水層に関して

$$n \frac{\partial (h_f - h_s)}{\partial t} = - \frac{\partial \{ (h_f - h_s) u_f \}}{\partial x} - \frac{\partial \{ (h_f - h_s) v_f \}}{\partial y} \quad (1)$$

塩水層に関して $n \frac{\partial h_s}{\partial t} = - \frac{\partial (h_s \cdot u_s)}{\partial x} - \frac{\partial (h_s \cdot v_s)}{\partial y} \quad (2)$

Darcy則より $u_f = -k \frac{\partial \phi_f}{\partial x} \quad (3) \quad u_s = -k \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \quad (4)$

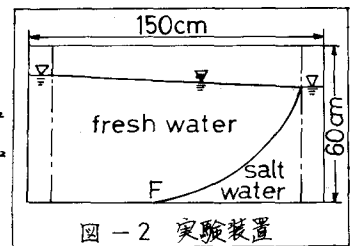
$$v_f = -k \frac{\partial \phi_f}{\partial y} \quad (5) \quad v_s = -k \frac{\partial \phi_s}{\partial y} \quad (6)$$



また $\phi_f = z + P / (\rho_f \cdot g)$ $\phi_s = z + P / (\rho_s \cdot g)$ ここで、 n は空げき率、 h_s は不透水層から地下水面までの高さ、 h_f は不透水層から塩水境界面までの高さ、 u_f, v_f はそれぞれx方向、y方向の淡水の流速、 u_s, v_s はx方向、y方向の塩水の流速、 k は透水係数、 ϕ_f, ϕ_s は淡水、塩水のポテンシャル、 ρ_f, ρ_s は淡水、塩水の密度、 P は圧力、 g は重力加速度である。式(1)~(6)を用いると次の2つの式が導かれる。

$$\begin{aligned} (n/k) \cdot \frac{\partial h_s}{\partial t} &= \rho_f / \rho_s \cdot \frac{\partial h_s}{\partial x} \cdot \frac{\partial h_f}{\partial x} + \rho_f / \rho_s \cdot h_s \cdot \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} + \rho_f / \rho_s \cdot (\frac{\partial h_f}{\partial x})^2 \\ &+ \rho_f / \rho_s \cdot h_s \cdot \frac{\partial^2 h_s}{\partial x^2} + \rho_f / \rho_s \cdot \frac{\partial h_s}{\partial y} \cdot \frac{\partial h_f}{\partial y} + \rho_f / \rho_s \cdot h_s \cdot \frac{\partial^2 h_f}{\partial y^2} \\ &+ \rho_f / \rho_s \cdot (\frac{\partial h_s}{\partial y})^2 + \rho_f / \rho_s \cdot h_s \cdot \frac{\partial^2 h_s}{\partial y^2} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (n/k) \cdot \frac{\partial h_f}{\partial t} &= \rho_f / \rho_s \cdot \frac{\partial h_s}{\partial x} \cdot \frac{\partial h_f}{\partial x} + \rho_f / \rho_s \cdot h_s \cdot \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} + \rho_f / \rho_s \cdot (\frac{\partial h_f}{\partial x})^2 \\ &+ \rho_f / \rho_s \cdot h_s \cdot \frac{\partial^2 h_s}{\partial x^2} + \rho_f / \rho_s \cdot \frac{\partial h_s}{\partial y} \cdot \frac{\partial h_f}{\partial y} + \rho_f / \rho_s \cdot h_s \cdot \frac{\partial^2 h_f}{\partial y^2} + \rho_f / \rho_s \cdot (\frac{\partial h_f}{\partial y})^2 \\ &+ \rho_f / \rho_s \cdot h_s \cdot \frac{\partial^2 h_s}{\partial y^2} + (\frac{\partial h_f}{\partial x})^2 + h_f \cdot \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} - \frac{\partial h_s}{\partial x} \cdot \frac{\partial h_f}{\partial x} - h_s \cdot \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} \\ &+ (\frac{\partial h_f}{\partial y})^2 + h_f \cdot \frac{\partial^2 h_f}{\partial y^2} - \frac{\partial h_s}{\partial y} \cdot \frac{\partial h_f}{\partial y} - h_s \cdot \frac{\partial^2 h_f}{\partial y^2} \quad (8) \end{aligned}$$



ここで、 $\Delta \rho = \rho_s - \rho_f$ である。式(7)(8)を差分化して解を求めるにあたり、その定常条件として次式がえられる。

$$\Delta t < 1/2 \cdot n/k \cdot 1/h_s \cdot \{ (\Delta x)^2 (\Delta y)^2 / \{ (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 \} \} \quad (9)$$

ここで、 Δt は時間間隔、 Δx はx方向の格子間隔、 Δy はy方向の格子間隔である。なお2次元問題については、式(7)(8)のyに関する項を省略した。

3. 実験および数値解析値との比較

(1). 2次元問題の実験値と数値解析値との比較

実験装置は図-2のように、左右にヘッドタンクをつけた透明の塩化ビニール製の長さ150cm、幅4cm、高さ60cmの長方形水槽に、直径 $d = 2.75 \text{ mm}$ のガラス球を詰め、浸透層の高さを約42cmにしたものである。左方に淡水、右方に塩水を入れ実験毎に淡水の水位を変え、浸透層内の淡水境界面の形状を時間的に追跡した。

この実験での Reynolds 数は、ほぼ 1.8 前後であり Darcy 則の適用範囲であることを確認した。実験は、淡水密度 $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 、塩水密度 $\rho_s = 1.03 \text{ g/cm}^3$ 、透水係数 $k = 3.42 \text{ cm/s}$ 、空げき率 $n = 0.4$ 、淡水水位 $H_f1 = 40.35 \text{ cm}$ 、塩水水位 $H_s = 38.20 \text{ cm}$ として、始めに定常状態の塩水楔を形成させておき、次に、淡水水位を 38.40 cm および 39.60 cm に下げた場合を実験し、図-3a, 3b をえた。

$H_f1 = 40.35 \text{ cm}$ a: 120s
 $H_f2 = 38.40 \text{ cm}$ b: 240s
 $H_s = 38.20 \text{ cm}$ c: 360s
 $\rho_f = 1.00 \text{ g/cm}^3$
 $\rho_s = 1.03 \text{ g/cm}^3$
 $k = 3.42 \text{ cm/s}$
 $n = 0.4$

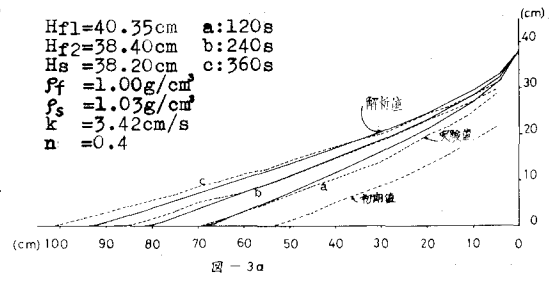


図-3a

数値計算で、塩水楔の先端の位置を非定常でとらえる場合、先端部の格子点で h が負となったときは、この点を近似的に塩水楔の先端として $h = 0$ を与え、次の時間ステップに進んでゆく方法をとった。図-3a, 3b をみると塩水楔の形状および先端の位置は実験値とはほぼ一致している。なおこの計算方法の誤差の原因として塩水楔の先端部の取り扱いがあり、また本計算では拡散現象を無視しているのが計算による楔先端は多少進行がおこることが考えられる。

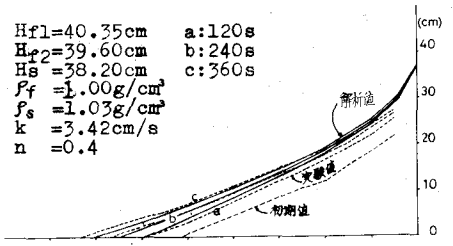
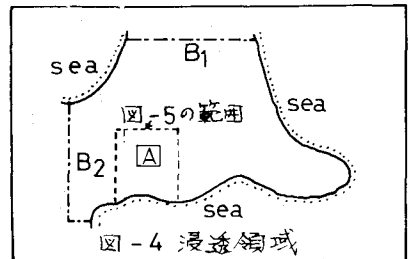


図-3b

$H_f1 = 40.35 \text{ cm}$ a: 120s
 $H_f2 = 39.60 \text{ cm}$ b: 240s
 $H_s = 38.20 \text{ cm}$ c: 360s
 $\rho_f = 1.00 \text{ g/cm}^3$
 $\rho_s = 1.03 \text{ g/cm}^3$
 $k = 3.42 \text{ cm/s}$
 $n = 0.4$

(2) 3次元問題

図-4のように透水層の高さを $h = 8.4 \text{ m}$ 、x方向 2.5 km 、y方向 2.0 km の浸透領域で、領域Aを不透水層まで掘り下げ、水を抜いてこの部分の水を 0 (水位を不透水層に一致させる) とした場合について、次の3通りの境界条件で塩水楔の先端の進行状態を算定した。



(1) 境界 B_1, B_2 の水位を一定とし、ここから淡水の供給があり、全地域の透水係数を $k = 0.03 \text{ cm/s}$ とする場合。(2) 境界 B_1, B_2 から淡水の供給がなく(不透水壁とする)、全地域の透水係数を $k = 0.03 \text{ cm/s}$ とする場合。(3) 境界 B_1, B_2 から淡水の供給がなく(不透水壁とする)、領域Aの周囲(図-5のハッチの部分)の透水係数を $k = 0.0002 \text{ cm/s}$ 、その他の領域の透水係数を $k = 0.03 \text{ cm/s}$ とする場合。塩水楔の先端の進行は、図-5のように(1)、(2)では、ほぼ同じであったが、(3)では、(1)より進行速度が非常におおきく、100日経過後ほとんど塩水楔の進行はみられない程度であった。

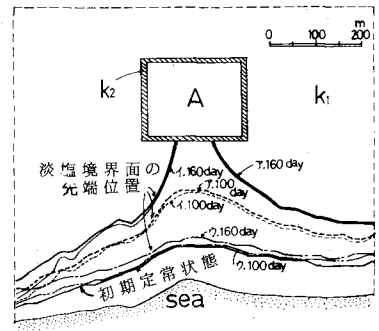


図-5 浸塩境界面の進行

4. むすび

塩水楔先端位置の計算として、不透水層からの塩水の高さが負となる点を先端とする方法は2次元問題の例では実験値と解析値とは、ほぼ一致した。また3次元問題でも計算可能であることがわかった。なお、実際現象として浸塩境界面に混合領域の存在が考えられるので、今後、混合拡散を含めた非定常問題を検討してゆきたい。

参考文献

- 1) Bear, J., Dagan G.: Moving interface in coastal aquifers, Proc. A.S.C.E., Vol. 90, No. HY4, 1967.
- 2) Tamai, N., Shima, S.: Salt-water wedge in unconfined coastal aquifers, 地球惑星科学, No. 139, March, 1967.
- 3) Shima, S.: Transient characteristics of salt-water wedge, Proc. of 13th Congr. of I.A.H.R., Vol. 4, 1969.
- 4) 川谷 健: 海岸帯水層内の地下水位と浸塩境界面に関する数値解析, 土木学会論文報告集, No. 238, 1975.