

九州大学 〇学生員 西尾基次

九州大学 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

海岸付近での取水において、その地域の地下水の塩水化問題はきわめて重要である。この塩水化は、地下塩水楔の挙動により知ることができる。このような塩水楔の非定常の解として、2次元現象については Bear & Dagan 五井・嶋よび嶋の理論解析がある。また川谷は浸透雨量の増減時の塩水楔の形状の数値解を行なっているが、これは楔先端を固定した場合を取り扱っている。また3次元現象については計算過重が複雑になり、その数値解はあまり見られない。本報では、地下塩水楔の形状や楔先端位置の時間的変化を解明するために、3次元での数値解析と室内実験とを行ないこれを比較検討した。数値解析は準一様流の仮定を用いて3次元を2次元の近似式として、地下塩水楔の先端位置を非定常において比較的容易に算定した。

2. 基礎方程式 (図-1 参照)

水平不透水面内に直行する座標軸として x, y をとり、流れの主流方向に y をとる。いま z を空けき率、 h を不透水層から地下水面までの高さ、 h_f を不透水層から淡塩境界面までの高さ、 u, v を x 方向、 y 方向の淡水の流速 (x, y の + 方向を +)、 u_s, v_s を x 方向、 y 方向の塩水の流速 (x, y の + 方向を +)、 ϕ を淡水ポテンシャル、 ϕ_s を淡水、塩水のポテンシャル、 ρ, ρ_s を淡水、塩水の密度、 p を圧力、 g を重力加速度とすれば、連続の式は、

$$\text{淡水層に対して} \quad n \partial(\rho_s - \rho) / \partial t = - \partial[(\rho_s - \rho) u] / \partial x - \partial[(\rho_s - \rho) v] / \partial y \quad (1)$$

$$\text{塩水層に対して} \quad n \partial \rho_s / \partial t = - \partial(\rho_s u) / \partial x - \partial(\rho_s v) / \partial y \quad (2)$$

$$\text{Darcy 則より} \quad u_f = -R \partial \phi / \partial x \quad (3) \quad u_s = -R \partial \phi_s / \partial x \quad (4)$$

$$v_f = -R \partial \phi / \partial y \quad (5) \quad v_s = -R \partial \phi_s / \partial y \quad (6)$$

淡水層内の任意の位置 z について、

$$\phi = z + p / (\rho_s g) = z + (\rho_s - z) \rho_s g / (\rho_s g) = h_f \quad (7)$$

また塩水層内の任意の位置 z について、

$$\phi_s = z + p / (\rho_s g) = z + \{(\rho_s - z) \rho_s g + (\rho_s - \rho) \rho_s g\} / (\rho_s g) = (\rho_s / \rho_s) \cdot h_f + (\Delta \rho / \rho_s) \cdot h_s \quad (8)$$

式(1),(2)に式(3)~(8)を代入し、 $\Delta p = \rho_s - \rho$ とすれば、

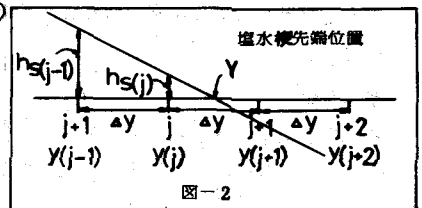
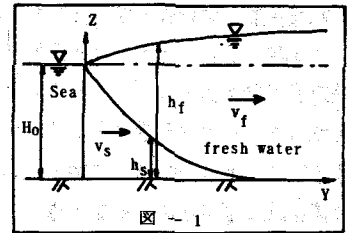
$$\text{塩水層について} \quad (\rho_s / R) \partial h_s / \partial t = (\rho_s / R) \left\{ (\partial h_s / \partial x) (\partial h_s / \partial x) + (\partial h_s / \partial y) (\partial h_s / \partial y) \right\} + (\Delta \rho / R) \left\{ (\partial h_s / \partial x)^2 + (\partial h_s / \partial y)^2 \right\} + (\rho_s / R) \cdot h_s \cdot (\partial^2 h_s / \partial x^2) + (\rho_s / R) \cdot h_s \cdot (\partial^2 h_s / \partial y^2) \quad (9)$$

$$\text{淡水層について} \quad (\rho_s / R) \partial h_s / \partial t = (\rho_s / R) \left\{ (\partial h_s / \partial x) (\partial h_s / \partial x) + (\partial h_s / \partial y) (\partial h_s / \partial y) \right\} + (\Delta \rho / R) \left\{ (\partial h_s / \partial x)^2 + (\partial h_s / \partial y)^2 \right\} + (\rho_s / R) \cdot h_s \cdot (\partial^2 h_s / \partial x^2) + (\rho_s / R) \cdot h_s \cdot (\partial^2 h_s / \partial y^2) + (\partial^2 h_s / \partial x^2) + \rho_s \cdot (\partial^2 h_s / \partial x^2) - (\partial h_s / \partial x) (\partial h_s / \partial x) - \rho_s \cdot (\partial^2 h_s / \partial x^2) + (\partial h_s / \partial y)^2 + \rho_s \cdot (\partial^2 h_s / \partial y^2) - (\partial h_s / \partial y) (\partial h_s / \partial y) - \rho_s \cdot (\partial^2 h_s / \partial y^2) \quad (10)$$

次に式(9),(10)を差分化して、塩水楔の先端位置を算出するにあたり次の2つの方法で行なった。図-2で説明する

と、第1の方法では塩水水位 h_s が最初に負または0となる格子点 $y(j)$ を近似的に先端とし、負となる格子点では0と書き直して非定常の計算をすすめる方法である。第2の算出方法ではある x 座標において、塩水水位 h_s が負となる格子点 $y(j+1)$ の手前の格子点 $y(j)$ 、 $y(j-1)$ の境界面を直線で延長して、 y 軸との交点を楔先端位置 Y とするもので、

$$\{h_s(j) - h_s(j-1)\} / \Delta y = -h_s(j) / \{Y - y(j)\} \quad (11)$$



$$\therefore Y = Y(i) - [f_{1s}(i) / \{f_{1s}(i) - f_{1s}(i-1)\}] \Delta Y \quad (12)$$

こうして次のステップの計算では、 $i+1$ の格子点を塩水楔先端である Y の位置へ移動させ、格子点 $i+1$ での格子間隔は図-2において左方で $\Delta Y = Y - Y(i)$ 、右方で $\Delta Y = Y(i+2) - Y$ とする。

また定常条件は、第1の方法(格子点を固定する方法)では次の式がえられる。

$$\Delta t < \frac{1}{2} \cdot \frac{\eta}{k} \cdot \frac{1}{f_{1s}} \cdot \frac{(4Y)^2}{\{(4X)^2 + (4Y)^2\}} \quad (13)$$

第2の方法(楔先端部で格子点を移動する方法)では次の式がえられる。

$$\Delta t < \frac{1}{2} \cdot \frac{\eta}{k} \cdot \frac{1}{f_{1s}} \cdot \frac{(4Y/2)^2}{\{(4X)^2 + (4Y/2)^2\}} \quad (14)$$

3. 実験および数値解析値との比較

実験装置は、図-3のように両端にヘッドタンクをつけた透明塩化ビニル樹脂製で、浸透領域は流れ方向90~120cm、流れに直角方向100cm、高40cm、これに細径 $d=0.1$ cm程度の砂をつめたものである。また塩水側の境界には、海岸線とみなすなだらかな曲線 ab を設けている。また水槽底面における塩水楔の先端が観察できるように底面も透明とした。実験は透水係数 $k=0.2$ cm/s前後、空げき率 $\eta=0.4$ 、淡水密度 $\rho=1.0$ g/cm³、塩水密度 $\rho=1.025$ g/cm³として、初めに淡水水位 $H_f=21.0$ cm、塩水水位 $H_s=19.8$ cmにおける定常状態の塩水楔を形成させておき、次に淡水水位を下げ、その時の水槽底面と側面における塩水楔の変化を記録した。

図-4, 5, 6は淡水水位を21.0cmから19.4cmへ下げた場合の塩水楔の変化の実験結果と解析値を示したものである。図-4は格子点を固定する方法による解析値と実験での塩水楔先端の位置を比較したものであるが、先端速度が解析値の方が大きくなっていて、これはこの方法による楔先端付近での算定誤差が大きいためと考えられる。図-5は格子点を移動する方法による解析値と実験での塩水楔先端位置の比較であり、解析値の楔先端位置はなめらかな曲線で表わすことができ、また両者はほぼ一致して格子点を固定する第1の方法に比べて、楔先端部で格子点を移動する第2の方法がすぐれていることがわかる。図-6は実験装置側面の実験値と格子点を移動する方法による解析値との塩水楔の形状の比較であるが、解析値では $y=0$ において $H_s=19.8$ cmとして解析を行なっているが、実験においては初期の定常状態で $H_s=17.0$ cmであったため、実験値と解析値には $y=0$ 付近で、ずれが生じているが、その他の部分ではほぼ一致している。

4. おまけ

非定常の塩水楔先端位置の計算として、本報で述べた格子点を移動する方法により実験値と解析値をほぼ一致させることができた。なお今後は井戸による取水、河口の存在を考慮した場合の検討を考えている。

参考文献

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
土木学会論文報告集, No. 238, 1975.

