

止水矢板による地下塩水楔の侵入抑制

長崎大学工学部 学生員 古田 真一郎

// 一ノ瀬 和 雄

// 正 員 古本 勝 弘

1. まえがき

海岸付近の帯水層には、淡水より密度の大きな海水が楔状で侵入している。雨水の地下浸透量の減少や井戸による過剰揚水などがあると、塩水楔の侵入が進行して塩害をもたらすことがある。特に、離島などで水源を地下水に頼らざるを得ない地域では塩害は深刻である。いくつかの島で水源確保と塩害防止に地下ダムが建設または計画されている。不透水層が適当な深さに存在する所では完全止水型の地下ダムを計画できるが、それが深い位置の場合は建設費の増加を招く。そこで、不透水層に達しない止水壁を入れることで陸側地下水のポテンシャルを高め、塩水をどの程度排除できるかを試算したので報告する。

2. モデルと計算

計算対象とするモデルは、図-1のように水平な不透水層の上に、長さ L 、透水係数 k をもつ自由地下水層が堤体の形で乗っている場を考える。海側の水位を H 、密度を $\rho_2(=\rho_1+\Delta\rho)$ 、陸側をそれぞれ、 $H+\Delta H$ 、 ρ_1 とする。地下水流は2次元で定常とする。止水壁を入れない場合については、玉井・嶋¹⁾によって解かれ、無次元の境界面形状として次式が得られている。

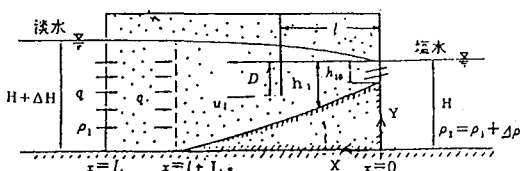


図 - 1

$$\frac{\varepsilon k}{|q|} h_1 = \left(2 \frac{\varepsilon k}{|q|} x + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$ 、 q は陸側から流出する淡水の単位幅流量で、 x 軸が陸向きに取られているので負の値である。

海から $x=l$ の位置に止水矢板を入れる場合を考える。淡水はこの矢板の下を迂回して流れ、陸側の地下水位は上昇する。このような流れの場を解析的に解くことは困難であるため、有限要素法を用いて解く。

淡・塩水は混合せず、両者は明瞭な境界面を形成するものとする。また、定常な平衡状態では下層の塩水は静止しているので淡水のみの流れを解析することになる。基礎式は、境界面形状を求めることを目的にしているの、地下水のポテンシャルで表して

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2) \quad u = -k \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = -k \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3)$$

ここに、 $\phi = \frac{p}{\rho g} + y$ である。(2)式のガラーキン法を用いた重み付き残差方程式は

$$\iint_A \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \delta \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \delta \phi}{\partial y} \right) dx dy = \int_s \frac{\partial \phi}{\partial n} \delta \phi ds \quad (4)$$

ここで、右辺は境界 S 上での線積分で、 n は法線方向、 s は接線方向の線素を表す。 $\partial \phi / \partial n$ は境界における法線方向流速を表すので、自然境界条件を与える水表面、不透水面および淡・塩境界面の上では、(4)式右辺は0となる。 ϕ の補間関数を一次三角形要素を用いて離散化すると、(4)式は各節点のポテンシャル $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ を未知数とする連立一次方程式 $K\Phi^n = Q$ (5)

となり、これを解いて ϕ の分布が得られる。ここに、 K は節点座標で表される N 行 N 列の全体マトリックス、 Φ^n, Q は N 行1列の縦ベクトルである。

実際の計算では、淡水が流れる領域を三角形要素に分割しなければならないが、水面および淡・塩境界面の位置が未知であるため、まずは両者の位置を仮定してメッシュ切りを行い、このメッシュに対してポテンシャルの計算を行う。水面上の節点では圧力 $p=0$ の条件が存在するので、 $\phi=y$ でなければならない。仮定した水面に対する計算の結果、水面で $\phi > y$ の場合には、水面を $\alpha(\phi-y)/2$ だけ上方に移動させ、不等号が逆であれば下方に移動させ、再計算を行う。 α は計算の収束を速める係数で、1.2とした。

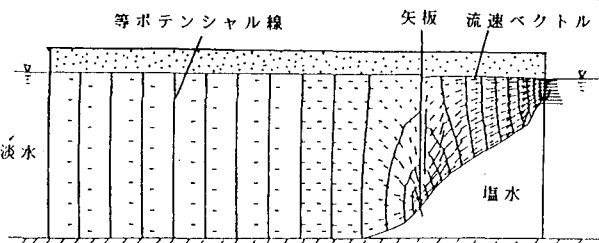


図 - 2

この手順を繰り返し、水面の条件が必要精度で満足されたときを正しい水面の位置とする。また、淡・塩境界面でも同様の繰り返し計算が必要である。この境界面上の点の、流動する淡水の圧力と静止している塩水の圧力は等しいので、 $\rho_1 g(\phi-y) = \rho_2 g(H-y)$ の条件を満たすように、水面と同じ繰り返し計算で境界面の位置 y を求める。水面と境界面の位置は互いに影響するので、単独で計算することはできず、両者を並行して収束させることが必要である。

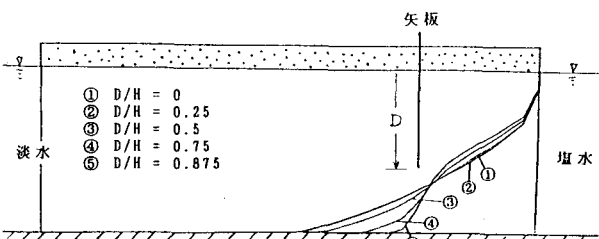


図 - 3

また、 $x=0$ における境界面の位置は、(1)式が成り立つものとして、 $h_{10} = |q|/\sqrt{2\varepsilon k}$ で与えている。

3. 数値計算例

ここに示す計算例は、 $L=24\text{m}$ 、 $H=4\text{m}$ 、 $\Delta H=0.15\text{m}$ 、 $\varepsilon=0.025$ としたもので、矢板は $l=6\text{m}$ の位置に、 $D/H=0.25, 0.5, 0.75, 0.875$ の深さまで挿入した場合を計算している。メッシュは矢板近傍を密にして、320要素に分割している。図-2は $D/H=0.75$ の場合の流速ベクトル及び等ポテンシャル線を示している。淡水側の塩水楔先端までは一様な水平流であるが、矢板近傍及びその海側では、矢板と楔形状により鉛直流れが主流となる。図-3は矢板の根入れ深さによる境界面形状の変化を示している。図-4は、矢板の根入れ深さによる塩水楔侵入長さの変化を示している。ここに、 L_s は矢板の位置から塩水楔先端までの距離、 L_{s0} は矢板を入れない場合のその距離である。この図によると矢板の根入れ深さにより楔の侵入長を短くはできるが、塩水排除を効果あらしめるには矢板の根入れをかなり深くすることが必要であることが分かる。ここで設定している場の自由地下水面および淡・塩境界面の計算には透水係数を必要とせず、これらは透水係数とは無関係に決まる。これは(1)式で淡水流量 q が透水係数に比例する量であることから分かる。

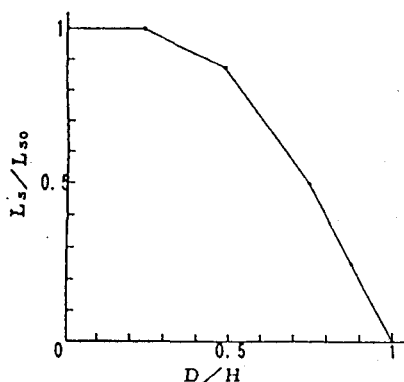


図 - 4

による塩水楔侵入長さの変化を示している。ここに、 L_s は矢板の位置から塩水楔先端までの距離、 L_{s0} は矢板を入れない場合のその距離である。この図によると矢板の根入れ深さにより楔の侵入長を短くはできるが、塩水排除を効果あらしめるには矢板の根入れをかなり深くすることが必要であることが分かる。ここで設定している場の自由地下水面および淡・塩境界面の計算には透水係数を必要とせず、これらは透水係数とは無関係に決まる。これは(1)式で淡水流量 q が透水係数に比例する量であることから分かる。

4. あとがき

ここでの計算は淡水側の水位を一定に保つような設定であるので、河口湖の堤体に相当するモデルである。陸側に帯水層が広がる場合は、陸側の境界条件は流量で与えることが必要であるが、このときは矢板の塩水侵入抑止効果はより大きなものとなる。

参考文献： 1)玉井・嶋：Salt-water wedge in unconfined coastal aquifer, Trans.JSCE, No.139, 1967.