

(財)電力中央研究所 土木技術研究所
正員 ○田中伸和, 安芸周一

1. はじめに

海上の孤島や海岸線近傍の浸透層内においては、地表面から雨水による淡水の浸透を受けると同時に海底より塩水の浸入があるため、塩水の上に淡水層が存在することが予想される。ここでは、このような炭塩地下密度流の数値解析手法を示すとともに、幅約1km、最大標高150mの孤島に適用し、実測された透水係数と地下水位をもとに雨水浸透を考慮して炭塩水の流動と炭塩境界面位置の経年変化を求め、得られた結果を調査結果と比較することにより、本手法の妥当性の検討を行った。

2. 基本式

炭塩各層内の浸透流に対する基本式はダルシー則と質量保存則より以下のように定めた。なお、解析は鉛直2次元とした。

$$S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} = K_{xf} \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} + K_{zf} \frac{\partial^2 h_f}{\partial z^2} + Q_f \quad (\text{淡水層}) \dots\dots (1)$$

$$S_o \frac{\partial h_o}{\partial t} = K_{xo} \frac{\partial^2 h_o}{\partial x^2} + K_{zo} \frac{\partial^2 h_o}{\partial z^2} + Q_o \quad (\text{塩水層}) \dots\dots (2)$$

式中、添字 f, o はそれぞれ淡、塩水での値を表わし、 $S = \rho \cdot g \cdot \lambda \cdot (\alpha + \beta / \lambda)$, $K_x = \rho \cdot g \cdot k_x / \mu$, $K_z = \rho \cdot g \cdot k_z / \mu$ で、 ρ は密度、 g は重力加速度、 λ は空隙率、 μ は粘性係数、 k_x, k_z はそれぞれ水平と鉛直方向の比透水係数、 α, β はそれぞれ浸透層と浸透水の圧縮率、 Q は浸透層内での流体の発生率である。

また、淡水水位と境界面位置は水粒子の運動学的条件より

$$\frac{\partial \eta_f}{\partial t} + u_f \frac{\partial \eta_f}{\partial x} = w_{of} \dots (3), \quad \frac{\partial \eta_o}{\partial t} + u_{oo} \frac{\partial \eta_o}{\partial x} = w_{oo} \dots (4)$$

と作る。ここで、 η は水面あるいは境界面の位置、 u, w はそれぞれ水面あるいは境界面上での x, z 軸方向水粒子速度である。

3. 境界条件

境界面上では淡、塩水側から作用する動水圧とその法線方向水粒子速度が一致する必要があるため、次式が成り立つことになる。

$$h_f = \frac{\rho_o}{\rho_f} (h_o - \varepsilon \eta_o) \dots (5), \quad u_f \frac{\partial \eta_o}{\partial x} - w_f = u_{oo} \frac{\partial \eta_o}{\partial x} - w_{oo} \dots (6)$$

ここで、 $\varepsilon = (\rho_o - \rho_f) / \rho_o$, u_f, w_f は境界面上での淡水水粒子速度である。

また、自由水面上では $h_f = \eta$, 湧出面上での h_f は傾斜面の高さに等しく、海底での h_f は $h_f = \rho_o (\eta_o - \varepsilon \eta_o) / \rho_f$, h_o は $h_o = \eta_o$ とした。ただし、 η_o は海面の水位、 η_f は海底面の高さである。

4. 差分式

計算に用いた地形とメッシュは図-1に示す。すなわち、自由水面は実測にもとづいて与え、初期境界面は Ghyben-Herzberg 条件で与えた。また、境界面の湧出点は図-2に示すように、時刻 n での

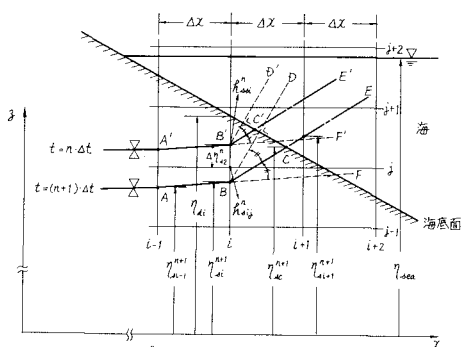
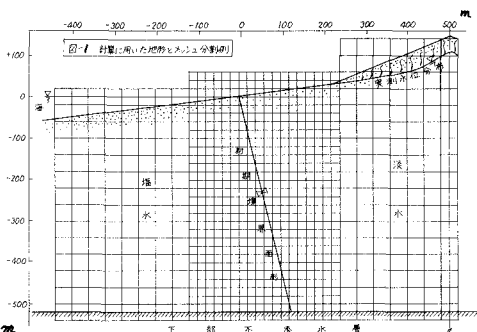


図-2 炭塩境界面湧出点の求め方

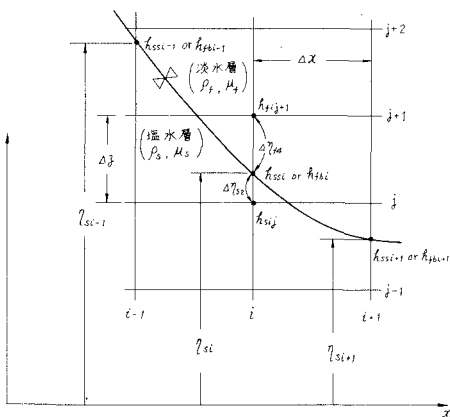


図-3 炭塩境界面付近のメッシュ分割

の境界面より(4)式から求める $(n+1)$ 次の位置A,Bの延長線とB点を通り海底面と直交するBDとの2等分線BEが海底面と交わる点で求めた。なお、各時刻での境界面位置は(4)~(6)式が同時に成り立つように差分化し以下の手順で求めた。(図-3参照)

まず、(6)式の流速をピエゾ水頭勾配で表わし(5)式を考慮すれば

$$\left(1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0 \lambda_2}\right) \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \frac{\partial h_{ao}}{\partial x} = E \left(\frac{\partial \eta_0}{\partial x} + \left[\frac{k_x}{k_z} + \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \right] \left[\frac{k_x}{k_z} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0 \lambda_2} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \right] \right) \dots (7)$$

となる。ここで、 $\frac{\partial \eta_0}{\partial x}$ は境界面上での値を表わす。そのため、 i 軸の境界面上での塩水ピエゾ水頭 h_{aoi} は(7)式を差分化し安定性より $\left(1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0 \lambda_2}\right) \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \Big|_i \geq 0$ の場合には次式で与えられる。

$$h_{aoi} = \frac{\left(1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0 \lambda_2}\right) \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \Big|_i h_{aoi-1} + R_{ij} \Delta x}{\left(1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0 \lambda_2}\right) \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \Big|_i + \left[\frac{k_x}{k_z} + \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \right] \left[\frac{k_x}{k_z} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0 \lambda_2} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + \frac{\Delta x}{\Delta t} \right]} \dots (8)$$

$$\therefore \text{ここで、} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \Big|_i = \frac{\eta_{oi} - \eta_{oi-1}}{2 \Delta x} \dots (9)$$

$$R_{ij} = E \left(\frac{\partial \eta_0}{\partial x} \Big|_i \right) + \left[\frac{k_x}{k_z} + \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \right] \left(\frac{k_x}{k_z} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + E \frac{\eta_{oi}}{\lambda_0 \lambda_2} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0 \lambda_2} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \right) \dots (10)$$

ただし、記号は図-3に示す。なお、 $\left(1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_0 \lambda_2}\right) \frac{\partial \eta_0}{\partial x} \Big|_i < 0$ の場合も同様

に与えられる。したがって、 i 軸の境界面上での淡水ピエゾ水頭 h_{wi} は(5)式より $h_{wi} = P_0 (h_{aoi} - E \eta_{oi}) / \beta$ となり、境界面上と浸透層内のピエゾ水頭勾配より境界面上での水粒子速度を計算し(4)式を差分化することで境界面が求まる。差分式には時間ステップを記すはか、したが、すべて時刻 $(n+1)$ 次の値である。そのため、計算は浸透層内のピエゾ水頭の算定と同時にを行った。一方、図-1に示す上での境界条件は $\frac{\partial \eta_0}{\partial x} = 0$ 、左側の海側仮想境界面上では $\frac{\partial \eta_0}{\partial x} = 0$ 、不透水層上では $\frac{\partial \eta_0}{\partial x} = 0$ と与えた。なお、(1)、(2)式の差分は水面や境界面の形状を考慮した中央差分で行った。以上のように、淡塩地下水密度流の数値解析手順を図-4に示す。

5. 計算結果と考察

図-5には本手法で求めた淡塩水水粒子速度の1例を示す。水面からの浸透雨水の海底や海岸付近への流出や境界面が初期の位置から変化した様子が分かる。図-6には透水係数と雨水浸透量を変化させた場合の境界面位置の経年変化を示す。図は定常に到っていないが、境界面の変化がわかる。

また、現地の標高約5mでボーリング調査を行なったが、地表面下200mにおいても塩水が認められなかった。図-6でも同様のことが判明するため、本手法により実際の地点で淡塩水の流動や境界面位置を推定することが可能になるものと思われる。そのため、今後は現地への適用を行なって行きたい。

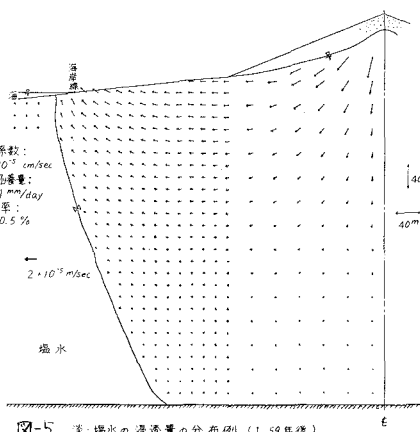


図-5 淡塩水の浸透量の分布例 (1.59年後)

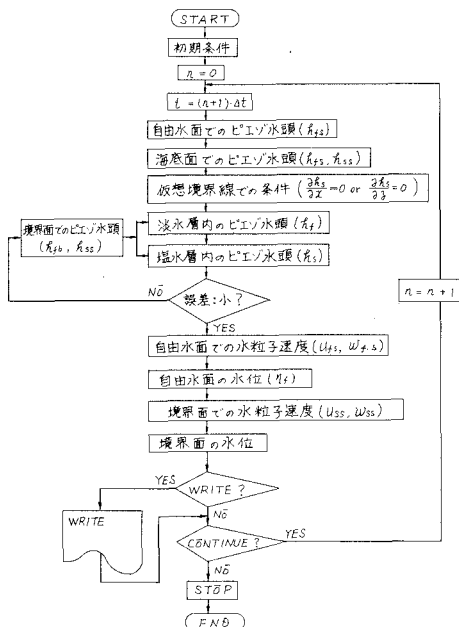


図-4 淡塩地下水密度流の数値解析手順

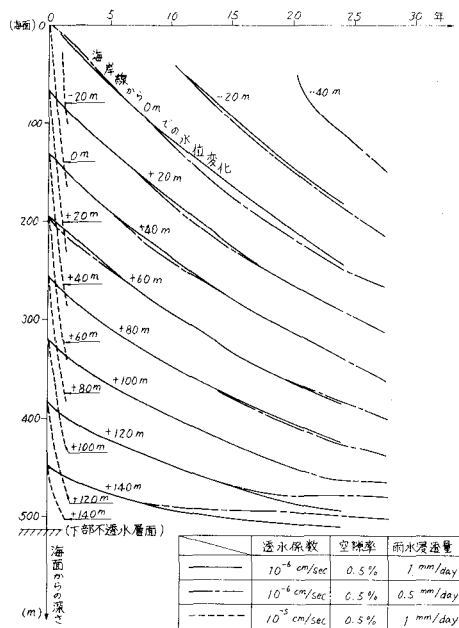


図-6 淡塩境界面位置の経年変化