

臨海地帯水層への塩水侵入現象の FEM シミュレーション

神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 ○野沢 修介
 神戸大学都市安全研究センター フェロー 川谷 健
 神戸大学都市安全研究センター 正会員 齋藤 雅彦

1. 目的

臨海地においては、地下水利用に伴う地下水(淡水)の水位・水頭の低下の結果、帯水層へ海水がくさび状に侵入し、地下水の塩水化が生じる。したがって、地下水利用に際しては、帯水層への塩水侵入の状況と挙動を十分に検討する必要がある。本研究では、帯水層が多層構造である場合も解析対象とするため、この塩水侵入現象を地下水流の場における塩分の移流分散現象として取り扱うこととし、移流分散方程式と地下水流の基礎方程式を連立して解くことで FEM シミュレーションを行い、現象を把握する。

2. 解析モデルと解析方法

地下水流の基礎式および移流分散方程式は、それぞれ下記の式(1)と式(2)である。ここで両式は、シミュレーションの汎用性を高めるため、無次元化してある。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{k_{ij}}{\mu} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \frac{\rho g L}{P} \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} = 0 \quad \dots (1) \quad \text{および} \quad \theta \frac{\partial c}{\partial t} + q_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta \lambda_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) = 0 \quad \dots (2)$$

式(1)で、 ϕ は無次元の水圧、 k_{ij} は無次元の固有透過度、 μ は無次元の粘性係数、 x_i は無次元座標であり、 x_3 は鉛直座標である。また L は代表長さ、 P は代表水圧、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。式(2)で、 c は海水の塩分濃度を 1 とする濃度 ($0 \leq c \leq 1$)、 q_i は無次元流束、 θ は空隙率、 λ_{ij} は無次元の分散係数である。分散係数は、鉛直平面 (x_1 - x_3 平面) については

$$\lambda_{11} = \frac{D_{11}}{LV} = \frac{\alpha_\ell}{\theta LU} \left(q_1 q_1 + \frac{\alpha_t}{\alpha_\ell} q_3 q_3 \right) + \frac{D_d}{LV} \quad , \quad \lambda_{33} = \frac{D_{33}}{LV} = \frac{\alpha_\ell}{\theta LU} \left(q_3 q_3 + \frac{\alpha_t}{\alpha_\ell} q_1 q_1 \right) + \frac{D_d}{LV}$$

$$\lambda_{13} = \lambda_{31} = \frac{D_{13}}{LV} = \frac{D_{31}}{LV} = \frac{(\alpha_\ell - \alpha_t)}{\theta LU} q_1 q_3 + \frac{D_d}{LV}$$

で与えられる。ここに、 D_{ij} は有次元の分散係数、 D_d は分子拡散係数、 α_ℓ と α_t は縦分散長と横分散長であり、 V は $V = (k_r P) / (\mu L)$ で与えられる代表流速であり、 $U = (q_1^2 + q_3^2)^{1/2}$ である。そして、無次元時間 (t) は L/V を代表時間としている。

移流分散方程式の有限要素定式化は、移流が卓越する流れも解析できるように、定常流の解析には SUPG (Streamline-Upwind/Petrov-Galerkin) 法、非定常流の解析には Explicit Characteristic Galerkin 法を用いた。また、数値解法として共役勾配法を採用し、計算容量と計算時間の軽減を図った。

図 - 1 に、解析モデルを示す。帯水層が、図のような 3 層構造の場合と、均質である場合とについて解析した。代表長 L は上流水深とし $X/L=2$ とした。また、 $H_s/L=0.966$ 、 $k_{11}/k_{33}=5$ 、 $k_{33}=1$ 、 $\alpha_\ell/L=0.01$ 、 $\alpha_t/\alpha_\ell=0.2$ 、 $\theta=0.3$ 、 $P=\rho_f g L$ 、 $\rho_s/\rho_f=1.03$ であり、 $\rho_s=\rho_f+(\rho_s-\rho_f)c$ である。

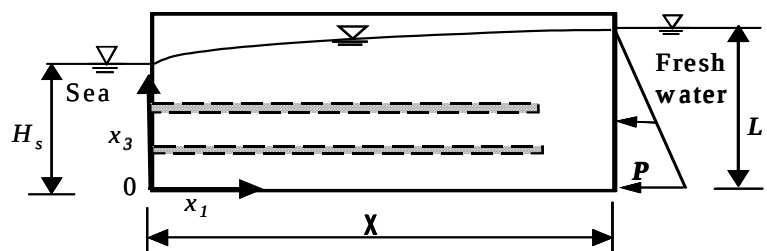


図 - 1 解析モデル

キーワード 臨海地帯水層，塩水侵入，移流分散現象，有限要素解析

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1 - 1 神戸大学都市安全研究センター TEL. 078-803-6055

3. シミュレーション結果

図 - 2 に、FEM によるシミュレーション結果を、Ghyben-Herzberg の近似解とともに示す。これにより、FEM シミュレーションは妥当であり、塩水域における流れも再現されており、実現象を忠実に表現していると考えられる。

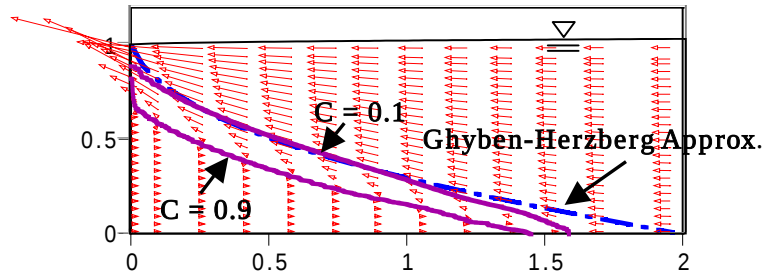


図 - 2 FEM シミュレーションと
Ghyben-Herzberg 近似の比較

図 - 3 に、取水時の塩水侵入状況を示す。取水点での水圧は、取水しないときの水圧と比べて、均質帯水層の場合に 0.04、多層帯水層の場合に 0.025 低くした。後者では、取水しないときと比べて、取水点に近接する帯水層に塩水侵入が著しいが、その他の層ではほとんど変化が認められない。

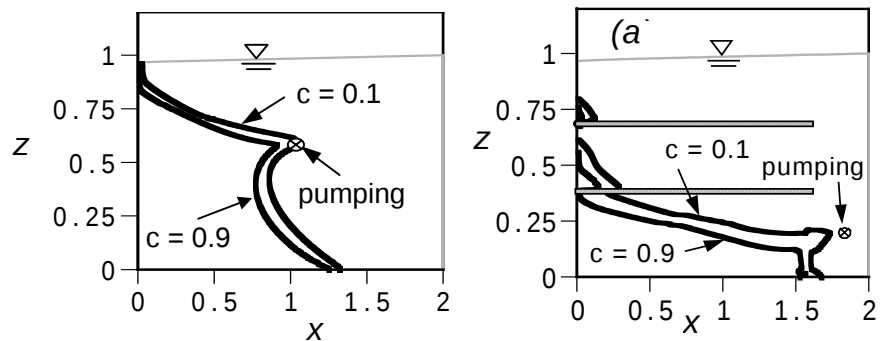


図 - 3 取水時の塩水侵入

図 - 4 に、図 - 3 の塩水侵入状態で取水を中止した場合の塩水くさびの退行過程を示す。図は、 $c = 0.9$ の等濃度線によって退行過程を示している。図中の破線あるいは鎖線は、取水しないときの定常状態の $c = 0.9$ の等濃度線である。

解析における時間増分は、Explicit Characteristic Galerkin 法における数値解の安定条件を考慮して、0.002 とした。退行過程を有次元の時間で把握するため、例えば、固有透過度を 10^{-8} cm^2 、代表長さを 100 m とすると、無次元時間 $t = 1$ はおよそ 140 日に相当する。したがって、いったん塩水化が起こると、もとの淡水にもどるのに長期間を要することがわかる。特に多層帯水層の場合は、上流からの淡水流入量が限られるため、淡水に戻るのに非常に長期間を要する。

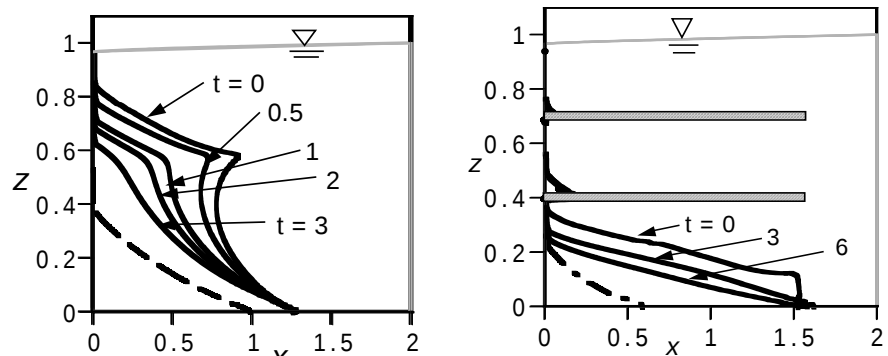


図 - 4 塩水くさびの退行

4. まとめ

- 1) 地下水流における移流分散現象の解析に SUPG 法および Explicit Characteristic Galerkin 法が有効であり、特に多層帯水層への塩水侵入現象の解析には有効である。
- 2) 過剰取水などによっていったん地下水が塩水化すると、取水を中止しても再び淡水化するのに極めて長期間を要する。
- 3) 帯水層の地層構造は塩水侵入の形状と挙動に大きな影響を与えるので、地層構造を的確に調査、把握することが重要である。