多層帯水層の地層構造と塩水侵入形態の関係についての有限要素解析による検討

神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 蓮井 一雄

神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 衣笠 秀隆

神戸大学都市安全研究センター 正会員 齋藤 雅彦

神戸大学都市安全研究センター 正会員 川谷 健

1.はじめに

臨海地において地下水を利用する場合,地下水位・水頭の低下に伴う帯水層への塩水侵入について十分に 配慮する必要がある.臨海帯水層は,一般にその形成過程から多層構造であると考えられる.そして,塩水 侵入の形態は帯水層の構造によって様々である.数値解析によって多層帯水層への塩水侵入を検討する場合, この問題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のが最適であると考えられる.

本研究では,移流分散方程式の有限要素定式化には SUPG(Streamline Upwind/Petrov-Galerkin)法を用 いた.そして地下水流の基礎方程式と移流分散方程式を連立して解くことで,帯水層構造とそこへの塩水侵 入形態との関係を調べた.

## 2.基礎方程式

ダルシー則と地下水流の基礎方程式を,水圧の代表値 $P_s$ ,流れ場の代表長さL,固有透過度の代表値 $k_s$ , 粘性係数の代表値 $\mu_s$ を用いて無次元化すると

$$q_{i} = -\frac{k_{ij}}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \frac{\rho g L}{P_{s}} \frac{\partial x_{3}}{\partial x_{j}} \right) \cdot \cdot \cdot (1) \qquad \text{fbs} U \qquad \qquad \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left\{ \frac{k_{ij}}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_{j}} + \frac{\rho g L}{P_{s}} \frac{\partial x_{3}}{\partial x_{j}} \right) \right\} = 0 \qquad \cdot \cdot \cdot (2)$$

となる.ここに, $q_i$ は無次元流速,pは無次元の水圧, $k_{ij}$ は無次元の固有透過度, $\mu$ は無次元の粘性係数, $x_i$ は無次元座標, $\rho$ は密度,gは重力加速度である.また,このとき,流速の代表値は  $V = \frac{k_s P_s}{\mu_s L}$  である.

一方,定常の場合の移流分散方程式は,無次元化すると  $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta \lambda_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - q_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = 0 \cdot \cdot \cdot (3)$ 

と書ける.ここに $C(0 \le C \le 1)$ は塩分濃度, $\lambda_{ij}$ は無次元の分散係数, $\theta$ は間隙率である.分散係数 $\lambda_{ij}$ は,

$$\lambda_{11} = \frac{\alpha_{\ell}}{L} \left( \frac{q_1^2}{\theta U} + \frac{\alpha_t}{\alpha_{\ell}} \frac{q_3^2}{\theta U} + \frac{D_d}{\alpha_{\ell} V} \right), \quad \lambda_{13} = \frac{\alpha_{\ell}}{L} \left( \frac{(\alpha_{\ell} - \alpha_t)}{\alpha_{\ell}} \frac{q_1 q_3}{\theta U} + \frac{D_d}{\alpha_{\ell} V} \right), \quad \lambda_{33} = \frac{\alpha_{\ell}}{L} \left( \frac{\alpha_t}{\alpha_{\ell}} \frac{q_1^2}{\theta U} + \frac{q_3^2}{\theta U} + \frac{D_d}{\alpha_{\ell} V} \right)$$

である.ここに, $\alpha_{\ell}$ , $\alpha_{t}$ はそれぞれ縦分散長と横分散長, $D_{d}$ は分子拡散係数,そして  $U = (q_{1}^{2} - q_{3}^{2})^{1/2}$ である.

3.解析例(帯水層の地層構造と塩水侵入形態)

図-1に,解析モデルを示す.以下の解析では,淡水と塩水の密度 ( $\rho_f$ , $\rho_s$ )は,  $\rho = \rho_f + (\rho_s - \rho_f)C$ ,  $\rho_f = 1$ ,  $\rho_s = 1.03$  とする. また,上・下流の水位の比は  $H_{upstream}/H_{downstream} = 1.035$  とする. 代表長さ(L)は解析領域の水平距離とする.分散長と間隙率は,  $\frac{\alpha_\ell}{L} = 0.005$ ,  $\frac{\alpha_t}{\alpha_\ell} = 0.2$ ,  $\theta = 0.3$  とする.



(Case1;帯水層が均質のとき)多層帯水層への塩水侵入状況と比較するために,まず図-2に,帯水層が均 質な場合の塩水侵入状況を示す.塩水くさびの先端はx=0.6にまで達している.

-502-

多層帯水層,塩水侵入,移流分散現象,SUPG法,無次元化 〒657-8501神戸市灘区六甲台町 神戸大学都市安全研究センター,Tel. 078-803-6055,Fax. 078-803-6394

(Case2;帯水層が3層で,不透水層が水平のとき) 図-3に,この場合の塩水侵入状況を示す.不透水層は 海岸からx=0.8までの範囲に存在する.下部の不透水層はz=0.2,上部の不透水層はz=0.35にある.図-3

には,比較のために,帯水層が均質な場合の*C*=0.1の等濃度線を破線 で示してある.2つの被圧帯水層では,塩水侵入域は帯水層が均質で あるときの侵入域より小さい.

(Case3, Case4; 下部の不透水層が傾斜しているとき) Case3 は不透水層の上流端が(*x*=0.8,*z*=0.1) にあり, Case4 は上流端が(*x*=0.8,*z*=0.3) にある.図-4に,不透水層の傾きによる塩水侵入域の違いを示す.最下部の帯水層へ流入する淡水は,Case3 で最少,Case4 で最大であり,したがって塩水侵入は,Case3 で最長,Case4 で最短となっている.一方,上部の被圧帯水層部分では,塩水の侵入状況はこれと逆になっている.



図-2 均質帯水層への塩水侵

0.6





(Case5; 取水するとき)図-5に,取水位置による塩水侵入状況の違いを示す.取水点での水圧は,取水しないときより 0.025 低くした.図中,(a),(b),(c)は不透水層のないところに取水点(+で示す)がある場合で,(d),(e),(f)は不透水層が存在する領域で取水する場合である.

このように,臨海地での地下水利用では,帯水層の地層構造を十分に把握することが重要である.

