

被圧帯水層内の塩水くさびの分散現象について

九州産業大学 正会員 ○ 細川 土佐男
九州大学工学部 正会員 神野 健二
九州産業大学 坂本 啓二
吉松 徹

1. まえがき 海岸付近の帯水層に存在する地下淡水を利用する際に塩水化現象が問題となることがある。これは、地下水へのかん養量の減少や地下水の過剰揚水に伴う淡水のポテンシャル低下により、淡水と塩水の平衡状態がくずれ内陸に塩水が侵入する現象である。本報は、塩水化現象の非定常過程を塩水と淡水が混合する分散現象として考え、断面2次元の被圧帯水層内で、浸透流方程式と移流分散方程式を数値解析し、砂モデルと比較検討したものである。

2. 数値解析

2.1 基礎方程式 非圧縮性の砂層および流体の連続の条件

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0 \quad \dots (1)$$

ダルシーの法則

$$u = -k(\partial h / \partial x), \quad v = -k(\partial h / \partial y + P / P_f) \quad \dots (2)$$

式(2)を式(1)に代入すると圧力水頭 h についての浸透流方程式を得る。

$$\partial^2 h / \partial x^2 + \partial^2 h / \partial y^2 + \partial(P / P_f) / \partial y = 0 \quad \dots (3)$$

移流分散方程式

$$\partial C / \partial t + u' \partial C / \partial x + v' \partial C / \partial y = \partial(D_{xx} \partial C / \partial x) / \partial x + \partial(D_{yy} \partial C / \partial y) / \partial y + \partial(D_{xy} \partial C / \partial x) / \partial y + \partial(D_{yx} \partial C / \partial y) / \partial x \quad \dots (4)$$

ここに、 u, v : x, y 方向のダルシー流速、 k : 透水係数、 P : 流体密度、 P_f : 淡水の密度、 h : 圧力水頭、 C : 塩分濃度、 $u' (= u/n), v' (= v/n)$: x, y 方向の実流速、 n : 有効空隙率、 $D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$: 分散係数テンソルであり各成分は、次の様に表示する。

$$D_{xx} = (\alpha_L u'^2 + \alpha_T v'^2) / |V| + D_M, \quad D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) u' v' / |V|, \quad D_{yy} = (\alpha_T u'^2 + \alpha_L v'^2) / |V| + D_M \quad \dots (5)$$

ここに、 $|V| = \sqrt{u'^2 + v'^2}$, α_L, α_T : それぞれ縦、横方向の分散長、 D_M : 分子拡散係数。

式(3)の密度と式(4)の塩分濃度の関係は、 $P = P_f + (P_s - P_f)C \quad \dots (6)$ で表わす。ここに、 P_s : 塩水密度。

2.2 初期および境界条件と計算条件

解析領域と境界条件は、図-1に示している。解析は、ケース1: 海水位を H_s 、淡水位を H_f に設定した時の定常状態を初期条件として、淡水位を H_f だけ一気に下げた塩水侵入過程と、ケース2: この過程の最終状態を初期条件として、淡水位を一気に H_f だけ上げ、もとの H_s に戻した塩水排除過程について行なう。式(3)、(4)の数値解析法には、差分法を用い、特に、式(4)の差分化には、解の安定性と収束性を考慮して、風上差分法を採用する。解析を進めるに当たって、厳密に濃度を求めるには、浸透流速が概知量であること、逆に圧力水頭を求めるには濃度が概知量でなければならないが、本報では微小時間内の濃度変化が浸透流に与える影響は小さく無視できると考えて、圧力水頭の算定には、1ステップ前の濃度を用いる。すなわち、濃度を概知量として、式(3)より圧力水頭を求め、この値を用いて、式(2)、(5)より流速と分散係数を計算して、これらの値より式(4)を用い濃度を求める方法を採用した。

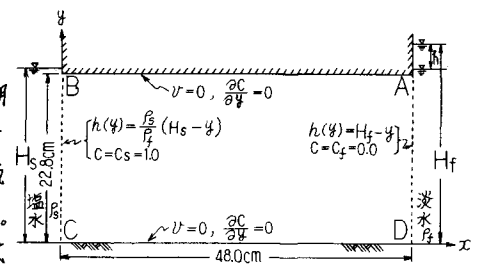


図-1 解析領域と境界条件

2.3 数値解析結果 数値解析を行なう為に必要な物理諸量として、塩水密度 $\rho_s=1.025$ (g/cm^3)、淡水密度 $\rho_f=1.0$ (g/cm^3)、透水係数 k と有効空隙率 n は、透水試験で求めた値 $k=0.325$ (cm/sec)、 $n=0.392$ を採用した。縦および横分散長は、Harlemanの実験公式を基

に近似した $D_{xx}/V \div 1/1.5Re$ 、 $D_{yy}/V \div 1/25Re$ を式(5)の第1式と第3式に適用して得られる $\alpha_L = dm/1.5$ と $\alpha_T = dm/25$ から算定した。本報の実験では、平均粒径 $dm = 0.54$ (mm)の相馬砂を用いたので、この場合の α_L 、 α_T はそれぞれ $\alpha_L = 0.036$ (cm)、 $\alpha_T = 0.00216$ (cm)となる。

なお、分子拡散係数は、 $D_M = 10^{-5}$ (cm^2/sec)とした。図-2,3は塩水侵入過程、図-4,5は塩水排除過程について解析した結果得られた塩分の濃度分布を示している。

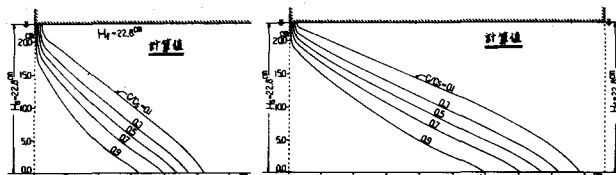


図-2 侵入過程($t=900\text{sec}$)

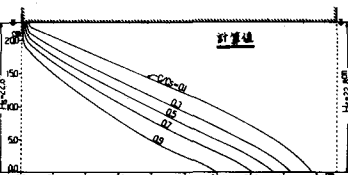


図-3 侵入過程($t=2280\text{sec}$)

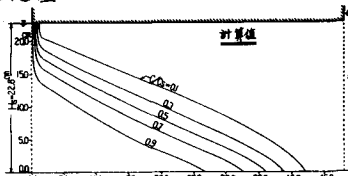


図-4 排除過程($t=280\text{sec}$)

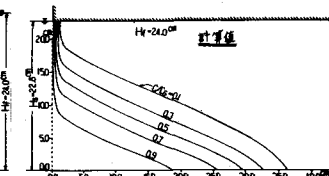


図-5 排除過程($t=940\text{sec}$)

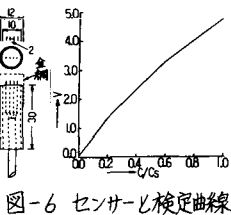


図-6 センサー校定曲線

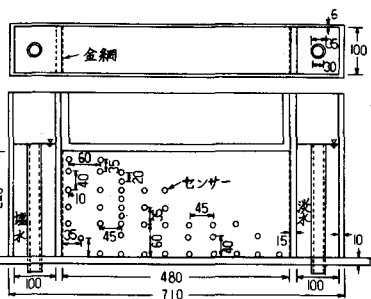


図-7 実験装置(単位: mm)

3. 砂モデル実験 数値解析結果を検討する為、図-6,7に示す塩分濃度測定センサーと、浸透領域が $48.0\text{cm} \times 22.8\text{cm} \times 10\text{cm}$ の砂モデルを用いて実験を行なった。砂モデルの透水係数と有効空隙率は、 $k=0.325$ (cm/sec)、 $n=0.392$ である。塩分濃度の測定には、図-6に示す直径12 mmの円筒体の先端部分に、検出用の直径0.8 mmのステンレス線を2 mm間隔で埋め込んだセンサーを製作し用いた。すなわち、塩分濃度を四極の電気導度計で測定したステンレス電極間の電圧変化量として測定した。水温 9°C における無次元濃度 C/C_s と電圧 V の関係を表わす校定曲線の一例を図-6に示す。

図-8,9には塩水侵入過程、図-10,11には塩水排除過程について実験した結果得られた塩分の濃度分布を示している。

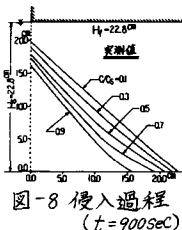


図-8 侵入過程($t=900\text{sec}$)

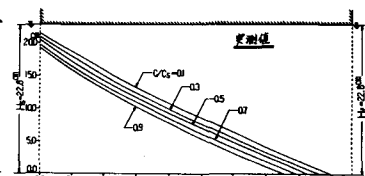


図-9 侵入過程($t=2280\text{sec}$)

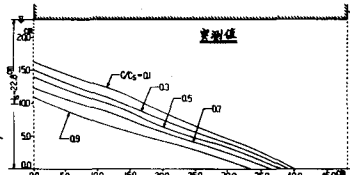


図-10 排除過程($t=280\text{sec}$)

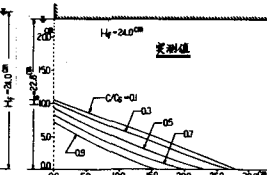


図-11 排除過程($t=940\text{sec}$)

4. 検討 解析結果および実験結果とも塩水く

さびの全域で濃度勾配が存在することが確かめられた。解析結果と実験結果とも比較すると、解析結果は実験結果よりも塩水くさび全体にわたって塩分の分散幅が広がっている。この事は、移流分散方程式の移流項の差分化による離散化誤差が起因していると考えられる。塩水侵入過程と塩水排除過程とは、解析および実験結果とも、排除過程の方が侵入過程よりも塩水くさびの分散幅が広がっている。なお今後は、移流項の差分化による分散の進みすぎの補正や塩水側侵入断面上の境界条件の与え方を検討してみたい。

謝辞 本研究を進めるにあたり、九州大学工学部上田年比古教授、九州産業大学工学部加納正道助教授に有益な御助言を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献 1)伊藤 剛: 数値計算の応用と基礎(水理学を中心として)、アデネ社、pp.201~205、昭和46年10月。
2)地下水ハンドブック編纂委員会: 地下水ハンドブック、建設産業調査会、p.105、昭和54年9月。