

II-104 地下塩水楔の侵入・排除過程における塩分混合特性

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

1. まえがき 塩水楔の侵入過程と排除過程で分散・混合の zone の幅が異なること、このことは、海岸近くの帯水層で淡水の取水、取水停止を繰り返していく内に混合幅が広がる可能性があることにつながる現象である。そして、この特性を知っておくことが、海岸近くで地下ダムを構築し、この地下ダムを運用してゆく上に重要であると考える。本報は、砂モデル実験と数値計算でこの事実を確かめたものである。

2. 数値解析

2.1 基礎方程式 基礎方程式として

○ 連続の式 $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 0$ (1)

○ 運動方程式 $u = -k(\partial h/\partial x), v = -k(\partial h/\partial y + P/\rho_f)$ (2)

○ 浸透流方程式 $\partial^2 h/\partial x^2 + \partial^2 h/\partial y^2 + \partial(P/\rho_f)/\partial y = 0$ (3)

○ 移流分散方程式 $\partial C/\partial t + u' \partial C/\partial x + v' \partial C/\partial y = \partial(D_{xx} \partial C/\partial x)/\partial x + \partial(D_{yy} \partial C/\partial y)/\partial y + \partial(D_{xy} \partial C/\partial y)/\partial x + \partial(D_{yx} \partial C/\partial x)/\partial y + \partial(D_{yy} \partial C/\partial y)/\partial y$ (4)

を用いている。ここに、 u, v : Darcy 流速, k : 透水係数, ρ : 流体密度, ρ_f : 淡水密度, h : 圧力水頭, C : 塩分濃度, $u' (=u/n), v' (=v/n)$: 実流速, n : 有効空隙率, D_{ij} : 分散係数テンソル($i, j = x, y$)
各成分は $D_{xx} = (\alpha_L u^2 + \alpha_T v^2)/|V| + D_m, D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T)u'v'/|V|, D_{yy} = (\alpha_T u^2 + \alpha_L v^2)/|V| + D_m$ (5)
である。ここに、 $|V| = (u^2 + v^2)^{1/2}, \alpha_L$: 縦分散長, α_T : 横分散長, D_m : 分子拡散係数。

式(3)の密度 ρ と式(4)の濃度 C との関係式は、 $\rho = \rho_f + (\rho_s - \rho_f) \cdot C$ で表わす。ここに、 ρ_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 ρ_s 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 ρ_s だけ上げ、もとの H_f に戻した塩水排除過程について行なう。なお、式(3)には差分法を、式(4)には、移流項の離散化誤差を防ぐために、粒子移動法を用いて数値解析を行なった。解析を進めるに当たって、厳密に濃度を求めるには、浸透流速が既知量であること、逆に圧力水頭を求めるには濃度が既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、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、濃度を既知量として、式(3)より圧力水頭を求め、この値を用いて、式(2)、式(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。

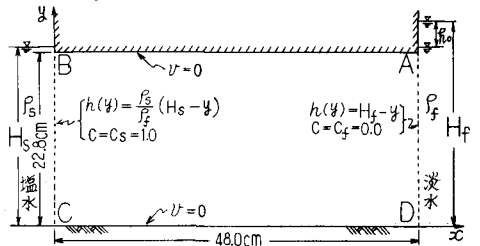


図-1 解析領域と境界条件

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 ρ_s 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 ρ_s だけ上げ、もとの H_f に戻した塩水排除過程について行なう。なお、式(3)には差分法を、式(4)には、移流項の離散化誤差を防ぐために、粒子移動法を用いて数値解析を行なった。解析を進めるに当たって、厳密に濃度を求めるには、浸透流速が既知量であること、逆に圧力水頭を求めるには濃度が既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、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、濃度を既知量として、式(3)より圧力水頭を求め、この値を用いて、式(2)、式(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。

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、

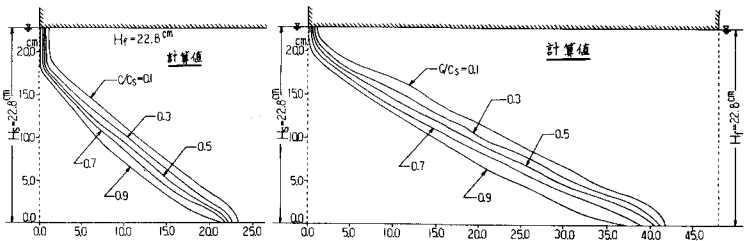


図-2 侵入過程 (t=900sec)

図-3 侵入過程 (t=2280 Sec)

Harleman の実験公式を基に近似した $D_{xx}/U \approx 1/1.5 Re$, $D_{yy}/U \approx 1/25 Re$ を式(5)の第1式と第3式に適用して得られる $\alpha_L = d_m/1.5$ と $\alpha_T = d_m/25$ から算定した。本報の実験では、平均粒径 $d_m = 0.54$ (cm) の相馬砂を用いたので、この場合の

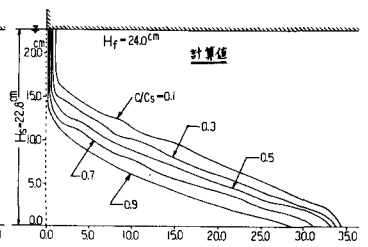
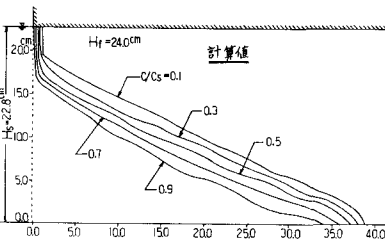


図-4 排除過程 ($t=280$ sec)

図-5 排除過程 ($t=940$ sec)

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、 $D_m = 10^{-5}$ (cm²/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の濃度分布を示している。

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 cm \times 22.8 cm \times 10 cm の砂モデルを用いて実験を行なった。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用いた。なお、濃度は四極の電気電導度計で電圧の変化量として測定した。図-6に、水温 9 °C における無次元濃度 C/C_s と電圧 V の関係を表わす検定曲線の一例を示す。

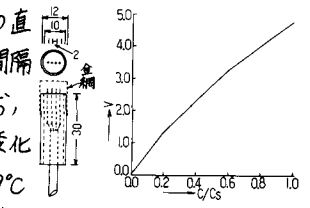


図-6 センサー検定曲線

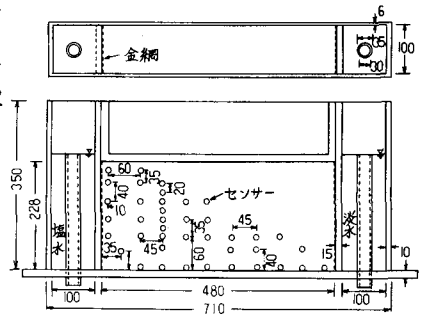


図-7 実験装置(単位: mm)

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の濃度分布を示している。図-12には、解析と実験による $C/C_s = 0.5$ の等濃度線の経時変化を示している。

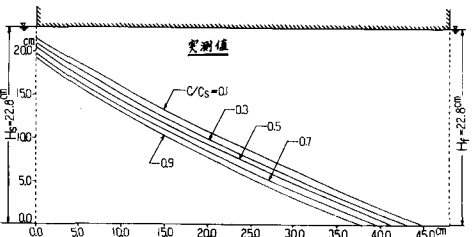
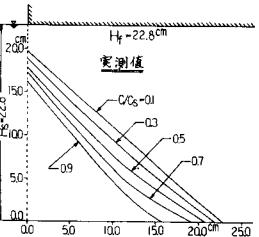


図-8 侵入過程 ($t=900$ sec)

図-9 侵入過程 ($t=2280$ sec)

4. 検討 解析および実験結果とも塩水楔の全域で濃度勾配の存在することが確かめられた。また、両結果を比較すると分散幅あるいは形状ともよく似た傾向をしている。侵入過程と排除過程とでは、実験および解析結果とも排除過程の方が塩水楔の分散・混合の zone の幅が広がっている。

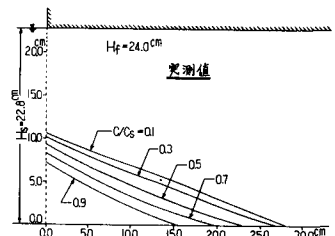
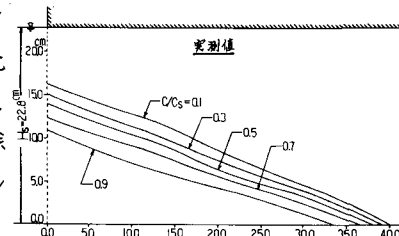


図-10 排除過程 ($t=280$ sec)

図-11 排除過程 ($t=940$ sec)

今後、具体的に、海岸帯水層に構築される地下ダムの取水運転に供する知見を得たいと考えている。

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に有益な御助言を頂いた。また、九州大学工学部羽井和朗氏には、粒子移動法の計算プログラムを快く提供して頂いた。ここに記して感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 神野健二, 上田年比古: 粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討, 土木学会論文報告集, No.271, pp.45~pp.53, 1978年3月.
- 2) 地下水ハンドブック編集委員会: 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, p.105, 昭和54年9月.

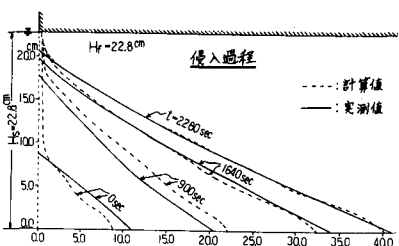


図-12 等濃度線 ($C/C_s = 0.5$) の経時変化