

大林組技術研究所 正会員 西田 憲 司
 同 上 正会員 上野 孝 之
 同 上 正会員 西林 清 茂

1. はじめに

近年、環境問題の一つとして地下水汚染がクローズアップされており、汚染状況を予測する技術の重要性が増している。そこで浸透拡散現象の予測技術として密度差による分散効果を考慮した有限要素解析プログラムを独自に開発し、ヘンリーの問題に適用して近似解とほぼ同じ解が得られることを確認した^{1, 2)}。ここでは、プログラムの実際現象に対する検証のため、まず室内において密度流を伴う浸透拡散現象の鉛直二次元モデル実験を実施した。そして、本プログラムによって実験供試体中の塩水領域をシミュレートできるかどうかについて検討した。

2. 解析方法³⁾

地下水の密度流度を考慮した解析をするためには、飽和浸透支配式と移流を考慮した拡散支配式を連立して解く必要があり、それぞれの式における圧力水頭 h と溶質濃度 C が互いに影響し合うため複雑である。そのため、ここでは図-1に示す手順によって繰り返し計算を行う。

飽和浸透支配式および流体密度と溶質濃度の関係式を式(1)、(2)に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \rho k_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} x_3 \right) \right\} = 0 \quad i=1, 2, 3 \quad \dots (1)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \times \frac{C}{C_0} \right) \quad \dots (2)$$

ここに、 ρ ：流体密度、 ρ_0 ：真水密度、 k_{ij} ：透水係数、 h ：圧力水頭、 C ：物質濃度、 C_0 ：最大密度 ρ_s における物質濃度。式(1)(2)の ρ 、 h と式(3)からDarcy流速を求め、式(4)の浸透拡散方程式を解いて濃度を計算する。

$$u_i = -k_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} x_3 \right) \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \theta C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i C) \quad \dots (4)$$

ここに、 D_{ij} ：分散係数であり、流速の関数として式(5)で計算する。

$$D_{11} = \{ \varepsilon_L u_1^2 + \varepsilon_T (u_2^2 + u_3^2) \} / |u| + D_m,$$

$$D_{12} = (\varepsilon_L - \varepsilon_T) u_1 u_2 / |u|, \dots \dots (5)$$

ここに、 ε_L ：横分散能、 ε_T ：縦分散能、 D_m ：分子拡散係数。

3. 密度流を伴う浸透拡散現象のモデル実験

実験装置は、図-2の模式図に示すような鉛直二次元装置であり、実験条件と実験試料の物理的性質を表-1にまとめた。試料には均質地盤を想定してガラスビーズ($\phi 2\text{mm}$)を用い、溶質は保存系物質としてNaClを用いた。実験は真水によって供試体(空隙率 $\theta=0.31$)を飽和させた後、供試体の一方から真水を、他方から塩水を供給した。なお供給する真水の水位は、塩水の水位より1cm高く設定した。また供給する塩水のNaCl濃度は3.0%とし、塩水を着色してNaClの移動の様子を観察できるようにした。実験結果を図-3に示すが、時間



図-1 解析手順

の経過に伴い塩水が真水領域に潜り込んでいく様子がわかる。塩水の浸入速度は時間とともに遅くなり、 $t=420\text{min}(7\text{hr})$ 後にはほぼ停止した。このときの真水の供試体内への供給流量は $0.36\text{cm}^3/\text{sec}$ であった。

4. モデル実験のシミュレーション解析

実験をシミュレートするために図-4の解析モデルを設定した。分散特性としての分散能は別途実施した実験結果⁴⁾の $\varepsilon_L=1.67\text{cm}$ 、 $\varepsilon_T=0.334\text{cm}$ を入力した。またNaClの分子拡散係数は $D_m=1.26\times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{sec}$ とした⁵⁾。初期条件は全節点濃度をゼロとし、図-4に示す境界条件を与えた。要素数160、時間刻み $\Delta t=60\text{sec}$ のときの $t=60\text{min}(1\text{hr})$ 後の解析結果として $C=0.5$ 等濃度線を図-5に示す。図中には実験における塩水と真水の境界線も示しているが、両者はほとんど一致していることから、解析モデルや分散能の設定の妥当性が確認でき、この解析プログラムで均質地盤における密度流を考慮した浸透拡散挙動をシミュレートできると考えられる。

【参考文献】1)西田,他:第29回土質工学研究発表会, p.1929~1930, 1994. 2)Henry, H. R. (Ed. H. H. Cooper et al.): United States Geological Survey Water Supply Paper, 1613-C, 1964. 3)Gupta, S. K., et al.: CFEST, PNL-4260, 1982. 4)西田,他:第50回土木学会年次学術講演会3-A, p.178~179, 1995. 5)水科,他:輸送現象, 産業図書, 349p., 1981.

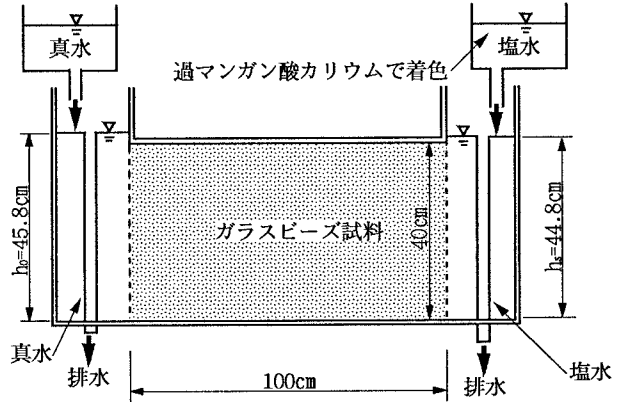


図-2 実験概要

表-1 実験条件と実験試料の物理的性質

真水側と海水側の水位差	1.0cm
塩水のNaCl濃度	3.0%
試料の種類	0.2mm径ガラスビーズ
供試体寸法	幅100cm×高40cm×奥5cm
間隙率 θ	0.31
透水係数 k	$1.8\times 10^{-3}\text{cm}/\text{sec}$
供試体の初期状態	真水による飽和状態
NaCl領域の測定	塩水を着色して目視

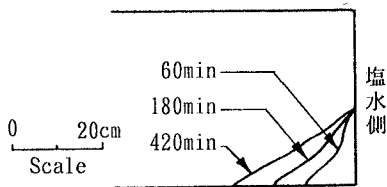


図-3 実験結果(真水と塩水の境界線)

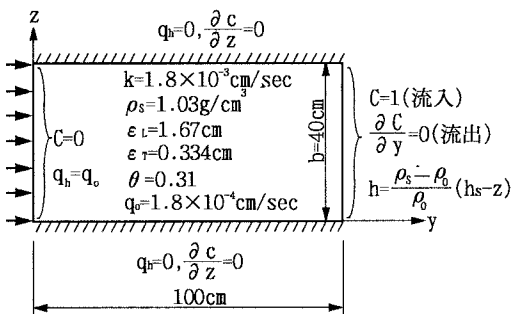


図-4 解析モデル

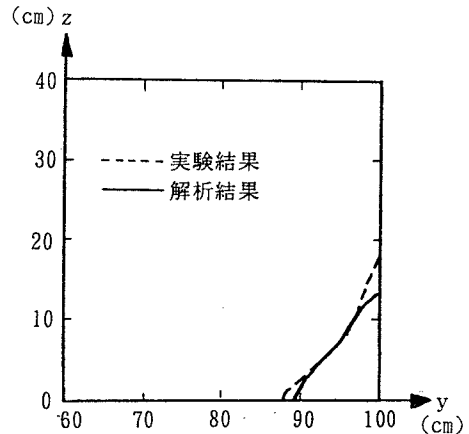


図-5 $t=60\text{min}$ 後の実験および解析結果