

地盤内の浸透・拡散現象の予測手法に関する研究（その2）

—地盤内の分散能の推定方法について—

西田 憲 司 上野 孝 之
西林 清 茂

Study on Prediction Method for Advection and Diffusion of Pollutants in Ground Water (Part 2)

—Original Estimation Method of Dispersivity in Ground—

Kenji Nishida Takayuki Ueno
Kiyoshige Nishibayashi

Abstract

For utilization of underground space it is necessary to predict the state of groundwater pollution as an environmental problem. In this prediction, it is necessary to simultaneously solve equations of seepage flow and diffusion because pollutants in groundwater are moved about by these forces. The original development program designed by the authors for solving the equations has been examined through simulation analyses. For multi-dimensional analysis it is necessary to input data of transverse dispersivity. Establishing dispersivity is difficult, and is a problem waiting to be solved. The original estimation method of dispersivity was examined through back analysis based on the results of two-dimensional vertical model experimentations with salt water. As a result of the examination, it was shown that it is possible to simulate the dispersivity movement of salt with the original method.

概 要

地下空間利用などに際しては、環境問題の一つである地下水の汚染状況を予測する技術が必要となる。地下水中の汚染物質は、地下水の流れおよび拡散によって移動することから、汚染状況を予測するためには浸透流支配式と拡散支配式を連立して解く必要があり、これに対応できる独自の有限要素解析プログラムを開発した。これまでに解析プログラムの適用性の検討を行ってきたが、多次元解析を行う際、入力定数の一つである地下水流れと直角方向の物質の分散能が解の精度に影響し、その設定方法が課題である。そこで塩水を使った室内二次元モデル実験で、数箇所の測定点における NaCl 濃度の時間変化を測定し、その結果に基づき解析プログラムを用いて分散能を逆算する方法を試み、NaCl 濃度の時間変化をうまく説明できる分散能を推定することができた。

1. はじめに

建設分野においては、放射性廃棄物の地下処分、工場跡地利用、そして大規模地下空間利用計画など、地下水環境に関わる問題が多くなってきている。これらの設計に際しては、環境保全の立場から事前に汚染の状況を把握、将来予測する調査・解析技術が必要不可欠となる。これに対応できる有限要素解析プログラムを開発し、これまでにその有効性を確認してきた¹⁾。しかし多次元解析を行う際は、地下水流れと直角方向の物質の分散能力を支配するパラメータである横分散能が解の精度に影響

し、その設定方法が課題である。そこで、室内実験および数値解析を用いて分散能を推定する手法を検討した。

この報告では、はじめに分散能推定手法について述べ、ガラスビーズ供試体を用いた浸透・拡散実験によりその適用性を検討した。

2. 基礎理論

2.1 分散能

土粒子に吸着しない物質の浸透による移動を考慮した分散現象の三次元支配式は式(1)で表される²⁾。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\theta C)}{\partial t} \\ = & \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \rho D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + \rho D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \rho D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + \rho D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + \rho D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + \rho D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right\} \\ & - \left\{ \frac{\partial(\rho u_x C)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y C)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z C)}{\partial z} \right\} \quad \dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここに、C：溶質濃度、 ρ ：溶液密度 [W/L³]、 θ ：空隙率、 u_i ：Darcy 流速の i 方向の成分 [L/T]、 D_{ij} ：分散係数 [L²/T]。右辺第1項は Fick の法則³⁾に従う拡散項であり、第2項は浸透流による移流項である。また D_{ij} は式(2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} D_{xx} &= \{ \epsilon_L \cdot u_x^2 + \epsilon_T (u_y^2 + u_z^2) \} / |u| + D_m \\ D_{xy} &= (\epsilon_L - \epsilon_T) \cdot u_x \cdot u_y / |u| \\ D_{xz} &= (\epsilon_L - \epsilon_T) \cdot u_x \cdot u_z / |u| \\ D_{yx} &= D_{xy} \\ D_{yy} &= \{ \epsilon_L \cdot u_y^2 + \epsilon_T (u_x^2 + u_z^2) \} / |u| + D_m \\ D_{yz} &= (\epsilon_L - \epsilon_T) \cdot u_y \cdot u_z / |u| \\ D_{zx} &= D_{xz} \\ D_{zy} &= D_{yz} \\ D_{zz} &= \{ \epsilon_L \cdot u_z^2 + \epsilon_T (u_x^2 + u_y^2) \} / |u| + D_m \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 D_m ：分子拡散係数 [L²/T]、 ϵ_L ：流れ方向の分散能(縦分散能) [L]、 ϵ_T ：流れと直角方向の分散能(横分散能) [L]、 $|u|$ ： $\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$ [L/T]。

式(1)によりある時刻 t における座標 (x, y, z) の物質濃度 C を求める場合、入力データのうち、溶液密度 ρ は真水と同密度とし、空隙率 θ 、Darcy 流速 u_i 、分子拡散係数 D_m を既知とすると、分散能 ϵ_L 、 ϵ_T を入力すれば解析可能となるが、 ϵ_L 、 ϵ_T の値の設定方法は確立されていない。Rumer らの実験結果⁴⁾を用いて便宜的に ϵ_L 、 ϵ_T を設定する例も見られるが⁵⁾、これらの値は地盤条件により異なり普遍的な物性値ではない。分散能は物質の分散移動に大きく影響を及ぼすため、解析対象の地盤固有の値を入力する必要があると考えられる。

2.2 分散能推定方法

2.2.1 流れ方向分散能(縦分散能) ϵ_L 推定

分散能は地盤固有の値であるため、移動物質の種類、浸透流の方向、速度に関係なく求められるパラメータである。そこで最も簡便な均質地盤の一次元場、すなわち浸透流の流れ方向および物質移動方向が x 方向のみに限定された状態から ϵ_L を求めることを考える。一次元場では式(3)の Harleman and Rumer の理論解⁶⁾で物質の移流・拡散を求めることができる。この場合、y, z 方向の Darcy 流速は $u_y = u_z = 0$ であるから、式(2)の分散係数は式(4)となる。そこで鉛直カラム実験¹⁾で供試体内の任意点 x の物質濃度 C の時間変化を測定すれば、式(3)から分散係数 D_{xx} が逆算でき、この D_{xx} を式(4)に代入することによって ϵ_L が得られる。

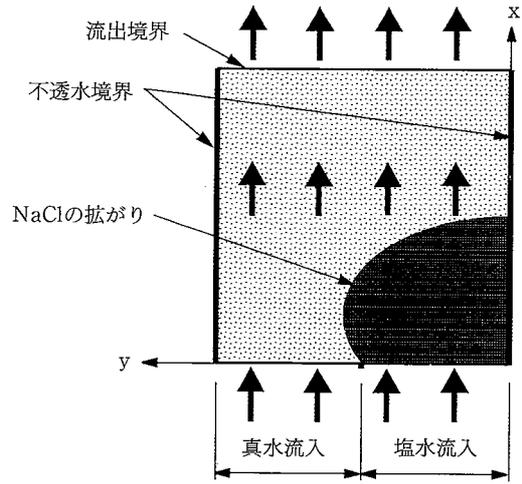


図-1 二次元場の移流拡散現象

$$\begin{aligned} \frac{C}{C_0} &= \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \theta u_x t}{2\sqrt{D_{xx}t/\theta}} \right) \right. \\ & \left. + \exp \left(\frac{u_x \theta^2}{D_{xx}} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \theta u_x t}{2\sqrt{D_{xx}t/\theta}} \right) \right\} \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここに、 C_0 ：流入境界における濃度。

$$D_{xx} = \epsilon_L u_x + D_m \quad \dots\dots(4)$$

2.2.2 流れと直角方向の分散能(横分散能) ϵ_T 推定

図-1に示すような均質地盤の二次元場に浸透流が一方方向(x方向)に流れている場を考える。流入境界から真水と塩水(NaCl濃度は低く、真水と同じ密度と仮定する)を流せば、物質 NaCl は流れ方向(x方向)だけでなく、流れと直角方向(y方向)にも分散する。二次元場の基礎式は次に示す式(5)で表せる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\theta C)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] - u_x \frac{\partial(\rho C)}{\partial x} \quad \dots\dots(5) \end{aligned}$$

分散係数は $u_y = u_z = 0$ とすると、式(2)から式(6)となる。

$$\left. \begin{aligned} D_{xx} &= \epsilon_L u_x + D_m \\ D_{yy} &= \epsilon_T u_x + D_m \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(6)$$

溶液密度 ρ 、空隙率 θ 、Darcy 流速 u_x 、分子拡散係数 D_m が既知で、一次元場の ϵ_L が得られている場合、未知数は分散能 ϵ_T だけとなり逆算可能となる。その際は、いくつかの ϵ_T を仮定し、解析プログラムによって地盤内の任意点における濃度 C の時間変化の測定結果と解析結果が最も一致する ϵ_T を逆解析する。

3. 適用事例

3.1 概要

鉛直カラム実験は文献1で報告しており、ここでは流れ方向の分散能 ϵ_L が既知の供試体を用いた二次元実験により、流れと直角方向の分散能 ϵ_T を推定した事例について述べる。

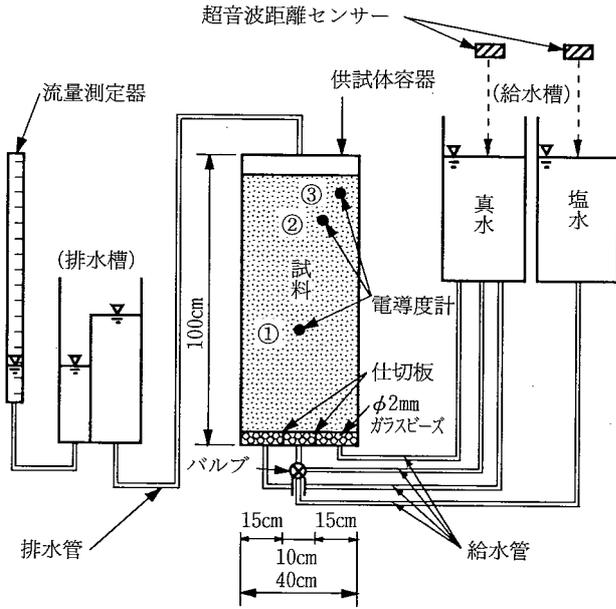


図-2 二次元移流拡散実験装置模式図



写真-1 二次元移流拡散実験装置

3.2 二次元移流拡散実験結果

図-2, 写真-1の実験装置を用いて表-1の条件で二次元実験を実施した。実験に用いた供試体は横40 cm, 縦100 cm, 奥行5 cmの土槽に0.2 mm径のガラスビーズを充填したもので, 空隙率は0.37である。実験はまず供試体底面(40×5 cm²)から真水を鉛直上向きに通水して供試体を飽和させた後, 供試体底面の中心部(10×5 cm²)のみを瞬時に塩水に切り替え, 両端部(15×5 cm²)はそのまま真水を通水した。塩水の通水開始から終了までの時間は459,600 sec (5.3 day)である。この実験は, 浸透流は一次元であるが, 物質(NaCl)移動については二次元である。供試体中の3箇所を設置した電導度計による塩水通水後の塩分濃度変化の測定結果を図-3に示す。測点①では時間の経過とともに濃度が上昇し, 供給塩水濃度の約65%の濃度に達した後一定となる。供給塩

表-1 実験条件と実験試料の物理的性質

給水槽と排水槽の水位差	1.0 cm
供給塩分濃度	1.0 %
通水方向	鉛直上向きに通水
NaCl濃度測定点	① { 底面から上へ39.0 cm 中心から横へ0 cm ② { 底面から上へ79.0 cm 中心から横へ5.0 cm ③ { 底面から上へ89.0 cm 中心から横へ10.0 cm
土の種類	0.2 mm径ガラスビーズ
供試体寸法	幅40 cm×高91 cm×奥5 cm
間隙率 θ	0.37
透水係数 k	7.3×10^{-3} cm/sec

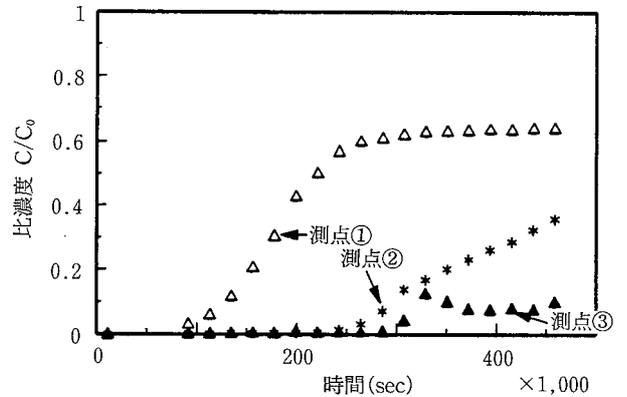


図-3 実験結果 (測点①~③における比濃度時間変化)

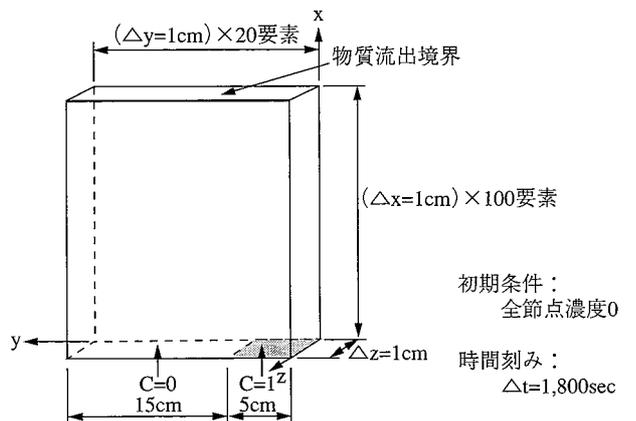


図-4 解析モデル

水濃度まで達していないのは, 流れと直角方向へ NaCl が分散しているためと考えられる。測点②も同様の傾向が見られるが, 測点③は流出部に近いことが影響し他点と異なる傾向となった。

3.3 横分散能の逆解析

鉛直カラム実験で得られた $\epsilon_L = 1.67$ cm を用い, 二次元実験の逆解析を行った。解析モデルは図-4に示す供

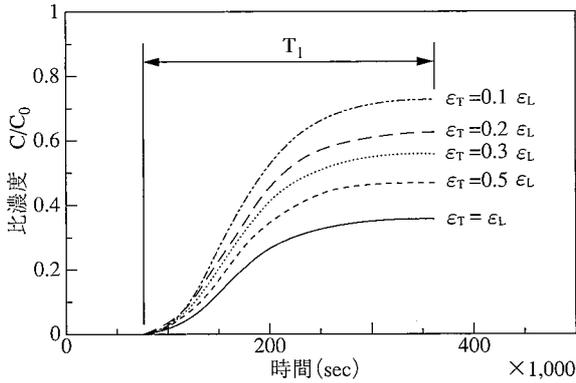


図-5 測点①における比濃度時間変化 ($\epsilon_L = 1.67 \text{ cm}$)

試体の左半分とした。モデルは3次元2,000要素であり、初期条件は全節点濃度を $C = 0$ 、流入境界条件は濃度規定境界とし、塩水流入面濃度を $C = 1$ 、真水流入面濃度を $C = 0$ 、流出境界は外向き法線ベクトル方向への分散による物質フラックス成分をゼロとした。

いくつかの ϵ_T について、実験の測点①に対応する比濃度時間変化の解析結果を図-5に示す。この図から、濃度が上昇し始めてから一定値になるまでの時間 T_1 は ϵ_T に係らずほぼ一定である。しかし ϵ_T が大きいほど漸近一定比濃度は小さく、流れと直角方向へ物質が多く分散し、横分散能によって解が異なることがわかる。この傾向は図-6に示した $t = 86,400 \text{ sec}$ (24 hr) の $C/C_0 = 0.25$ 等比濃度分布曲線からも明らかに示されている。

解析結果のうち測点①の実験値と最もよくフィッティングしたのは、 $\epsilon_T = 0.2\epsilon_L = 0.334 \text{ cm}$ のケースであった。

3.4 実験のシミュレーション解析

鉛直コラム実験から得た $\epsilon_L = 1.67$ 、二次元実験の測点①の実験値から逆算した $\epsilon_T = 0.334 \text{ cm}$ を用い、二次元実験のシミュレーション解析を行った。図-7に示すように、塩分濃度の時間変化は測点②についても解析結果と実験値がほぼ一致していることから、推定した分散能は、妥当な値といえる。

4. おわりに

地下水の汚染状況の予測解析では、分散能を入力する必要がある。分散能は地盤固有の値であり、汚染物質の種類に関係なく求められるため、ここでは NaCl を用いた室内実験の数値解析による逆解析方法を提案した。ガラスビーズ模擬地盤に適用した結果、移動物質の濃度変化を精度よく解析できる値が得られ、本手法の有効性が確認できた。実地盤の採取試料についても本手法を適用すればその地盤固有の分散能を推定することができ、実設計の汚染物質浸透拡散予測解析の精度がより向上するものと考えられる。

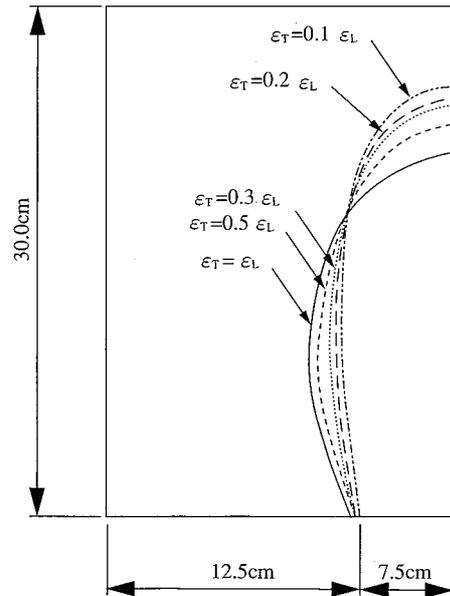


図-6 $t = 24 \text{ hr}$ の $C/C_0 = 0.25$ 等比濃度分布曲線

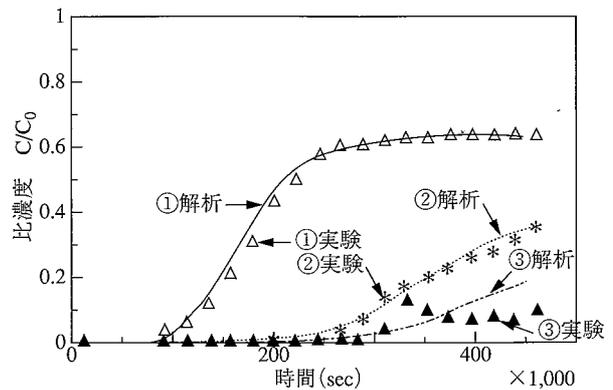


図-7 実験結果と解析結果の比較 (測点①~③における比濃度時間変化)

参考文献

- 1) 西田憲司, 他: 地盤内の浸透・拡散現象の予測手法に関する研究 (その1) - 開発プログラムの妥当性について -, 大林組技術研究所報, No.50, p.47~52, (1995)
- 2) Gupta, S. K., et al.: A Multi-Dimensional Finite-Element Code for the Analysis of Coupled Fluid, Energy, and Solute Transport (CFEST), PNL-4260, (1982)
- 3) 水科篤郎, 他: 輸送現象, 産業図書, 349p., (1981)
- 4) 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.103~107, (1979)
- 5) 神野健二, 他: 沿岸帯水層における地下水塩水楔の混合特性と数値計算手法の開発について, 水資源研究センター研究報告, 第9号, p.61~71, (1989)
- 6) Harleman, D. R. F., et al.: Longitudinal and Lateral Dispersion in an Isotropic Porous Medium, J.Fluid Mech, Vol.16, p.385~394, (1963)