

III-586 移流・拡散問題の物性の逆解析に関する研究

岡山大学工学部 正員 西垣 誠

勝竹中工務店 正員 清水孝昭

電源開発株式会社 正員 江原昌彦

1. はじめに

近年、地下水汚染問題が深刻な社会問題となっている。これに対応するには、地下水汚染の早期発見と、地下水での汚染物質の挙動の定量的な把握が必要となってくる。しかし、地下水や汚染物質の挙動を支配する状態変数やパラメータを推定するために、数多くの観測データを得ることは技術的にも経済的にも非常に困難である。そこで、本研究では、少ない限られた観測データから土壌中での汚染物質の挙動を把握するため、有限要素法、積分有限差分法とともに非線形最小二乗法による最適化手法を用いた逆解析手法を提示し、原位置試験、室内試験において従来の解析方法では、移流・拡散パラメータの算定が困難であった複雑な試験条件や地盤条件下にも適応できる解析方法の提案を行う。

2. 密度勾配を考慮した浸透と移流拡散方程式

本研究に用いた浸透と物質輸送の支配方程式を以下に示す¹⁾。

(1) 飽和・不飽和地下水流

$$\left(S_w \rho \frac{\partial S_w}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} \right) \frac{\partial U}{\partial t} + \left(\epsilon S_w \frac{\partial \rho}{\partial U} \right) \frac{\partial U}{\partial t} \nabla \cdot \left(\frac{k k_{rp}}{\mu} \right) \nabla P - \rho g = Q_p \quad (1)$$

S_w : 飽和度 μ : 流体の粘性
 S_{wp} : 比貯留係数 k : 飽和透水係数
 ρ : 流体密度 k_r : 比透水係数
 ϵ : 間隙率 U : 溶質濃度

(2) 地下水中の溶質輸送

$$\frac{\partial (e S_w C)}{\partial t} + \frac{\partial ((1-e) \rho_s C_s)}{\partial t} = \nabla (e S_w \rho C) + \nabla (e S_w \rho (D_m + D) \nabla C) + e S_w \rho \Gamma_w (1-e) \rho_s \Gamma_s + Q_p C' \quad (2)$$

D_m : 曲率効果のある多孔質媒体内の溶液中の溶質の見掛け上の分子拡散
 C' : 流体ソースの溶質濃度
 C_s : 固体粒子上での吸着物の比濃度
 Γ_w : 生成反応による流体内の溶質量ソース
 Γ_s : 吸着材質内部での生成反応による吸着質量ソース

3. 非線形最小二乗法を用いた逆解析手法

本研究では、逆解析手法の間接法を用いて、観測可能なデータの中で最も信頼性が高い濃度の非定常データより、未知パラメータ縦分散長 a_L 、横分散長 a_T を同定する。また、本解析のフローチャートを図-1に示す。なお、逆解析の解法としてはGauss-Newton法を、安定化手法に修正Marquardt法を用いた。

4. 原位置試験による分散パラメータの同定

(1) 原位置海水浸透実験

電源開発株式会社は、沖縄県において原位置海水浸透実験を行なった²⁾。実験は、防水シートライニングを施した溜池に海水を貯留し、その底部に配したボーリング孔の地下水面下の孔壁より海水を浸透させ、海水の淡水地下水での拡散現象等を測定するものであり、観測用のボーリング孔において塩分濃度の変化を観測する。実験の概念を図-2に示す。

(2) 解析方法および結果

解析モデルを図-3に示す。逆解析に用いる観測データは注入井に比較的近く、縦分散、横分散双方の影響をよく受けると思われるC-8を選んだ。解析ケースおよび結果を表-1に示し、濃度の経時変化の観測結果と解析結果を比較して図-4に示す。なお、CASE1は密度勾配を考慮しない場合であり、CASE2は密度勾配を考慮した場合である。

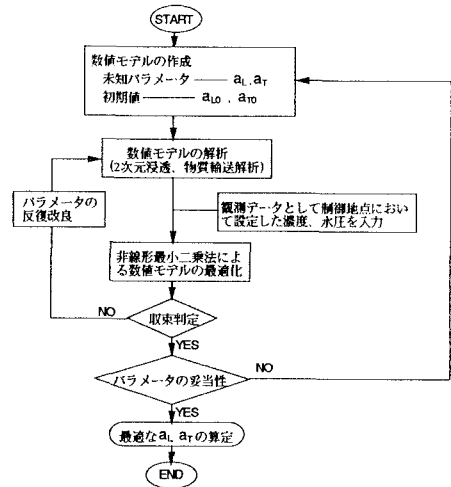


図-1 逆解析フローチャート

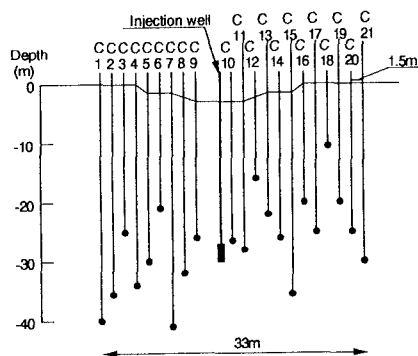


図-2 原位置海水浸透実験概念図

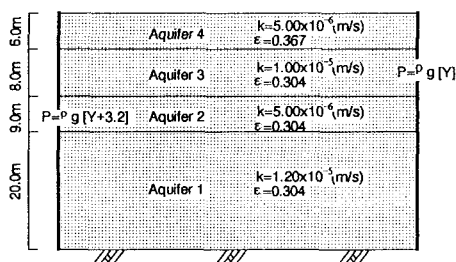


図-3 原位置海水浸透実験解析モデル

表-1 解析ケース

解析 ケース	初期推定値		変化幅		観測点	密度 勾配	残差 平方和	最大 残差平方	同定値	
	al(m)	at(m)	al(m)	at(m)					al(m)	at(m)
CASE1	2.000e+2	2.000e+1	1.000e+2	1.000e+1	C-8	無	3.505e-2	1.930e-2	6.769e+2	2.000e+1
CASE2	2.000e+2	2.000e+1	1.000e+2	1.000e+1	C-8	有	3.640e-3	7.510e-4	1.784e+2	1.189e+2

CASE1において、濃度の観測値と計算値は経時変化の後半部分においてよく一致しているが、前半部分ではズレがみられる。この原因としては、海水注入により観測点C-8, 9が位置する領域において急激な密度変化による密度流によって流れの場が乱れるためと考えられる。

密度勾配を考慮したCASE2においては、濃度の経時変化の全体にわたりよく一致している。また、この場合、同定された縦分散長と横分散長の比が小さくなっているが、これは先述したように密度流に起因するものと考えられる。

観測点C-9において多少ズレがみられるのは、同定された分散パラメータが観測点C-8の局所的なものであることを意味し、地盤の不均質性が示される。

5. 結論

以上より、本解析手法は原理が単純であり、計測誤差などの影響を受けにくく広範囲の適用性が期待できるが、複雑な構成の地盤や流体の密度依存がある問題について逆解析を行う場合は、観測点の設置位置、入力データとして用いる濃度の観測値の選択などを十分に考慮した上で行わなければならないといえる。

〈参考文献〉

- 1) Voss, C. I.: SUTRA: A Finite Elements Simulation Model for Saturated-Unsaturated, Fluid-Density-Dependent Ground-Water Flow with Energy Transport of Chemically-Reactive Single-Species Solute Transport, U.S.G.S. Water Resour. Investigation, pp84-4369, 1984
- 2) H. Mieno, M. Hori, M. Ebara: Experimental on seepage and dispersion of seawater in fractured rock, International Congress on Rock Mechanics, 6th, pp. 191-194, 1987.

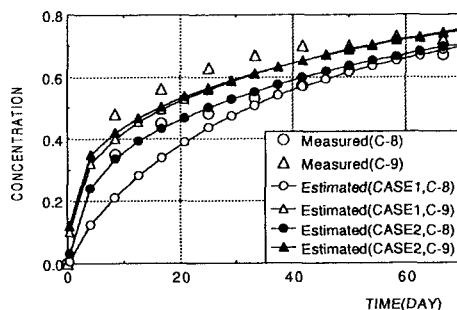


図-4 観測点C-8, C-9における濃度の経時変化