

Ⅲ-A337

地盤内における物質移行パラメータの逆解析手法

岡山大学環境理工学部 正会員 西垣 誠
(株) 大林組 正会員○太田拓郎

1. 背景及び目的

地下水汚染を数値解析によって精度よく予測するためには、地下水中的の汚染物質の挙動の定量的な把握が必要となる。しかし、汚染物質や地盤の分散特性は多種多様であるため、それらに適合したパラメータを用いなければ正確な将来予測が不可能である。そこで本研究では、Eulerian-Lagrangian Numerical Method¹⁾（以下 EL 法）と共に Levenburg-Marquardt Method²⁾による最適化手法を用い、地盤内の汚染状況から移流・分散・吸着パラメータを推定する手法について検討する。

2. 移流・分散・吸着パラメータの逆解析手法

移流・分散の支配方程式は、

$$R_d \theta \rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta \rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta \rho V_i c) - \theta \rho \lambda R_d c - Q_c \quad (1)$$

で表される。ここで、 R_d ：遅延係数、 θ ：体積含水率（ $\theta = n \cdot S_w$ ）、 ρ ：密度、 γ ：溶質の密度比、 c ：濃度（ $0 \leq c \leq 1$ ）、 t ：時間、 D_{ij} ：分散テンソル、 Q_c ：源泉項、 V_i ：実流速（ $V_i = V_d / \theta$ ； V_d ：ダルシー流速）、である。遅延係数 R_d は土中での吸着による遅れを表すもので、一般的に次式で表され、通常 $1 < R_d$ である。

$$R_d = \left(1 + \frac{\rho_s}{\theta} K_d \right) \quad (2)$$

ここで、 K_d ：飽和土に対する吸着係数、 ρ_s ：土粒子の単位体積重量である。

また、分散テンソル D_{ij} は Bear が示した拡散係数も含めた流速に依存する次式を用いる。

$$D_{ij} = \alpha_L |V| \delta_{ij} + (\alpha_L + \alpha_T) \frac{V_i V_j}{|V|} + \alpha_m \tau \delta_{ij} \quad (3)$$

ここで、 α_L ：縦分散長、 α_T ：横分散長、 V_i ：実流速ベクトル、 $|V|$ ：実流速のノルム、 α_m ：分子拡散係数、 τ ：屈曲率、 δ_{ij} ：クロネッカのデルタである。分散テンソル D_{ij} は、不飽和領域においても飽和領域と同じとし、流速依存のみを考慮する。

地下水中の物質移行を評価する有限要素法では、移流項の影響による数値的不安定性を有している。このような問題には、固定座標系と移動座標系の手法を組み合わせた EL 法が有効である。従って順解析には、西垣らが EL 法を用いて開発した解析手法³⁾を用いる。

また、同定手法には、非線形最小二乗法の 1 つである Levenburg-Marquardt Method を用いる。これは、Gauss-Newton 法と最急降下法との折衷であり、安定にかつ早く解を求めることができる。

3. 数値モデルによる解析手法の検証

実験によって観測された濃度変化を入力データとして逆解析を行う場合、分散係数だけを考慮した解析では、逆問題が不適切 (ill-posed) となる可能性がある。このような場合、モデルに応じて遅延係数 R_d や減衰係数 λ を考慮した解析を行わなくてはならない。そこで、分散長に加えて遅延係数や減衰係数を同時に推定することが可能であるか検証する。

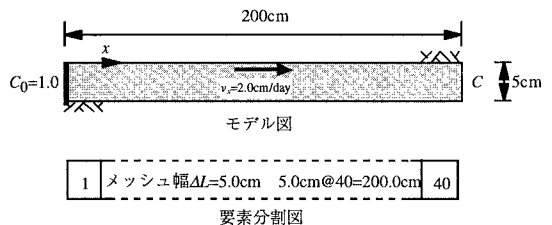


図-1 解析モデル及び要素分割図

キーワード：逆解析、有限要素法、物質移行、分散、吸着

連絡先：〒700-8530 岡山市津島中2-1-1 岡山大学環境理工学部 Tel.086-251-8164, Fax.086-251-8257

分散, 吸着の影響がある観測値から α_L , R_d を同定する。モデルは, 図-1 に示す 1 次元モデルであり, ペクレ数, クーラン数は共に 2 である。 $\alpha_L=2.5\text{cm}$, $R_d=0.5, 1.25$ の順解析結果を観測値として用いる。観測点は $x=100\text{cm}$ である。

観測値と, 同定されたパラメータによる順解析解を図-2 の

破過曲線に示す。観測値と解析値の良好な近似により, 分散長及び遅延係数が同定可能であることが実証された。また, $R_d=0.5$ の場合の観測値から R_d が同定可能であるので, 離脱現象を $R_d (<1)$ によって解析可能であるといえる。

4. 室内実験による解析手法の検証

過去に行われた室内実験の観測値から物質移行パラメータを同定する。観測値には青木らが行った 1 次元不飽和移流・分散実験⁴⁾の観測値を用いる。実験装置には直径 20cm, 高さ 20cm の円筒形セルが用いられ, 試料には豊浦標準砂が用いられた。試料上端から一定浸透強度で塩水が流入され, 下端では一定圧力水頭-50cm が設定された。試料の不飽和浸透特性は, 青木らが示したものをを用いる。濃度変化は下端における電気伝導度により測定された。青木らが示したグラフから濃度変化を読みとり, 観測値として用いる。観測値は, 160~480 分まで 40 分毎の値を用いる。実験モデル・要素分割図を図-3 に示す。

実験値と同定されたパラメータによる順解析値を図-4 に示す。図-4 より, 曲線の立ち上がりは比較的实验値と一致しているが, 300 分を過ぎると実験値と解析値は異なる C/C_0 で収束する。これは, 実験が不飽和土で行われたため, 観測点において残留空気が存在し, 飽和状態に達していないためだと考えられる。

5. 結論

- (1) 離脱の現象を $R_d < 1$ とすることで解析可能である。
- (2) 分散長・遅延係数の逆解析手法の妥当性が検証された。

<参考文献>

- 1). Neuman, S.P.: A Eulerian-Lagrangian Numerical Scheme for the Dispersion Convection Equation Using Conjugate Space-Time Grids, J. of Computational Physics, 41, pp.270-294, 1981.
- 2). 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 1982.
- 3). 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析に関する研究, 土木学会論文集 No.511/III-30, pp.1715-1716, 1995.
- 4). 青木一男, 福田護, 壺内昌浩, 中川進: 非定常移流分散実験による不飽和分散係数の推定, 1997 年秋期講演会講演要旨, 日本地下水学会, pp.16-17, 1997.

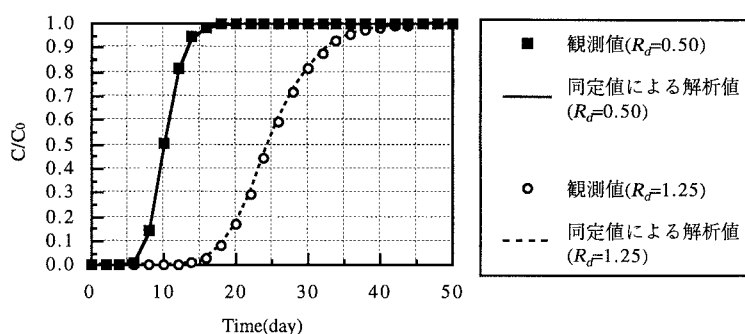


図-2 同定値による破過曲線

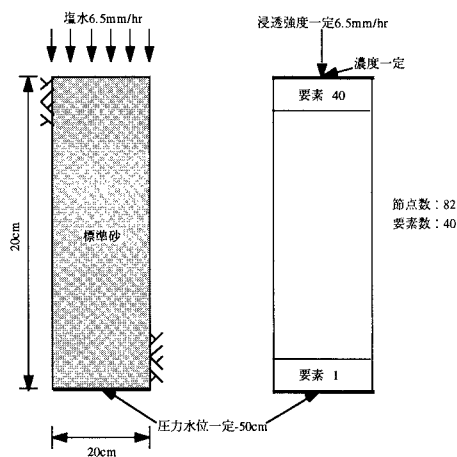


図-3 実験モデル及び要素分割図

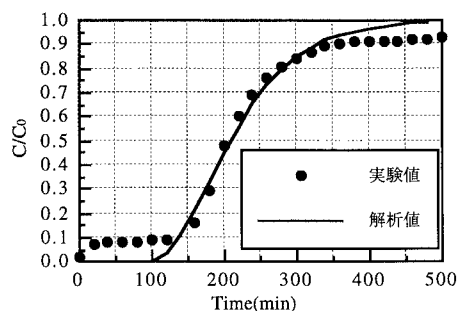


図-4 破過曲線