

Ⅲ - A239

不飽和地盤の物質移動問題に関する逆解析

大阪工業大学大学院 学生会員 壺内 昌浩

大阪工業大学工学部 正会員 青木 一男

大阪工業大学工学部 正会員 福田 護

大阪工業大学大学院 中川 進

1. はじめに

地表面上の汚染物質は一般に不飽和地盤を移動し地下水面に到達する。このような不飽和地盤の物質移動を議論する場合、不飽和地盤内の移流分散現象を解明する必要がある。飽和地盤中の物質移動はかなり研究が進んでいるが、不飽和地盤中の物質移動問題は十分に評価されていないのが現状である。そこで、本研究では、不飽和地盤の物質移動問題に必要となるパラメータである分散長を逆解析的に推定する手法について紹介する。

2. 不飽和地盤に対する移流分散解析手法

(1) 不飽和浸透解析

不飽和浸透を解析する場合、不飽和浸透特性が必要となる。そこで、本論文では不飽和浸透特性の内、体積含水率－圧力水頭の関係として式(1)、(2)に示す van Genuchten モデル¹⁾を用いる。また、体積含水率－不飽和透水係数の関係としては式(3)に示す Mualem の式¹⁾を用いることにする。

$$Se = \left(\frac{1}{1 + |\alpha\psi|^n} \right) \quad (1)$$

ここで、 α 、 n は定数である。また、 Se は有効飽和度であり、次式で定義される。

$$Se = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_{sat} - \theta_r)} \quad (2)$$

ここで、 θ_r ：最小含水量、 θ_{sat} ：飽和体積含水率である。

$$k_r = Se^{1/2} \left\{ 1 - (1 - Se^{1/m})^m \right\}^2 \quad (3)$$

ここで、 m は定数で $m = 1 - 1/n$ であり、 k_r は不飽和透水係数 $k(\psi)$ と飽和透水係数 k_s の比である。

また、これらの関係を規定する各パラメータ値としては、表-1に示す値を採用した。このような不飽和浸透特性を用いて、鉛直1次元不飽和浸透有限要素解析を行った。

(2) 不飽和移流分散解析

不飽和地盤中の移流分散解析手法としては、特性曲線型有限要素法を用いた。この解析において必要となる分散長に関しては、不飽和地盤に対して棚橋²⁾が提案している式を変形した式(4)を用いた。

$$a_{L1} = a_{L2} \cdot \left(\frac{Se_2}{Se_1} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、添字は、実験条件有効飽和度 Se_i 、実流速 v_i のときの分散長 a_{Li} である。

key word: 不飽和地盤、物質移動、不飽和浸透、逆解析、有限要素法

連絡先：大阪工業大学(〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1 TEL 06-954-4109 FAX 06-957-2131)

表-1 不飽和浸透特性

α (1/cm)	0.0522
n	5.6784
θ_{sat}	0.3
θ_r	0.0
k_s (cm/s)	0.6

3. 逆解析手法

パラメータを解析的に決定しようとするときに用いられる解法は非線形最小二乗法を用いるのが一般的である。最小二乗法では目的関数の重み付き残差二乗和は

$$S(x) = \sum_{i=1}^n w_i [y_i - f_i(x)]^2 \quad (5)$$

ここで、 x :パラメータ、 w_i :重み、 y_i :観測値、 n :観測値の数、 f_i :モデル関数である。

式(5)を最小にする x を見いだすためその極小値を求める手法としては、Davidon-Fletcher-Powellの可変計量法、共役傾斜法、シンプレックス法などが挙げられるが、本研究では最も基本的で、比較的簡単なアルゴリズムの割に収束性がよいと思われる Gauss-Newton 法を採用した。

4. 解析モデルと結果

解析モデルとしては、長さ 20cm の鉛直 1 次元有限要素モデルを要素数 68、節点数 69 に分割した。試料の初期状態としては真水で飽和した状態を想定した。また、境界条件としてはこの初期状態から試料上端から 1mm/hr の浸透強度で汚染物質を流入し、下端では圧力水頭-50cm の圧力一定条件を設定した。

このような初期条件、境界条件のもとで解析した結果、下端から流出する汚染物質濃度の経時変化を図-1に示す。飽和地盤における汚染物質濃度の経時変化は一般的に S 字曲線で得られるが、今回の不飽和地盤の場合はそれとは異なった形状が得られた。

次に、逆解析の結果について述べる。表-2に示す

分散長の真値を与えた解析結果を観測値とみなし、これとは異なる分散長の初期値から出発して、逆解析から得られる分散長の推定値が真値にどれだけ近づくかで逆解析の妥当性を検討した。その結果、繰り返し回数 12 回で残差二乗和 4.36×10^{-8} と小さくなり、かなりの精度で推定できることが明らかになった。

5. おわりに

本論文では、不飽和地盤中の物質移動を解析する上で、必要となる分散長を逆解析的に推定する手法を示した。今後は、室内実験とこの手法と組み合わせて実際の試料に対して適用する予定である。

《参考文献》

- 1) van Genuchten, M.th.:A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J.,Vol.144,pp.892-898, 1980.
- 2) Mualem, Y.:A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resou. Res., Vol.12, pp513-522, 1976.
- 3) 棚橋秀行、佐藤健、湯浅晶、宇野尚雄：不飽和砂層中の溶質の分散・吸着・移流、地下水環境に関するシンポジウム 96 論文集、pp51-64、1996.

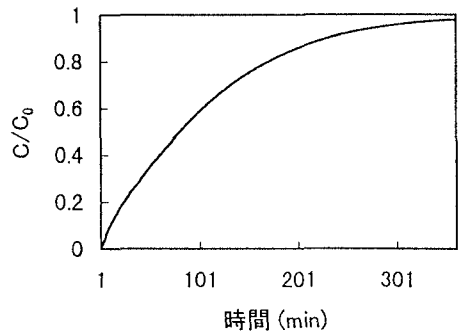


図-1 濃度の経時変化

表-2 分散長の推定値と残差二乗和

繰返し回数(回)	推定値(cm)	残差二乗和
1	1.82E+00	6.45E-02
2	3.01E+00	2.64E-02
3	4.61E+00	1.00E-02
4	6.48E+00	3.57E-03
5	8.45E+00	1.14E-03
6	1.02E+01	3.37E-04
7	1.15E+01	8.70E-05
8	1.23E+01	2.02E-05
9	1.27E+01	4.32E-06
10	1.29E+01	9.76E-07
11	1.30E+01	2.22E-07
12	1.31E+01	4.36E-08
初期値	1.00E+00	—
真値	1.31E+01	—