

電気浸透現象の解析手法に関する一考察

（株）フジタ技術センター土木研究部 正会員 仲沢 武志

1.はじめに

汚染された地盤を浄化する手法には種々の手法が考えられる。対象地域が稼働中の工場である場合などには、その生産性の面から地下水の汲み上げなどによる原位置浄化手段が採用されることが多い。地下水汲み上げ手法は、地盤の透水性がそこそこあれば効果が期待できるが、対象地域の透水性は制御できないのが普通である。透水性が低い地盤において浄化行為を行なう場合、そのまま地下水汲み上げだけで対応することは効率的でなく、吸引などを併用することも考えられる。また、少しでも原位置浄化の効率を上げるために電気浸透現象の採用も近年話題に上がってきているように思われる。しかしながら、電気浸透の効果を事前に予測あるいは評価する一般的な手段は未だ皆無に近いのも現状であろう。そこで、本研究では、電気浸透現象に対する一般化された予測解析手法について考察する。

2.電気浸透現象に対する解析モデル

(1) 電気浸透現象による流速

従来の電気浸透現象における評価式は次式が提案されている¹⁾。

$$Q = k^{(e)} \frac{\Delta V}{L} A \quad (1)$$

ここに、 Q ：流量、 V ：電位、 L ：供試体長さ、 A ：供試体断面積、 $k^{(e)}$ ：電気浸透透水係数

式(1)は基本的に1次元表記での電気浸透現象による土中水の移動流量を求めるものであり、このままの形で2次元や3次元問題に適用することはできない。そこで、ここでは先ず式(1)を2次元や3次元問題に適用することが可能となるように一般化する。式(1)の両辺を断面積で除すると次式となる。

$$\frac{Q}{A} = v^{(e)} = k^{(e)} \frac{\Delta V}{L} \quad (2)$$

式(2)は通常の浸透流解析におけるダルシー則と形式的には類似の表記となる。これに添字を付けることで、次式のように多次元に拡張する。

$$v_i^{(e)} = k_{ij}^{(e)} \frac{\partial V}{\partial x_j} \quad (3)$$

式(3)が一般化された電気浸透による流速評価式である。ただし、電気浸透透水係数の符号は、対象となる地盤の ζ 電位に依存する。

(2) 電気浸透現象を考慮した支配方程式

ところで、地盤中の水分移動の要因には電気浸透現象を施した上でもヘッド差による流速、つまり、通常の浸透現象を伴うのが普通と考えられる。そこで、本研究では、地盤内の流速は電気浸透現象による流速と浸透現象での流速から相互作用なしで発生するものとする。

つまり、全体としての流速 $v_i^{(T)}$ を

$$v_i^{(T)} = v_i^{(D)} + v_i^{(e)} \quad (4)$$

で評価できるものとする。

次に、流量やヘッド分布を計算するために、式(4)の流速を場の方程式である連続の式に代入する。これにより、電気浸透現象を伴う一般化された支配方程式を得る。

場の方程式は、非定常状態も考慮すると次式で与えられている。

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f v_i^{(T)}) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \theta) \quad (5)$$

ここに、 θ ：体積含水率、 ρ_f ：地下水の密度

なお、ここでは、電気浸透現象が生じている場合でも場の方程式としての連続の式はそのままの形で成り立つものとしている。 $\theta = nS_r$ (n ：間隙率、 S_r ：飽和度)などの関係を用いた上で、通常の手続き²⁾により、電気浸透を考慮した流量とヘッドの関係を表わす支配方程式が得られる。

$$(k_{ij}^{(D)} h_{,j} - k_{ij}^{(e)} V_{,j}) = c(\phi) \frac{\partial h}{\partial t} + S_a \frac{\partial n}{\partial t} \quad (6)$$

ここに、 $c(\phi)$ ：比水分容量、 S_a ：貯留係数

式(6)が本研究で提案する電気効果を考慮に入れた浸透現象の支配方程式である。

キーワード：地盤汚染、透水、電気浸透

連絡先：〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1 TEL 046-250-7095 FAX 046-250-7139

(3) 電圧分布の考慮³⁾

式(3)あるいは式(6)からわかるように、提案する方程式を計算するには電位分布が必要になる。したがって、本解析手法を完成するには、式(6)とは別に電氣的な計算も必要となる。これには、次式に示すような一般化されたオームの法則による電気解析手法を用いる。

$$(\sigma_{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j})_{,i} = 0 \quad (7)$$

ここに σ_{ij} : 一般化電気伝導度マトリックス

式(7)は通常電荷密度の時間変化を伴う式となっているが、土中水の流速に対して電荷の移動速度ははるかに速いものと考えられる。よってここでは、電氣的な現象は準定常的なものであるものとし、式(7)を用いることとする。

式(6)と式(7)を差分法や有限要素法によって離散化した上で解析プログラムを作成することで任意の初期・境界条件における解を得ることが可能となる。

から領域内全体の平均流速は次式のように求められる。

3.適用例

本研究で提案した解析モデルの適用性を簡単な例題で示す。図1にヘッド分布、図2に電圧分布を示し、図3に流速分布、図4に電流密度の分布を示す。また、作用電圧による流量の変化の一例を図5に示す。特に、図5に着目すれば作用電圧の上昇によって流量が増加している。なお、同図には試行した室内模型試験の結果も示してあるが、ほぼ良好に表現できていると思われる。

4.あとがき

本文では、一般化した電気浸透解析モデルを提案した。条件次第では比較的良好な結果が示されられると思われるが、適用範囲の限定などについてさらに検討を進めたい。

参考文献

- 1) Casagrande, L.: Electro-Osmotic Stabilization of Soil, Harvard Soil Mechanics Series, No.38, 1952
- 2) 赤井浩一、大西有三、西垣誠：有限要素法による飽和—不飽和浸透流の解析、土木学会論文報告集、第264号、1977
- 3) 砂川重信：電磁気学、物理テキストシリーズ4、岩波書店

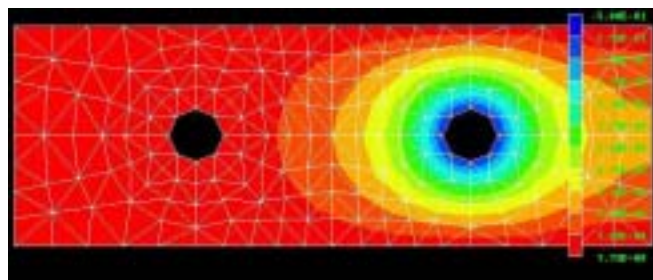


図1 ヘッド分布

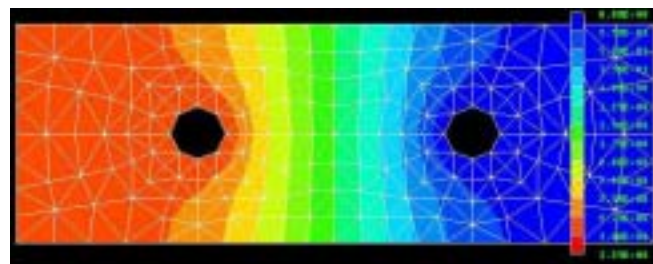


図2 電圧分布

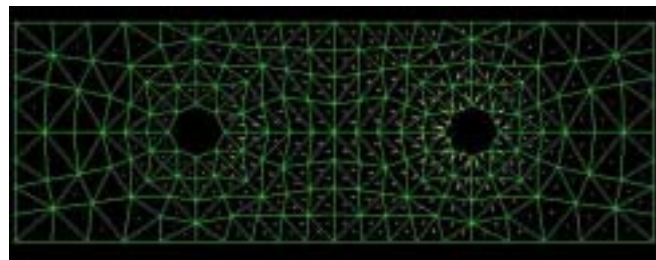


図3 流速分布

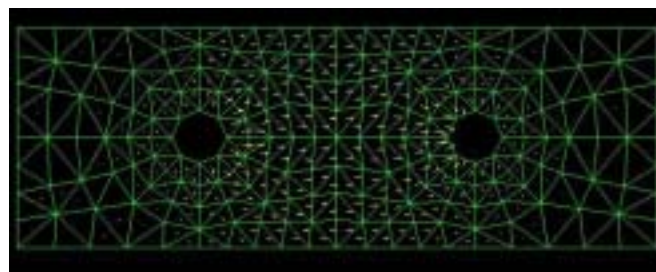


図4 電流密度分布

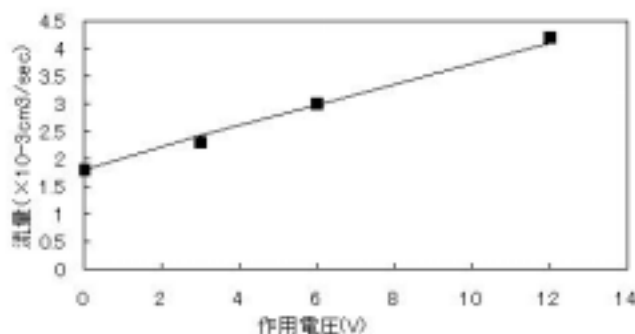


図5 作用電圧と流量の関係

透水係数: $6.5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$

電気浸透透水係数:

$2.5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec/V/cm}$