

## 表計算ソフトを用いた浸透流解析モデルの開発 Numerical simulation model of seepage flow using Spreadsheet

○粟生田忠雄\*, 小澤尚輝\*, 安田 裕\*\*

AODA Tadao, OZAWA Naoki, YASUDA Hirishi

### 1. 本研究の背景と目的

表計算ソフトの 2 次元セルを浸透流解析の格子点として、差分化した基礎式や境界条件を代入すれば解を求められる。

本研究の目的は、上記の表計算ソフトの特徴を活かし、定常浸透実験の結果を再現する数値解析モデルを構築することである。

### 2. 室内浸透実験

アクリル製の矩形堤体(高さ 90cm, 水平 60cm, 奥行き 30cm)に試料(川砂, 平均粒径 0.5mm, 密度 2.76g/cm<sup>3</sup>)を乾燥密度 1.50g/cm<sup>3</sup>にし充填した。体積含水率, 温度, EC 測定 of センサー 5 本(デカゴン製, 5TE)と圧力水頭測定用の 8 個のマノメータを設置した(Fig.1)。5 本のセンサーの校正曲線, および排水過程での水分特性曲線を実験前に求めた。試料の飽和透水係数  $k_s$  は,  $1.1 \times 10^{-2}$  (cm/s) であった。

### 3. 表計算ソフトを用いた浸透流解析

流れ関数  $\psi$  の基礎方程式は,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(x, y) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(x, y) \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

である<sup>1)</sup>。またポテンシャル  $h$  の基礎方程式は,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{k_y(x, y)} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{k_x(x, y)} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

である<sup>2)</sup>。ここに,  $h$ : ポテンシャル,  $\psi$ : 流れ関数,  $x, y$ : それぞれ水平, 鉛直の座標軸である。なお, (1)式は定常浸透でのみ適応可能である。流れ関数  $\psi$  を差分化すると,

$$\psi_{i,j} = \frac{\Delta y^2 \left( \frac{\psi_{i+1,j}}{k_{y,i,j}} + \frac{\psi_{i-1,j}}{k_{y,i-1,j}} \right) + \Delta x^2 \left( \frac{\psi_{i,j-1}}{k_{x,i-1,j}} + \frac{\psi_{i,j+1}}{k_{x,i-1,j+1}} \right)}{\Delta y^2 \left( \frac{1}{k_{y,i,j}} + \frac{1}{k_{y,i-1,j}} \right) + \Delta x^2 \left( \frac{1}{k_{x,i-1,j}} + \frac{1}{k_{x,i-1,j+1}} \right)} \quad (3)$$

となる。同様にポテンシャル  $h$  を差分化すると,

$$h_{i,j} = \frac{\Delta x^2 (k_{y,i,j-1} h_{i,j-1} + k_{y,i,j} h_{i,j+1})}{\Delta x^2 (k_{y,i,j-1} + k_{y,i,j}) + \Delta y^2 (k_{x,i,j} + k_{x,i-1,j})} + \frac{\Delta y^2 (k_{x,i,j} h_{i+1,j} + k_{x,i-1,j} h_{i-1,j})}{\Delta x^2 (k_{y,i,j-1} + k_{y,i,j}) + \Delta y^2 (k_{x,i,j} + k_{x,i-1,j})} \quad (4)$$

である。ここに,  $i, j$ :  $x$  方向および  $y$  方向のセル(各解析要素の節点)番号を表す添え字,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ : 要素刻み幅,  $k$ : 不飽和透水係数である。

(3), (4)式がそれぞれ浸透領域における流れ関数とポテンシャルの一般式である。試料の水分特性曲線は,

$$\left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \frac{\alpha}{\alpha + |p|^\beta} \quad (5)$$

で表す。なお不飽和透水係数  $k$  は,

$$k = k_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^m \quad (6)$$

である。ここに,  $k_s$ : 飽和透水係数,  $\theta$ : 体積含水率,  $\theta_r$ : 残留水分,  $\theta_s$ : 飽和水分,  $\alpha$ ,  $\beta$ , および  $m$ : それぞれフィッティングパラメータである。なお, 事前に測定した水分特性曲線(図 2)を Table 1 のパラメータで表した。

### 4. 結果と考察

矩形堤体の上流側水位 81.8cm, 下流側水位 77.7cm として定常浸透させた。この境界条件における手書き流線網は図 3 のようになった。図 2 の水分特性曲線から試料の毛管上昇高さは約 20cm であった。(3)式, (4)式をセルに代入し水平方向の刻み  $\Delta x=2.4$ cm, 鉛直方向の刻み  $\Delta y=4.1$ cm として解析した。流線分布は上流側境界から水平に堤体内に浸透し, 堤体中央部で盛り上がり, 下流境界で等ポテンシャル線に直交するようになった。等ポテンシャル分布は飽和領域に

\*新潟大学農学部 Faculty of Agriculture, Niigata university, \*\*鳥取大学乾燥地研究センター Arid Land Research Center Tottori University キーワード: 浸透流, 差分法, 境界条件

おいてほぼ直線的になり、不飽和領域で左右に広がることで、流線との直交性を保つようになった。また、等ポテンシャル線間隔は上・下流境界付近で小さく、中央部で大きくなった。ただし、浸透領域上端の気と接する流線とは直交関係を示すことができなかった。手書きの流線網は FEM 等の数値解析とほぼ同等の精度で  $\psi$ 、 $h$  の解を求められることがわかっている。エクセルを用いた浸透流解析(Fig. 4, Fig.5)は既応の FEM 解析<sup>2)</sup> とほぼ同等の精度で再現できた。

### 5. まとめ

表計算ソフトを用いた飽和不飽和浸透流の数値解析を行った。実験データの再現は未確認な点があるが、流線と等ポテンシャル線をほぼ合理的に描くことができた。解析モデルの精度向上のため、実験データの再現性を高めることが今後の課題である。

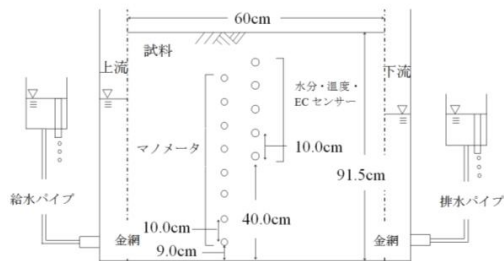


Fig.1 浸透実験装置の模式図

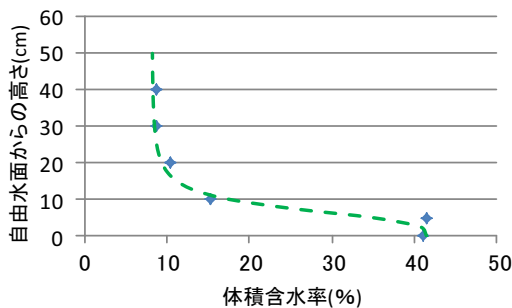


Fig.2 排水過程の水分特性曲線(プロット: 実測値, 点線: フィッティングパラメータを用いた計算値)

Table 1 フィッティングパラメータ

| $\alpha$ | $\beta$ | $\theta_s$ | $\theta_r$ |
|----------|---------|------------|------------|
| 1000     | 3.4     | 0.415      | 0.082      |

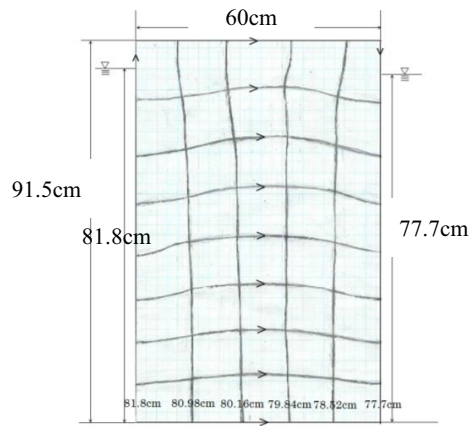


Fig.3 定常浸透の流線網 (上流 81.8cm, 下流 77.7cm)

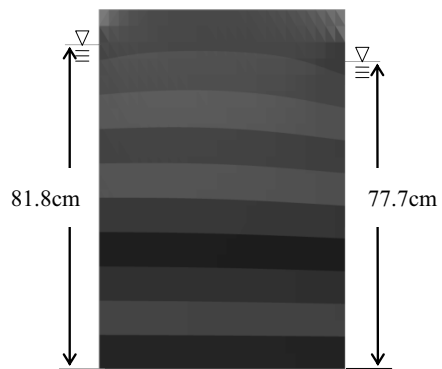


Fig.4 定常浸透の流線分布 (上流 81.8cm, 下流 77.7cm)

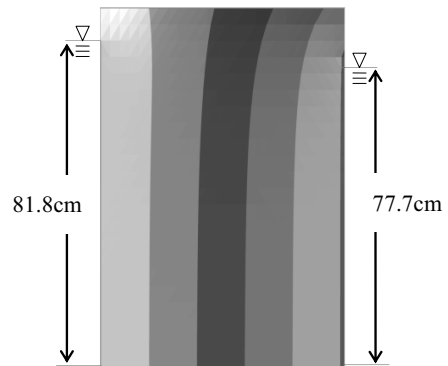


Fig.5 定常浸透の等ポテンシャル分布 (上流 81.8cm, 下流 77.7cm)

### 引用文献

- 1) 藤縄克之(2010): 環境地下学 共立出版
- 2) 吉田ら(1996): 浸透流における流れ関数と流線網の有限要素法による数値解析 農士学会論文集 185号, pp51-60.