

II-11

ヒステリシスを考慮した不飽和浸透解析

東北大学大学院 学生会員 ○高橋雅之

東北大学大学院 学生会員 横尾善之

東北大学大学院 フェロー 沢本正樹

1. はじめに

気候変動による降水への影響や水需要の増加に対して、日本における貯留施設の役割は治水・利水面でより重要になってきている。環境面の配慮から、今存在する森林土壌の保水能力が最大限発揮されているかを評価する必要がある。不飽和層での浸透理論 (Richards の方程式) を用いた森林土壌に対する数多くの研究や解析が行われているが、これらの研究では土壌の履歴現象であるヒステリシス効果をあまり考慮していない。

本研究ではヒステリシス効果を考慮した不飽和浸透解析モデルを構築し、流出量への影響を評価、検討することを目的とした。

$$C \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_r \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} - K_r \sin \alpha \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} - K_z \cos \alpha \right) \quad (1)$$

$$\left[\begin{array}{l} C: \text{比水分容量 (1/cm)}, \alpha: \text{斜面の勾配} \\ \theta: \text{体積含水率}, \psi: \text{圧力水頭 (cm)} \\ K_r, K_z: x, z \text{ 方向の透水係数 (cm/s)} \end{array} \right]$$

体積含水率 θ と圧力水頭 ψ の関係には式(2)に示す谷式¹⁾を、不飽和透水係数 K と体積含水率 θ の関係には式(4)に示す一般化 Kozeny 式²⁾を用いて、式(1)から(4)を完全陰形差分式として SOR 法により解いた。

2. 不飽和浸透解析モデル

2-1 モデル斜面の概要

本研究で用いたモデル斜面を図1に示す。AB, BC はそれぞれ分水嶺と不透水面を表しており、水の移動はないものとする。CD は斜面と接している水深を表す。 n_x, n_z はそれぞれ, x, z 方向のメッシュの個数である。

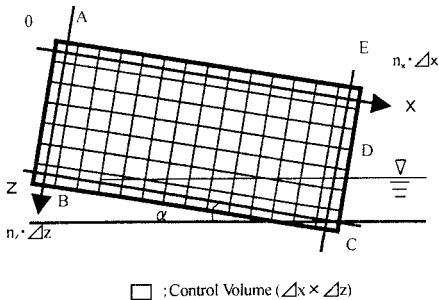


図1 モデル斜面の概要

2-2 基礎方程式

本研究で用いた基礎方程式 (Richards の方程式) を式(1)に示す。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi'}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(-\frac{\psi'}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \psi' = \begin{cases} \psi & (\psi < 0) \\ 0 & (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$K = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (4)$$

$$\left[\begin{array}{l} \theta_s: \text{飽和体積含水率}, \theta_r: \text{残留体積含水率} \\ \psi_0: C \text{ が最大となる } \psi \text{ (cm)}, \beta: \text{定数} \\ K_s: \text{飽和透水係数 (cm/s)} \end{array} \right]$$

2-3 境界条件

図1のAE, CE, ABおよびBCの各境界条件はそれぞれ式(5), (6), (7), (8)に示す。

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \cos \alpha \left(1 - \frac{r(t)}{K_r(\psi)} \right) \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \psi = 0 \quad (\text{飽和時}) \\ \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} = \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} = 0 \quad (\text{不飽和時}) \end{array} \right\} \quad (6)$$

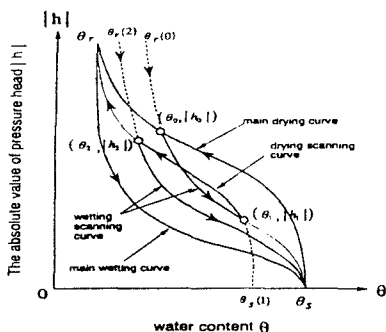


図2 走査曲線と折り返し点の概略

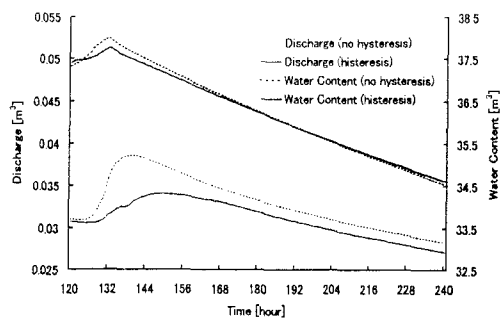


図3 流出量と含水量

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \sin \alpha \quad (7)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \cos \alpha \quad (8)$$

[$r(t)$: 浸透量 (正值: 浸透, 負値: 蒸発散)]

2-4 ヒステリシスの導入

本研究では、簡便で実態をよく表す Kool and Parker の解析的方法³⁾を改良することにより走査曲線を求めた (図2)。

3. 数値実験

3-1 実験概要

数値実験に用いる共通パラメータを表1に示す。なお、初期圧力水頭を全てゼロとした。実験では蒸発散は無視し、降水量は実験開始から 121～132 時間後の 12 時間で 10mm/hour とし、10 日間分の土壌からの流出量を求めた。

表1 共通モデルパラメータ

Name of Parameter	Value of Parameter
n_x	60
n_z	20
$\angle x$ (m)	0.5
$\angle z$ (m)	0.1
K_{sx}, K_{sz} (cm/sec)	1.0×10^{-3}
α (deg)	25
θ_s	0.70
θ_r	0.30

3-2 結果と考察

降水時間帯前後における流出量と含水量を図3に示す。ヒステリシスを考慮した場合の方が流出量のピークおよび変化が小さい。また、計算終了時における総流出量は考慮しない場合の 8.19m^3 と比べて 7.93m^3 と少なく、総含水量は考慮しない場合の 34.55m^3 に対して 0.06m^3 だけ多くになっていた。

4. おわりに

今回の結果ではヒステリシスによる流出量の低減効果があることはわかったが、実際のデータとの比較は行っておらず、実現象の再現性は保証できていない。今後は浸透実験と比較して実現象の再現性を評価、検討することで、ヒステリシスと土壌の保水能力の関係を解明することを目指す。

謝辞

本研究は河川懇談会の援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷誠：一次元鉛直浸透によって生じる水面上昇の特性，日本林学会誌，64(11)，pp.409-418，1982。
- 2) Brutsaert, W. : The permeability of a porous medium determined from certain probability laws for pore size distribution, Water Resources Research, Vol.4, No.2, pp.425-434, 1968.
- 3) Kool, J. B. and Parker, J. C. : Computer simulation model of evaluation of soil hydraulic properties from one-dimensional unsaturated flow by non-linear least-squares parameter estimation, Soil and Environmental Science, Ver.2.2., 1990.