

ヒステリシスを考慮した不飽和浸透に関する解析的研究

港区環境まちづくり支援部環境課 福留 多佳子
 芝浦工業大学大学院 学生会員 渡部 春樹
 芝浦工業大学 正会員 守田 優

1. 研究背景と目的

近年、土壤汚染問題が懸念されるようになり、「土壤汚染対策法」が施行され、土壤に関する環境アセスメントも始まっている。土壤中においては、降雨によって浸透、乾燥、飽和、不飽和が生じ、また、雨水が土壤に浸入、排水することによる複雑な溶質移動が汚染を複雑化している。したがって、土壤・地下水環境を保全・管理するためには、土壤内への雨水の不飽和浸透過程・土壤中の溶質移動を把握することが重要である。

そこで本研究では、土壤中の水の複雑な移動、特にヒステリシスを考慮した降雨による土壤水の浸入、排出を伴う不飽和浸透をモデル化することを目的とする。

2. モデルと解析手法

土壤の圧力水頭と体積含水率の間には、脱水過程と吸水過程とで別のルートを通るヒステリシスが存在する。ヒステリシス効果は、土壤内で湿潤と乾燥が、同時あるいは続いて生じるような複合的なプロセスの場合に影響する。Fig.1は、飽和から乾燥へ、及びその逆の方向についての二組の主要経路を示している。ヒステリシスは、脱水時における毛管下降と吸水時における毛管上昇が同一ではないことが原因である。

本研究では、ヒステリシスを考慮したモデルで計算する場合と、ヒステリシスを考慮せずに脱水過程と吸水過程を別々に計算する場合の地下流のモデル化を行い、計算結果について考察する。本モデルでは、不飽和浸透流の方程式として Richard の方程式(1)を適用し、その数値解析手法は ADE(Larkin)法を用いる¹⁾。また、土壤水分量と圧力との関係式は、King が示した経験式(2)を適用し、不飽和透水係数は Gillham et al.が示した(3)式を用いる。ヒステリシスについては、Mualem³⁾によって提案されたモデルを用いた。このモデルでは、あらゆる Scanning curve を単純な関数を用いることにより、Main drying curve と Main wetting curve のみから導くことができ、複雑なヒステリシスの問題を簡単なモデルで表現している。

キーワード：ヒステリシス、脱水、吸水、不飽和浸透

連絡先：〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5 都市環境工学研究室 TEL03-5859-8353

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \alpha_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \alpha_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \alpha_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (1)$$

$$\theta(\psi) = \theta_0 \left[\frac{\cosh(\psi / \psi_m)^\kappa - (\theta_0 - \theta_r) / (\theta_0 + \theta_r)}{\cosh(\psi / \psi_m)^\kappa + (\theta_0 - \theta_r) / (\theta_0 + \theta_r)} \right] \quad (2)$$

$$K(\theta) = \mu \theta^\eta \quad (3)$$

H : ピエゾ水頭, ψ : 圧力水頭, θ : 体積含水率

K : 透水係数, $\alpha_i \theta_0, \psi_m, \theta_r, \kappa, \mu, \eta$: パラメータ

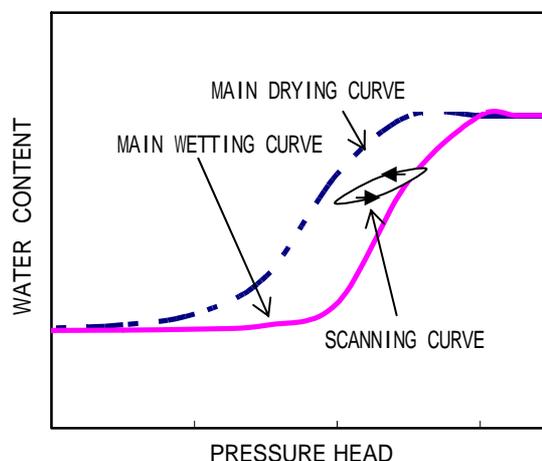


Fig.1 Water content-pressure head hysteresis loop

3. モデルの検証

モデルの検証には、Pickens and Gillham²⁾が示した、不飽和状態における溶質輸送の有限要素法による解析結果を用いる。モデルの条件として、試料の長さが 150cm の均質な砂で、この試料上部に 5cm の水を与え、浸透強度は 2.83×10^{-2} (mm/sec) とする。30 分後における脱水・吸水過程について、それぞれの圧力水頭(ψ)、体積含水率(θ)、間隙水速度(v)を Pickens and Gillham のモデルの計算結果と比較し、本モデルの適用性を検証する。

Fig.2 の(a)(b)(c)では、それぞれ 30 分後における Pickens and Gillham の計算と本モデルの脱水・吸水過程の計算結果を比較している。この 3 つのグラフにおいて、二つのモデルの計算結果はほぼ一致しており、圧力水頭、含水率だけでなく、間隙水速度も排水の場合と吸水の場合でほぼ同じ計算結果となった。

また、(a)の土壌の浅い場所で、同じ含水率でも drying curve より wetting curve の圧力が大きく、(b)の土壌の深い場所で、wetting curve より drying curve の毛管上昇が高いことがわかる。これは Fig.1 の二つの曲線の特性に対応する。

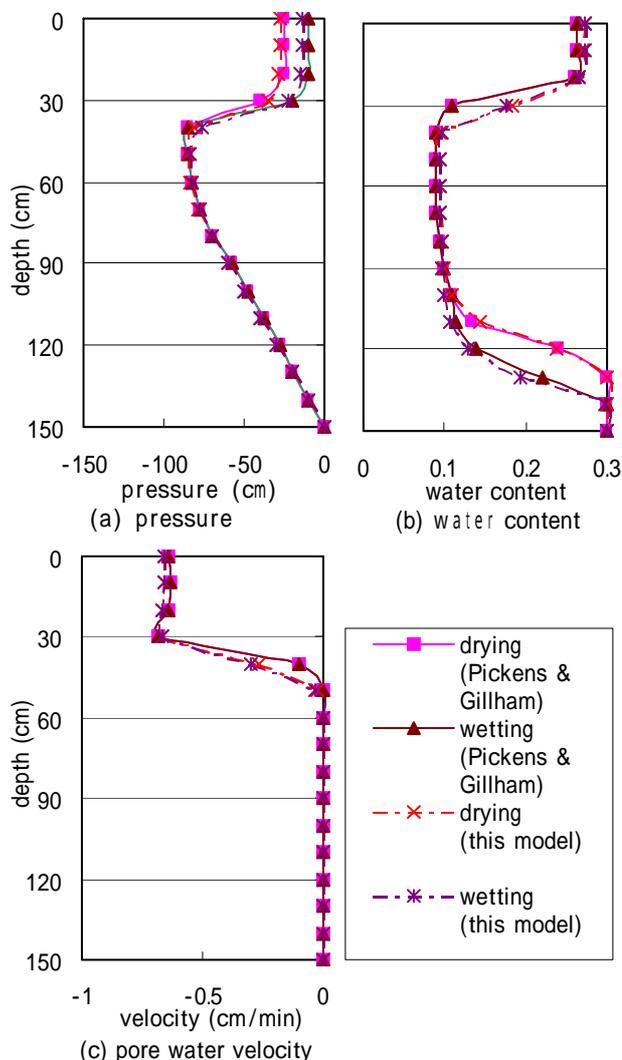


Fig.2 Comparison of Two Calculation Results

4. ヒステリシスを考慮した不飽和浸透モデル

本モデルにおけるヒステリシスを考慮した場合と考慮しない場合のモデルを比較し、考察する。

まず、ヒステリシスを考慮したモデルの考え方を述べる。乾燥した土壌に降雨が生じると、雨水が浸透した部分の土壌は湿る。したがって、初めに drying curve を選択して計算したモデルを、雨水が浸透した場所から徐々に wetting curve に置換する手法を用いる。置換は、ある点で $(\partial\psi/\partial t)$ の符号の変化が見られた場合に drying curve を wetting curve に移すことで可能となる。

Fig.3.の(a)(b)は、60分後における、本モデルのヒステリシスを考慮する場合としない場合の圧力水頭値と体積含水率値を比較している。土壌が乾燥した状態から雨を

降らし始めるので、土壌上部は雨水が浸透して wetting の状態となり、下部はまだ雨水が達しておらず、drying の状態をとっていないわけではない。(a)(b)において、ヒステリシスを考慮したモデルで計算した曲線が、土壌の浅い場所で高い圧力を示す wetting curve と一致し、また土壌の深い場所で大きい含水率を示す drying curve と一致していることがわかる。以上より、ヒステリシスを考慮した不飽和浸透モデルの妥当性が確認できた。

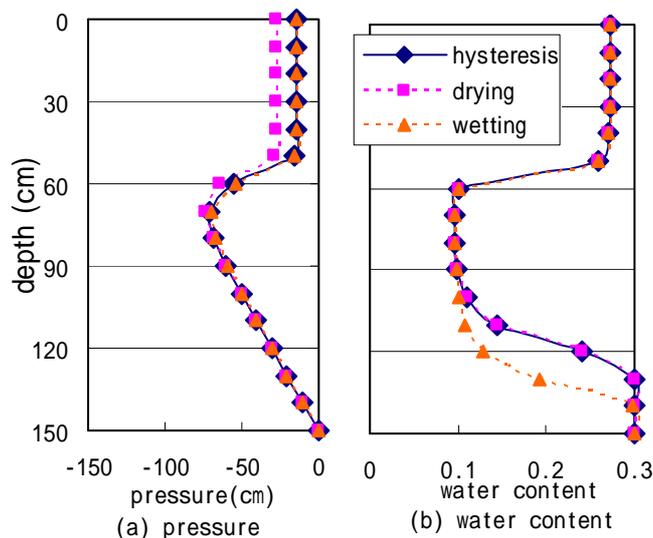


Fig.3 Comparison of hysteresis and nonhysteresis

5. 結果と今後の課題

本研究では、ヒステリシスを考慮した場合としない場合における土壌の不飽和浸透モデルを作成した。本モデルの計算結果は、Pickens and Gillham のモデルの結果と一致し、モデルの妥当性を確認できた。また、ヒステリシスを組み込むことと、その圧力水頭、体積含水率との関係についても明らかにすることができた。

最後に今後の課題として、本研究においては、降雨が生じ、湿っていく過程はモデル化できた。しかし、雨が止み、土壌上部が湿潤状態から再び乾燥状態に移行する過程のモデル化までは至らなかった。今後、乾湿が交互に生じる過程、すなわち scanning curve を直接適用するモデルを作成することが必要となる。

引用文献

- 1) Morita, M. and Yen, B.C. (2002) : "Modeling of Conjunctive Two-Dimensional Surface-Three-Dimensional Subsurface Flows", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.128, NO.2, 184-200.
- 2) Pickens, J.F. and Gillham, R.W. (1980); "Finite Element Analysis of Solute Transport Under Hysteretic Unsaturated Flow Conditions", Water Resources Research, VOL. 16, NO. 6, 1071-1078.
- 3) Mualem, Y. (1974); "A Conceptual Model of Hysteresis", Water Resources Research., VOL. 10, NO.3, 514-520.