

山地斜面における雨水鉛直浸透の実態と数値シミュレーションの比較

京都大学農学研究科 ○梁 偉立, 小杉 賢一朗, 林 祐妃, 水山 高久

1. はじめに

従来より, Richards 式に基づく数値シミュレーションにより, 雨水の鉛直浸透過程の解析が行われてきた。この数値シミュレーションには, 土層の保水性と透水性を代入する必要があるが, これらの特性は土壌サンプルを用いて実験室内で計測されることが多い。しかしながら, シミュレーション結果が必ずしも現場斜面の雨水浸透現象を再現できないと指摘されている。その要因として, 土壌の不均質性, 局所的な鉛直浸透やバイパス流などのサンプルスケールでは把握できない水流の存在が考えられる。本研究では, 土層の保水性と透水性の計測手法が数値シミュレーション結果に与える影響について, 実測データに基づいて解析を行い, 最適な計測手法について検討した。

2. 観測流域・項目

観測は兵庫県六甲山系にある住吉川流域の山地小流域において行った。この流域では, 六甲山グリーンベルト事業により, ニセアカシア林が伐採され, 2000 年に落葉・常緑広葉樹が植栽された。標高は 340m, 土層深は約 1m, 樹冠による被覆は未だ少ない。計測項目は, 雨量, 土壌水分, マトリックポテンシャルとした。土壌水分の計測にはキャパシタンスメータ (Sentek 社製 EasyAG) を用い, 深さ 5 cm から 85 cm まで 10 cm 毎の体積含水率を 5 分インターバルで計測した。同深度のマトリックポテンシャルを隣接する地点において, テンシオメータ (大起理化製 DIK-3150) を用いて同じく 5 分インターバルで計測した。土壌水分, マトリックポテンシャルの計測地点から約 2m 離れた場所に土壌断面を掘削し, 深度 0~20 cm では 5 cm 毎に, 以下 10 cm 毎に 90 cm まで 100 cc サンプラーを用いて土壌試料を不攪乱採取した。採取した土壌試料を用い, pF 試験と変水位透水試験により土壌の水分特性曲線と飽和透水係数を測定した。

3. 保水性・透水性に関するパラメータの決定方法

土壌の保水性 (体積含水率 θ と圧力水頭 ϕ の関係) と透水性 (透水係数 K と ϕ の関係) は, それぞれ次式で表されるものとした (Kosugi, 1996)。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = Q\left(\frac{\ln(\psi / \psi_m)}{\sigma}\right) \quad (1)$$

$$K = K_s \left[Q\left(\frac{\ln(\phi / \phi_m)}{\sigma}\right) \right]^{1/2} \left[Q\left(\frac{\ln(\phi / \phi_m)}{\sigma} + \sigma\right) \right]^2 \quad (2)$$

ここで, S_e : 有効飽和度, θ_s : 飽和体積含水率, θ_r : 残留含水率, ϕ_m : メジアン孔隙径に対応する圧力水頭, σ : 無次元パラメータ ($\sigma > 0$), K_s : 飽和透水係数, Q : 余正規分布関数である。数値シミュレーションを行うためには, 各深度の土層におけるパラメータ θ_s , θ_r , ϕ_m , σ , K_s の値を定める必要がある。

3.1 Method 1: 室内計測法

土壌試料を用いて計測された各深度の pF-水分曲線に, (1) 式を最小自乗法により当てはめることによって θ_s , θ_r , ϕ_m , σ を決定した。 K_s には, 変水位透水試験により得られた値を代入した。

3.2 Method 2: 野外計測法

大規模な降雨イベント時に現場で実測した圧力水頭と体積含水率のデータを用いて各層の $\theta - \phi$ 関係を決め, さらに瞬間的断面法 (Instantaneous profile method) を用いて $K - \phi$ 関係を決めた (Watson k. k., 1966)。

得られた $\theta - \phi$ 関係と $K - \phi$ 関係に (1), (2) 式を最小自乗法により当てはめることによって θ_s , θ_r , ϕ_m , σ , K_s を算出した。ただし吸水過程では, $\theta - \phi$ 関係に, θ と ϕ の反応時間の不一致によるノイズが見られたため, 排水過程のデータを用いて計算を行った。

3.3 Method 3: 室内と野外の折衷法

現位置斜面における体積含水率の高空間分解能計測は、測器の制約から未だ一般的なものとはなっていない。このため、現位置でテンシオメータのデータしか得られない場合を想定して、室内と野外の折衷法についても検討を行った。すなわち、室内計測で得られた $\theta - \phi$ 関係を用いて、現位置斜面で実測された ϕ より θ の時系列を求めた。その上で、瞬間的断面法により $K - \phi$ 関係を求めた。得られた $\theta - \phi$ 関係と $K - \phi$ 関係に(1)、(2)式を最小自乗法より当てはめることによって θ_s 、 θ_r 、 ϕ_m 、 σ 、 K_s を算出した。

4. 結果・考察

Method2, 3に関しては、2003年11月23日～11月24日の降雨イベント(積算雨量38.4 mm)時に観測されたデータを用いて、パラメータの決定を行った。図2に、各Methodにより得られた $\theta - \phi$ 関係と $K - \phi$ 関係と、(1)、(2)式の当てはめの結果を示した。

各Methodにより得られたパラメータを用いて、2003年11月28日～11月30日の降雨イベント(積算雨量44.8 mm)時の鉛直浸透過程を、数値シミュレーションにより解析した。

図1(上は ϕ の時間変化、下は $\Delta\theta$ の時間変化。 $\Delta\theta$:降雨開始時点からの θ の変化量)に示したように、室内実験に基づくpF-水分曲線を用いたMethod1及びMethod3の計算結果では、雨水が表層に大量に貯留され、浸潤前線の下降が遅く、実際の浸透現象を説明できていない。一方、現位置での観測結果のみに基づくMethod2による数値計算結果は、実際の浸透現象を良好に再現していることがわかる。

図2に示したように、Method1とMethod3による $\theta - \phi$ 曲線では湿潤領域の土壤水分貯留量が大きく計算されたため、雨水の貯留が実際よりも大量に見積もられたと考えられる。一方、 $K - \phi$ 曲線では ϕ の小さい領域における不飽和透水係数が小さく計算されたため、浸潤前線の下降が実際よりも遅く見積もられたと考えられる。

図3には各降雨イベントについて求められた、実測値と計算値の平均誤差を示した。全てのイベントについてMethod2による平均誤差が最も小さくなっており、Method2により求められたパラメータを用いることで、様々な降雨イベント時の鉛直浸透過程が良好に再現されることがわかる。以上の結果、豪雨時の現場斜面における体積含水率と圧力水頭の同時計測に基づく保水性・透水性の決定方法が、最良の方法であると結論付けられた。

5. 引用文献

- Kosugi K. (1996): Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Res. Res. Vol. 32, No. 9 p. 2697-2703.
- Watson k. k. (1966): An Instantaneous Profile Method for Determining the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Materials, Water Res. Res. Vol. 2, No. 4 p. 709-715

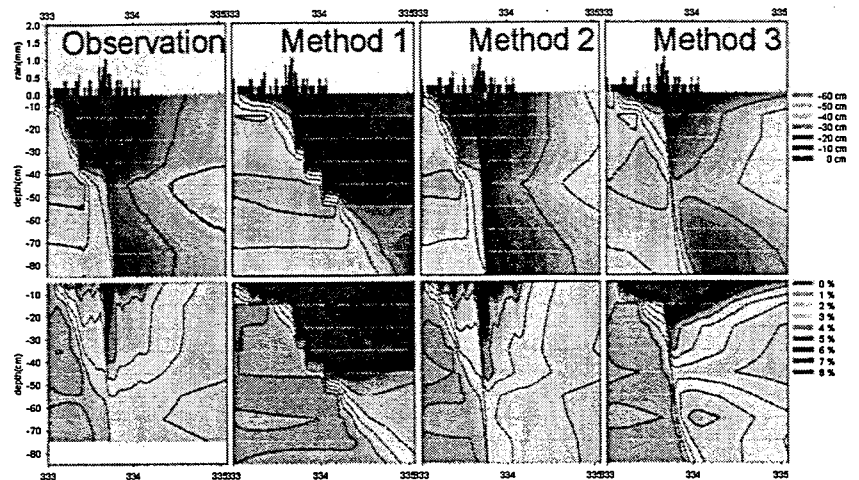


図1. 左から実測値及びMethod1, 2, 3による計算結果

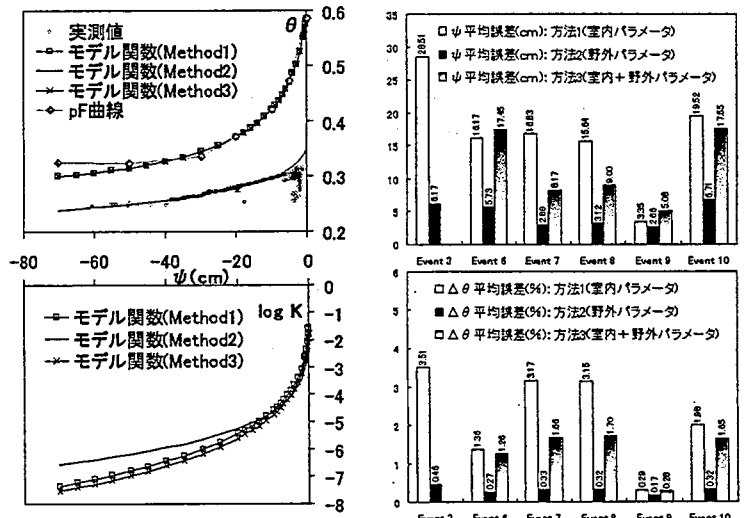


図2. 異なる方法によるモデル関数 (上は $\theta - \phi$ 関係, 下は $K - \phi$ 関係) 図3. 実測値と計算値の平均誤差