

現地計測データに基づく土壌水分特性を用いた降雨浸透過程の再現計算

(株)荒谷建設コンサルタント
高知大学教育研究部
中電技術コンサルタント(株)
復建調査設計(株)
(株)建設技術研究所

○片山弘憲, 小林公明
笹原克夫
杉原成満
渡邊 聡
山部 哲

1. はじめに

降雨に伴う斜面の表層崩壊予知のためには、雨水浸透過程を把握する必要があり、その手段として浸透流解析が広く用いられている。これまでの検討で、現地計測データに基づき、最適化手法により浸透流解析に必要なモデル定数を設定し、得られたモデル定数を用いて土質特性の均一な土層による鉛直一次元飽和-不飽和浸透流解析の再現計算を行い、解析結果に高い再現性が得られた(片山ら, 2015)。本研究では、上記の均一な土層における再現計算に続いて、土質特性の異なる2つの土層よりなる地盤への降雨浸透の再現を行った。

2. モデル定数同定手法

土壌水分特性の関数モデルとして式-1に示すvan Genuchten式が広く用いられている。本研究ではvan Genuchten式の θ_r , θ_s , α , n を、現地計測データを用いて同定する。

$$Se \left(\equiv \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[1 + (-\alpha \psi_m)^n \right]^{-m} \cdots \text{式-1}$$

θ_r : 残留体積含水率
 θ_s : 飽和体積含水率
 α : スケーリングパラメータ
 n : 無次元パラメータ
 m : 無次元パラメータ, $m=1-1/n$

Se : 有効飽和度
 θ : 体積含水率
 ψ_m : 土壌水分吸引水頭

モデル定数の同定には最適化手法を用いた。最適化手法は、実測値から求めた土壌水分特性曲線とvan Genuchten式で表わされる曲線とが一致するようにvan Genuchten式のモデル定数を同定する手法である。最適化手法として本研究ではSCE-UA法を用いた。

3. モデル定数の同定に用いる θ - ψ 関係の抽出

検討対象としたデータは、広島県廿日市市のまき土斜面で計測されているGL-30cm, -50cmの2深度で2013年に計測されたデータである。GL-30cm, GL-50cm地点では、それぞれ同じ深度に土壌水分計とテンシオメータが設置されており、それぞれ体積含水率 θ , 土壌水分吸引水頭 ψ を計測している。土壌水分特性曲線の設定においては、全計測データの中から、降雨浸透時のデータとみなせる「吸水過程」(体積含水率が上昇かつ土壌水分吸引水頭が減少する期間)を抽出し、さらに、吸水速度の大きいデータ($\Delta \theta / \Delta t \geq 1.00e-03[\text{cm}^3/\text{cm}^3/10\text{min}]$)を棄却した。抽出したデータに基づく θ - ψ 関係を用いて、SCE-UA法によりvan Genuchten式のモデル定数のうち、 θ_r , θ_s , α , n を同定した。2深度で同じ方法で抽出したデータに基づき、SCE-UA法で同定したモデル定数を表-1に示す。

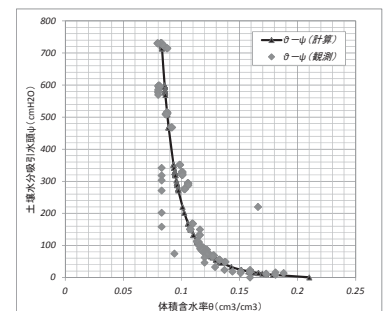


図-1 吸水過程および吸水速度によるデータ絞り込み

表-1 SCE-UA法により同定したモデル定数

地点	モデル定数				最小二乗誤差
	θ_r	θ_s	α	n	
GL-30cm	0.04	0.21	0.17	1.27	0.004686
GL-50cm	0.07	0.30	0.49	1.44	0.005220

4. 同定したモデル定数を用いた再現計算

(1)均一土層における再現計算

GL-30cmのデータから同定したモデル定数を用いてHYDRUS-1D²⁾による鉛直一次元飽和-不飽和浸透流解析を行った。再現する降雨イベントは、2013/10/24 4:10~2013/10/25 19:10(経過時間2,340min, 累加雨量200mm)とした。解析の入力条件は以下の通りである。

- ・土層モデル…①土層数: 1層。GL-30cmにおける計測値を再現の対象とした。②土層厚: 100cm。初期値が既知である深度を下端とした。
- ・モデル定数…SCE-UA法により決定(表-1参照)。Mualem式モデル定数: $\xi=0.5$ (一般値)。飽和透水係数: $k=9.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}=0.54 \text{cm/min}$ (室内透水試験結果)。
- ・境界条件…①上端: 10分間林外雨量(mm/10min)から時間雨量(mm/hr)を求め、地表面への変動フラックス

(cm/min)として1時間毎に与えた。②下端：重力による排水とした。

・初期値・・・初期値は体積含水率 θ で与えた。計測深度は既知であるため、その初期値とした。

計測値と解析結果の経時変化グラフを図-2に示すが、概観すると両者は類似した変動を示し、降雨開始直後の体積含水率の立ち上がりの反応も概ね一致しており、再現性は比較的高い結果が得られた。

(2)2層モデル

次に、上記と同一の降雨イベントを対象に、土質特性の異なる2層の土層（以下2層モデル）に対して再現計算を行った。2層モデルの層区分は隣接斜面の鉛直一次元トレンチの土層区分を参考に、GL-40cmにA層とB層との境界を設定し、GL-30cm、GL-50cmにおける計測値を再現の対象とした(図-3)。なお、各層のモデル定数は、A層はGL-30cm、B層はGL-50cmの値(表-1)を用い、飽和透水係数は両層とも同一値とした(0.54cm/min)。

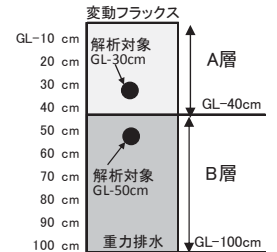


図-3 2層モデル模式図

再現計算による体積含水率の経時変化を見ると、GL-30cmは、均一土層の再現計算とほぼ同様に、時系列変化も降雨開始直後の立ち上がりも再現性が高い結果となった。一方でGL-50cmは、計測値に対して解析値が全体的に

0.05cm³/cm³程度高い値で推移している(図-4)。また、降雨初期段階では解析値は反応せず、ある程度降雨量が累積した120分後以降に一気に上昇する。体積含水率が上昇した140分以降は、計測値と解析値の絶対値の差はあるが、細かい値の変動を含め、計測値と解析値の経時変化のトレンドは概ね一致している。以上の通り、2層目の解析値は、実際よりも全体的に飽和度が高い結果となっている。この理由として、2層目以深では、実際は浸透水が鉛直もしくは側方に流出していることが考えられる。ここで、側方流の影響を検討するために、隣接斜面における全水頭の深度分布を示した(図-5)。

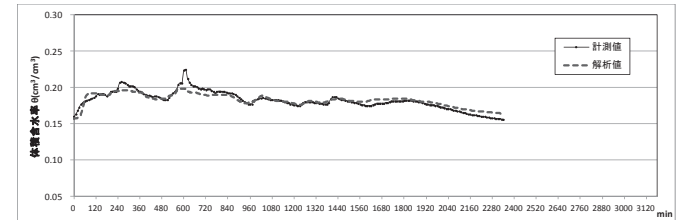


図-2 均一土層における計測値と解析結果の経時変化の対比 (GL-30cm)

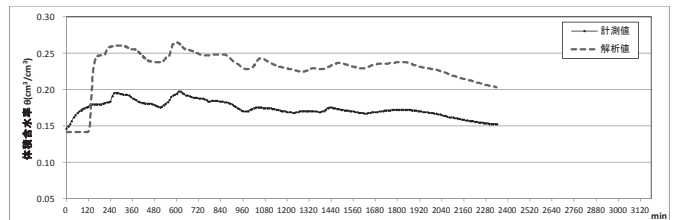


図-4 2層モデルにおける計測値と解析結果の経時変化の対比 (GL-50cm)

全水頭分布は、解析開始時刻(雨の降り始め)の前後約2時間のデータを30分毎に示した。GL-40cm以浅(A層)では全水頭線の勾配が緩く、降雨時の鉛直方向の浸透が卓越することを表している。一方でこれより深部では、全水頭線の勾配が大きく、全水頭線に垂直な方向である、斜面方向への浸透流が多いことが示唆される。

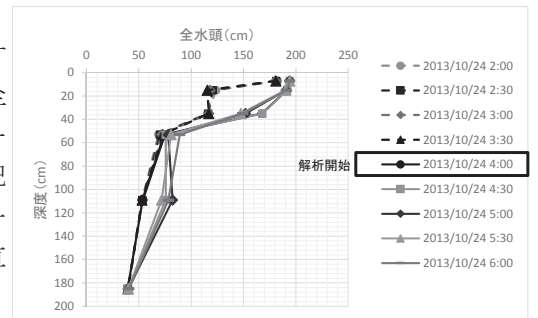


図-5 解析開始時刻前後における全水頭分布

以上のことから、A層では降雨中の鉛直浸透が多いと考えてよいが、B層では、斜面方向への側方流出が多いと考えられる。このため、鉛直一次元飽和・不飽和浸透流解析では、深部における浸透状況の再現が困難なことが考えられる。

5. おわりに

本検討では、現地計測データに基づき土壌水分特性曲線を設定し、van Genuchten式のモデル定数をSCE-UA法を用いて同定した。求めたモデル定数を用いた、土質特性の異なる2層の土層における降雨浸透の再現計算では、1層目のA層では計測値と解析値の経時変化が類似し再現性が高い結果が得られたが、2層モデルのB層については、実際より高い飽和度を示す結果となった。全水頭分布の分析から、2層目より深部では側方流出が卓越する可能性が示唆された。鉛直一次元飽和・不飽和浸透流解析における地盤モデルにおいては、実際には存在する側方流出の影響をどのように取り扱うかが、再現性を高める上での課題である。

謝辞：本研究の実施にあたり、現地計測に関する便宜を図って頂き、また貴重な資料及びご助言を頂いた国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所担当者の各位に深く御礼申し上げます。

参考文献 1)杉原成満, 福田慎哉, 倉本和正, 荒木義則, 朝居孝二, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定, 土木学会論文集F6(安全問題), Vol.67, No.1, pp.1-13, 2011.

2)Simunek, J. and van Genuchten, M. Th.: Estimating Unsaturated Soil Hydraulic Properties from Tension Disc Infiltrometer Data by Numerical Inversion, Water Resour. Res., Vol.32, No.9, pp.2683-2696, 1996.