

1. はじめに

降雨時の表層崩壊発生予測のための降雨浸透過程を再現する上で、森林土壌の浸透特性を把握することは重要である。そこで、本研究では斜面中における降雨時の体積含水率の実測データを良好に再現しうる土壤水分特性曲線のパラメータの決定方法について検討する。

2. 現地計測

現地斜面における観測については、広島風化花崗岩起源のまさ土である広島市佐伯区荒谷地区(図-1)を対象とし、雨量、体積含水率、土壤水分吸引水頭の計測を行った。計測地点の土層深は200cmである。計測深度(図-2)は、体積含水率では20cm, 50cm, 90cmで、土壤水分吸引水頭では20cm, 50cm, 100cm, 155cmである。計測間隔は10分間隔である。

3. 土壤水分特性曲線のパラメータ決定方法

降雨時の体積含水率の経時変化を再現しうる土壤水分特性曲線のパラメータ(土壤水分特性曲線の形状を表す α と n 、飽和体積含水率 θ_s 、残留体積含水率 θ_r 、飽和透水係数 k_s)を決定するために現位置 θ - ϕ 法を用いる。現位置 θ - ϕ 法のパラメータの決定方法¹⁾として、現位置で計測した同深度の体積含水率 θ と土壤水分吸引水頭 ϕ の関係から最小二乗法でvan Genuchten式のパラメータを決定する。ここで、体積含水率 θ と土壤水分吸引水頭 ϕ の関係は、無降雨期における体積含水率が減少し、かつ土壤水分吸引水頭が増加する期間のデータを用いる。van Genuchten式²⁾は(1)式で表される。

$$S_e = \left\{ 1 - \left(\frac{\phi}{\psi} \right)^n \right\}^m \quad \dots (1) \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \dots (2)$$

ここに、 S_e : 有効飽和度 (cm^3/cm^3)、 α : 土壤水分吸引水頭 ϕ の逆数の次元をもつスケリングパラメータ ($(\text{cmH}_2\text{O})^{-1}$)、 $\alpha > 0$ である。 n : 無次元パラメータで、 $n > 1$ である。 m : 無次元パラメータで、 $m = 1 - 1/n$ とした²⁾。 ϕ : 土壤水分吸引水頭 (cmH_2O)、 θ : 体積含水率 (cm^3/cm^3)、 θ_s : 飽和体積含水率 (cm^3/cm^3)、 θ_r : 残留体積含水率 (cm^3/cm^3)である。

3.1 1層モデルと3層モデル

土層全体を均一の土壤水分特性と仮定した場合(1層モデル)と異なる土壤水分特性を持つ複数の土層を仮定した場合(3層モデル)において、降雨時における体積含水率の実測データの再現性について比較検討を行う。

3.1.1 1層モデルの現位置 θ - ϕ 法

1層モデルの現位置 θ - ϕ 法で決定すべきパラメータは、 α と n であり、これらのパラメータは、深度20cmの体積含水率 θ と土壤水分吸引水頭 ϕ の関係から決定する。ここで、飽和体積含水率 θ_s は、呉市吉浦東地区のまさ土の不攪乱試料による不飽和三軸圧縮試験装置を用いて、体積含水率 θ と土壤水分吸引水頭 ϕ の関係を求めた試験結果³⁾を参考にし、 $\theta_s = 0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ と与える。また、残留体積含水率 θ_r は、計測した体積含水率 θ の最低値を参考にし、 $\theta_r = 0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ と与える。さらに、飽和透水係数 k_s は、広島市荒谷川地区のまさ土の不攪乱試料による飽和透水試験結果⁴⁾を用い、 $k_s = 0.00289 \text{ cm/sec}$ である。

3.1.2 3層モデルの現位置 θ - ϕ 法

3層モデルの現位置 θ - ϕ 法で決定すべきパラメータは、 α 、 n 、 θ_s である。これらのパラメータは図-2で示した深度20cm, 50cm, 100cmの体積含水率 θ と土壤水分吸引水頭 ϕ の関係から決定し、それぞれ深度0~35cm, 35cm~75cm, 75cm~200cmの3つの層に適用する。なお、深度100cmの体積含水率の値は、深度90cmで計測した値を近似して用いる。また、深度155cmの計測データは用いていない。図-2に示す層の境界はテンシオメータの計測深度の中間とする。ここで、残留体積含水率 θ_r 、飽和透水係数 k_s は、1層モデルの現位置 θ - ϕ 法と同様である。

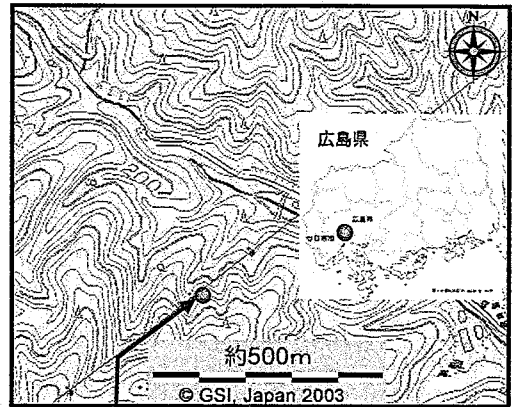


図-1 荒谷地区の位置図

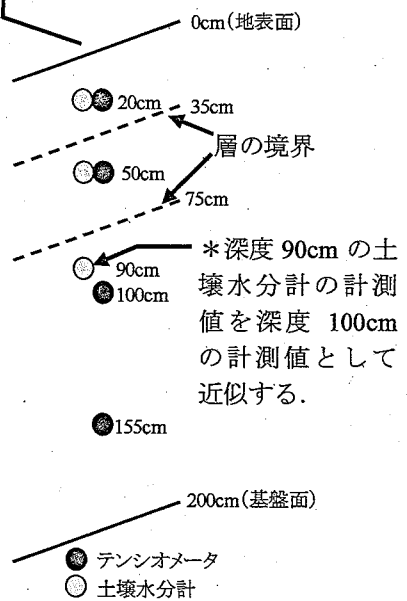


図-2 計測深度

今回、2006年8月18日の降雨イベントで再現計算ができない(鉛直一次元不飽和浸透流解析の計算値が収束しない。)場合を考慮し、飽和体積含水率 θ_s において、残差 e が小さい順に順位付けを行う(残差が1番小さいときは1位である.)。そして、上位のパラメータから順次適用して再現計算を行い、再現計算ができたパラメータを土壌水分特性曲線のパラメータとする。ここで、残差 e は式(3)に示す。また、土壌水分吸水水頭の計算値 ψ_{cal} は式(4)に示す。

$$e = \frac{\sum (\psi_{obs} - \psi_{cal})^2}{N} \dots (3) \quad \psi_{cal} = -\frac{1}{\alpha} \left\{ \left(\frac{\theta_{obs} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{1-n}} - 1 \right\} \dots (4)$$

ここに、 ψ_{obs} : 土壌水分吸水水頭の実測値 (cmH₂O), ψ_{cal} : 土壌水分吸水水頭の計算値 (cmH₂O), N: データ数である。

再現計算を行う際に必要となる深度方向の初期土壌水分吸水水頭分布については、計測した深度 20cm, 50cm, 100cm, 155cm の初期土壌水分吸水水頭を内挿、外挿することにより求める。

4. 検討結果

1層モデルの現位置 θ - ϕ 法で決定した結果、決定したパラメータは、 $\alpha=0.06$ ((cmH₂O)⁻¹), $n=1.38$ となった。

一方、3層モデルの現位置 θ - ϕ 法においては、上位3位までは図-3に示すような土壌水分特性曲線となった。表-1には、現位置 θ - ϕ 法で決定した α , n , θ_s を上位3位まで示す。そして、上位のパラメータから順次適用して再現計算を行った結果、再現計算ができた各深度における土壌水分特性曲線のパラメータは、表-1の網かけに示すようなパラメータとなった。

5. 1層モデルと3層モデルの再現性の比較

両方法で決定した土壌水分特性曲線のパラメータについては、鉛直一次元不飽和浸透流解析を用いた降雨時の体積含水率の経時変化の再現計算を行うことによって再現性の検証を行った。

決定したパラメータ(表-2)を用いて、2006年8月18日の降雨イベントで計算を試みた結果(図-4)、3層モデルの現位置 θ - ϕ 法の方が体積含水率の経時変化を良好に再現することができた。これは、表-2に示す残差において、3層モデルの現位置 θ - ϕ 法の方が小さいことからいえる。この残差は深度 20cm, 50cm, 90cm の体積含水率の実測値と計算値の差の絶対値をデータ数で割った値である。

以上、深度ごとに土壌水分特性を適用した結果の方が、降雨時における体積含水率の実測データの再現性がよくなった。

【参考文献】1)梁偉立・小杉賢一朗・林祐妃・水山高久(2006): 雨水鉛直浸透に関する土壌水分特性パラメータの特定手法に関する考察, 砂防学会誌, Vol.59, No.3, p.3-12, 2) (社)地盤工学会編(2004): 不飽和地盤の挙動と評価, 地盤工学会, p.37, 3)建設省土木研究所・(株)東京ソイルリサーチ(2002): 風化花崗岩地帯の斜面の降雨時の安定性評価に関する検討業務, p.17, 4)建設省土木研究所・(株)東京ソイルリサーチ(2002): 風化花崗岩地帯の斜面の降雨時の安定性評価に関する検討業務, p.13, 5)鈴木義一郎(2005): はじめて学ぶ基礎統計学, 森北出版, p.41

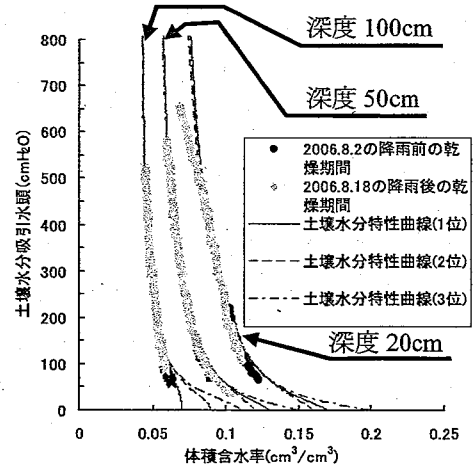


図-3 各深度における現位置で計測した体積含水率 θ と土壌水分吸水水頭 ψ の関係を再現する土壌水分特性曲線(上位3位まで)

表-1 決定した α , n , θ_s (上位3位まで)

深度	順位	θ_s (cm ³ /cm ³)	α ((cmH ₂ O) ⁻¹)	n
20cm	1	0.17	0.03	1.40
	2	0.16	0.02	1.44
	3	0.20	0.06	1.38
50cm	1	0.13	0.03	1.52
	2	0.12	0.02	1.56
	3	0.15	0.05	1.50
θ 90cm ψ 100cm	1	0.07	0.01	2.10
	2	0.09	0.02	2.00
	3	0.11	0.03	1.98

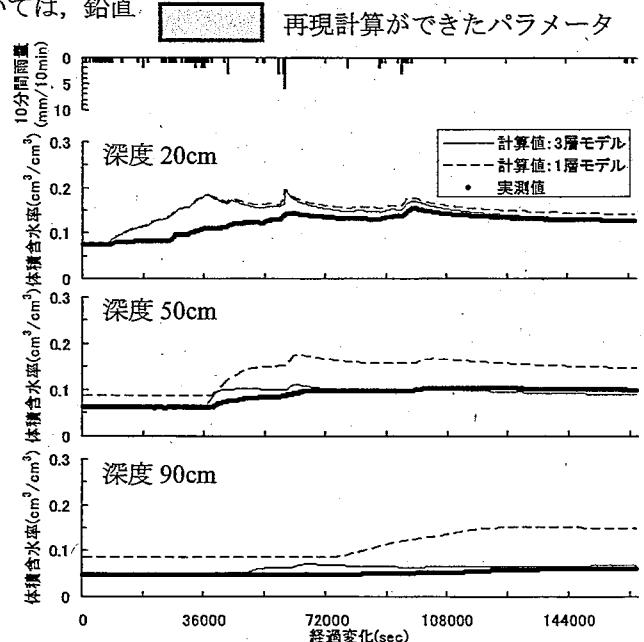


図-4 再現した体積含水率の経時変化 (2006年8月18日の降雨イベント 累加雨量: 73mm)

表-2 決定した土壌水分特性曲線のパラメータと残差

パラメータ 決定方法	適用深度	α ((cmH ₂ O) ⁻¹)	n	k_s (cm/sec)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	残差
3層モデルの 現位置 θ - ϕ 法	0~35cm	0.06	1.38	0.00289	0.20	0.04	1.3×10^{-2}
	35~75cm	0.03	1.52		0.13		
	75~200cm	0.02	2.00		0.09		
1層モデルの 現位置 θ - ϕ 法	0~200cm	0.06	1.38	0.00289	0.20	0.04	4.6×10^{-2}