

河川堤防表層における土中水分量計測を用いた不飽和浸透特性値の推定方法に関する考察

岡山大学大学院環境生命科学研究科 正会員 竹下 祐二

岡山大学大学院環境生命科学研究科 学生会員 ○片山 頌嵩

岡山大学環境理工学部 後藤 竜二

国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所 児子 真也

1. はじめに

河川水や降雨による河川堤防内での浸透挙動を把握するためには、堤防表層部分の浸透特性値を評価する必要がある。本文では、堤防のり面表層における土中水分動態を鉛直一次元浸透流解析によりシミュレートし、不飽和浸透特性の関数モデルを同定する手法を用いて不飽和浸透特性値の推定を試み、河川堤防調査における土中水分量計測の有用性について考察した。

2. 土中水分動態の計測方法

対象とした河川堤防は一級河川高梁川右岸 4k900 川裏のり面である。図1に示すように、1本で6深度(計測中心深度 7, 17, 27, 37, 57, 97 cm)の土中水分量(計測精度 $\pm 0.06\text{m}^3/\text{m}^3$)を計測できる土中水分計 5 本と簡易型転倒升雨量計(計測精度 $\pm 2\%$)が設置されている。図2に示すように堤防のり面表層の土中水分量は一定ではなく長期的に変動しており、降雨浸透に対しては迅速に増加するが、蒸発散による減少は緩やかに進行し、その動態はのり面上の位置によっても異なる状況が計測された。これらの土中水分動態を浸透流解析によって再現できる不飽和浸透特性値の算定を試みる。解析期間は2016年6月から9月の出水期であり、この期間を9分割して、それぞれ浸透特性値を算定した。

3. 不飽和浸透特性値の測定方法

不飽和浸透特性の関数モデルは次式に示す van Genuchten の関数モデル (VG モデル) ¹⁾を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1)$$

$$k(S_e) = k_s S_e^{0.5} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (2)$$

ここで、 S_e : 有効飽和度、 h : 圧力水頭、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率、 k_s : 飽和浸透係数、 α , n : 土質によるパラメータ、 $n > 1$, $m = 1 + 1/n$ である。

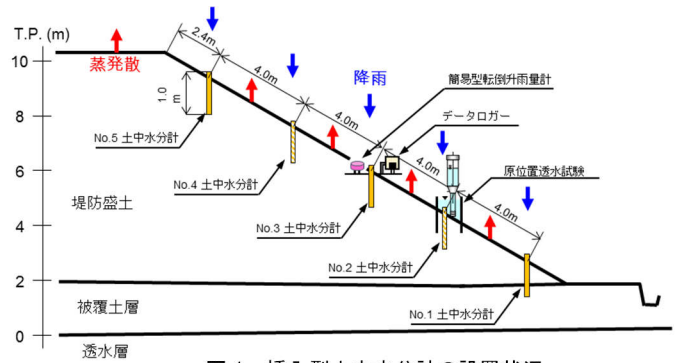


図1 挿入型土中水分計の設置状況

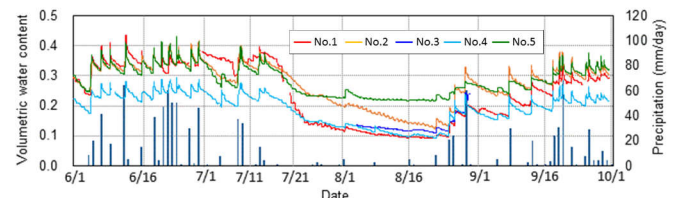


図2 計測中心深度7cmでの土中水分量変動状況（2016年）

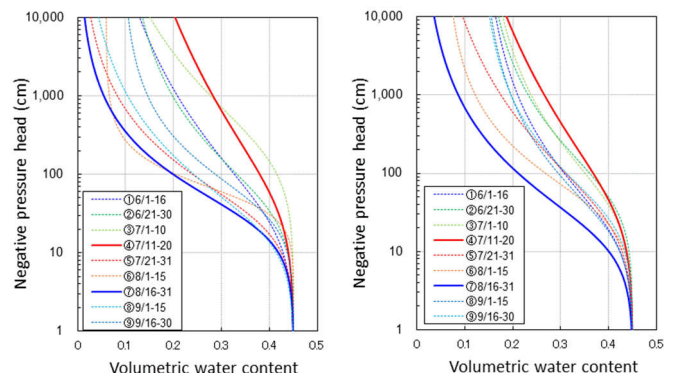


図3 推定された水分特性曲線

キーワード：河川堤防、不飽和浸透特性、土中水分量、数値シミュレーション、逆解析
 連絡先：〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1 岡山大学大学院環境生命科学研究科 TEL：086-251-8153

VG モデルの同定には、非線形最小二乗法による逆解析手法²⁾を用い、深度 7cm で計測された体積含水率 θ の経時変化を目的関数として、次式の重み付き残差平方和 $OF(\mathbf{b})$ を最小にするパラメータ $\mathbf{b}$ を推定した。

$$OF(\mathbf{b}) = \sum_{j=1}^N [w_j \{\theta_m(t_j) - \theta_c(t_j, \mathbf{b})\}]^2 \quad (3)$$

ここに、添え字 m, c はそれぞれ、計測データと浸透流解析による体積含水率を表す。また、 N は計測データ数、 t は計測時間である。 w は重みであり、本解析では、体積含水率の測定値は全て同程度の誤差を含むと考えて 1.0 とした。VG モデルの未知パラメータは飽和浸透特性 (θ_s, k_s) と不飽和浸透特性 (θ_r, α, n) の計 5 個であるが、推定解の唯一性が満足されないため、これらを全て同時には推定できない。そこで、土中水分計の設置点の近傍において、原位置透水試験³⁾を実施して現場飽和透水係数 k_{fs} を測定し、また、乱れの少ない試料を採取して飽和体積含水率を測定した。したがって、推定すべき未知パラメータは (θ_r, α, n) であり、これらの初期推定値はデータベース⁴⁾を参考に $\theta_r=0.05$, $\alpha=0.03\text{cm}^{-1}$, $n=1.41$ とした。浸透流解析は、均質地盤を仮定した軸対称モデル（各土中水分計の計測領域である地表面から深さ 100cm、直径 12cm の円筒領域）を用いて、地表面を降雨境界、解析領域下部は重力排水境界として、原位置で計測された降雨量と Hamon 式⁵⁾による推定可能蒸発量を考慮した。

4. 不飽和浸透特性値の推定結果

図3に推定された水分特性曲線を、図4に計測された土中水分動態を浸透流解析でシミュレートした結果を示す。各土中水分計における土中水分動態は十分に再現されていると思われる。土中水分計および計測期間により異なる VG モデルが同定された要因は、不飽和浸透特性が強い非線形性を有すること、雨量や蒸発散量によって降雨浸透挙動が変化することなどが考えられる。特に、Case④の解析期間では土中水分量の高い状態から蒸発散による排水現象が生じており、一方、Case⑦では土中水分量の低い状態から降雨による浸潤が生じているため、それぞれ主排水曲線と主浸潤曲線に近い水分特性曲線が推定されていると思われる。

5. おわりに

河川堤防表層に複数本の土中水分計を設置し、計測された土中水分動態を浸透流解析によりシミュレートして不飽和浸透特性値を推定する方法は、堤防の浸透特性値をフィールドスケールで評価できる有用な調査方法であると思われる。今後は浸透流解析モデルによる感度解析を行って、堤防の横断面および縦断面での土中水分量計測地点の選定方法について検討を行う予定である。

謝辞

本研究は平成 29 年度国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所による受託研究費により実施されました。また、復建調査設計(株)上熊秀保氏より堤防調査に関する助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 2) Rassam, D., Simunek, J. and van Genuchten, M. Th.: Modelling Variably saturated flow with HYDRUS-2D, International Ground-water Modeling Center, 2003.
- 3) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E.: Pondered infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 54, pp.1233-1241, 1990.
- 4) U.S. Environmental Protection Agency, *UNSODA*
- 5) Hamon, W.R.: Estimating potential evapotranspiration. *Am. Soc. Civ. Eng. Proc.*, 87(HY3), 107-120, 1961.

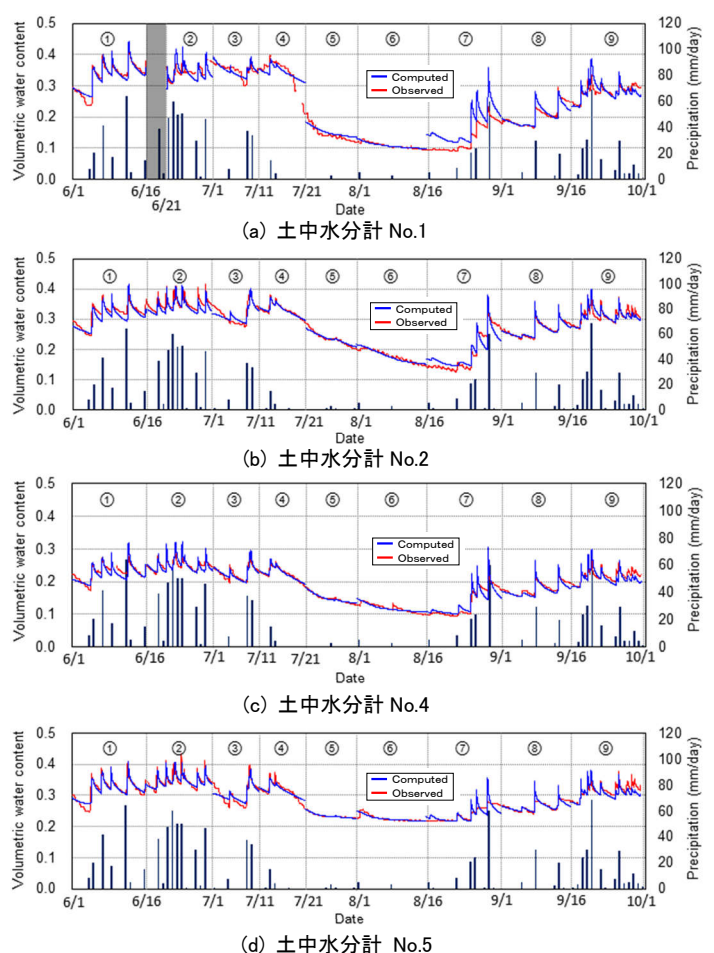


図4 推定されたパラメータによる土中水分量変動の再現