

鉛直一次元浸透流現象の観測および解析

OBSERVATIONS AND ANALYSIS OF VERTICAL ONE DIMENSION

SEEPAGE FLOW PHENOMENON

坪郷 浩一¹・荒木 功平²・福田 靖³・桑嶋 啓治²・片山 光亮⁴・上 俊二⁵

Koichi TSUBOGO, Kohei ARAKI, Yasushi FUKUDA, Keiji KUWAJIMA,

Kosuke KATAYAMA and Shunji UE

¹坪郷計算工学研究所 (〒747-0806 防府市石が口 2 丁目 5 番 21 号)

E-mail: ktsubogo@gmail.com

²徳山工業高等専門学校土木建築工学科 (〒745-8585 周南市学園台)

³徳山工業高等専門学校教育研究支援センター (〒745-8585 周南市学園台)

⁴徳山工業高等専門学校機械電気工学科 (〒745-8585 周南市学園台)

⁵徳山工業高等専門学校テクノ・リフレッシュ教育センター (〒745-8585 周南市学園台)

Key Words: *seepage flow analysis, infiltration capacity, Hortonian overland flow, percolation, erosion of slopes*

1. はじめに

わが国においては、地球温暖化等の気候変動にともない、梅雨時の長雨や局所的な集中豪雨は増加傾向にある。特に、集中豪雨は、短時間で多量の雨を狭い地域にもたらし、その時間雨量は 50mm を超える^{1) 2)}。たとえば、平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨では、山口県防府市で 7 月 21 日 6 時～12 時の 6 時間雨量は 200mm を超え、防府市を中心に県内各地に 200 件近い土砂災害が発生し、大きな被害を与えたり。また、九州北部豪雨では、7 月 24 日から 26 日にかけて局所的に 1 時間あたり 100mm を超える雨量を記録し、大規模な斜面災害を誘発した²⁾。このように、毎年、想定を上回る豪雨に起因する斜面崩壊などが発生して、人的・経済的等損失を与える災害が増加傾向にある。

地表面には、降雨を地表流と地中水に分離する能力がある。降雨強度が浸透能より低い場合、降雨は全て地中に浸透する。一方、降雨強度が浸透能を超えれば、余剰降雨は浸透しきれずに地表面上を流下する。これが、ホートン地表流である^{3) 4)}。これまでの研究成果⁴⁾により、植生が十分な斜面では浸透

能が十分に大きいことから、ホートン地表流は発生しないと一般化した。しかし、植生の衰退(斜面の裸地化)によって、ホートン地表流が発生して、斜面侵食が発生していることが報告されている⁴⁾。

前述の問題に対応した斜面保護工として侵食防止効果と緑化機能を有する不織布フィルターによる工法がある。不織布フィルターを用いた斜面保護工法では、撥水性や親水性繊維などで構成された不織布で斜面を被覆し、保護する。不織布の繊維は地表面の土粒子と絡み合い密着する。また、降雨時の地表流は高い空隙率の不織布部分を通り排出させる。他にも、雨滴による衝撃を緩和し、ガリ侵食を防止するなど、風雨のような気象環境の変化から斜面を保護する効果がある。不織布フィルター侵食防止効果に関する既往研究としては、藤原ら⁵⁾、坪郷ら⁶⁾、徳久⁷⁾などが挙げられる。これらの研究は、地表流について多くの検討がなされている。しかし、地中内の降雨浸透を十分に把握しきれていない。

近年、コンピュータの高性能化と高速化ともなっていて、数値シミュレーションは、地下水流・浸透流の諸問題を解くための極めて実用的で有効な手段と

して評価されている⁸⁾。この方法は、地下水流・浸透およびこれに関わる諸現象を数学的モデルによって表して、その支配方程式の数値解を求めることによってコンピュータ上で実験を行う手法である。数値モデルが適切に構築されていれば、流れ場の形や構造、またパラメータを変えることで、多様な流れ場における様々な現象の再現計算が可能になる。

よって、本論文では、ホートンの浸透能理論に着目して裸地または不織布フィルターを施工した場合の地中への降雨浸透流の数値モデル化および数値解析を行う。さらに数値モデルの開発においては、現地調査による観測と平行して行う必要がある。そこで本論文では、土砂災害警戒区域等に指定されている山口県周南市にある徳山工業高等専門学校（以降、徳山高専とする）北側斜面を現地実験斜面として造成後、雨量計と土中水分計を設置して現地観測を実施する。また、数値解析結果と現地観測結果の比較を行い、不織布フィルターの施工有り無しが地中の浸透能におよぼす影響について検討する。

2. 現地観測

(1) 現地観測方法

現地実験斜面は、写真-1 に示すように徳山高専北側斜面に造成した。この斜面の概略は、斜面勾配30度、斜面長さ7mの人工斜面である。

地中水分については、EC-5 土壌水分センサー（METER社製）を用い、法尻から1m、地表から10cmの位置で測定を行い、観測値を保存するデータロガー（Em50データロガー、METER社製）を設置した。つぎに雨量計については、転倒ます式雨量計を使用した。さらに降雨強度は約1時間ごとに観測して、コンパクトフラッシュ（フラッシュメモリ型カード）で観測値を保存した。また降雨の観測期間は、2021年6月3日0時～6月5日0時までである。

(2) 現地実験場の土質状況

本論文で使用するまさ土の性質は、表-1 のとおりであった。

3. 鉛直一次元降雨浸透流解析

降雨浸透流現象は、基本的には2次元あるいは3次元的に発生する。ただし、多くの場合、降雨浸透は鉛直方向の流れが卓越する⁹⁾。そこで本論文では、鉛直1次元降雨浸透流モデルを用いて解析を行う。

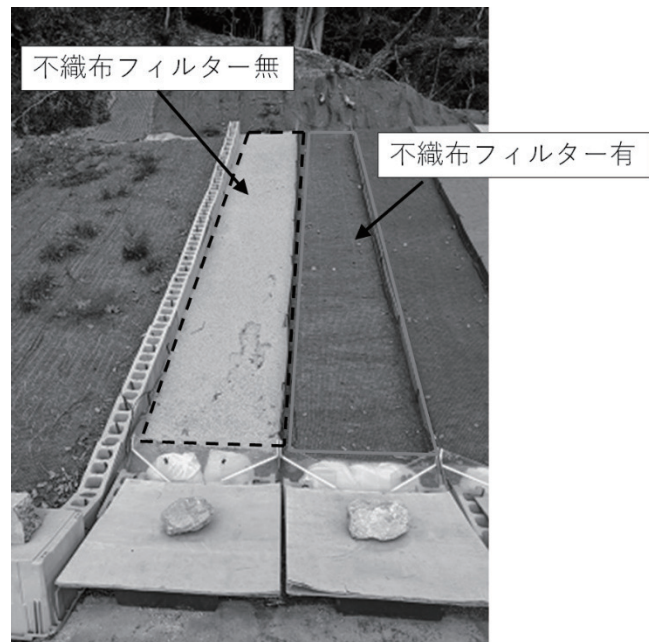


写真-1 現地実験斜面の施工一例

表-1 現地まさ土の性質

土粒子密度 (g/cm ³)	2.65
間隙比	0.448
最大体積含水率	0.309
飽和透水係数 (cm/s)	0.0002~0.0010

また鉛直1次元降雨浸透の式は、不飽和浸透の支配方程式を変形した式を用いた¹⁰⁾。

(1) 連続の式

地中に体積 $dx dy dz$ の微小要素を考えた。要素の体積含水率を θ 、水の密度を ρ 、 x 、 y 、 z 方向から流入する水分の質量フラックスを q_x 、 q_y 、 q_z とおくと、 dt 時間の要素内の水分変化量は以下の式で表した。

$$d(\rho\theta)dx dy dz = -\left\{\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right\} dx dy dz dt \quad (1)$$

各方向の浸透流速を u 、 v 、 w とおくと、水分フラックスは $q_x = \rho u$ 、 $q_y = \rho v$ 、 $q_w = \rho w$ を式(1)に代入して変形すると、地中水分移動の連続方程式は式(2)となる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left\{\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right\} \quad (2)$$

(2) Richards の方程式¹⁰⁾

地中内の水分移動は、不飽和浸透流として生じる。 x_i 方向の浸透流速 u_i はダルシー則により、

$$u_i = -k_i(\theta) \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial x_i} = -k_i(\theta) \frac{\partial (\psi(\theta) + z)}{\partial x_i} \quad (3)$$

なお、 k_i : x_i 方向の不飽和透水係数、 ϕ : ピエゾ水頭、 ψ : 吸引圧水頭、 z : 位置水頭である。ここで、 x 、 y 、

z 方向の不飽和透水係数を k_x , k_y , k_z とすると, それぞれの方向の浸透流速は下式とした.

$$\begin{aligned} u &= -k_x(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial x}, & v &= -k_y(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial y}, \\ w &= -k_z(\theta) \left\{ \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} + 1 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

Richards は, 式(4)を式(2)に代入することにより, 不飽和浸透流の基礎方程式を示した.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_x(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_y(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial y} \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_z(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} \right\} + \frac{\partial k_z(\theta)}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

降雨浸透は, 多くの場合, 鉛直方向の流れが卓越することから⁹⁾, 式(5)の x , y の項を 0 とし, z 軸を地表から下向きを正にとると, 鉛直 1 次元の Richards の式は下式に変形できる.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_z(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} \right\} - \frac{\partial k_z(\theta)}{\partial z} \quad (6)$$

(3) 土質パラメータの設定

基礎方程式を解くためには, 式(6)中に含まれる吸引圧水頭 ψ ・体積含水率 θ ・不飽和透水係数 k の 3 者の関係を明らかにする必要がある. $\theta - \psi$ 関係は水分特性曲線であり, $k - \theta$ 関係は不飽和透水係数の体積含水率による変化曲線である. したがって, これらの 2 本の曲線を何らかの式形で表現することができれば, 基礎方程式を解く際に極めて有効である. ここでは, 砂質土に対してよく用いられ取り扱いが容易な Brooks-Corey の式¹¹⁾を用い, 飽和度 S_r を式(7)とした.

$$S_r = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad (7)$$

不飽和透水係数 k_u は, 式(8)で表した.

$$k_u = k_s \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^{2+3\lambda} \quad (8)$$

さらに, 式(7)を式(8)に代入して式(9)に変形した.

$$k_u = k_s (S_r)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \quad (9)$$

なお, S_r : 飽和度, θ_s : 飽和含水率, θ_r : 残留含水率, ψ_b : 限界吸引圧水頭または空気侵入値, λ : 土の種類による定数 (間隙径分布指標), k_s : 飽和透水係数である.

(4) 基礎方程式の離散化¹²⁾

ダルシー則と連続の式に分けて式(10)のように差分展開して, 数値計算を行った.

$$w_{i,i-1} = -k_{i,i-1} \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{\Delta z_{i,i-1}} - 1 \right) \quad (10)$$

$$\theta_{i,t+\Delta t} = \theta_{i,t} - \frac{\Delta t}{\Delta z} (w_{i+1,i} - w_{i,i-1}) \quad (11)$$

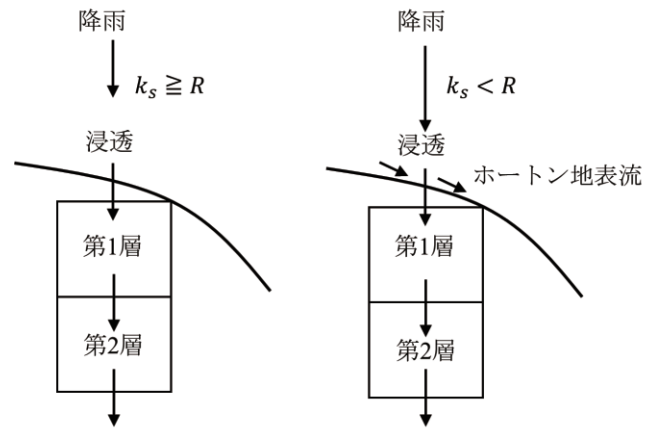


図-1 降雨強度と飽和透水係数の関係

本論文では, 地表面の境界条件として, 降雨強度を与えるが, この解析への導入には, 第 1 層の体積含水率 (θ_1) との関係において, 次のようにして行った.

$$\theta_{1,t+\Delta t} = \theta_{1,t} - \frac{\Delta t}{\Delta z} (w_{2,1} - C_e R) \quad (12)$$

なお, θ_1 : 第 1 層の体積含水率, $w_{2,1}$: 第 1 層から第 2 層への浸透流速 (cm/s), R : 降雨強度 (cm/s), C_e : 降雨流入係数となる. なお, 表 - 1 より, 現地実験斜面の最大体積含水率が 0.309 であることから, この値を上限値とする. また飽和度については, 1.0 を超えないように設定した.

(5) 降雨流入係数の提案式

Horton 地表流を数値モデル化した提案式は, 図 - 1 より, 降雨強度 (R) と飽和透水係数 (k_s) の大小関係で考える. R が k_s より低い場合, 降雨は全て地中に浸透する. 一方, R が k_s を超えれば, 余剰降雨は浸透しきれずに地表面上を流下するモデルとする. 余剰降雨が発生した場合には, k_s を R で除した降雨流入係数 C_e で表し, 式(13)となり, 式(14)の条件で判別する.

$$C_e = \frac{k_s}{R} \beta \quad (13)$$

なお, β ($0 < \beta \leq 1.0$) は補正係数である. この補正係数 β は, 数値解, 観測値およびデータ数の誤差の最小値で決定する.

β の値が大きくなると余剰降雨が減少する. 一方, β の値が小さくなると余剰降雨が増加することで地表流の流下による斜面侵食を考慮した数値モデルになる.

一方, 自然な状態にある地表面付近の土の飽和度は 0%, 100% となることはなく, 不飽和の状態で存在する. 保水性試験であってもサクシオン 0 にお

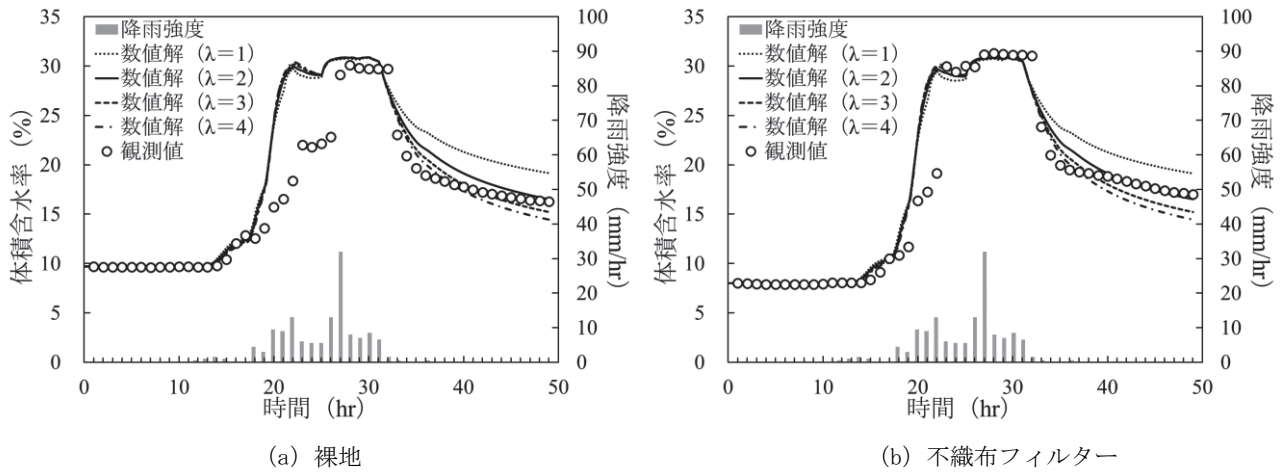


図-2 土の種類による定数λの検討

ける飽和度が 100%にならず、75~90%の値を示す例が複数みられる（例えば、参考文献^{13), 14)}。荒木・北村^{15), 16)}は、熱力学的考察・平衡条件に基づいて、実際の土のとのる最大の飽和度を擬似飽和度と定義した。なお、擬似飽和度は降雨に伴う斜面崩壊の予知¹⁷⁾を目的とした不飽和浸透解析等の入力パラメータとして用いられており、荒木・北村^{15), 16)}は、締め固め曲線から擬似飽和度を推定する手法を提案している。本論文では、この擬似飽和度の概念を導入し地表面付近である第1層の飽和度について擬似飽和度以上で地中への降雨浸透が容易になると想定する。第1層の飽和度の閾値（擬似飽和度）を0.80と仮定する。なお、優先順位は、判別条件(i)とする。

(i) 降雨強度

$$\begin{cases} R \leq k_s & : C_e = 1.0 \\ R > k_s & : C_e = \frac{k_s}{R} \beta \end{cases} \quad (14)$$

(ii) 第1層の飽和度

$$\begin{cases} S_{r1} > 0.80 & : C_e = 1.0 \\ S_{r1} \leq 0.80 & : C_e = \frac{k_s}{R} \beta \end{cases} \quad (15)$$

(6) 計算条件

本解析では、人工斜面を対象として、法長 7m、傾斜角 30 度斜面を想定している。また、降雨流入係数 C_e を用い、補正係数 β を変えることで不織布フィルターの施工の有無による地中への降雨浸透の時間変化を検討する。

空間微小間隔 Δz は 5cm、時間微小間隔 Δt は 2s とした。 $\theta - \psi$ 関係と $k - \theta$ 関係としては、Brooks-Corey の式を用いることとして、 $k_s = 2.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、 $\theta_s = 0.4$ 、 $\theta_r = 0.05$ 、 $\psi_b = 40 \text{cm}$ と設定した。ここでは、吸水・脱水過程のヒステリシスは考慮していない。初期条件は、地表面から深さ方向に体積含水率が裸

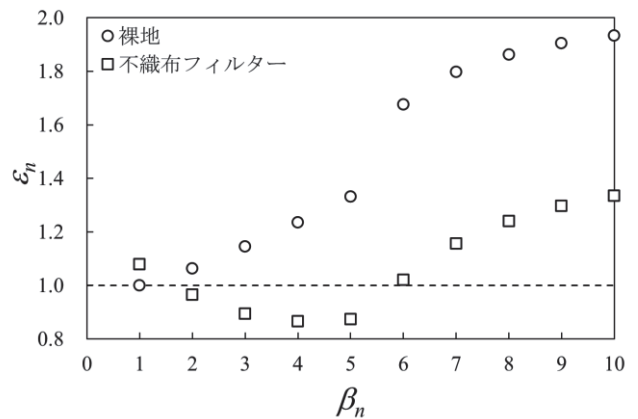


図-3 観測値と数値解の誤差と補正係数の関係

地では $\theta = 0.097$ 、不織布フィルターでは $\theta = 0.080$ とする。さらに、補正係数 β については、 $\beta = 0.1 \sim 1.0$ を 0.1 間隔で与え最適な係数を見つけ出す。また地表の降雨強度については、2021 年 6 月 3 日 0 時~6 月 5 日 0 時まで間の 1 時間毎の観測値を与えた。

4. 解析結果

本論文は、地中モデルの第2層の数値解および観測値との比較検討を行った。

(1) 土の種類による定数λ

土の種類による定数 λ は、現地観測値に数値解をフィッティングさせることで決定する。本論文では、 $\lambda = 1, 2, 3, 4$ を計算条件に与え検証する。なお、 $C_e = 1.0$ として計算を行う。

図-2 より、数値解は、裸地および不織布フィルターともに $\lambda = 2$ のときが最も観測値にフィッティングしている。一方、降雨時間帯については、数値解が観測値より体積含水率を過大評価していることから、 λ のみの設定では降雨時の体積含水率を適切に評価できないと考えられる。

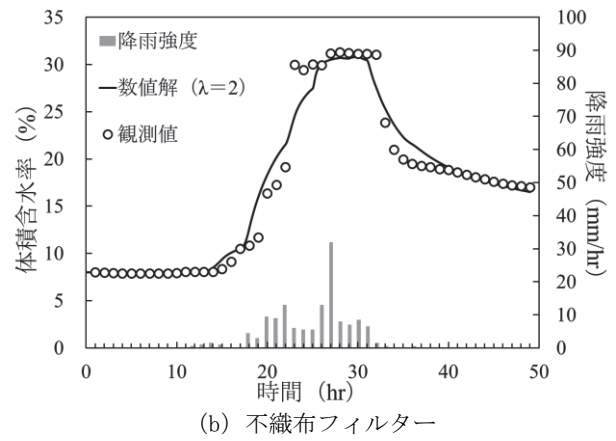
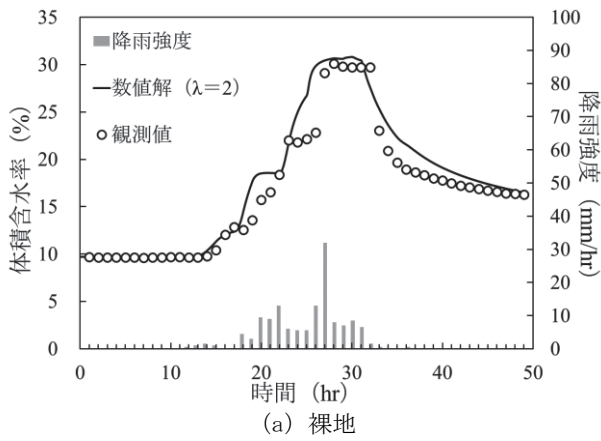


図-4 体積含水率の時間変化

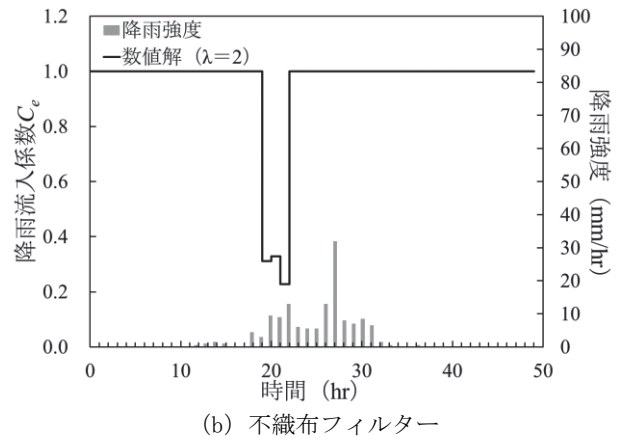
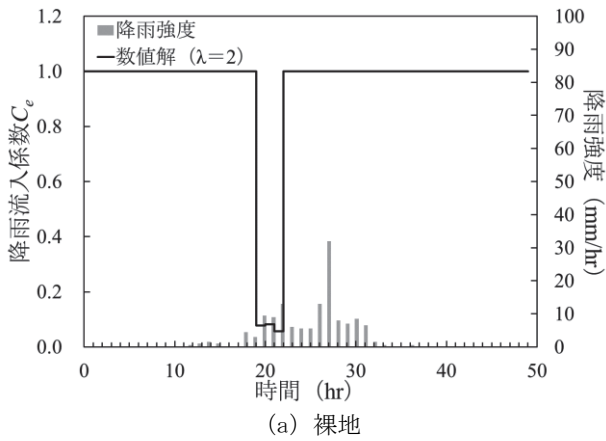


図-5 降雨流入係数 C_e の時間変化

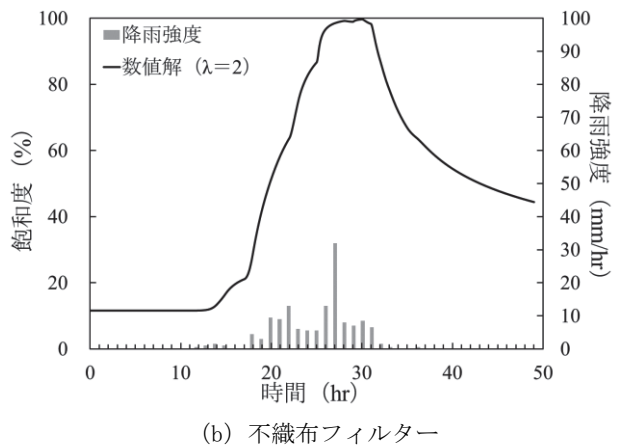
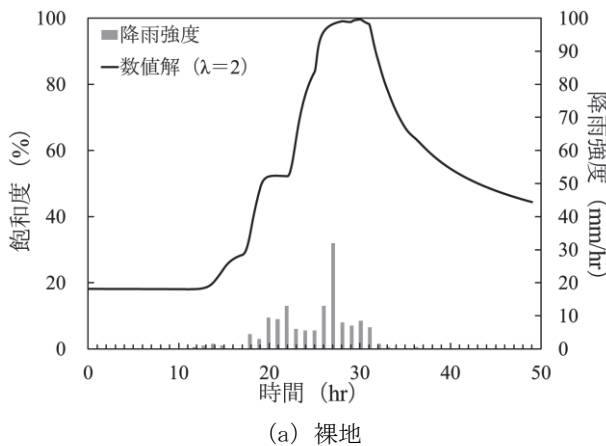


図-6 飽和度の時間変化

(2) 降雨流入係数の補正係数 β

数値解 \hat{y}_i , 観測値 y_i およびデータ数 $N (=49)$ の誤差 ε については, 下式で評価することで補正係数 β を決定する.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (16)$$

ここで, ε は, 裸地の誤差の最小値 ε_{min} で除して ε_n と表記する. また補正係数 β は, 裸地の誤差の最小値 ε_{min} のときの β を基準補正係数 β_o として規格化する. この規格化された値は, $\beta_n = \beta / \beta_o$ とする. 式(16)から, 誤差の最小値は, 裸地で $\beta = 0.1$ ($\beta_n = 1$), 不織布フィルターで $\beta = 0.4$ ($\beta_n = 4$) の場合である.

(3) 解析結果の検討

図-3 には, 観測値と数値解の誤差 ε および補正係

数の関係を示す。地表が裸地では、図-3 より、 $\beta_n=1$ で ε が最小となる。この場合は、 β_n の値が増加するにしたがい ε の値が大きくなる。一方、不織布フィルターが施工された地表面は、 $\beta_n=4\sim 5$ で誤差 ε が裸地の誤差を下回り、観測値と数値解と誤差が小さい。この間は、地中への浸透が維持され水を土中に貯留していることから、不織布フィルターを施工することにより、裸地と比べて4から5倍程度の浸透能を有していると考えられる。

図-4 には、観測値と数値解の体積含水率の時間変化を示す。図-5 では、降雨流入係数の時間変化を表示する。また図-6 には、飽和度の時間変化を示す。

降雨による体積含水率の上昇については、図-4 から、地表面が裸地より不織布フィルターを施工した場合が観測値に近い傾向を示している。さらに、降雨流入係数は、図-5 より、裸地より不織布フィルターの方が2倍程度高い値を示す。図-6 から、降雨流入係数が低下した時間帯では、裸地の飽和度の上昇が見られないことから降雨の浸透能が低下している。この時間帯においては、余剰降雨の流下により Horton 地表流が発生し斜面侵食が生じていると考えられる。一方で、不織布フィルターの場合には、地表面を保護することで地中の土砂の流出を防ぎ、浸透能を確保できていると考えられる。

5. まとめ

本論文では、鉛直次元浸透流現象に基づく数値計算を実施して、以下の知見が得られた。

- 1) 裸地の場合には、Horton 地表流が発生して斜面侵食が生じて浸透能低下する傾向にある。
- 2) 現地観測値から降雨流入係数および土の種類の数値を決定することができた。
- 3) 不織布フィルターを地表面に施工すれば、裸地の場合より、4~5 倍程度の浸透能を有し、水資源涵養機能が向上することを意味している。
- 4) 不織布フィルターには、余剰降雨の地表面への流下を予防することで斜面の侵食防止効果が期待できる。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP21K04263 の助成を受けたものです。また株式会社ソイル・ブレン、多機能フィルター株式会社、日本工営株式会社および中村建設株式会社の関係各位にご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会 2009 年 7 月豪雨による山口県土砂災害緊急調査団：2009 年 7 月 21 日豪雨による山口県防府地区での斜面災害，地盤工学会誌，Vol.57，No.12，pp.39-42，2009.
- 2) 地盤工学会九州北部土砂災害調査団：平成 21 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害調査報告書，地盤工学会，2010.
- 3) 恩田裕一，奥西一夫，飯田智之，辻村真貴：水文地形学，古今書院，1996.
- 4) 五味高志，宮田秀介，恩田裕一：ヒノキ人工林流域における表面流の発生と流域の降雨流出特性，水利科学，No.311，pp.77-94，2010.
- 5) 藤原東雄，福田靖，上俊二，桑嶋啓治，常村忠生：開放型フィルターによる斜面の安定，地盤と建設，地盤工学会中国支部論文報告集，Vol.21，No.1，pp.23-30，2003.
- 6) 坪郷浩一，中村勝美，山本一夫，上俊二，福田靖：不織布フィルターを用いた降雨時の法面侵食防止に関する研究，地盤と建設，地盤工学会中国支部論文報告集，Vol.29，No.1，pp.89-97，2011.
- 7) 徳久晶：浸透流解析と実物大型崩壊実験によるまさ土斜面の降雨浸透および源頭部崩壊メカニズム，博士論文，山口大学大学院創成科学研究科，2020.
- 8) 佐藤邦明，岩佐義朗：地下水理学，丸善出版，2002.
- 9) 小川滋，岸洋介，山田あゆみ：雨水の浸透・流出と押し出し作用に関する研究，水文・水資源学会誌，第 3 巻 3 号，pp.25-35，1990.
- 10) 土木工学会：水理公式集 [2018 年版]，丸善出版，pp.53-55，2019.
- 11) Brooks, R. H. and Corey, A. R.: Properties of porous media affecting fluid flow, J. Irrigation and Drainage, Proc. ASCE, Vol. 92, (IR2), pp.61-88, 1966.
- 12) 岡太郎，角屋睦：裸地斜面域における雨水の侵入と地下水流出(2)，京都大学防災研究所年報，第 17 号 B，pp.523-533，1974.
- 13) 神谷浩二，Rully BARKKRIE，本城勇介：保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定，土木学会論文集 C，Vol.62，No.3，pp.679-688，2006.
- 14) 藤森弘晃，荒木 功平：不飽和砂の浸潤・締固め特性と加振時破壊形態に関する実験的考察，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 73(4) I_161-I_169 2017.
- 15) 北村良介，酒匂一成，荒木功平，宮本裕二，山田満秀：豪雨災害の予知技術，地盤工学会誌，Vol.60，No.3，pp.6-9，2012.
- 16) 荒木功平，北村良介：不飽和土の締固め曲線と水分特性曲線の関係，地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.83-90，2005.
- 17) K. Araki, R. Kitamura: Derivation of SWCC and permeability coefficient from compaction test based on Kitamura model, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia2007), pp.327-333, 2007.

(2022. 5. 30 受付)