不織布フィルターを設置した斜面における地中体積含水率変化を考慮した降雨浸透流解析

RAINWATER SEEPAGE ANALYSIS OF SLOPES WITH NONWOVEN FILTERS CONSIDERING CHANGES IN SOIL VOLUMETRIC WATER CONTENT

坪郷　浩一[1]・荒木　功平[2]
Koichi TSUBOGO and Kohei ARAKI

[1]徳山工業高等専門学校機械電気工学科（〒745-8585　山口県周南市学園台）
E-mail: tsubogou@tokuyama.ac.jp
[2]徳山工業高等専門学校土木建築工学科（〒745-8585　山口県周南市学園台）
E-mail: araki@tokuyama.ac.jp

***Key Words**: cumulative rainfall, nonwoven filter, seepage flow, Hortonian overland flow*

1. はじめに

わが国では，気候変動により短時間に 50mm を超える集中豪雨が増加傾向にある [1)]．これにより，土砂災害や斜面崩壊が多発し，毎年人的・経済的損失を与えている．

降雨（豪雨）の浸透，流出メカニズムは以下のように示されている．降雨は地表面で地中への浸透流と地表を流れる地表流に分かれる．降雨強度が浸透能を超えると，余剰の雨が地表を流れるホートン地表流となり，斜面侵食を引き起こす．従来，植生が豊かな斜面ではホートン地表流は発生しないとされてきた [2),3)]．しかし，植生の衰退が原因でホートン地表流が発生し，斜面侵食が起きることが報告されている [3)]．

そのような斜面侵食に対して，斜面保護工法の一つとして不織布フィルターが用いられる．その侵食防止効果は，既往研究 [4)] で実証されている．また，降雨・越流実験にはコストと時間がかかり，地中への降雨浸透状況は十分に解明されていないのが現状である．

これに対して，Tsubogo et al.[5)] は，降雨浸透に関する課題に対し，ホートン地表流を考慮した地中への有効降雨量に着目した．そして，降雨強度と地盤の最大透水能力である飽和透水係数との大小関係を判別条件として，地中に浸透可能な降雨量の定式化を試みた．さらに，荒木・北村 [6)] が提案した擬似飽和度（不飽和土が飽和状態とみなせる飽和度）の概念を導入し，地表面付近である第 1 層（地表面からの土層厚）の飽和度がこの擬似飽和度以上になった段階で，地中の間隙が水で満たされて下方への降雨浸透が容易になると想定した．これらを考慮して，Tsubogo et al.は降雨が地中に実際に浸透する割合を表す降雨流入係数の算定式 [5)] を提案した．その後，水分状態によって変化する不飽和透水係数を用いた鉛直一次元降雨浸透流解析も行い，地中の体積含水率の数値解が観測値を再現していることを確認した．しかしながら，Tsubogo et al.[5)] では斜面下部における観測値と数値解析結果の比較が行われているものの，当該の観測値には降雨のみならず斜面上部からの側方流入（地表流など）が影響を及ぼしている可能性がある．また，連続降雨にともなう累加雨量が考慮されていないため，体積含水率の数値計算結果が観測値を過大に評価する傾向にある．そこで本研究では，以下に示す手法を用いて観測することにした．

①土砂災害警戒区域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）の北側斜面に実験区画を造成し，不織布フィルター設

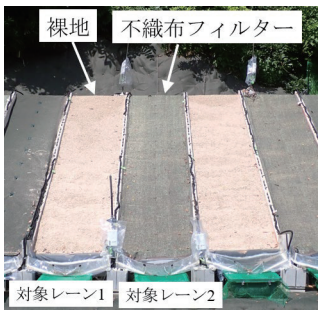


図-1　現地観測の概略

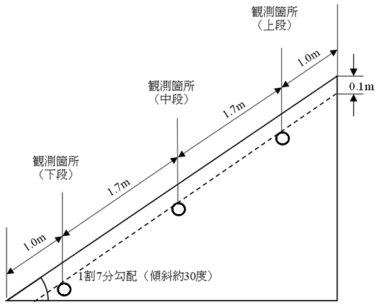


図-2　斜面観測の概略図

置区画および裸地区画を設置した．②各区画の斜面上段・中段・下段の地表面下 10cm に土壌水分センサーを設置し，約 4 ヶ月間にわたり降雨量と地中の体積含水率の変動を観測した．

本論文は，連続降雨にともなう斜面の体積含水率変化を高精度に予測するため，ホートン地表流を考慮して地中に浸透する有効降雨量の算定手法を提案し，その妥当性を検証するものである．本研究では，側方流入の影響が軽微な斜面上段の観測値から降雨特性を推定し，連続降雨による累加雨量を定式化の条件式に導入した．また，鉛直一次元降雨浸透流解析を実施し，体積含水率変化の観測値に対する再現性を検討した．

2. 現地観測

(1) 現地観測方法

実験斜面は，**図-1** および**図-2** に示すように徳山高専北側斜面に盛土で造成した．突き固めの方法はタンピングランマーによる打設を行い，締め固め度は山中式土壌硬度計で測定して硬度指数 20mm 前後になるように管理した．斜面の末端は，コンクリートブロックで土留めし降雨時の表面流（または表面排水）を回収できる構造とした．

この斜面の形状寸法は，斜面勾配 1 割 7 分，斜面長さ 5.4m，幅 0.9m で，**図-1** に示すとおり対象レーン 1 は裸地，対象レーン 2 には不織布フィルターを敷設した．地中水分については，土壌水分センサー（METER 社製）を用い，**図-2** に示すように，各対象レーン中央の上中下段 3 箇所，地表から 10 cmの深さ（**図-2** 中〇印）に設置し，観測を行った．観測間隔は 1 時間とし，データロガー(Em50 データロガー，METER 社製)に採取した．本研究においては，体積含水率測定の精度，センサー間誤差に配慮するために，センサー毎に校正式を作成し観測値の補正を行った [7]．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，降雨強度の観測は，

表-1　供試土の性質

項目	数値
土粒子密度(g/cm^3)	2.6500
間隙比	0.4480
空隙率(%)	30.9392
最大体積含水率	0.3090
飽和透水係数(cm/s)	2.0×10^{-4} ～1.0×10^{-3}

表-2　不織布フィルターの性質

項目		数値
単位面積当たり質量 (g/m^2)		8.81±6.4
厚さ(mm)	0.0 kPa	9.00±1.5
	0.2 kPa	2.70±0.6
ウェブ縦方向引張強度 (N/m)		23.1

2024 年 6 月 20 日から 10 月 23 日の梅雨期，秋雨期とし，転倒ます式雨量計を使用して 1 時間ごとに観測した．

(2) 供試土と不織布の物理的性質

実験斜面の供試土には**表-1** に示すまさ土を用いた．また，透水係数は緩詰めと密詰めで試験を行ったため，数値に幅が出ている．

現地観測で使用する不織布フィルターは，降雨時の雨滴衝撃エネルギーを吸収して地表面の破壊を防ぎ，雨水は不織布フィルターの繊維間の空隙（空隙率 99%以上）を通過し，排水されるという特徴などを有している．また，現地施工の不織布フィルターの物性値は，**表-2** に示すとおりである．

3. 鉛直一次元降雨浸透流解析

(1) 鉛直一次元降雨浸透流解析

降雨浸透流は通常二次元，三次元で発生するが，



(a) 第 i 層の離散化　　(b) 第 1 層の境界条件

なお，$w_{i,i-1}$：第 i-1 層から第 i 層への浸透流速 (cm/s)，$k_{i,i-1}$： 第 i-1 層から第 i 層の境界の透水係数 (cm/s)，ψ_i ：第 i 層の吸引圧力水頭 (cm)，Δz_i ：第 i 層の空間微小間隔 (cm)，θ_i ：第 i 層の体積含水率，t：時間(s)，Δt ：時間微小間隔 (s)，$w_{i+1,i}$：第 i 層から第 i +1 層への浸透流速(cm/s)，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)，Δz_1 ：第 1 層の空間微小間隔 (cm)，R：降雨強度(cm/s)，および C_e：降雨流入係数となる．

図-3 基礎方程式の離散化の概略

鉛直方向の流れが卓越することが多いとされる[8]．そのため本研究では，鉛直一次元降雨浸透流解析を用いて単純化した．この解析には，不飽和浸透の支配方程式を変形した式(1)を用いた[9]．現状では，現地観測値を正確に再現する解析方法がないため，降雨が地中に実際に浸透する割合を表す降雨流入係数[5]などの補正係数が必要である．そこで，本解析モデルにおいては，ホートン地表流の発生にともなう降雨の損失分を差し引き，地中に浸透する有効降雨量を定式化している．すなわち，本研究の解析対象は降雨浸透のみであり，地表流の流動そのものは解析対象外として，浸透補正の境界条件においてのみ考慮している．具体的には，**図-3** より，第 1 層の擬似飽和度（不飽和土が飽和状態とみなせる飽和度）を考慮した有効降雨量の算定式を構築するとともに，側方流入の影響が軽微な斜面上段の観測値から降雨特性を推定し，連続降雨による累加雨量を定式化の条件式に加えた．

(2) 基礎方程式

本解析に使用する基礎方程式は，Richards の式[9]の x，y の項を 0 として，z 軸を地表から下向きを正にとると，式(1)の鉛直一次元の式に変形できる．

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left\{k_z(\theta)\frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z}\right\} - \frac{\partial k_z(\theta)}{\partial z} \qquad (1)$$

なお，k_z：z 方向の不飽和透水係数，θ：地中の体積含水率，ψ：吸引圧水頭である．

(3) 土質パラメータの設定

基礎方程式を解くためには，式 (1)中に含まれる吸引圧水頭・体積含水率・不飽和透水係数の 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．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[10] を用い，飽和度 S_r を式 (2) とした．

$$S_r = \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^{\lambda} \qquad (2)$$

なお，S_r：飽和度，θ：地中の体積含水率，θ_s：最大体積含水率，θ_r：残留体積含水率，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）である．

(4) 基礎方程式の離散化[11]

基礎方程式の離散化については，**図-3** に概略を示す．ダルシー則と連続の式に分けて，**図-3** から，式(3)および式(4)のように差分展開する．また各層間の微小間隔は等間隔として数値計算を行った．

$$w_{i,i-1} = -k_{i,i-1}\left(\frac{\psi_i-\psi_{i-1}}{\Delta z_i}-1\right) \qquad (3)$$

$$\theta_{i,t+\Delta t} = \theta_{i,t} - \frac{\Delta t}{\Delta z_i}\left(w_{i+1,i}-w_{i,i-1}\right) \qquad (4)$$

本研究では，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，式(5)のようにして行った．

$$\theta_{1,t+\Delta t} = \theta_{1,t} - \frac{\Delta t}{\Delta z_1}\left(w_{2,1}-C_eR\right) \qquad (5)$$

また，降雨流入係数の詳細については，次節で説明を行うが，**図-4** から第 1 層の体積含水率の変化を第 1 層から第 2 層への浸透流速と地表面から第 1 層へ浸透する降雨強度の差で表現していることから，式(5)の表記が降雨流入係数の提案式の基本的な考え方を反映している．

(5) 降雨流入係数の提案式

Tsubogo et al. [5] は，ホートン地表流を考慮した地中への有効降雨量に着目し，降雨強度と地盤の飽和透水係数との大小関係を判別条件として地中に浸透可能な降雨量の定式化を試みた．さらに，荒木・北村 [6] の擬似飽和度（実質的な飽和状態とみなせる閾値）の概念を導入し，第 1 層の飽和度がこの値以上になった段階で，地中への降雨浸透が容易になると想定した．これらを基に，式(6)より，実際の地中浸透割合を表す降雨流入係数の算定式 [5] を提案した．

$$\begin{cases} R \leqq k_s \text{のとき} C_e = 1.0 \\ R > k_s \text{のとき} \begin{cases} S_{rq} < S_{r1} : C_e = 1.0 \\ S_{r1} \leqq S_{rq} \quad : C_e = \dfrac{k_s}{R}\beta \end{cases} \end{cases} \tag{6}$$

ここで，k_s : 飽和透水係数，R : 降雨強度，β($0 \leqq \beta \leqq 1.0$) ：補正係数，S_{r1} : 第 1 層の飽和度，S_{rq} : 擬似飽和度となる．室内実験の計測値から算出された飽和度 0.99 の状態を，第 1 層の擬似飽和度とする．

降雨を受ける斜面の第 1 層の体積含水率は，表面流出の発生時刻や流出量と密接に関係している．この体積含水率を増加させる大きな要因の一つが，累加雨量や降雨強度などの降雨条件である [12]．岸井 [12] は，降雨条件と斜面形状上の直接流出（地表流出など）との関係に注目し，地形に起因する降雨分布の不一致（斜面直下と流域内の観測点における降雨曲線の差異）を解消するため，小規模な流域の河川下流端において降雨量と流出量を観測した．これらの変数間の相関関係に基づき直接流出量を推定したところ，累加降雨量（R_d）が 20 mm 以上に達すると，降雨開始時から直接流出量が増加する傾向があることが明らかになった．

これらの実証的知見に基づき，本研究では，従来のモデルでは見過ごされがちであった不飽和条件下での地表流出の発生を数学的にモデル化するために，累加降雨量の閾値を組み込んだ点にある．累加降雨量 R_d は降雨開始時からの連続降雨量を追跡する指標であり，水文・土砂災害分野でよく用いられる，6 時間の無降雨期間を経てリセットされるものとした. 本研究では, 長時間の降雨が地中の浸透能を徐々に低下させるという仮定に基づき，限界累加降雨量の閾値として R_{dl} を導入した．

本モデルの特徴は，R_d が R_{dl} に達するか，あるいはそれを超えると，たとえ降雨強度(R) が飽和透水係数(k_s)を下回っている場合でも地中への降雨浸透が減少し，地表流出（すなわち余剰降雨）が増加

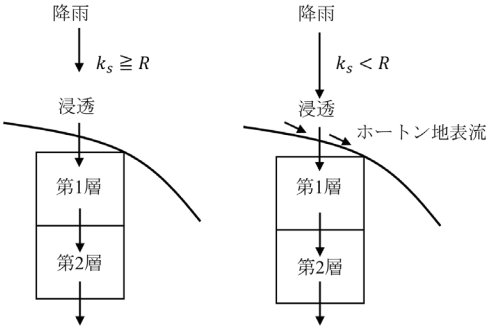


図-4 降雨強度と飽和透水係数の関係

する点にある．この現象は，式 (7) に示すように，k_s と R の比として定義される降雨流入係数 C_e を用いて定式化される．

$$C_e = \frac{R}{k_s}\beta \tag{7}$$

本研究では，連続降雨による累加雨量(R_{dl})を考慮する条件を式(6)に組み込み，式(8)を導出した．

$$\begin{cases} R_d \leqq R_{dl} \begin{cases} R \leqq k_s \quad : \quad C_e = 1.0 \\ R > k_s \begin{cases} S_{rq} < S_{r1} : C_e = 1.0 \\ S_{r1} \leqq S_{rq} \quad : C_e = \dfrac{k_s}{R}\beta \end{cases} \end{cases} \\ R_d > R_{dl} \begin{cases} S_{rq} < S_{r1} : C_e = 1.0 \\ S_{r1} \leqq S_{rq} \begin{cases} R \leqq k_s : C_e = \dfrac{R}{k_s}\beta \\ R > k_s \quad : C_e = \dfrac{k_s}{R}\beta \end{cases} \end{cases} \end{cases} \tag{8}$$

(6) 計算条件

対象として，観測斜面と同じ斜面長さ 5.4m，傾斜角約 30 度斜面を想定している．また，降雨流入係数 C_e を用いた．なお，補正係数β は一定として，本研究では前項で提案したモデルの精度検証を行う．

空間微小間隔Δz は 1cm，時間微小間隔Δt は 2s とした．θ-ψ 関係と k-θ 関係としては，Brooks-Corey の式を用いる．**表-1** より，最大体積含水率はθ_s=0.3090 とする．

観測期間における最小体積含水率の観測値を**表-3** にまとめる．残留体積含水率（θ_r）には，これらのうち，最小体積含水率が大きい裸地の観測値に基づき 0.05 を採用した．藏田・荒木 [13] は，本研究で使用した供試土の限界サクション S_u=1.762 kPa を求めていることから，限界サクション S_u から空気侵入値（限界吸引圧水頭）ψ_b を 18cm 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．土の種類 λ は，既往研究 [5] と同様な土を使用し

ていることから, 土の種類 λ=2 とした. 計算領域は, z 軸を地表から下向きを正にとり，土層厚 350 cm とした．境界条件としては，式(5)より上端境界から降雨強度を与えた．飽和透水係数については，k_s=2.0×10^{-4} cm/s とする．

観測期間中の解析対象期間は, RUN1 では 2024 年 6 月 21 日 22 時から 6 月 22 日 22 時まで，RUN2 では 2024 年 6 月 22 日 22 時から 6 月 23 日 22 時までとする．初期体積含水率は，RUN1 で 6 月 21 日 22 時に観測された体積含水率が裸地の場合でθ = 0.1600，不織布フィルターの場合でθ= 0.1673 であった．RUN2 で 6 月 22 日 22 時に観測された体積含水率が裸地の場合でθ= 0.1772，不織布フィルターの場合でθ = 0.1800 であった．これらの観測値を RUN1 と RUN2 の数値解析の体積含水率の初期値とした．地表の降雨強度については，先述の RUN1 と RUN2 の観測期間で 1 時間毎に観測された降雨強度を与え，累加雨量(R_{dl})を 7.2mm および 20mm とする．なお，数値計算のアルゴリズムは，**図-5** に計算アルゴリズムのフローを示す.

(7) 数値解および観測値の誤差解析

体積含水率の数値解$\hat{y}_i$，観測値 y_i およびデータ数 N の誤差ε については，式(9)で評価した．この誤差εは，ε の値が大きくなると体積含水率の数値解と観測値の誤差が増加し，数値解と観測値の再現性の低下につながる. なお, 本解析では, 地表面から 10cm の観測値を計測していることから，数値解についても同じ位置で解析を行い，観測値と比較検討する.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{i=N}(\hat{y}_i - y_i)^2} \qquad (9)$$

4. 解析結果

(1) 提案モデルの妥当性の評価

図-6 および**図-7** は, 観測値と RUN1 および RUN2 の数値シミュレーション結果を比較したものである．図中，previous は Tsubogo et al. [5]のモデルを指し，proposed (7.2mm)および proposed (20mm)は，本研究で提案したモデルを示し，カッコ内は限界累加降雨量の閾値である．本解析では，既往の研究と異なり空間分解能を高めたケースで検討している．なお，補正係数βは，提案モデルの妥当性を検証するため，地表面性状に関わらず 0.3 と一定とした.

図-6 および**図-7** に示すように, 限界累加降雨量が

表-3　残留体積含水率の決定

地表面	最小観測値
裸地	0.0521
不織布フィルター	0.0341

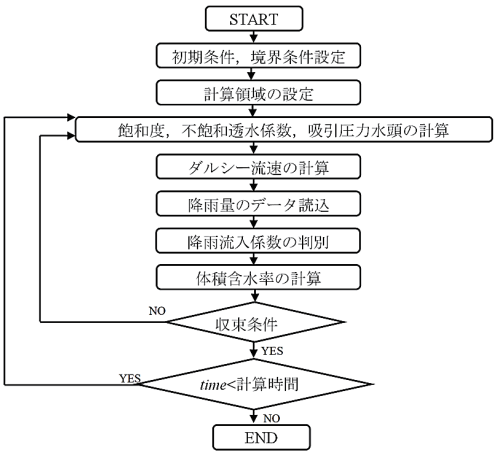


図-5 計算アルゴリズムのフロー図

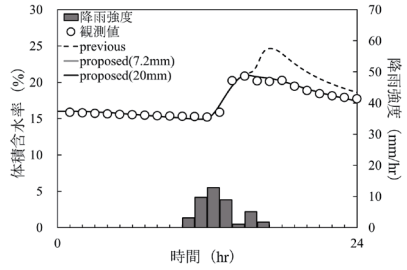
7.2mm と 20mm ともに達すると，RUN1 で観測された体積含水率が上昇し始めた．一方，RUN2 では，限界累加雨量が 20mm で観測された体積含水率より過大な数値解となったが，7.2mm の場合で観測された体積含水率に近い結果となった．これは，累加降雨量 7.2mm が地中の体積含水率の著しい変化を捉えるための有効な閾値であることを示唆している.

(2) 考察

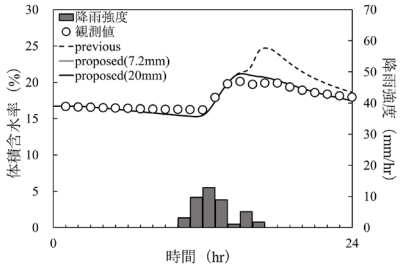
Tsubogo et al. [5] では，5cm を格子間隔用いたため数値拡散の影響により地表付近の急峻な水分勾配を捉えるには不十分であったが，本研究では 1cm の格子間隔を採用することでこの誤差を効果的に抑制し，観測値の再現性の数値解を得ることができる．これらの結果は，補正係数の最適化を組み込む前段階として本モデルが，裸地および不織布フィルターの双方の観測されたデータを単純なモデルで再現していることを示している.

5. まとめ

本研究では，従来のモデルに累加降雨量の概念を取り入れ，空間分解能を向上させることで，数値解の体積含水率を評価した．本研究で補正係数βを一定として新たに導入したモデルの再現性を検討して，地表面付近の地中の体積含水率の数値解結果は，概ね観測値と一致していた．今後の課題としては，補正係数βの最適化を行い，より明確に裸地と不織布

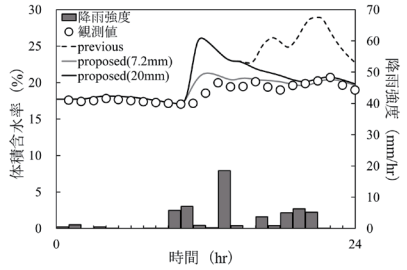


(a) 裸地（上段，β= 0.3）

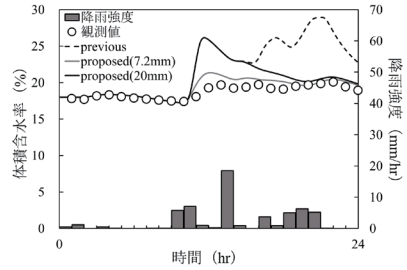


(b) 不織布フィルター（上段，β= 0.3）

図-6 体積含水率の時間変化(RUN1)



(a) 裸地（上段，β= 0.3）



(b) 不織布フィルター（上段，β= 0.3）

図-7 体積含水率の時間変化(RUN2)

フィルターの違いについて検討する予定である.

謝辞：本研究は，公益財団法人中国地域創造研究センターの 2024 年度新産業創出研究会助成(研究代表者：荒木功平氏）の一部を受けて実施されました. 研究を進めるにあたり，徳山高専の桑嶋啓治教授，片山光亮教授，福田靖技術長，上俊二特命教授にはご助言をいただいた.ここに深く感謝申し上げます.

参考文献

1) 気象庁:気象業務のいま 2025，研精堂印刷株式会社，pp.30-51，2025.

2) 宮田秀介，恩田裕一，五味高志，水垣滋，浅井宏紀，平野智章，福山泰治郎，小杉賢一朗，Roy C. Sidle，寺嶋智巳,平松晋也：森林斜面におけるホートン型表面流の発生に影響を与える要因－地質および降雨特性の異なる 3 サイトにおける観測結果の解析－，日本森林学会誌，Vol.91，No.6，pp.398-407，2009.

3) 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.

4) 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(2003) 23-30.

5) Koichi Tsubogo, Kohei Araki, Yasushi Fukuda, Keiji Kuwajima, Kosuke Katayama, Shunji Ue: Effect of nonwoven filters on rainfall seepage flow and stability of slopes, Smart Construction and Sustainable Cities, Vol.3, pp.1-19, 2025.

6) 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，pp.83-90，2005.

7) 瀬戸口慧，志賀弘征，田原雄一郎，河野伸之，坪郷浩一，荒木功平，福田靖，桑嶋啓治，片山光亮，上俊二：不織布フィルター敷設斜面における斜面上部～下部にかけての土中水分量の観測手法の検討・構築，ジオシンセティックス論文集，第 39 巻，pp.41-51，2024.

8) 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.

9) 土木工学会：水理公式集［2018 年版］，丸善出版，pp.53-55，2019.

10) 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.

11) 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，523-533，1974.

12) 岸井徳雄：直接流出と累加雨量について，第 26 回水理講演会論文集，pp.301-305，1982.

13) 藏田光，荒木功平：まさ土における空気侵入値とレイノルズ数の関係に関する一考察，第 77 回令和 7 年度（2025）年度土木学会中国支部研究発表会概要集，pp.206-208，2025.

（2026.5.29　受付）