

透過性を有するブロック積砂防堰堤の捕捉機能に関する解析的検討

原田 紹臣, 藤本 将光, 中村 達也, 里深 好文(立命館大学理工学部)
 ○佐藤 哲也, 橋口 聡太郎, 神野 忠広 (共和コンクリート工業株式会社)
 水山 高久(京都大学名誉教授)

1. はじめに

本研究では、山脚固定等の根固め等の機能が期待される透過性を有する砂防堰堤（ブロック積砂防堰堤¹⁾）背面の堆砂面における捕捉機能について新たに提案する。なお、着眼する機能については、地下水を速やかに堰堤本体より排水させた不飽和の状態を維持させた堆砂面において、水と土砂の分離を期待するものである。そこで、これらの機能に関して、既往の砂防堰堤に堆砂している実在の土砂を採集して条件を設定し、解析的に検討して考察する。

2. 解析概要

今回の検討に用いる堆積部中における不飽和浸透過程も考慮した土石流等の侵食堆積予測モデル²⁾については、不飽和堆積物中における浸透過程とその堆積物上部を通過する洪水や土石流等による侵食堆積過程について同時に計算が可能である。さらに、堆積物の表面を介した流動層と堆積層との水移動についても考慮しており、河床表面内外の圧力差と堆積層の透水係数を用いて、水移動量を計算している。また、河床勾配 α の鉛直二次元場を対象として、 x 軸を河床基岩面と平行にとり、それと垂直な z 軸をとって、スタガードスキームにより離散化している（図-1：左）。なお、圧力水頭 ψ と体積含水率 θ 及び透水係数 K との関係については、式 (1) に示すRichard式が成立するものとしている。

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \psi} + \beta S_s \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 z は河床位、 S_s は比貯留係数、 α は河床勾配、 β は飽和時に 1 または不飽和時に 0 となる係数である。また、圧力水頭と体積含水率の関係及び透水係数は、それぞれ次のように表される。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (2)$$

$$K = K_s \left\{ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right\}^m \quad (3)$$

ここに、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 ψ_0 は水分特性曲線の変曲点における圧力水頭、 K_s は飽和透水係数及び m は係数である。なお、流動層及び堆積層との境界（河床面）における水交換フラックス w_i を求める際に用い

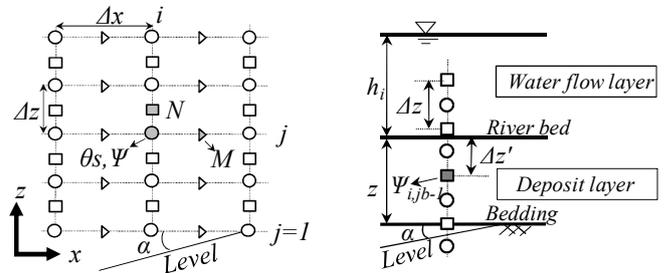


図-1 浸透流解析の変数配置 (左) と水浸透フラックスを求める際の変数配置図 (右)

る変数の配置を図-1 (右) に示す。水交換フラックスは、一定の値を持つ層厚 Δz と河床面位置までの層厚 $\Delta z'$ との関係により、次のように表される。 w_i は、河床面に一番近い堆積層内部の地点における圧力水頭 ψ_{ijb-1} を用いて、

$$w_i = -K \left\{ \frac{h_i \cos \alpha - \psi_{ijb-1} + \cos \alpha}{\Delta z' - \Delta z / 2} \right\} \quad (4)$$

と表される。ここに、 h_i は流動深、 ψ_{ijb-1} は河床面に一番近い堆積層内部の地点における圧力水頭である。また、流動層における流れの基礎方程式は、一様砂礫を対象とした一次元非定常流れのものを用いる。全流量の質量保存則、土石流中の砂礫の質量保存則及び流れの運動方程式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = w_i + i_b \left\{ C_* + (1 - C_*) \frac{\theta}{\theta_s} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} = i_b C_* \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{uw_i}{h} = g \sin \alpha - \frac{\partial(z+h)}{\partial x} g \cos \alpha - \frac{\tau_b}{\rho h} \quad (7)$$

である。ここに、 h は流動深、 u は断面平均流速、 i_b は堆積物の侵食または堆積速度、 C_* は堆積物中の表面における土砂濃度及び河床の堆積濃度（同等）、 C は土石流中における土砂濃度、 g は重力加速度、 τ_b は河床せん断力、 ρ は水の密度、 w_i は式 (4) によって求められる。ここで、本解析モデルにおける不飽和浸透過程に関する実験結果と解析結果を比較した筆者らの検証事例²⁾（各ケースの浸透過程に関する実験結果と解析結果との計測時間毎における浸潤面の比較）を図-2 に示す。図-2 に示すとおり、不飽和浸透流の観測と

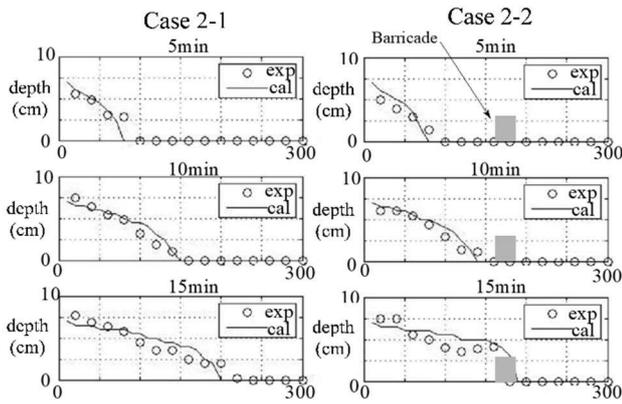


図-2 実験による解析モデルの妥当性検証結果²⁾

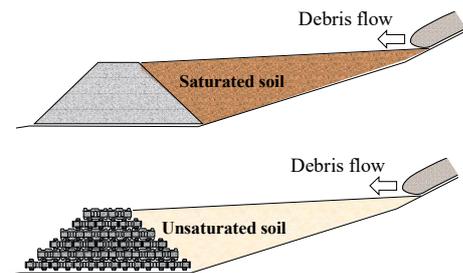


図-3 飽和(上)と不飽和状態(下)を対象にした検討モデル

解析値の比較により、両者は概ね一致していることが確認されており、モデルの妥当性が示されている。

次に、本解析モデル²⁾を用いて、既設の不透過型砂防堰堤において堆砂している土砂を採集してきた試料(実験土)を対象に、図-3に示す仮定した2つの条件を対象に検討した。なお、図-3(上)のケースは、不透過型砂防堰堤における水抜工の排水性能が顕著に低下して堆砂土が飽和している状態を想定している。一方、図-3(下)のケースは、ブロック積砂防堰堤に代表される透過性を有する砂防堰堤において期待される堆積物の排水性能により、堆砂土が不飽和である状態を想定している。これらのケースを対象に、土石流等の通過時における各堆砂面への水の浸透に伴う水と土の分離による効果について、解析的に検討する。

本研究では、土石流等が一般的な Regime 理論を参考に、流量に応じて一定の流下幅を形成して流下するものと仮定し、簡単のため鉛直二次元場を対象として解析する。また、試料を採集した溪流において、現地状況より推定される流出条件を設定し、単位幅流路(延長 200 m, 堆積層厚 5 m)を対象に不飽和浸透過程及び流水の流動過程について解析した。また、先行研究²⁾を参考に、比貯留係数 S_s を 1.0、係数 m を 3 とし、 $\Delta x = 100$ cm, $\Delta z = 100$ cm, $\Delta t = 0.001$ s とし計算した。なお、単位幅あたりの最大土石流ピーク流量を $Q_{pm} = 1.0$ m³/(s・m) とし、一定流量で堆砂面上部より 100 秒間供給することとした。また、堆砂面の勾配を 5 度、河床の

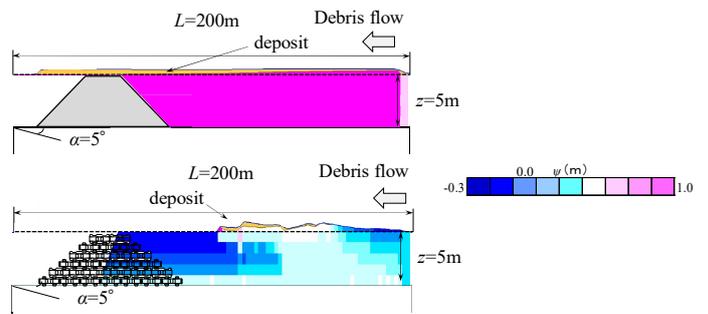


図-4 飽和(上)と不飽和状態(下)を対象にして得られた解析結果

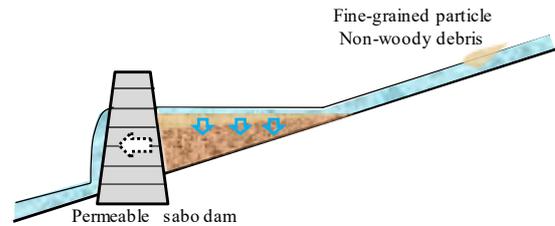


図-5 透過性を有する砂防堰堤において期待される堆砂面水抜きフィルター効果による細粒土砂等の捕捉機能

粒径を 10.0 cm 及び内部摩擦角を 37 度とし、堆積層表面における容積濃度を 0.6、流入する土石流中の土石流濃度を 0.1、マンニングの粗度係数を 0.05 m^{1/3}s とした。

計算の結果得られた 100 秒後の圧力水頭の分布と河床縦断形状を図-4 に示す。なお、図-4(上)は堆砂土が飽和している状態で土砂を含んだ流水が上部を通過した場合であり、堆砂土の飽和状態により堆砂土への水への浸透が見られず、供給した約 4 分の 1 程度の土砂が堰堤の上部を通過して捕捉されない結果となった。一方、図-4(下)は不飽和土の堆砂面を通過する場合であり、こちらは、堆砂土へ多くの水が浸透し、土砂と水が分離して土石流等が堆砂面で停止することがわかった。これらの結果より、堰堤の背面における堆砂土の水分状態(含水比)により、急勾配区間での山脚の固定を目的とした床固め工においても、従来の底面水抜きスクリーンと同様の堆砂面(底面)水抜きフィルター効果としての効果が期待できることが示唆された。なお、この効果により、近年課題となっている土砂・洪水氾濫対策³⁾における細粒土砂の処理についても、透過性を有した砂防堰堤の堆砂面におけるフィルター効果による捕捉が期待できるものとする(例えば、図-5)。

参考文献

- 1) 建設コンサルタンツ協会: ブロック積砂防堰堤, 活用事例集, 2023.
- 2) 原田紹臣・里深好文: 堆積物中の不飽和浸透過程を考慮した侵食に関する研究, 河川技術論文集, Vol.18, 2012
- 3) 原田紹臣ら: 土砂・洪水氾濫対策の施設規模における計画規模の設定方法に関する考察, 河川技術論文集, Vol.28, 2022.