

浅水流方程式による暗渠内の流砂の停止過程の再現

九州大学大学院生物資源環境科学府 ○江藤稚佳子・原 教介
九州大学大学院農学研究院 水野秀明

1. はじめに

山間地域において、洪水が溪流を横切る林道や道路の下に設けられた暗渠に流れ込むと、それらの中で流砂が堆積して閉塞する。すると、洪水は林道や道路上を流れ始め、舗装や路盤を侵食したり、住宅地に流れ込んだりすることで、災害を引き起こす。その災害を防止・軽減するためには、暗渠内での土砂の挙動を予測する必要がある。

しかしながら、暗渠内での流砂の挙動はあまり明らかになっていない。暗渠内で流れの速度や水深が急変すると、抗力や浮力を含めた圧力といった流砂に作用する力が急に变化するため、それを考慮した流砂の挙動を予測する手法がほとんどないためである。また、これまでの暗渠内の水の流れを対象とした数理モデルは、暗渠内の流れを定常(例えば、中村ら, 2004)とすることが多い。一方で、山地流域の溪流では、降雨中に流量ハイドログラフが大きく変化するため、暗渠内の流れは非定常として扱う必要がある。そのため、2次元浅水流方程式といった非定常な流れを追跡できる数理モデルの適用が求められる。しかし、今のところ暗渠の中に2次元浅水流方程式を適用した事例はほとんどない。

本研究は、暗渠内の流れと流砂の堆積過程に適用できる2次元浅水流方程式を開発するとともに、水路実験による暗渠内の水の流れと流砂の停止過程の再現計算を行い、その再現性を明らかにすることを目的とする。

2. 水路実験

本研究では、江藤ら(2021)の水路実験の結果を対象に暗渠内の流砂の堆積過程の再現計算を行った。図-1は実験に用いた水路である。水路実験では幅0.03m、高さ0.027mの亚克力製の流路を水平に設置し、暗渠内で流れを急激に変化させるために、流路の下流側を90度に屈曲させた。実験に際して、水を水路の上流端から $201.74 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ で供給し、流れが定常化した後、4mmのガラスビーズを $28.41 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ で供給した。

図-2は水路実験のガラスビーズの堆積状況である。水路模型実験の結果、暗渠の入口から0.12m程度の位置で跳水のように水深が急激に深くなり、流れの表面は暗渠の上面に達した。ガラスビーズは水深の変化地点を通過すると減速し、屈曲部の手前で停止した。後続のガラ

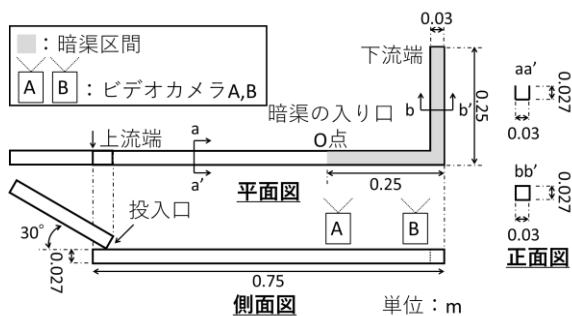
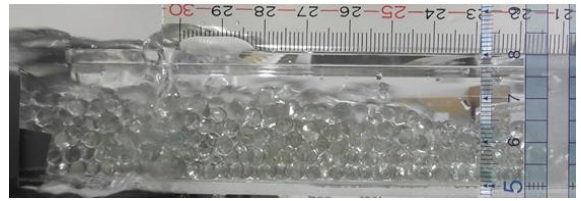
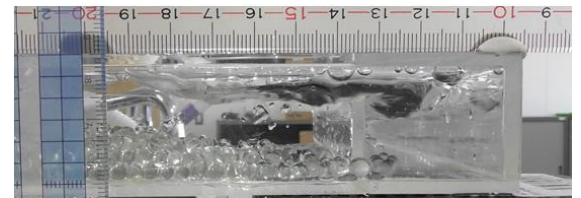


図-1 実験に用いた水路の概要 (江藤ら, 2021)



(a) カメラ A (2.0s)



(b) カメラ B (2.0s)

図-2 ガラスビーズの堆積状況 (江藤ら, 2021)

スビーズは、停止したガラスビーズに衝突して停止したり、停止したガラスビーズに乗り上げて堆積したりした。堆積により水深の変化点は上流側へ移動した。

3. 浅水流方程式による暗渠内の流れの再現計算

3-1. 2次元浅水流方程式を用いた数理モデル

本研究では暗渠が満管状態の場合にも適用できるように、水は流れの表面に作用する圧力に応じて僅かに圧縮すると仮定する。これにより、自由水面を持つ開水路と自由水面を持つ管水路、満管状態の管水路を統一して計算できるようになる。すると、2次元浅水流方程式は、

$$\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial t} = \vec{s} \quad \dots\dots(1)$$

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} \rho h \\ \rho U h \\ \rho V h \\ (\sigma - \rho) C h \end{bmatrix} \quad \dots(2)$$

$$\vec{F} \equiv \begin{bmatrix} \rho U h \\ \rho U^2 h + \frac{1}{2} \rho g h^2 + p_s h \\ \rho U V h \\ (\sigma - \rho) C U h \end{bmatrix} \quad \dots(3)$$

$$\vec{G} = \begin{bmatrix} \rho V h \\ \rho U V h \\ \rho V^2 h + \frac{1}{2} \rho g h^2 + p_s h \\ (\sigma - \rho) C V h \end{bmatrix} \quad \dots(4)$$

$$\vec{s} = \begin{bmatrix} -\rho g h \frac{\partial b}{\partial x} + p_s \frac{\partial \rho h}{\partial x} + \int_b^s \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \\ -\rho g h \frac{\partial b}{\partial y} + p_s \frac{\partial \rho h}{\partial y} + \int_b^s \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dz \\ -C_* \frac{\partial \{(\sigma - \rho) z_b\}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad \dots(5)$$

となる。ここで、 h : 水深[m], U : 流れの速度の x 成分

[m/s], V : 流れの速度の y 成分[m/s], g : 重力加速度 [m/s²], ρ : 流れの密度[kg/m³], p_s : 流れの表面の圧力 [N/m²], b : 河床の標高[m], s : 水面の標高[m], C_* : 河床の堆積層における土砂容積濃度である。堆積深の時間変化は、高橋 (2004) を参考に、

$$-\frac{\partial(\rho z_b)}{\partial t} \equiv \rho i \approx \rho \delta_d \left(1 - \frac{U}{p_i U_c}\right) \frac{C_{L\infty} - C_L}{C_{*DL}} U \quad \dots (6)$$

$$-C_* \frac{\partial\{(\sigma - \rho)z_b\}}{\partial t} \approx (\sigma - \rho)C_* i \quad \dots (7)$$

と近似した。ここで、 δ_d : 堆積速度係数 (=0.05), p_i : 実験係数 (=1/3) である。

満管状態の管水路の場合、2 次元浅水流方程式に Water Hammer の数理モデルを組み込んだものを開発した。このとき、密度と圧力の関係は、

$$p_s = E \cdot \log_e \frac{\rho}{\rho_0} + p_0 \quad \dots (8)$$

となる。ここで、 E : 流れの体積弾性率[Pa], ρ_0 : 水の密度[kg/m³], p_0 : 大気圧[N/m²]である。

計算に際して、水路を約 0.005m メッシュの論理構造格子に分割し、暗渠の高さは 0.027m とした。暗渠の流入口から水深 0.0085m, 速度 0.79m/s で 20 秒間供給し、その後、ガラスビーズを水路の上流端から供給した。また、水は下流端から計算領域外へ流出するものとした。本研究の計算にあたっては、満管状態における水の密度の変化は無視できるほど小さいとした。

3-2. 再現計算の結果と考察

図-3, 4, 5 は暗渠の内の水深とガラスビーズの堆積状況の実験結果と計算結果を、それぞれ 0.1s, 0.9s, 1.7s の時点で比較したものである。

図-3 に示した通り、水深の計算結果は暗渠の流入口から 0.12m 付近で水深が急激に上昇し、実験結果の値と概ね一致した。一方、堆積深の計算結果はゼロとなり、実験結果の値より浅かった。

図-4 に示した通り、水深の計算結果は屈曲部より上流において実験結果の値よりも浅くなった。一方で、堆積深の計算結果は屈曲部より下流まで薄く堆積しており、実験結果の値よりも下流まで到達した。

図-5 に示した通り、水深の計算結果は暗渠の入り口付近で上面に達するものの屈曲部付近では 0.04m 程度と浅く、実験結果の値と異なった。堆積深の計算結果は 0.9s 時点よりも下流側まで到達し、実験結果の値よりも下流まで到達した。

4. 考察

本研究で提案した数理モデルは、水だけを流した期間で実験結果を概ね再現できたものの、土砂を模したガラスビーズを投入した以降で実験結果と大きく乖離した結果を出すようになった。これは、暗渠が満管状態となった時刻以降で、土砂に関する質量保存則及びその離散化の適用性が低かったためと考えられる。今後は、満管状態における、土砂に関する質量保存則及びその離散化を改良していきたいと考えている。

5. おわりに

本研究では、開水路と満管状態を含む暗渠に適用できる 2 次元浅水流方程式の数理モデルを開発し、水路実験の再現計算を行い、その水の流れと流砂の停止過程の再現性を検証した。その結果、本研究で提示した 2 次元浅

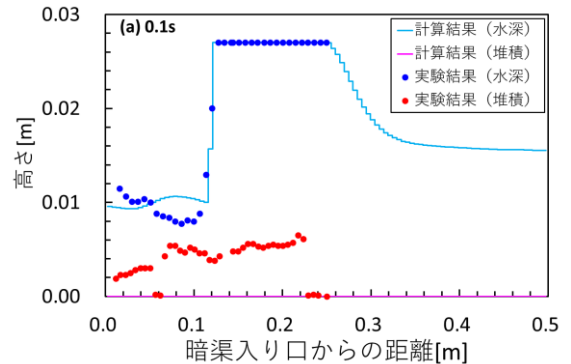


図-3 暗渠内における水深と堆積深の変化(0.1s)

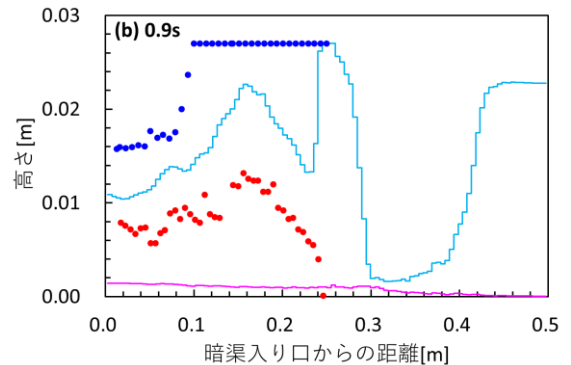


図-4 暗渠内における水深と堆積深の変化(0.9s)

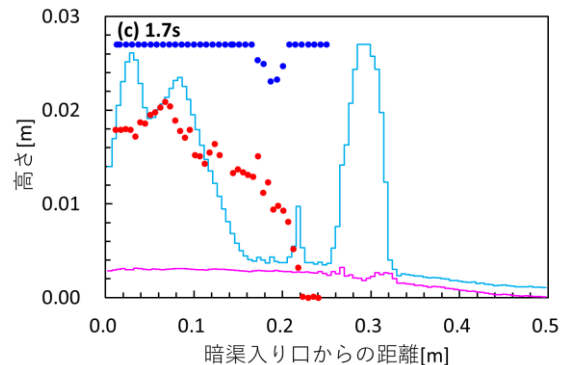


図-5 暗渠内における水深と堆積深の変化(1.7s)

水流方程式を用いた数理モデルは、水のみを流した期間で水深の変化を概ね再現できるものの、土砂を模したガラスビーズを投入した以降の水深と堆積深をあまり再現できなかった。これは、土砂に関する質量保存則及びその離散化の適用性が低かったためと考えられる。

今後は、暗渠における閉塞過程を明らかにするために、満管状態の土砂の挙動に関する数理モデルの改良を行い、自由水面を持つ開水路と自由水面を持つ管水路、満管状態の管水路を統一して計算できる手法を開発していきたいと考えている。

本研究は JSPS 科研費 20K05029 の助成を受けたものです。

引用文献

- 江藤稚佳子, 原 教介, 水野秀明 (2021): 暗渠内における流れと流砂の停止過程, 砂防学会誌, Vol.73, No.5, p.38-43
 高橋保(2004): 土石流の機構と対策, 近未来社 432pp
 中村徹立, 佐々木淑充, 水草浩一 (2004): 都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン (案) - 都市浸水 -, 国土技術政策総合研究所資料第 202 号, 33pp