

満管と未満管が混在する流れの再現方法の検討

九州大学大学院生物資源環境科学府 ○江藤稚佳子・原 教介（現日鉄鉱コンサルタント株式会社）
九州大学大学院農学研究院 水野秀明

1. はじめに

山間地域では谷出口や住宅地に暗渠が設置され、その上が道路として活用されている（図-1）。このような道路の下に設けられた暗渠に土石流や洪水が流れ込むと、暗渠内に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。大分県津久見市の事例では、2017年9月の台風18号に伴う豪雨で流出した土砂が住宅地にある暗渠内に流入し閉塞したことで、住宅地や道路が広い範囲で冠水した。このような災害を防止・軽減するためには、暗渠内の流れや土砂の挙動を予測する必要がある。

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。また、開水路（未満管）から暗渠（満管）への連続した流れの変化を計算できる必要がある。そのため、2次元浅水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、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）とすることが多く、暗渠内の流れに2次元浅水方程式を適用した事例はほとんどない。

本研究は、開水路から暗渠内への連続した流れに適用できる2次元浅水方程式を開発し、水路模型実験による水路内の水の流れの再現性を明らかにすることを目的とする。

2. 2次元浅水方程式を用いた暗渠の水理モデル

本研究では暗渠が満管と未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



（左：谷出口，右：住宅地）

図-1 大分県津久見市の暗渠の設置状況

僅かに圧縮すると仮定する。つまり、流れが圧縮性で、管水路（暗渠）内で弾性波が生じると仮定する。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、

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

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} \rho h \\ \rho U h \\ \rho V h \end{bmatrix}, \vec{F} \equiv \begin{bmatrix} \rho U^2 h + \frac{1}{2} \rho g h^2 + p_s h \\ \rho U V h \\ \rho V^2 h + \frac{1}{2} \rho g h^2 + p_s h \end{bmatrix},$$

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

$$\vec{s} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial \{\rho z_b\}}{\partial t} \\ -\rho g h \frac{\partial b}{\partial x} + p_s \frac{\partial h}{\partial x} + \int_b^s \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \\ -\rho g h \frac{\partial b}{\partial y} + p_s \frac{\partial h}{\partial y} + \int_b^s \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dz \end{bmatrix} \dots\dots(3)$$

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]、である。

満管状態の管水路の場合、2次元浅水方程式に 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、

$$p_s = E \cdot \log_e \frac{\rho}{\rho_0} + p_0 \quad \dots\dots(4)$$

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。

3. 浅水方程式による暗渠内の流れの再現計算

3.1 水路模型実験

水路模型実験では、アクリルで作成した延長約 2.0m、幅 0.05m、高さ 0.05m で、90度の湾曲部を持つ水路に上流端に接続したポンプから水を速度 1.31m/s で供給した。水路上部はアクリル板で蓋をしており、流入口は仕

切り版により 0.02m に固定した。水深は水路湾曲部の左岸（内湾側）と右岸（外湾側）に設置したビデオカメラで撮影し計測した。

図-2 は対象とした水路模型実験の計算要素モデルの平面図と断面図である。計算要素は直線部を 0.05m 間隔、湾曲部を 10 度間隔で分割し、水路の高さは 0.05m とした。初期水深は 0.02m，粗度係数は 0.00025 とした。

計算に際して、暗渠の流入口から水深 0.02m，速度 1.31m/s で水を 60 秒間流入し，流出口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。

3.1 結果

図-3，4，は水路内の実験結果と計算結果の水深を比較したものである。実験結果の水深は，上流から水を共有し，定常状態を確認してから 40 秒時点の水深とした。

実験結果の水深は流入口から 0.5m 地点から高くなり，左岸では 0.59m，右岸では 0.55m で水路上面に到達した。一方，計算結果の水深は流入口から 0.5m 地点まで 0.02m 程度で，0.5m 地点から高くなり 0.08m 付近で水路上面に到達した。

4. 考察

計算結果の水深は湾曲部まで概ね一定の値で，湾曲部に到達すると水深が上昇して湾曲部の終わりに水路上面に到達し，跳水の発生による未満管から満管状態への水面形の変化を再現することができた。一方で，実験結果では湾曲部に到達すると急激に水深が上昇して水路上面に到達するのに対して，計算結果では水深が水路上面へ到達する位置が下流側となった。これは，再現計算の粗度係数を直線部に合わせて設定しているため，湾曲部で生じる二次流などによるエネルギー損失を考慮できていないためと考えられる。また，流れと側面の摩擦力を考慮していないため，差が出たと考えられる。

5. おわりに

本研究では，満管と未満管状態を含む暗渠に適用できる 2 次元浅水方程式の数理モデルを開発し，水路模型実験の再現計算を行い，その水の流れの再現性を検証した。本研究で提案した数理モデルは，暗渠内における跳水による未満管から満管状態への流れの変化を再現できたものの，実験結果と比較して跳水の発生箇所が下流

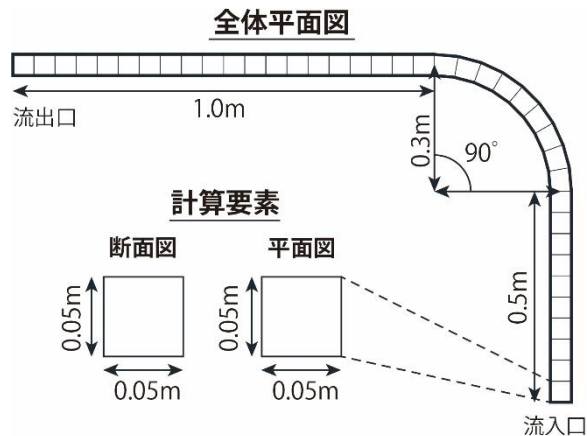


図-2 水路模型実験の計算要素モデル

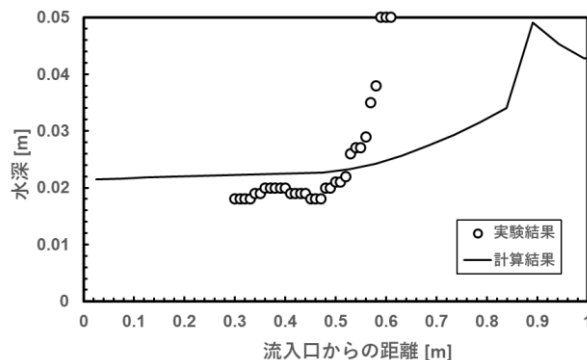


図-3 暗渠内における水深の比較（左岸）

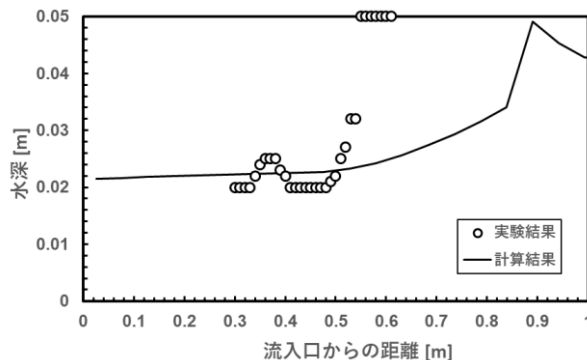


図-4 暗渠内における水深の比較（右岸）

側になる結果となった。これは，とくに湾曲部における摩擦を十分に考慮できていなかったためと考えられる。今後は，これらを考慮できるように改良したいと考えている。さらに，土砂が流入し場合の流れへの適用に向けて改良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

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