

㈱日水コン

神戸大学工学部

京都大学防災研究所

神戸大学大学院

東京消防庁

正会員 ○南條 雅志

正会員 道奥 康治

正会員 石垣 泰輔

学生会員 藤井 淳

非会員 高橋 亮介

1. はじめに

不透過構造は、流水制御効果が大きい反面、構造物に作用する流体力が大きい。これに対し、透過構造は流れを柔らかく制御し、さらに曝気や浸透による水質浄化、間隙など水生生物の生息空間の提供、河川景観など環境機能も合わせて期待できる。本報告では、図-1 に示すように、透過水制を設置した開水路において、水制を透過・越流する流れを再現するために二次元二層流モデルを開発し、水理実験によってモデルを検証した。

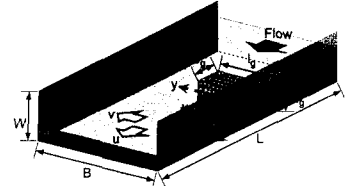


図-1 流れの模式図

2. 二層二次元モデルの概要

図-2 に示すように、二層に分割した各領域の上下層の間で質量・運動量保存を考慮する。基礎式を以下に記す。A 領域については、紙面の都合により省略するが、B 領域と同様の二層モデルが定式化されている。

$$\cdot \text{連行速度: } q_i = -\left(\frac{\partial M_{\text{lor}S}}{\partial x} + \frac{\partial N_{\text{lor}S}}{\partial y}\right) \quad (1) \quad \cdot \text{全層連続式: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (M_{\text{lor}S} + M_2)}{\partial x} + \frac{\partial (N_{\text{lor}S} + N_2)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

ここで、 t : 時間、 (x, y) : 空間座標、 $(M_m = u_m h_m, N_m = v_m h_m)$: 各層の流量フラックスの x, y 方向成分、 (u_m, v_m) : 各層平均された流速の x, y 方向成分、 $(M_S = u_S h_1, N_S = v_S h_1)$: 見かけの流量フラックスの x, y 方向成分、 (u_S, v_S) : 見かけの流速の x, y 方向成分、 h_m : 上下層の厚さ、 h : 全水深、 q_i : 上下層間の連行速度である ($m=1$ 下層, $m=2$ 上層)。

・B 領域下層の運動方程式 (x 方向):

$$\frac{1}{n} \frac{\partial M_S}{\partial t} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial u_S M_S}{\partial x} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial v_S M_S}{\partial y} = -gh_1 \frac{dz_S}{dx} - M_S \left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \sqrt{u_S^2 + v_S^2} \right) + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u_S'^2} h_1 \right) + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{u_S' v_S'} h_1 \right) + Eq_i (u_2 - u_S) - \frac{u_i q_i}{n^2} \quad (3)$$

・B 領域上層の運動方程式 (x 方向):

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 M_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2 M_2}{\partial y} = -gh_2 \frac{dz_S}{dx} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u_2'^2} h_2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{u_2' v_2'} h_2 \right) - Eq_i (u_2 - u_S) + u_i q_i \quad (4)$$

ここで、 g : 重力加速度、 z_S : 基準面からの水位、 ν : 動粘性係数、 (τ_{wx}, τ_{wy}) : 壁面摩擦力の x, y 方向成分、 E : 連行係数、 $(-\overline{u_S' v_S'}, -\overline{u_S'^2}, -\overline{v_S'^2})$: レイノルズ応力、 ρ : 水の密度、 (u_i, v_i) : 二層境界面での流速の x, y 方向成分、 $(\sqrt{K} = e \cdot d_m, c = f(d_m / \sqrt{K/n})^{3/2})$: 多孔体の特性パラメータ、 n : 間隙率、 d_m : 平均粒径、 (e, f) : 実験から決定する無次元係数である。

3. 捨石堰を透過・越流する一次元流れ

図-3(a) に表示した非越流の場合における透過流量 Q の無次元値 $F_0 = Q / (B \sqrt{g h_0^3})$ と無次元水深 h_0/L との関係 (実験値, 理論解¹⁾, 数値解) を図-4 に示す。ここで、 B は水路幅、 h_0 は上流側の水深、 L は流下方向の堰長、 Δh は上下流端の水深差である。パラメータとして理論解析と同値の $(e, f) = (0.025, 50)$ を用いた数値解析の流量

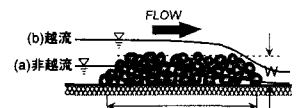


図-3 捨石堰の諸量

は、図-4に見られるように無次元流量 F_0 を小さく評価している。(e, f)の調整後の(e, f) $\gamma=(0.015, 30)$ の場合の数値解は、実験値や理論解と良好に一致している。先の理論解析と数値解析において(e, f)の最適値が異なる要因の一つとして、理論解析では捨石堰上下流の急変流区間に質量・運動量保存を適用して水深比を求めているのに対し、数値解析では急変部でも流れの不連続部を設けずに一次元流として流れの遷移を表現していることが考える。

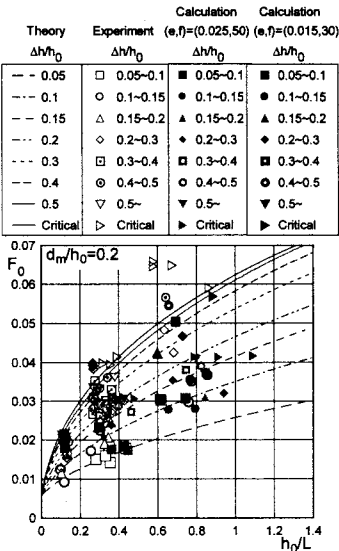


図-4 無次元流量 F_0 と 相対水深 h_0/L の関係

まず、図-3(b)のような捨石堰の一次元越流現象によって二層流モデルを検証する。図-5に、水面形に関する実験値、理論解²⁾、数値解の比較を示す。理論解析では、堰上流側の急変流が次元解析によって表現されているため、この区間の解は得られない。数値解析では、上下流にわたり、一次元流を仮定している。支配断面があらわれる堰下流端での急変部を除くと、本解析は実験値を概ね再現している。図-6では、全層流量 $M=M_1+M_2$ で無次元化された上層流量（越流量） M_2 、下層流量（透過流量） M_1 の流下方向変化（実験値、理論解²⁾、数値解）を示す。上流側では下層から上層へ、下流側では上層から下層へ流量が交換されているという実験における特徴を、数値解析は良好に再現している。

4. 二次元流れ場における適用

表-1に、水制を越流する平面二次元流の実験条件を示す。実験に用いた開水路は、長さ $L=9.0\text{m}$ × 幅 $B=0.4\text{m}$ × 高さ $W=0.25\text{m}$ 、水路勾配 $i=1/400$ である。Case B-1 の水深分布の実験値と解析値を図-7,8に示す。右岸側の $x/h_0=5\sim 10$ 付近に水深最小点があらわれている。図-9に、 $y/h_0=1.3$ （水制中央部）での水深の縦断分布を示す。顕著には見ることができないが、粒径が小さい Case B-3,4 に比べ、粒径の大きい Case B-1,2 の方が、上下流間の水深減少が小さく、流れが緩やかに変化していることが確認できる。以上の特徴が、本解析によって良好に再現されている。

参考文献

- 1) 道奥康治・前野詩朗・古澤孝明・羽根田正則：捨石堰の「水位 - 流量」特性を規定する水理量，水工学論文集，第46巻，2002
- 2) 道奥康治・前野詩朗・羽根田正則・古澤孝明：捨石堰を越流・透過する流れの構造と流量解析，土木学会論文集，No.740/II-64，pp.131-142，2003.

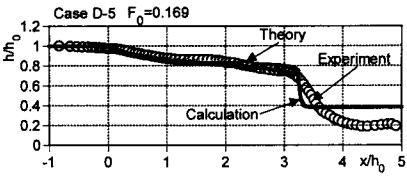


図-5 捨石堰を越流する水面形

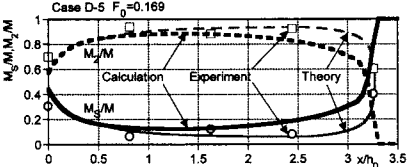


図-6 上下層流量の流下方向変化

表-1 越流の二次元流れの実験条件

水制形状	Case B	Case B-1	Case B-2	Case B-3	Case B-4
	透過型 (捨石)				
種類	透過型 (捨石)				
長さ L (m)	0.2				
幅 b (m)	0.1				
高さ h_s (m)	0.05				
粒径 d_m (m)		0.035		0.020	
間隙率 n		0.373		0.318	
堰上げ	無	有	無	有	
流量 Q (m ³ /s)	0.010583				
上流端での Reynolds 数 Re		2.9×10^4	2.9×10^4	2.9×10^4	3.3×10^4
上流端での Froude 数 F_0		0.396	0.396	0.377	0.373
下流端での Froude 数 F_1		1.102	0.534	1.184	0.534

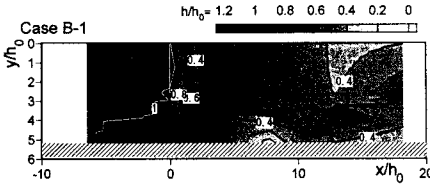


図-7 水深分布 (実験値)

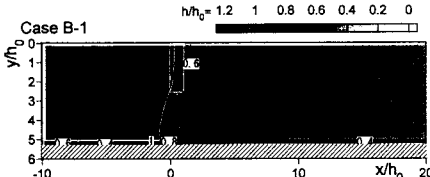


図-8 水深分布 (解析値)

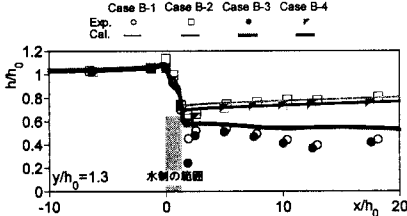


図-9 水深の縦断分布