

捨石水制が設置された開水路における流れと流体力の二層流解析

神戸大学大学院	学生員	藤井 淳
神戸大学工学部	正会員	道奥 康治
(株)日水コン	正会員	南條 雅志
京都大学防災研究所	正会員	石垣 泰輔
岡山大学環境理工学部	正会員	前野 詩朗

1. はじめに

透過水制は流れを柔らかく制御し、さらに曝気などによる水質浄化、水生生物の生息空間の確保、物質の疎通性など環境機能も合わせて期待できる。本報告では、開水路に捨石を用いた透過水制を設置した二次元流れを対象としている。水理実験・数値解析を実施することにより、水制内外の流れの構造を把握し、流体力について検討を行った。

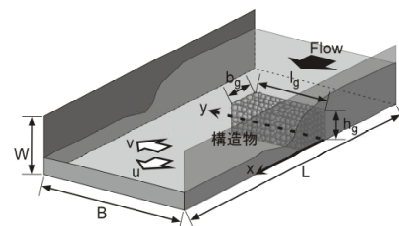


図-1 流れの模式図

2. 実験方法

水理実験では、京都大学防災研究所宇治川水理実験所に設置された長さ $L=9.0\text{m}$ × 幅 $B=0.4\text{m}$ × 高さ $W=0.25\text{m}$ 、水路勾配 $i=1/400$ のアクリル製開水路が用いられた。図-1 に示すように、左岸側に直方型の透過水制を設置した。水深 h は、デジタルポイントゲージ (KENEK 製) で、流速ベクトル $\mathbf{U}=(u,v)$ は、二次元電磁流速計 (UNION ENGINEERING 製) によってそれぞれ計測された。

表-1 越流の二次元流れの実験条件

Case B	Case B-1	Case B-2	Case B-3	Case B-4
種類	透過型 (捨石)			
長さ $l_g(\text{m})$	0.2			
幅 $b_g(\text{m})$	0.1			
高さ $h_g(\text{m})$	0.05			
粒径 $d_m(\text{m})$	0.035		0.020	
間隙率 n	0.373		0.318	
堰上げ	無	有	無	有
流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	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

3. 数値モデルの概要

図-1 に示すような、構造物を越流する流れを対象とする。図-2 に示すように、二層に分割した各領域について質量・運動量保存を考慮する。A 領域については省略するが、B 領域と同様に二層モデルを構築する。

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

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):

$$\frac{1}{n} \frac{\partial M_S}{\partial t} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial u_S M_S}{\partial x} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial v_S M_S}{\partial y} = -gh_1 \frac{dz_s}{dx} - M_S \left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \sqrt{u_S^2 + v_S^2} \right) + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u'_2 h_1} \right) + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{u'_2 v'_2 h_1} \right) + Eq_i(u_2 - u_S) - \frac{u_i q_i}{n^2} \quad (3)$$

・B 領域上層の運動方程式 (x 方向):

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 M_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2 M_2}{\partial y} = -gh_2 \frac{dz_s}{dx} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u'_2 h_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{u'_2 v'_2 h_2} \right) - Eq_i(u_2 - u_S) + u_i q_i \quad (4)$$

ここで、 g : 重力加速度、 z_s : 基準面からの水位、 n : 間隙率、 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、 $(-\overline{u'_m v'_m}, -\overline{u'^2_m}, -\overline{v'^2_m})$: レイノルズ応力、 ρ : 水の密度、 (u_i, v_i) : 二層境界面で

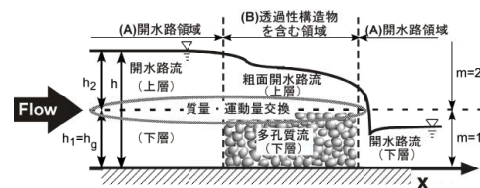
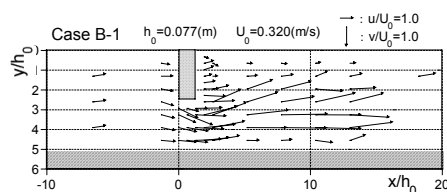
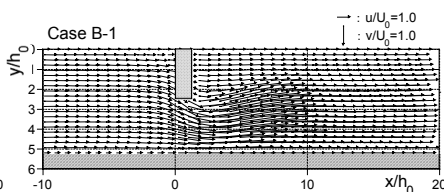
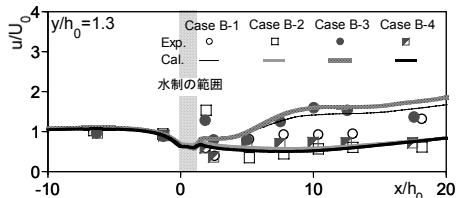


図-2 領域の分類

キーワード: 透過水制, 局所流, 多孔体, 捨石水制, 越流, 二層流

連絡先: 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 Phone: (078)803-6056, FAX: (078)803-6069

図-3 流速 $(u,v)/U_0$ （実験値）図-4 流速 $(u,v)/U_0$ （解析値）図-5 流速 u/U_0 の横断変化

の流速の x, y 方向成分, (c, K) : 多孔体の特性パラメータである。

4. 実験・解析の比較

図-3,4 に, 上流端流速 U_0 で無次元化した水深平均流速ベクトル $(u/U_0, v/U_0)$ を示す。解析値は実験値を大局的に再現している。さらに比較を行うために, 図-5 では, $y/h_0 = 1.3$ (水制中央部) における流速 u/U_0 の縦断変化を比較する。

粒径・間隙率の増加に伴い, 流速が変化する勾配を緩やかにさせるという実験の傾向を解析は良好に再現している。

解析値により, 水制近傍の流れについて検討する。図-6 には水制周辺と内部における上下層流速ベクトルを示す。上下層ともに, 流れは水制上流側で右岸側へ転向している様子がわかる。図-7 には水制先端を通る縦断面, $y/h_0 = 2.5$ における下層流速 v_1 と上層流速 v_2 の分布を示す。粒径・間隙率の小さい場合 (Case3,4) の方が横断流速の下層成分 v_1 はやや小さく, 上層成分 v_2 はやや大きい。すなわち, 透過性が小さいために水制を透過する流れが小さく, 水制天端において流れを右岸側 (水制と反対側) へと導流し水を刎ねている。

5. 解析による流体力の検討

水制の安定性を検討するために, 流体力について着目する。水制内の無次元流体力 (= 層流抵抗力 + 乱流抵抗力) は, 式 (3) の右辺第 2 項より次式のように算定される。

$$F_p = \frac{F_0^2}{\text{Re}} \frac{\tilde{U}_s^2}{\tilde{K}^2} + cF_0^2 \frac{\tilde{U}_s^2}{\sqrt{\tilde{K}}} \quad (5)$$

ここに, F_0 : 水路の上流端におけるフルード数, Re : レイノルズ数, $\tilde{U}_s = \sqrt{u_s^2 + v_s^2} / U_0$, $\tilde{K} = \sqrt{K} / h_0$ である。

図-8 に, 数値解析より得られた流体力を示す。粒径・間隙率の大きい場合 (CaseB-1,2) の方が小さい場合 (CaseB-3,4) よりも, 流体力は小さい。また, 流体力は水制先端の上下流隅角部で最大となる。次に, 下流側で大きい。すなわち, この部分で崩壊の危険性が高いことがわかる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 道奥康治・石垣泰輔・前野詩朗・南條雅志・池松健: 透過型水制の周辺・内部の流れに関する実験と解析, 水工学論文集, 第 48 巻, 2004 (掲載決定)。

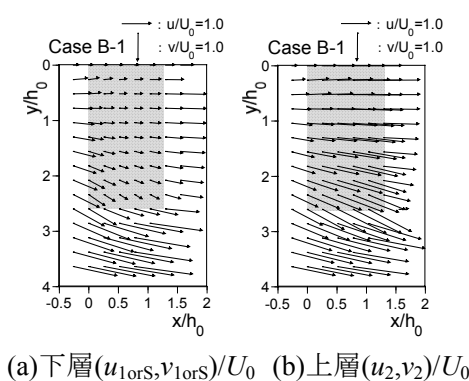
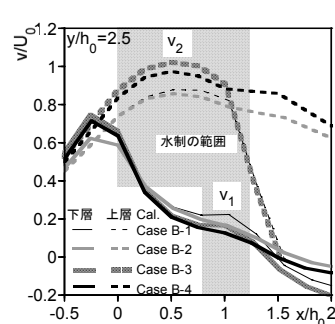
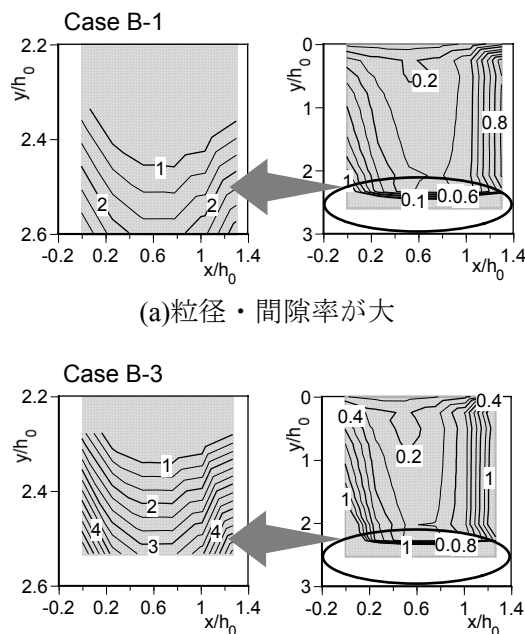


図-6 水制近傍の流速ベクトル

図-7 流速 $v_{1,2}/U_0$ の縦断変化図-8 流体力 F_p