

透過型水制の周辺・内部の 流れに関する実験と解析

EXPERIMENT AND ANALYSIS ON FLOW FIELD
AROUND AND INSIDE A PERMEABLE GROIN

道奥康治¹・石垣泰輔²・前野詩朗³・南條雅志⁴・池松健⁵

Kohji MICHIOKU, Taisuke ISHIGAKI, Shiro MAENO, Masashi NANJYO, Takeshi IKEMATSU

¹ 正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 正会員 工博 京都大学防災研究所助教授 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

³ 正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

⁴ 学生会員 修士(工) 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

⁵ 正会員 建設技研インターナショナル (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

A permeable groin constructed with natural stones would be a nature-friendly river structure with minimum negative impact on natural environment. For making suitable design of the structure, hydrodynamics of the flow inside and around the permeable groin was investigated in the present study. Physical models of the permeable groin were installed in an open channel with various dimensions, porosity and rubble diameters. A numerical model was developed in order to simulate a two-dimensional flow field both in the open channel and the porous body. A flow resistance inside the groin was formulated by applying a non-Darcian formula that has already been verified in the authors' previous study on a rubble mound weir. Effects of grain diameter, porosity, geometry of the groin on the flow structure and flow force were discussed based on the experimental and the numerical data.

Key Words: permeable groin, two-dimensional analysis, non-Darcian flow resistance

1. はじめに

河川の自然環境を創生するために様々な改修工法が試みられている。古くから河岸処理技術として実施されてきた水制や護岸などの治水構造物に関しても、本来の流水制御機能に加えて、水質浄化・土砂制御・水生生物の棲息空間など環境機能を備えた工法が検討されている。

水制工は、流速の減少と水流の方向転換(水捌)を目的とし、以下のような水利機能を発揮する。

- ① 流水の流向制御
- ② 河岸付近の河床洗掘防止
- ③ 土砂堆積促進
- ④ 水制上流側の水位嵩上げ

水制は、コンクリートや土砂で構築された不透過型、石礫・ブロック・木材などで構築された透過型(図-1)に分類される。不透過水制は、流水制御効果が大きい反面、構造体に作用する流体力が大きい。これに対して、透過型水制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、間隙への水生生物の生息、河川景観保全など環境機能も合わせて期待できる。透過型水制は長年の経験や実験的知見に基づいて設計されるが、現時点では構

造物内外の流況を推定する手段がないため、上記のような諸機能を水理学的に評価することは困難である。

これまで、著者らは石礫・ブロックなどを積み上げて構築される「捨石堰」を考え、水利設計のために必要な流量算定法を1次元解析によって開発した¹⁾。

本文では、図-2のように、開水路流れと直角方向に設置された捨石水制を対象として、平面二次元流れに関する水利実験と数値解析を行い、水制の周辺と内部の流れ特性を明らかにする。

本文で対象とする流れと類似の系として、樹木群が平面的に配置された開水路流があげられる。池田・泉²⁾や富永ら³⁾は樹木による抗力抵抗を考慮した数値解析によって実験で計測された流れを良好に再現した。本文で対

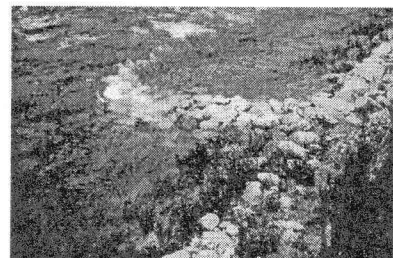


図-1 明智川における石礫を用いた透過型水制

象とする流れでは水制内の間隙率が非常に小さく、コントロールボリュームに占める流体体積が小さいため、間隙率を考慮した方程式の定式化が必要である。この点が植生流れとの大きな相違点である。

2. 実験概要

実験は、京都大学防災研究所宇治川水理実験所に設置されたコンクリート製水路（長さ $L=20.0\text{m}$ × 幅 $B=2.0\text{m}$ × 高さ $W=0.25\text{m}$ 、水路勾配 $i=1/800$ ）を用いて実施された。図-2 に示すように、左岸側に直方型の不透過型・透過型水制（いずれも、長さ $l_g=1.0\text{m}$ 、幅 $b_g=0.3\text{m}$ 、高さ $h_g=0.2\text{m}$ ）を設置した。不透過型水制はベニヤ版で制作された。透過型水制の材料には、平均粒径 $d_m=0.019\text{m}$ 、 0.035m の二種類の石礫を用いた。水路下流端での堰上げ制御により、水制下流側が射流と常流になる場合をそれぞれ再現した。実験条件を表-1 に示す。流れ（流量 $Q=0.05193\text{m}^3/\text{s}$ ）の定常性を確認した時点で、流速 $U=(u, v)$ を二次元電磁流速計（UNION ENGINEERING 製）で、水深 h をデジタル・ポイントゲージ（KENEK 製）によってそれぞれ計測した。流速は水面から 60% の地点をねらい計測したが、プローブの大きさが大きく水深の小さい地点では必ずしも正確な位置設定にはならない。水面からおおよそ 40~60% の位置の測定となっている。流速のサンプリングは 5Hz、計測時間は 30sec である。

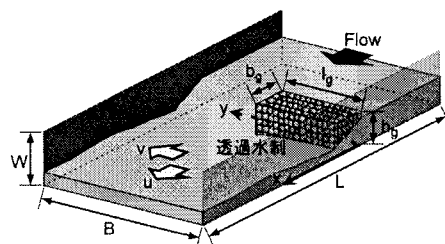


図-2 実験装置

表-1 実験条件

Case		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
水制形状	種類	不透過型		透過型 (捨石)		
	長さ $l_g(\text{m})$	1.0				
	幅 $b_g(\text{m})$	0.3				
	高さ $h_g(\text{m})$	0.2				
	粒径 $d_m(\text{m})$		0.019	0.035	0.019	0.035
	間隙率 n		0.33	0.38	0.33	0.38
	堰上げ	なし (水制下流側が射流)			あり (水制下流側が常流)	
	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	0.05193				
	水路幅 $B(\text{m})$	2.0				
水路勾配 i	1/800					
上流端水深 $h_0(\text{m})$	0.103	0.098	0.096	0.100	0.099	
下流端水深 $h_1(\text{m})$	0.047	0.047	0.045	0.077	0.060	
上流端でのFroude数 F_0	0.250	0.270	0.279	0.262	0.268	
上流端でのReynolds数 Re	3.1E+04	3.3E+04	3.1E+04	3.3E+04	3.2E+04	

$$\frac{1}{n} \frac{\partial N_s}{\partial t} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial u_s N_s}{\partial x} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial v_s N_s}{\partial y} = -gh \frac{dz_s}{dy} - N_s \left(\frac{v}{k} + \frac{c}{\sqrt{k}} \sqrt{u_s^2 + v_s^2} \right) \quad (3)$$

多孔質流による抵抗

3. 数値解析

長田⁴⁾による一般座標系を用いた平面二次元非定常流解析コードを規範として、ここで対象とする透過型水制周辺の流れを再現できるように、解析モデルを構築した。

(1) デカルト座標系における基礎式

対象とする系では、捨石水制の内部にも流れが存在するため、開水路部と水制内部に分けてモデルを定式化する。水制内部に関しては、捨石堰の解析に適用された非線形抵抗則を用いる⁵⁾。図-2 のデカルト座標系における連続式と運動方程式は以下のようにあらわされる。

① 捨石水制の内部

● 連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M_s}{\partial x} + \frac{\partial N_s}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

● 運動方程式

(x 方向)

$$\frac{1}{n} \frac{\partial M_s}{\partial t} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial u_s M_s}{\partial x} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial v_s M_s}{\partial y} = -gh \frac{dz_s}{dx} - M_s \left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \sqrt{u_s^2 + v_s^2} \right) \quad (2)$$

多孔質流による抵抗

(y 方向)

ここに、 (x, y) : 流れ方向および流れと直角方向の座標、 (u_s, v_s) : 見かけの流速、 (M_s, N_s) : 見かけの流量フラックス、 ν : 動粘性係数、 n : 間隙率、 t : 時間である。

K は、長さの二乗の次元を持つ多孔体の透水性に関する係数であり、清水⁶⁾により平均粒径 d_m の関数として次式のように与えられた。

$$\sqrt{K} = e \cdot d_m \quad (4)$$

ここに、 e は定数である。

係数 c は Arbbabhirama ら⁷⁾によって平均粒径 d_m や間隙率 n の関数として次式で与えられる。

$$c = f \left(\frac{d_m}{\sqrt{K/n}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

著者らの検討により、モデル定数は $(e, f) = (0.015, 30.0)$ と同定された。

② 開水路部

● 連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

● 運動方程式

(x 方向)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{dz_s}{dx} - \frac{\tau_{bx}}{\rho}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{u'v'} h \right) \quad (7)$$

(y 方向)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{v'^2} h \right) \quad (8)$$

ここに、 (u, v) : 水深平均流速、 (M, N) : 流量フラックス、 z_s : 基準面からの水位、 (τ_{bx}, τ_{by}) : 底面せん断力の (x, y) 方向成分、 $(-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2})$: 水深平均されたレイノルズ応力である。

(2) 一般座標系における基礎式

デカルト座標 (x, y) から一般座標系 (ξ, η) への変換は次式によりなされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta}, \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (9)$$

式(9)を用いて座標変換された捨石水制内部の連続式・運動方程式を以下に示す(開水路部については、長田²⁾と同様であるので省略する)。

● 連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{U_s h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{V_s h}{J} \right) = 0 \quad (10)$$

● 運動方程式

(ξ 方向)

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_s^\xi}{J} \right) + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{U_s Q_s^\xi}{J} \right) + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{V_s Q_s^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{1}{n^2} \frac{M_s}{J} \left(U_s \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V_s \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{1}{n^2} \frac{N_s}{J} \left(U_s \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V_s \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{Q_s^\xi}{J} \left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \sqrt{u_s^2 + v_s^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

(η 方向)

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_s^\eta}{J} \right) + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{U_s Q_s^\eta}{J} \right) + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{V_s Q_s^\eta}{J} \right) \\ & - \frac{1}{n^2} \frac{M_s}{J} \left(U_s \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V_s \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{1}{n^2} \frac{N_s}{J} \left(U_s \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V_s \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{Q_s^\eta}{J} \left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \sqrt{u_s^2 + v_s^2} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、 $(\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y)$: 座標変換行列、

$J = 1/(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi)$: 座標変換のヤコビアン行列、

$U_s = \xi_x u_s + \xi_y v_s$, $V_s = \eta_x u_s + \eta_y v_s$: 流速ベクトルの反変成分、 $(Q_s^\xi = \xi_x M_s + \xi_y N_s, Q_s^\eta = \eta_x M_s + \eta_y N_s)$: 流量フラックスの反変成分である。

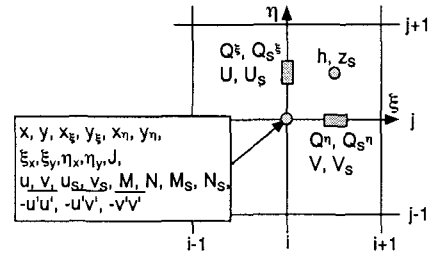


図-3 各変数の定義位置

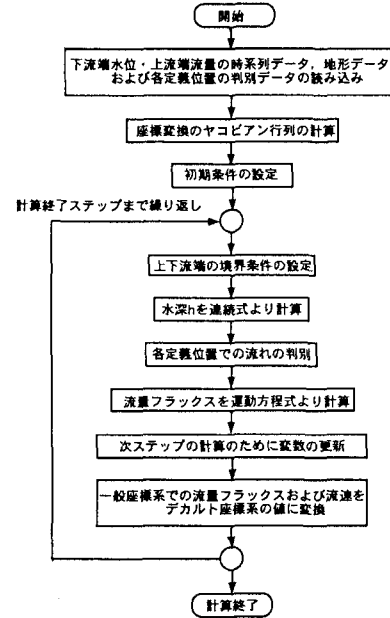


図-4 解析の流れ

(3) 数値計算

境界部での取り扱いの容易性、上流からの影響が比較的小さいことなどを考慮して、基本スキームに変更を加えることなく、移流項には一次精度の風上差分を用いていた。時間積分には Adams-Bashforth 法を用いた。変数は図-3 のようなスタッガードスキーム上に配置される。図-4 に数値計算の流れを示す。

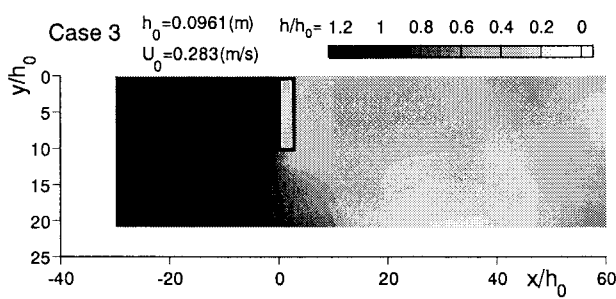
開水路と水制の境界において、開水路側の流速と水制側の見かけの流速が連続すると考え、開水路部と水制内部には同一の連続式が適用される。

また、運動方程式の抵抗項に関しては、各定義点において開水路流と多孔体流との判別指標を設定し、いずれかの抵抗項を適用した。境界条件として、上流側で一様の流速・水深が与えられ、下流端では吹き抜け条件が与えられる。

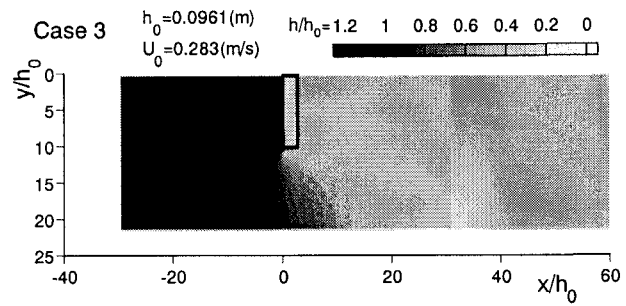
4. 実験と解析結果の比較

(1) 水深および流速の分布

図-5 に Case 3 の上流側の水深 h_0 で規準化した無次元水深 h/h_0 の分布について実験値と数値解析との比較を示す。右岸側の $x/h_0=20 \sim 40$ 付近にあらわれる水深最小点など、実験で観測される水深分布の特徴が数値解析によって再現されている。他の実験ケースに関しても数値解析によ

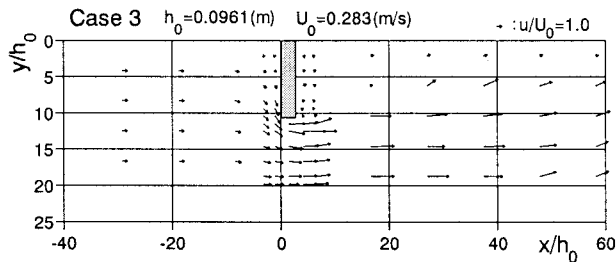


(a) 実験

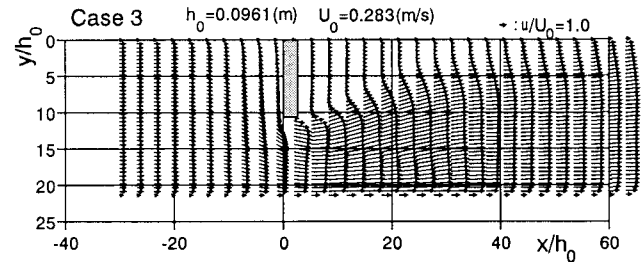


(b) 数値解析

図-5 Case-3における無次元水深 h/h_0 の分布 (□部分は水制を表す)

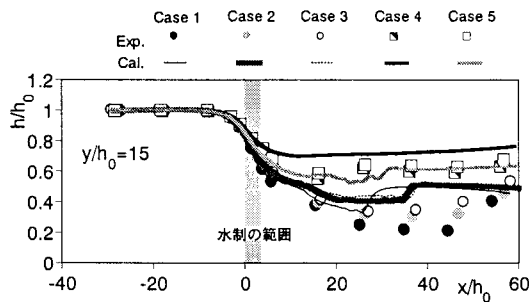


(a) 実験

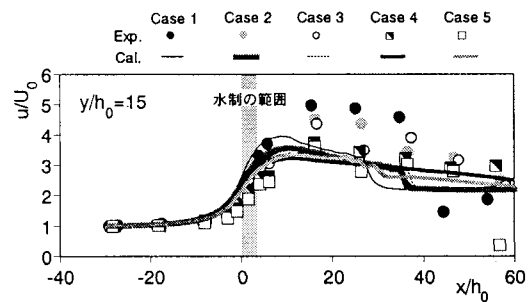


(b) 数値解析

図-6 無次元流速のベクトル分布 (□部分は透過水制を表す)



(a) 無次元水深 h/h_0



(b) 無次元流速 u/U_0

図-7 無次元水深・流速の流下方向変化 ($y/h_0=15$ の断面)

る現象再現性は同程度であった。

図-6には、同じく Case-3 で観測された無次元流速ベクトルを数値解析結果とともに示す。ここで、流速ベクトルは上流端の等流区間による平均流速 U_0 によって規準化されている。後流域の流下方向変化などが数値解析によってほぼ再現されている。

(2) 流れの縦断変化

図-7 に $y/h_0=15$ における各ケースの無次元水深 h/h_0 と無次元流速 u/U_0 の縦断変化を示す。実験値、解析値ともに以下のような特徴が見られる。

- ・不透過水制 (Case-1) よりも透過水制 (Case-2~5) の方が水制直下流における水深・流速の減少は小さい。
- ・本実験条件の範囲においては、捨石粒径の影響はそれほど顕著ではない (射流の場合: Case-2 が粒径小 Case-3 が粒径大, 常流の場合: Case-4 が粒径小で Case-5 が粒径大)。

水制近傍の流況に関して、実験と数値解析の定性的傾向は一致しているが、詳細を見ると両者にはずれが見ら

れる。特に、下流側が射流となる条件で行われた Case-1~3 の数値解析ではおおそ $x/h_0=20\sim40$ の範囲で跳水が生じているのに対し、実験では下流端に至るまで射流の状態が維持されている。これが「実験-数値解析」間のずれの主な原因になっているようである。今後、数値解析における境界条件の与え方などを検討する必要がある。

(3) 横断分布

図-8には、水制下流側の $x/h_0=4$ の断面における無次元水深 h/h_0 と無次元流速 u/U_0 の横断分布を示す。不透過水制 (Case-1) よりも透過水制 (Case-2~5) の方が水深・流速の横断方向変化が小さいという特徴が数値解析によって再現されている。すなわち、透過水制は横断方向の速度せん断や水深勾配を減少させ、より緩やかに流れを制御していることが実験と数値解析の両方において確認される。

(4) 水制の水削効果

水制の水削効果を調べるために、水制長さ l_g に相当する左岸側断面で積分された流量 Q_l

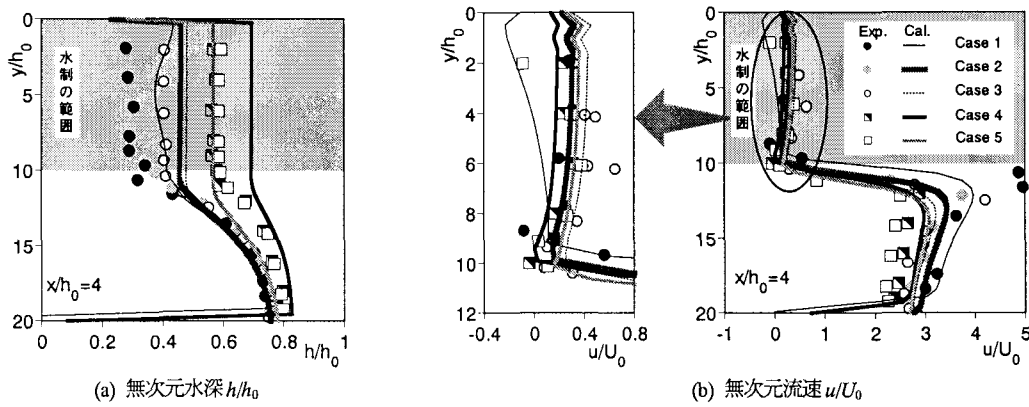


図-8 無次元水深・流速の横断分布 ($x/h_0=4$ の断面)

$$Q_l = \int_0^h \int_0^L u dy dz \quad (13)$$

と全断面流量 Q_{all}

$$Q_{all} = \int_0^h \int_0^B u dy dz \quad (14)$$

との比 Q_l/Q_{all} の流下方向変化を図-9 に示す。これより、 Q_l/Q_{all} が水制の下流側で減少し、すなわち流れが右岸側に歪められ、その後、流下とともに一般的な流速分布へと回復する過程が数値解析によって再現されている。しかし、本実験範囲では粒径 ($d_m=1.9\text{cm}$ と 3.5cm) による間隙率の違いがそれほど大きくないため ($n=0.33$ と 0.38)、(d_m, n) の Q_l/Q_{all} への影響は顕著ではない。

5. 水制近傍・内部の流れ

捨石水制の水質浄化機能や構造安定性などを評価するためには、水制内部の流速や流体力の情報を得る必要があるが、実験や観測からこれらを求めることは困難である。ここでは、数値解析に基づいて水制内部の流れと流体力の特性を明らかにする。

(1) 水制近傍と内部における水深と流速の分布

図-10 に水制近傍と内部における無次元水深分布 h/h_0 の数値解を示す。水制内部においては、上流側左岸から水制先端の下流隅角部に向かって水深が減少している。また、水制先端における水深は、粒径が小さい Case-2 の方が粒径の大きな Case-3 よりもやや小さい（後述の表-2 参照）。

図-11 には水制周辺と内部における流速ベクトルを示す。水制によって流れが右岸側へ転向している様子がわかる。流向変化によらず Case-2 と Case-3 の違いは明瞭ではないが、水制内部の流速および直下流の開水路流速を見ると、粒径の大きな Case-3 の流速がより大きいことがわかる。

図-12 には水制先端部の縦断面 ($y=l_g$) における横断方向流速 v/U_0 の分布を表示している。 $v>0$ 、すなわち、水制内部から主流部方向への連行流が見られる。連行流速は Case-2 より Case-3 の方が、また Case-4 より Case-5 の方が大きく、捨石粒径の増加によって水制からの吸い出

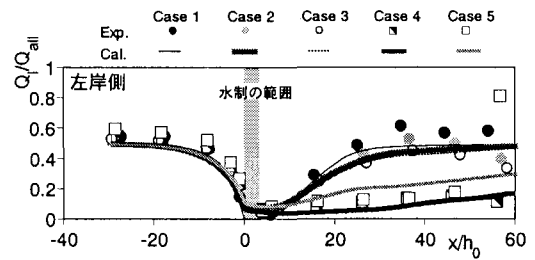


図-9 水路左岸側の流量

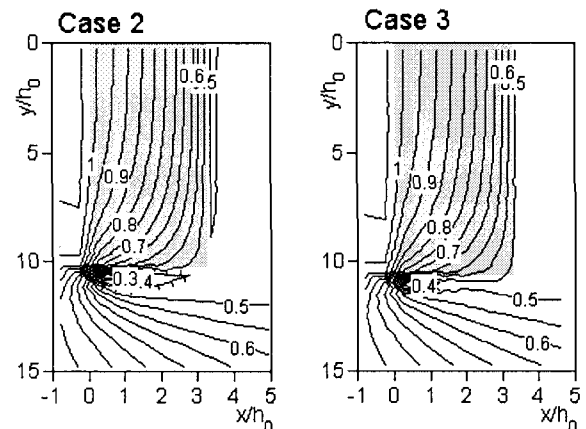


図-10 透過型水制近傍・内部における無次元水深 (灰色部分は水制を表す)

しが顕著になることが確認される。

(2) 透過型水制に働く流水抵抗力

水制内の無次元流体力 (= 層流抵抗力 + 乱流抵抗力) は式(2), (3)の右辺第二項から次式のように算定される。

$$F_p = \frac{F_0^2}{\text{Re}} \frac{\tilde{u}_s^2}{\tilde{K}^2} + c F_0^2 \frac{\tilde{u}_s^2}{\sqrt{\tilde{K}}} \quad (15)$$

ここで、 F_0 ：水路上流端におけるフルード数、 Re ：レイノルズ数、 $\tilde{u}_s = u_s/U_0$ 、 $\tilde{K} = \sqrt{K}/h_0$ である。図-13 には数値解析より得られた F_p の分布を示す。また、水制先端面における最小水深と最大流体力の比較を表-2 にまとめる。

図-13 より、水制先端の上流側隅角部で最も流体力が大きくなり、崩壊の可能性が高いことがわかる。また、粒径・間隙率が大きい場合 (Case-3) の方が小さい場合

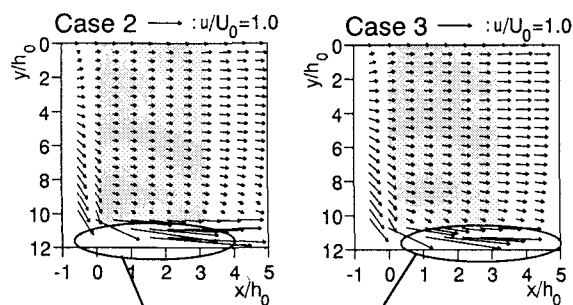


図-11 透過型水制内の無次元流速ベクトル

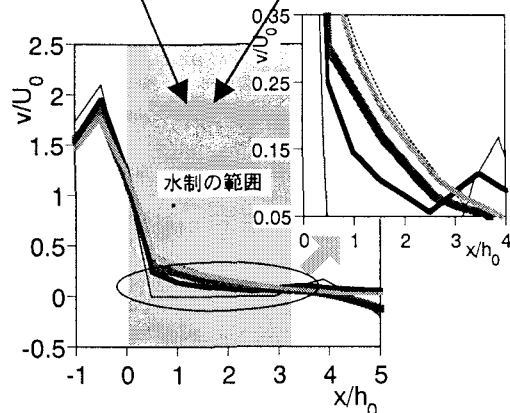


図-12 水制先端断面における横断方向流速 v の分布

(Case-2) よりも、隅角部における流体力は小さい。表-2 における Case-4 と 5 との比較からも同様のことが確認される。以上のように、本解析によって、捨石材料の流体力・構造物安定性への影響や崩壊箇所などを推定することが可能となる。

6. むすび

捨石を用いた透過型水制の水理機能を明らかにするために水理実験と数値解析を実施した。これより、水制近傍や内部の流れの構造、流体力におよぼす水制の諸元や材料特性の影響を検討した。実験で設定した粒径・間隙率の範囲がそれほど広くなかったため、水制の透水性の影響は明らかではなかったが、間隙率の増加とともにより柔らかく流れを制御するという透過型水制の特徴を数値解析によって再現することが可能となった。今後、本モデルを用いて、水制のスケール、材料特性（粒径・間隙率）、設置角度（上向き・下向き）等の影響や構造物の安定条件等についても検討する予定である。水制のみならず、透水性護岸など種々の河川構造物設計への本モデルの適用性についても調査する方針である。

京都大学防災研究所災害観測実験センターの中川一教授をはじめセンター教職員の方々には実験に際し多くのご協力を頂いた。水理実験に際しては、当時神戸大学大学院と工学部の学生であった羽根田正則氏、花谷清明氏の協力を得た。本研究は平成 14,15 年度文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)(1)（代表：道奥康治、課題番号：

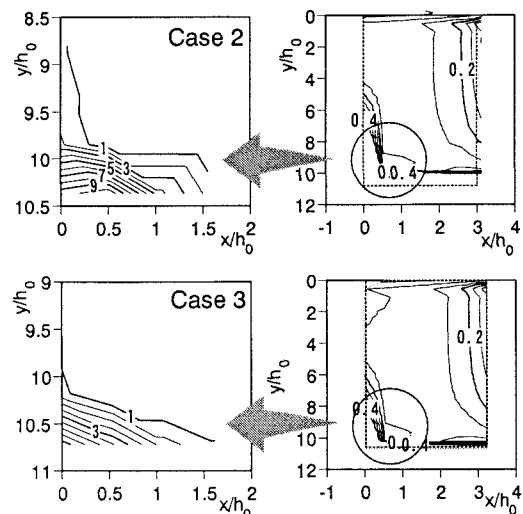


図-13 流水抵抗力分布

表-2 水制先端における最小水深と最大流体力（無次元量）のケース間比較

	水制先端の最小水深	最大流体力
Case 1	0.176	
Case 2	0.232	10.68
Case 3	0.341	5.28
Case 4	0.538	8.80
Case 5	0.417	5.15

40127303) の援助のもとに実施された。以上、記して謝意を表する。

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，pp.487-492, 2002.
- 2) 池田駿介・泉典洋：浮遊砂の横断方向拡散係数について，土木学会論文集，No.434/II-16, pp.47-77, 1991.
- 3) 富永晃宏・長尾正志・劉建・鈴木徹也：洪水流の抵抗と流れ構造に及ぼす高水敷樹木配置の影響，水工学論文集，第 39 巻，pp.477-498, 1995.
- 4) 長田信寿：水工学における計算機利用の講習会講義集，土木学会水理委員会，pp.61-76, 1999.
- 5) Ward, J.C.: Turbulent flows in porous media, J. Hydr. Eng., ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964.
- 6) 清水義彦：種々の河床粗度形態を有する開水路流れの構造に関する研究，京都大学学位論文，165P., 1992.
- 7) Arbhahirama, A. and Dinoy, Antonio A.: Friction factor and Reynolds number in porous media flow, Jour. Hydr. Eng., Proc. ASCE, Vol.99, HY6, pp.901-911, 1973.

(2003.9.30 受付)