

捨石水制群の水利特性について

Hydraulic characteristics of a group of permeable groins constructed in an open channel flow

李最森¹・道奥康治²・前野詩朗³・牛田高裕⁴・藤井淳⁵

Li Zuisen, Kohji Michioku, Shiro Maeno, Takahiro Ushita, Atsushi Fujii

¹学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 博士後期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)²フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)³正会員 博 (工) 岡山大学助教授 環境理工学部 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)⁴非会員 (株) フジクリーン工業 (〒464-8613 名古屋市千種区今池4-1-4)⁵学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科 博士前期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

In this study, a numerical analysis and a laboratory experiment were carried out in respect to an open channel flow field with a group of permeable groins installed. By using a two-dimensional depth-averaged numerical model, flow fields and water surface profiles were analyzed and compared with the laboratory data. The model was developed by taking consideration of flow resistance and permeability of the rubble mound structures, which is expected to be a powerful tool for making hydraulic design of rubble mound groins as well as other permeable river structures. The agreement between the analysis and experiment was fairly satisfactory. Effects of rubbles' porosity and diameter and geometry of the group of groins on the flow structure and flow force were discussed based on the experimental and the numerical data.

Key Words: a group of permeable groins, two-dimensional analysis, non-Darcian flow

1. 序論

これまでの河川整備においては、治水上の安全と利水上の効率を目的として、コンクリート・鋼・築土など不透過材料を用いて堰・護岸・水制などが構築されてきた。この種の河川構造物は、頑強で耐荷力が大きい、河川本来が有する生態系など自然環境へ負の影響を与えている場合が多い。自然環境に対する関心が高まり、河川の親水機能への期待が広がるにつれ、水生生態系や景観へより一層配慮した河川整備が望まれている。

流れの制御構造物として自然の石礫を積み上げた水制(以下、「捨石水制」と記す)は、間隙を有する透過型構造物であるため、浸透や越流にともなう再曝気・水質浄化や水生生物の生息空間としての間隙など様々な自然環境機能を期待できる。しかし、柔な構造であり、出水による損壊頻度が高いため、供用中の補修・維持管理が前提となる。捨石水制を実用化するためには、流れに対す

る構造安定性や土砂収支への水制の影響を評価することが必要である。

著者らは、これまで捨石堰や一基単独の捨石水制を対象として水理実験と理論解析を実施してきた^{1), 2), 3)}。しかし、実際には複数基の水制を組み合わせる流れや土砂収支を制御することが多い。本研究では図-1のように捨石水制群が設置された開水路流を対象として、水理実験と

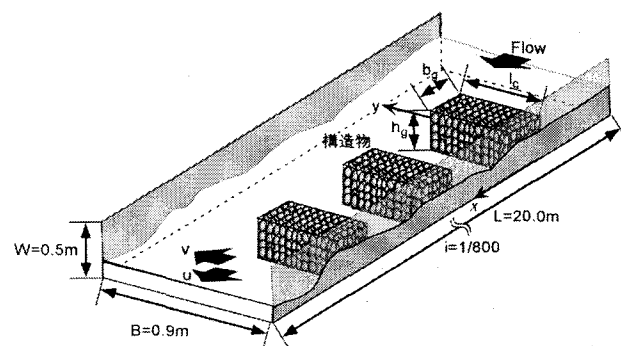


図-1 流れの模式図

二次元二層流モデルを用いた数値解析を実施した。これより、水制内外の局所流特性や流れの構造など、捨石水制群の水利設計や配置計画に資する知見を得た。

2. 平面二次元二層流モデル³⁾

(1) 解析対象の流れ

図-2のように高さ h_g の捨石構造物が設置された二次元開水路流(水深 h)を対象とする。計算領域は、開水路流の領域(A領域:液相流)と透過水制を透過・越流する流れが混在する領域(B領域:多孔体流)からなる。B領域では、上層が粗面開水路流、下層が被圧多孔体流の二層流として記述される。A,B領域とも上下層間の質量・運動量交換が考慮される。

A領域における質量保存は次式で記述される。

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} + \frac{\partial M_m}{\partial x} + \frac{\partial N_m}{\partial y} = -\Gamma_m q_i \quad (1)$$

ここで、 m :上下層を判別する添え字(下層で $m=1$, 上層で $m=2$)、 t :時間、 (x, y) :空間座標、 $(M_m = u_m h_m, N_m = v_m h_m)$:流量フラックスの x, y 方向成分、 (u_m, v_m) :層平均された時間平均流速の x, y 方向成分、 h_m :上下層の厚さ($h_1 = h_g$, $h_2 = h - h_1$, h は全水深)、 q_i :上下層間の連行速度(鉛直上向きを正とする)である次式で定義される。

$$\Gamma_m = \begin{cases} 1 & m=1 \text{ の時 (下層)} \\ -1 & m=2 \text{ の時 (上層)} \end{cases} \quad (2)$$

Γ_m はA,B領域共通に適用される。

下層厚さ $h_1 = h_g$ は時間的に変化しない。下層に対する式(1)より連行速度 q_i は次のように与えられる。

$$q_i = -\left(\frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \right) \quad (3)$$

A領域における運動量保存は次式で記述される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ u_m \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_m \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} \right\} \\ &= -gh_m \left[\frac{\partial}{\partial x} z_s + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-u_m'^2 h_m}{-v_m' u_m' h_m} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{-u_m' v_m' h_m}{-v_m'^2 h_m} \right] \right. \\ & \quad \left. - \frac{\delta_{m1}^A}{\rho} \begin{bmatrix} \tau_b^x \\ \tau_b^y \end{bmatrix} + \Gamma_m E q_i \begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ v_2 - v_1 \end{bmatrix} - \Gamma_m \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} q_i \right] \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 g :重力加速度、 z_s :基準面からの水位、 (τ_b^x, τ_b^y) :底面せん断力の x, y 方向成分(マンニングの粗度係数を用いて平均流速により評価)、 E :連行係数($=1$ とする)、 $(-u_m' v_m', -u_m'^2, -v_m'^2)$:レイノルズ応力、 ρ :水の密度、

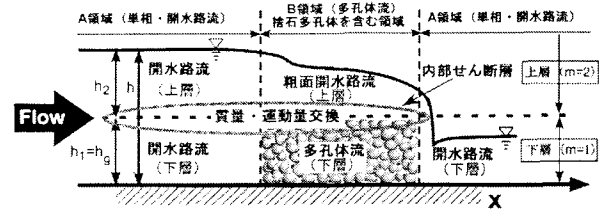


図-2 領域の分類

(u_i, v_i) :二層境界面での流速の x, y 方向成分である。 δ_{m1}^A はA領域において $\delta_{11}^A=1$ (下層)、 $\delta_{21}^A=0$ (上層)、B領域においては上下層ともに $\delta_{m1}^A=0$ である。

B領域においては捨石多孔体である下層($m=1$)に対し、「見かけ流速」($u_s, v_s = n(u_i, v_i)$) (ここで、 n は間隙率)により定義される「見かけの流量フラックス」

$$M_s = u_s h_1, N_s = v_s h_1 \quad (5)$$

が式(1),(3)の(M_i, N_i)に置き換えられる。上層に関してはA領域と同様である。これより、B領域の下層多孔体内($m=1$)の運動方程式は、捨石堰で検証された非ダルシ型抵抗則を用いて以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} M_s \\ N_s \end{bmatrix} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ u_s \begin{bmatrix} M_s \\ N_s \end{bmatrix} \right\} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_s \begin{bmatrix} M_s \\ N_s \end{bmatrix} \right\} \\ &= -gh_g \left[\frac{\partial}{\partial x} z_s + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-u_s'^2 h_g}{-v_s' u_s' h_g} \right] + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{-u_s' v_s' h_g}{-v_s'^2 h_g} \right] \right. \\ & \quad \left. - \left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \sqrt{u_s'^2 + v_s'^2} \right) \begin{bmatrix} M_s \\ N_s \end{bmatrix} + E q_i \begin{bmatrix} u_2 - u_s \\ v_2 - v_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \frac{q_i}{n^2} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

上式において、 ν は動粘性係数である。 K と c は多孔体の特性パラメータであり、平均粒径 d_m や間隙率 n の関数として次のように与えられる。

$$\sqrt{K} = e \cdot d_m \quad (7)$$

$$c = f \left(\frac{d_m}{\sqrt{K/n}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

ここに、 (e, f) は無次元の経験定数であり、別途実験値に基づいて同定されている³⁾。

B領域の上層($m=2$)は透水粗面上の開水路流と考えて、以下のように運動方程式が用いられる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ u_2 \begin{bmatrix} M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_2 \begin{bmatrix} M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} \right\} \\ &= -gh_2 \left[\frac{\partial}{\partial x} z_s + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-u_2'^2 h_2}{-v_2' u_2' h_2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{-u_2' v_2' h_2}{-v_2'^2 h_2} \right] \right] \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{\rho} \left[\begin{matrix} \tau_w^x \\ \tau_w^y \end{matrix} \right] - Eq_i \left[\begin{matrix} u_2 - u_s \\ v_2 - v_s \end{matrix} \right] + \left[\begin{matrix} u_i \\ v_i \end{matrix} \right] q_i \quad (9)$$

ここで、 (τ_w^x, τ_w^y) は捨石構造物天端における壁面せん断力、 D_{h2} は捨石多孔体内の渦動拡散係数である。A領域に関して、構造物から十分離れた領域では一層の平面二次元浅水流と見なすことができるが、捨石構造物の近傍では上下方向のせん断が強く、浅水流としてモデル化するためには、二層流として取り扱うことが必要である。本解析においては、領域の離散化を容易にするために、A,Bの全領域にわたって多孔体天端を内部界面とする二層系として流れがモデル化されている。したがって、上下層厚さはそれぞれ $(h_2, h_1=h_2)$ である。二層界面では上下層間の質量・運動量交換が考慮されるので、捨石天端での内部せん断力を記述することができる。また、捨石構造物から離れるとともに二層流から一層流へ遷移するが、このような運動量拡散も二層流モデルで的確に再現される。本モデルは二層流的なB領域とその近傍に対しても、構造物から十分に離れたA領域の一層流に対しても、適用可能である。

モデル方程式のより詳細は文献3)を参照されたい。

なお、構造物を安定に維持するために、捨石構造物には法面が設けられるが、本研究では解析の簡略化をはかるために図-1, 2のように外縁を鉛直構造としている。捨石法面が緩やかで構造物や流れの領域に比べて法面の占める割合が大きな場合には、法面を考慮したモデル化が新たに必要であり、本解析モデルをそのまま適用することは厳密ではない。

(2) 一般座標系における方程式

本解析の差分スキームでは、任意の河道地形と構造物形状に対して、流れの場が一般座標系において展開される⁴⁾。デカルト座標系 (x,y) から一般座標系 (ξ,η) への変換式

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta}, \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (10)$$

を用いて流速ベクトル $[u_m(s), v_m(s)]$ 、流量フラックス $[M_m(s), N_m(s)]$ 、壁面摩擦係数 $[\tau_{b(w)}^x, \tau_{b(w)}^y]$ は、次式のように変換される。

$$\begin{bmatrix} U_{m(s)} & Q_{m(s)}^{\xi} & \tau_{b(w)}^{\xi} \\ V_{m(s)} & Q_{m(s)}^{\eta} & \tau_{b(w)}^{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{m(s)} & M_{m(s)} & \tau_{b(w)}^x \\ v_{m(s)} & N_{m(s)} & \tau_{b(w)}^y \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 $[U_{m(s)}, V_{m(s)}]$ 、 $[Q_{m(s)}^{\xi}, Q_{m(s)}^{\eta}]$ 、 $[\tau_{b(w)}^{\xi}, \tau_{b(w)}^{\eta}]$ は諸量の反変成分である。各該当箇所述べたように、変数の下付添字 m は液相の上下層を、 S は多孔体(B領域の下層)を、

b はA領域の底面摩擦係数を、 W はB領域の多孔体天端での摩擦係数をそれぞれあらわしている。

さらに、A,B領域と上層・下層の判別パラメータを含む支配方程式の普遍表示によって全領域・上下層共通の方程式形を採用し、解析アルゴリズムの簡便化をはかっている。解析格子上で流れと領域属性を判別するパラメータを設定すれば、任意形状の透過・不透過構造物の流れが容易に表現される。一般座標系変換と普遍表示の詳細については文献3)を参照されたい。

(3) 解析対象領域と数値解析

解析対象領域は、幅 $B=0.9\text{m}$ 、流下方向長さ 14.0m の開水路流である。その他の諸元については表-1 によって後段で記述する。差分時間間隔は $\Delta t=1.0 \times 10^{-3}(\text{sec})$ 、空間間隔は $\Delta x=\Delta y=5.0 \times 10^{-2}(\text{m})$ である。上流端境界において所定の断面平均流速、下流端境界において水深が与えられる。初期条件としては、上下流端における境界条件に適合するように横断方向一様で縦断方向へ線形的に変化する流速・水深を暫定的に与え、定常解が得られるまで非定常流計算を経て、定常流の解を得る。

3. 水理実験の概要

(1) 実験装置

水理実験は、神戸大学工学部環境水理実験室で実施された。流れに対し「直角」、「上向き」、「下向き」となるように捨石水制群 8 基を左岸等間隔で設置した。3 種類それぞれの水制群に対して、流れが水制を越流しない場合と越流する場合の 2 ケースの実験を実施した。実験水路は、長さ $20.0\text{m} \times$ 幅 $0.9\text{m} \times$ 高さ 0.5m 、水路勾配 $1/20000 \sim 1/20$ の可変勾配水路である。捨石水制は、1 基あたり長さ $0.45\text{m} \times$ 幅 $0.20\text{m} \times$ 高さ 0.10m の諸元を有する。水制の間隔は 0.8m である。捨石水制の材料には、平均粒径 $d_m=0.02\text{m}$ の石礫を用いた。不透過型水制としては、捨石水制と同じ寸法の木箱を並べて固定した。

流れがほぼ定常に達した後、水平流速成分 (u, v) を二次元電磁流速計で、水深 h をデジタル・ポイントゲージで計測した。流速は 6 割水深での計測を原則としているが、浅い計測点では 4~6 割の範囲で変動する位置設定となっている。流速は 5Hz で 30sec サンプルングされた。

(2) 実験条件と実験方法

実験では、捨石水制群の下流側が常流となるように、下流端水位が調整された。実験は表-1に示すような合計7 ケースに対して行われた。数値解析も各実験ケースと同様の水理条件で実施された。実験においては、流れの定

表-1 実験及び数値解析における水理条件

Case	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6	Case-7
種類	不透過型						透過型 (捨石)
長さ l_g (m)							0.45
幅 b_g (m)							0.20
高さ h_g (m)							0.10
粒径 d_m (m)							0.02
間隙率 n							0.34
堰上げ							あり
流れの型	非越流	非越流	越流	非越流	越流	非越流	越流
水制個数							8
設置角度	直角		上向き		下向き		
流量 Q (m ³ /s)	0.018	0.0158	0.0358	0.0158	0.0358	0.0158	0.0358
水路幅 B (m)							0.90
水路勾配 i							1/800
上流端水深 h_0 (m)	0.0909	0.0884	0.1499	0.0860	0.1516	0.0843	0.1497

常性を確認した後、流量 Q 、水深 h 、流速2成分(u, v)を計測した。

水制を斜めに設置する場合には、上向き・下向きともに側岸との偏角を20°とした。捨石水制の事例は少ないため、国内における不透過水制の実績⁵⁾などを参考に設定している。あくまで直角水制との比較を検討するための実験条件であり、必ずしも代表的な設置角度とは限ら

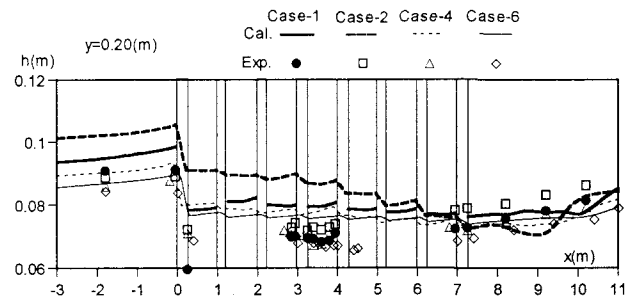


図-3 水深の縦断方向分布 (水制を越流しない場合)
(水制中央部 $y=0.20m$ の縦断面)

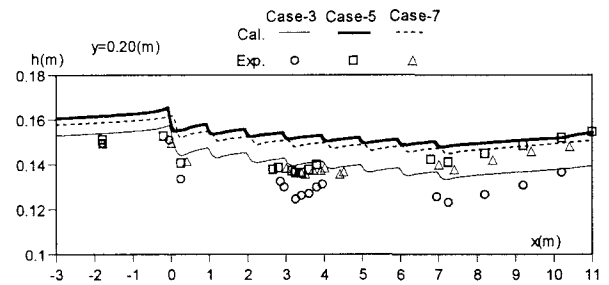
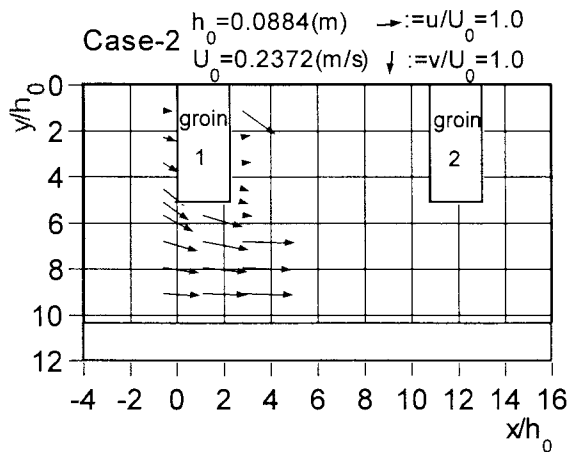
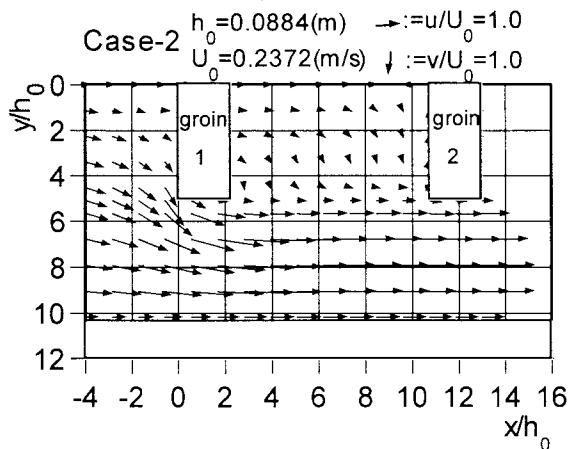


図-4 水深の縦断方向分布 (水制を越流する場合)
(水制中央部 $y=0.20m$ の縦断面)



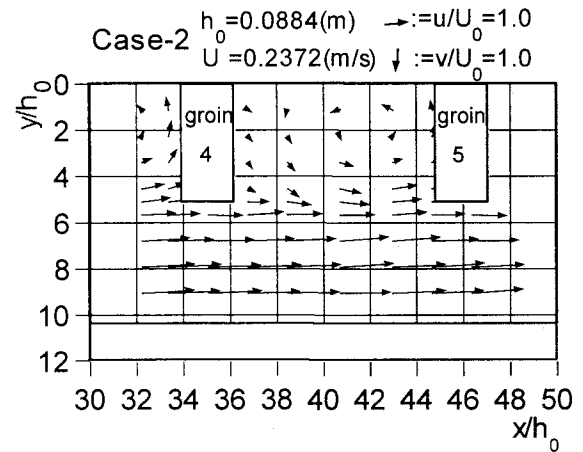
(a) 実験



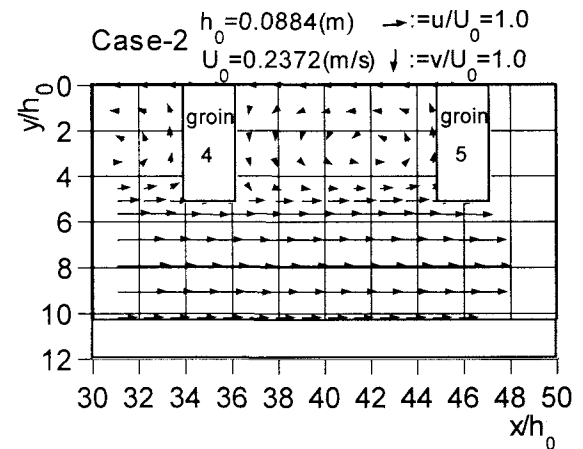
(b) 数値解析

(x, y 方向ともベクトル数を1/2に削減して表示)

図-5 1～2 基目の水制周辺の流速ベクトル
(非越流型の直角水制: Case-2)



(a) 実験



(b) 数値解析

(x, y 方向ともベクトル数を1/2に削減して表示)

図-6 4～5 基目の水制周辺の流速ベクトル
(非越流型の直角水制: Case-2)

ないことを付記する。

水理諸量の無次元化に用いる代表水理量には、水制群より上流側で水深変化が少ない区間の横断面（1基目の水制の2m上流側：これを「上流端境界」と称する）における平均水深 h_0 と断面平均流速 $U_0=Q/(Bh_0)$ を用いている（ここで、 $B=0.9\text{m}$ は水路幅）。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 水面形

(1) 水制を越流しない場合（非越流型：Case-1,2,4,6）

水制を越流しない場合について、無次元水深 h/h_0 の分布を図-3に示す。図-3は $y=0.2\text{m}$ の縦断面における水深の流下方向分布である。計算値は実験値を上回っており、解析に導入された浅水流近似の再現精度の限界が見られるが、水制前後の水深変化は計算と実験で同程度であり、また実験で計測される水深の縦断変化の概形は数値解析により捉えられている。いずれのケースにおいても1基目の水制を通過した後の水深低下が大きく、その後下流

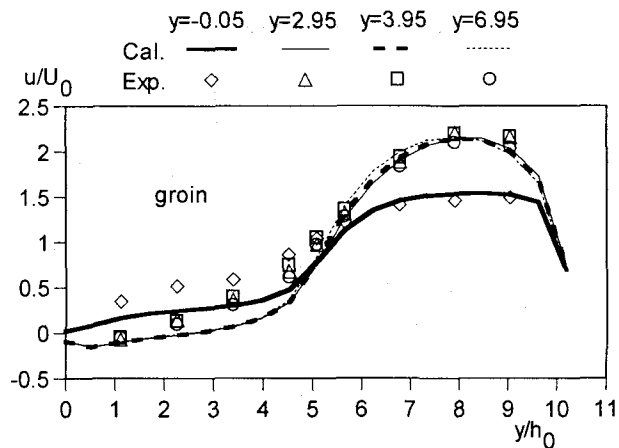
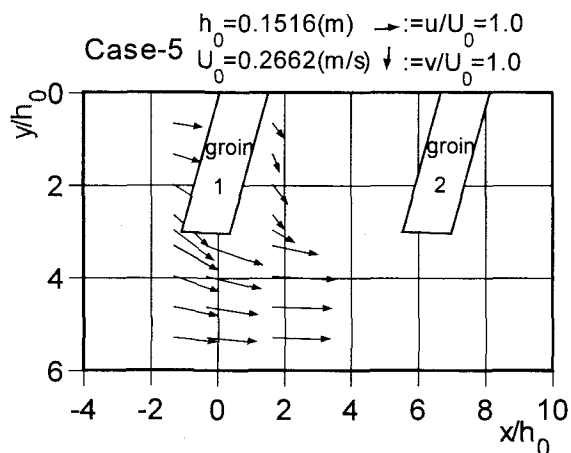
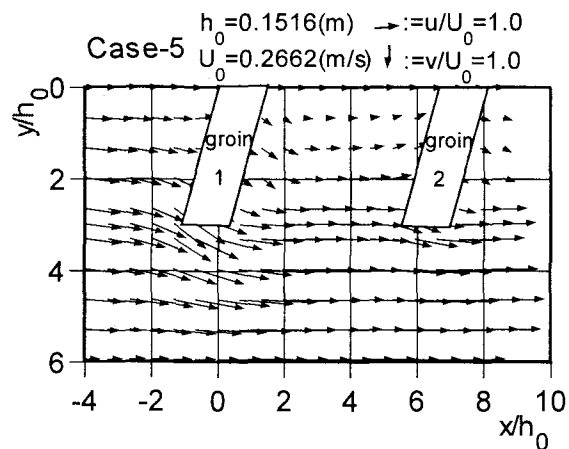


図-7 直角水制（Case-2）における流速の横断分布

に向かって徐々に回復している。水制が不透過であるCase-1を除けば下向き水制の場合に水深の低下が最も大きかった。以上のように、いずれの場合にも1基目直後の流れの縦断変化は大きい。本実験では、流れの縦断変化がほぼ平衡状態となる3,4基目水制周辺の流況に焦点をあてたが、水制群の上流区間における流れの急変特性

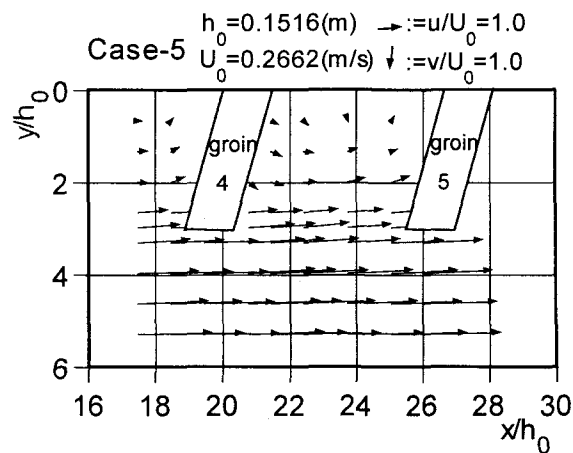


(a) 実験

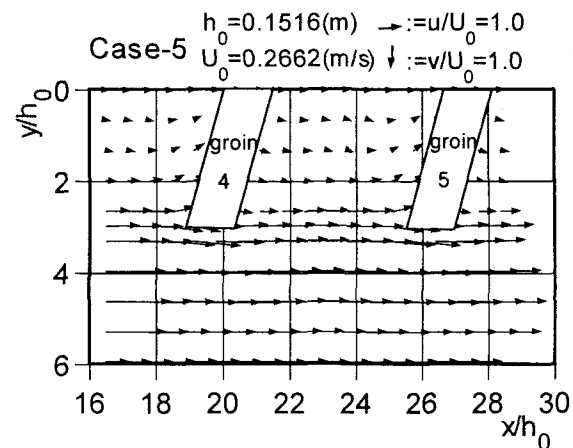


(b) 数値解析

(x,y 方向ともベクトル数を1/2に削減して表示)
図-8 1～2基目の水制周辺の無次元流速分布
(越流型の上向き水制：Case-5)



(a) 実験



(b) 数値解析

(x,y 方向ともベクトル数を1/2に削減して表示)
図-9 4～5基目の水制周辺の無次元流速分布
(越流型の上向き水制：Case-5)

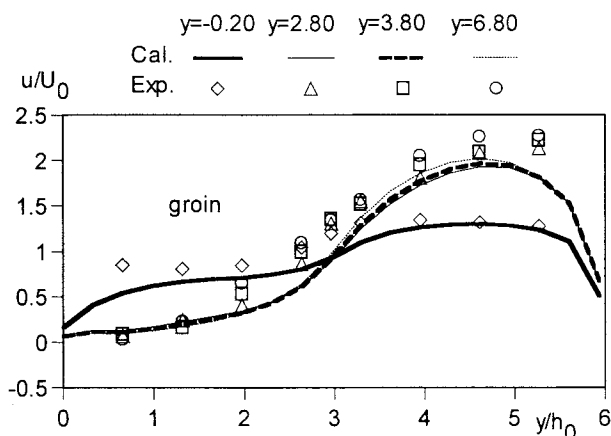


図-10 上向き水制 (Case-5) における流速の横断分布

を検討する場合には、2,3 基目周辺の流速・水深の詳細な計測が必要と考えられる。

また、不透過型水制に比べて、透過型水制の場合は水深の変化が緩やかであり、流れを柔らかに制御する効果を期待できる。

数値解析は二層浅水流モデルであり、構造物直近で三次元性が強い領域の流れを再現するには限界がある。図-3に示すように、構造物周辺において数値解析と水理実験の間にやや誤差が見られるが、対象領域全般の水深分布は概ね再現されている。

(2) 水制を越流する場合 (越流型: Case-3, 5, 7)

同様に水制を越流する場合の h/h_0 の分布を図-4に示す。1 基目の水制の直上流側で水位がやや上昇しているが、1 基目の水制を通過した後には低下し緩やかに上昇している。やはり、浅水流モデルに基づく解析結果が実験値を上回っているが、水深の分布形状の特徴は再現されている。

4.2 流速分布の特性

(1) 非越流型の直角水制 (Case-2)

一例として、直角透過水制 (Case-2) の1～2 基目周辺と4～5 基目周辺における流速ベクトル ($u/U_0, v/U_0$) を図-5と図-6にそれぞれ示す。1 基目の水制の上流側で流れが右岸方向へ刎ねられ、左岸への再付着はみられない。1～2 基目の水制間の湛水域においては循環流は見られないが、図-6のように、下流側の湛水域にはいずれも同程度の規模と強度の循環流が見られた。1～2 基目の水制間で循環がみられないのは、1 基目水制の透過流量が大きく、湛水域内の循環流の発生を阻止したためであると考えられる。2 基目より下流側における水制では透過流量が小さく湛水域の閉鎖性が強くなったため循環流が発達すると考えられる。

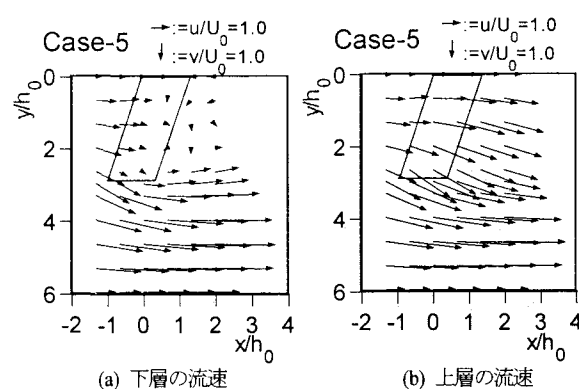


図-11 越流型流れにおける水制周辺・内部の流速分布 (x, y 方向ともベクトル数を1/2に削減して表示)

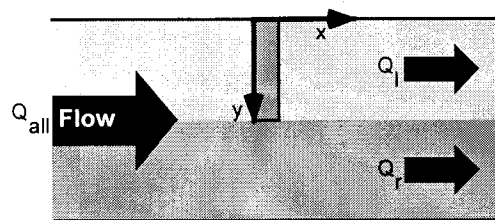


図-12 水制ね効果を定量化するための左岸側、右岸側流量 (Q_l, Q_r) の定義

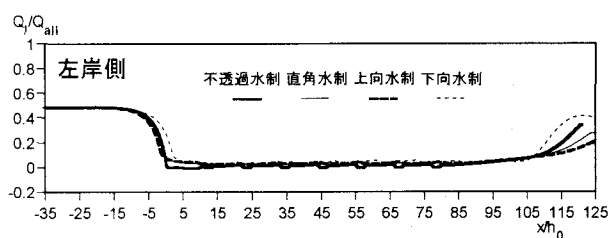


図-13 非越流型流れにおける流量比 Q_l/Q_{all} (数値解析)

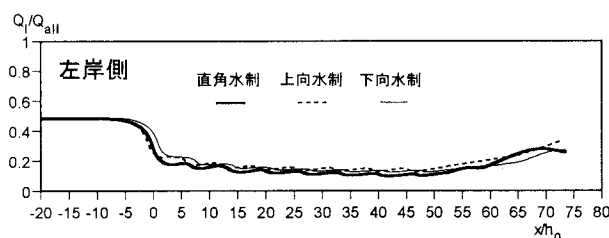


図-14 越流型流れにおける流量比 Q_l/Q_{all}

直角水制における流速の横断分布を実験と解析間で図-7に比較する。ここで、 $x=-0.05, 2.95, 3.95, 6.95m$ の横断面は、それぞれ1, 4, 5, 8 基目水制の直上流側の断面に相当する。流速ベクトルに見られる平面流況は数値解析により概ね再現されていたが、図-7のように流速分布の詳細を見ると、特に $x=-0.05m$ の断面のような構造物直近の三次元性が強い領域においては浅水流近似による本解析に再現性の限界が見られる。

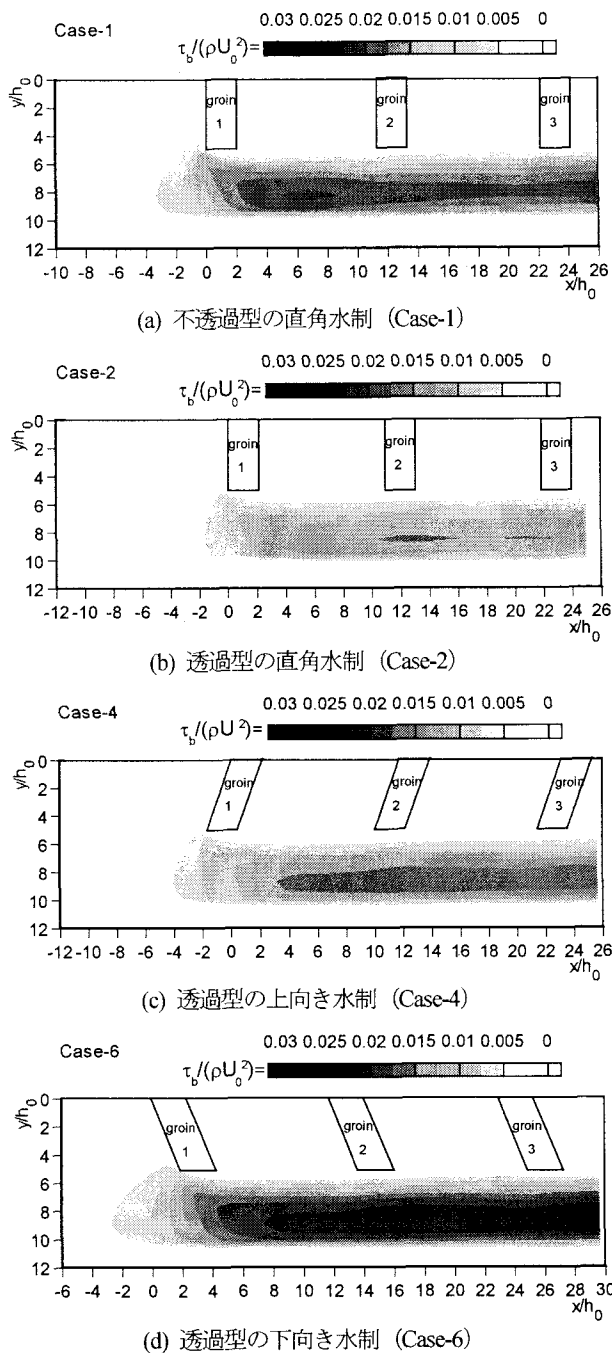


図-15 非越流型の水制における無次元底面せん断力

(2) 越流型の上向き水制 (Case-5)

上向き水制 (Case-5) の1~2基目と4~5基目の水制周辺における流速ベクトルを図-8と図-9に示す。水制を越流する水脈が流れの中央側へ削ねられている様子が実験と数値解析の両方から確認される。流速の横断分布を図-10に示す。ここで、 $x = -0.20, 2.80, 3.80, 6.80\text{m}$ は、それぞれ1, 4, 5, 8基目水制の直上流側の横断面に相当する。実験値との適合性は良好であり、実験では計測できない水制内部の流れの解が数値解析によって得られている。例えば、水制周辺の上下層の流速が図-11のように得られ、これより水制内部と越流部で流れの構造が

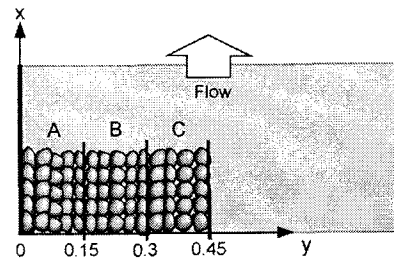


図-16 水制のA,B,C三領域への分割

なり異なることなどを確認することができる。

4.3 水削ね効果

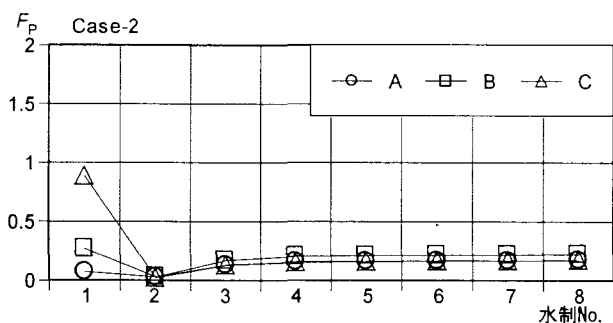
水制群の水削ね効果を調べるために、図-12のように水制先端を通る縦断面で流れを左岸側と右岸側に分割し、それぞれの断面で積分された流量(Q_L, Q_R)を求めた。ここでは、全断面流量 Q_{all} で除した流量比 Q_L/Q_{all} 、 Q_R/Q_{all} によって水制の水削ね効果を評価する。数値解析と水理実験との比較も可能であるが、すでに流速分布の比較から流量に関する両者の適応度は間接的に検証されているので、ここでは縦断変化の特性がよいわかりやすい数値解析結果のみを示している。非越流型のケースにおける Q_L/Q_{all} の流下方向変化を図-13に示す。 Q_L/Q_{all} が水制群の上流側で急減し、流れが右岸側へと削ねられ、水制群を過ぎた後に回復している。水制の設置角度や透過・不透過の別が水削ねにおよぼす影響は顕著ではない。

越流型のケースにおける Q_L/Q_{all} の流下方向変化を図-14に示す。水制を越流するため非越流の場合よりも Q_L/Q_{all} が大きくなっている。越流型のケースを比較すると直角水制の水削ね効果が最も大きい。

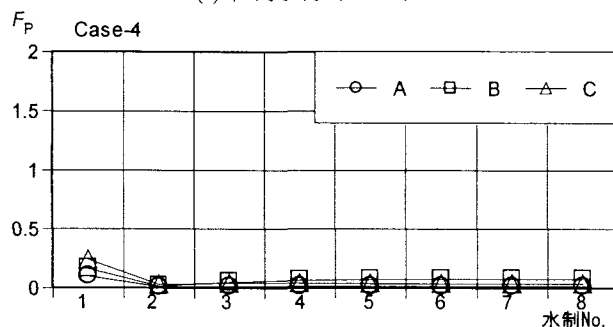
4.4 水制群が底面せん断力におよぼす影響

式(4)の右辺に含まれる (τ_b^x, τ_b^y) から底面せん断力の大きさ $\tau_b = \sqrt{\tau_b^x{}^2 + \tau_b^y{}^2}$ の数値解が得られる。非越流型のケースにおける底面せん断力の無次元値、 $\tau_b / (\rho U_0^2)$ の分布を図-15に示す。

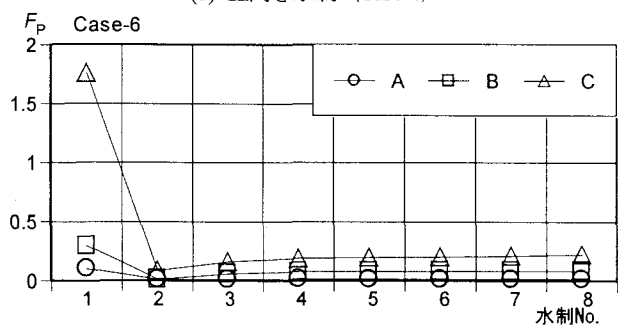
いずれのケースにおいても水制群の下流側・右岸寄りに大きな底面せん断力が発生している。不透過型の直角水制 (Case-1) および透過型の下向き水制 (Case-6) において、他のケースよりも大きな底面せん断力が作用しており、河床への負荷が大きいことがわかる。また、直角水制の Case-1 と Case-2 を比較すると、不透過型水制 (Case-1) よりも透過型水制 (Case-2) における底面せん断力の方が小さい。すなわち、透過性に富んだ捨石を用いることによって河床への影響を小さくすることができる。自然材料を用いた伝統工法にはこうした知見が経験的に生かされていた。本解析によって掃流力や局所的



(a) 直角水制 (Case-2)

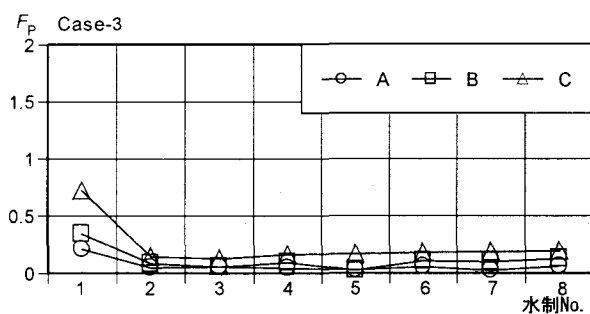


(b) 上向き水制 (Case-4)

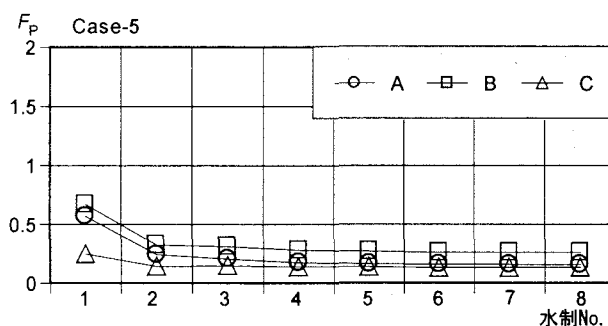


(c) 下向き水制 (Case-6)

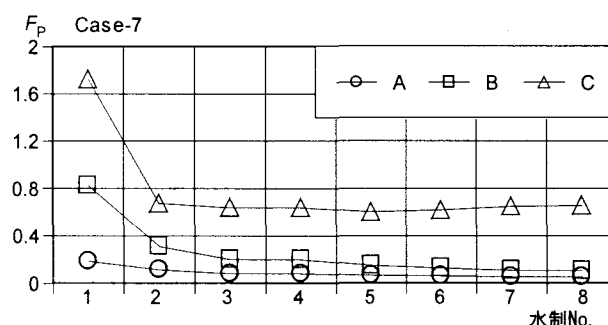
図-17 非越流型の捨石水制各部に作用する無次元最大抗力 F_p



(a) 直角水制 (Case-3)



(b) 上向き水制 (Case-5)



(c) 下向き水制 (Case-7)

図-18 越流型の捨石水制各部に作用する無次元最大抗力 F_p

な土砂動態が水理学的に評価されれば、これまで経験に頼っていた捨石構造物を合理的に設計し、河川整備の説明責任を果たすことが容易になる。このことはもちろん、本研究を実施した背景でもある。

4.5 水制群に作用する流体力

捨石水制群の構造設計や維持管理の上で、捨石水制に作用する流体力を知ることが必要である。本モデルでは、計測不可能な水制内部の流れ・流体力を解析することができる。

図-16に示すように、水制を横断方向のA, B, C領域に三分割し、捨石水制に作用する抗力の最大値 F_p を算出する。ここで、抗力（捨石構造物に作用する流体力）は多孔体流の運動方程式(6)の右辺下線部で示す抵抗項の大きさとして数値解から評価される^{2),3)}。A,B,C各部位の崩壊はその最大値により規定されると考えて、これを代

表量 (U_0, h_0) により無次元化したものを F_p と定義している。本解析ではその他に、捨石天端に作用する摩擦力も運動方程式から算定することが可能である。

図-17、図-18に非越流型と越流型の水制群における F_p の流下方向の変化をそれぞれ示す。非越流型（図-17）のいずれのケースにおいても1基目の水制のC部（水制の先端部）において抗力が最大となっている。また、2基目の水制に作用する抗力は最も小さく、3基目あるいは4基目より下流側の水制に作用する抗力は同程度の値をとっている。このことから、1基目水制の先端において崩壊する可能性が最も大きいことが示唆される。また、上向き・直角水制に比べて下向き水制のC部で大きな抗力が作用するのは、非越流の状態においては水制が下流に向く場合において水制先端部へ流れが最も集中しやすい、その結果大きな抗力を発生することが原因として考

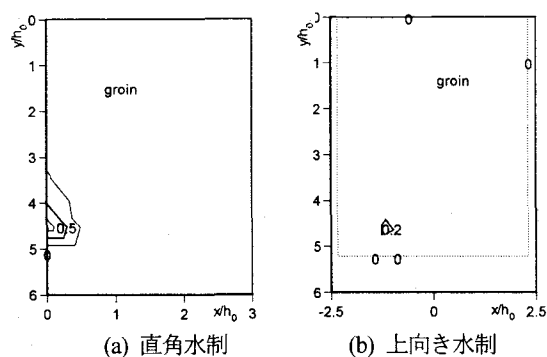


図-19 非越流型の1基目水制に作用する無次元抗力

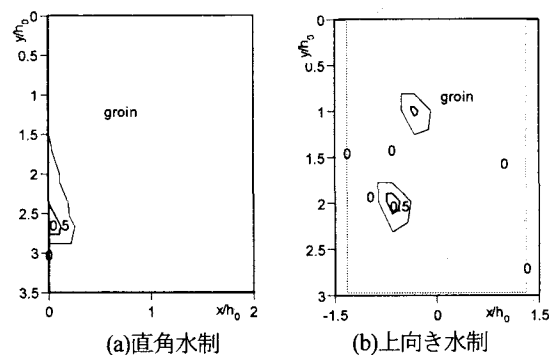


図-20 越流型の1基目水制に作用する無次元抗力

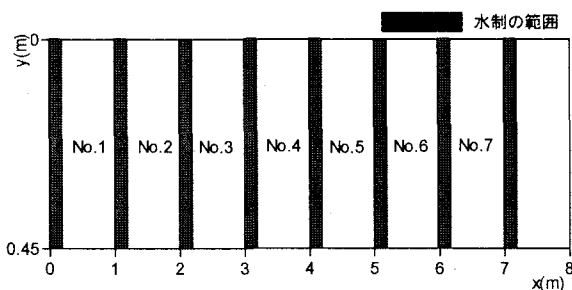
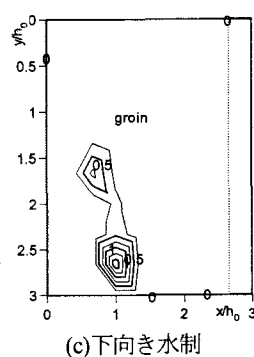
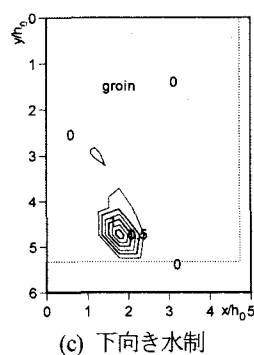


図-21 湛水域の番号

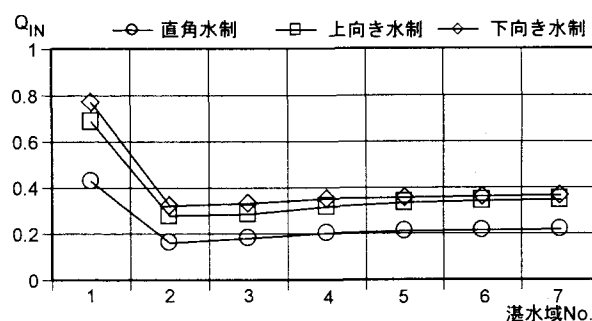


図-22 湛水域上流側水制からの無次元透過流入量 Q_{IN}

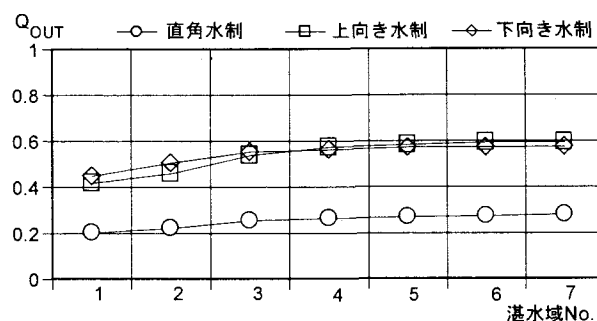


図-23 湛水域下流側水制への無次元透過流出量 Q_{OUT}

えられる。

越流型(図-18)の直角・下向き水制の場合には1基目の水制の先端部(C部)に大きな効力が作用し、2基目より下流では同程度の抗力が作用している。越流型の上向き水制(図-18(b))においては、C部よりもB部(水制の中間部)にやや大きな抗力が作用し、直角・下向き水制とは異なる特性を示す。

そこで、第1基目水制の抗力特性をより詳細に検討するために、図-19、図-20にそれぞれ、非越流型と越流型の1基目水制における抗力分布を示す。図-18(b)では越流型上向き水制が先端部(C部)で最大抗力が発生するような結果が得られていたが、実際には図-20(b)のように水制最先端ではなく、B部とC部の境界付近で最大値があらわれる。したがって、最大抗力がC部に発生するとは言え、水制中央寄りの越流水衝部で崩壊しやすいことがわかる。なお、図-19(b)の非越流型で上向き水制の場合に水制先端付近で最大抗力が発生しているのは、流

れが水制を回り込む先端付近の流れを収斂させて加速し、大きな流体力をもたらすためと推察される。非越流の状態では抗力が小さく、水制の安定性が問題となるのは越流時である。水制の設置角度にともなう抗力分布特性を把握し、水制の強度設計に反映する必要がある。

4.6 捨石水制群の環境機能

水制間の領域に形成される湛水域の水交換は重要な河川環境要素である。そこで、湛水域に形成される循環流の特性、レイノルズ応力、湛水域の水交換率を数値解析的に検討した。ここでは、湛水域の閉鎖性が高い非越流の場合を対象とする。整理のため、図-21 のように各湛水域に番号を付す。

ある湛水域の上流側水制から湛水域への透過流入量の無次元値 Q_{IN} (水制断面における無次元流速分布の断面積分) を図-22 に示す。ここで Q_{IN} は、数値解析より得られる水制内の見かけ流速の断面積分値として算定される。前述のように、上流断面での平均流速 U_0 と平均水深 h_0 を用いた無次元化による無次元全流量は水路断面のアスペクト比 B/h_0 に等しい。本実験では、 $B=0.9m$ であり、仮に $h_0=0.1m$ とすれば、無次元全流量は9.0 程度である。図-22 に得られた透過流入量は全流量の数%程度であることがわかる。

いずれのケースにおいても、1 基目水制から2 基目水制への透過流入量が最も大きく、いったん急減した後、下流方向へ徐々に回復している。直角水制に比べて下向き・上向き水制における透過流入量の方が大きく、湛水域内の停滞性は低い。水位の縦断方向変化を示す図-3 を参照すると、直角水制の場合には上向き・下向き水制に比べて水制設置区間における水面勾配が小さい。これに対応して水制の透過流を誘起する動水勾配が直角水制の場合に最も小さく、こうした設置角度による透過流量の違いが透過流入量にも現れているようである。しかし、前述のように透過流量は全流量のわずか数%にすぎないため、各ケース間の透過流入量の差は全流量に比べればはるかに小さい。

同様に図-23 には、湛水域の下流側水制へと透過流出する流量 Q_{OUT} (無次元値) を示す。水制設置角度にともなう透過流量の違いは流入量の場合と同様である。

図-24 には、湛水域開口部に相当する $y=0.45m$ の断面での交換流量 Q_{EXCHG} (無次元値) を示す。全ての断面において、直角水制よりも上向き・下向き水制の方が、 Q_{EXCHG} は大きく、停滞性が低い。水制群を上向きあるいは下向きに設置した方が湛水域と主流部間の水交換が促進されるようである。

5. 結論

捨石水制群の環境水理機能を検討し、構造物の水理設計や配置方法に関する知見を得るために、水理実験と平面二次元解析を行った。本研究で得られた知見を以下に要約する。

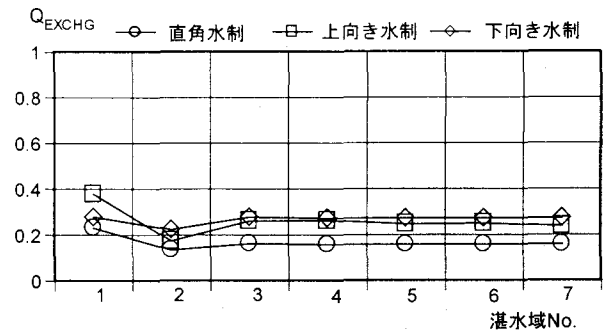


図-24 湛水域開口部の断面 ($y=0.45m$) における交換流量 Q_{EXCHG} (無次元値)

- (i) 設置角度が異なる捨石水制群を設置した開水路において、水理模型実験と数値解析を実施し、水制を越流する場合と越流しない場合の流れがともに精度良く再現された。特に、実験では計測不能な水制内部の流れも数値解析によって明らかにすることができた。
- (ii) 水制本来の機能である水刳ね効果を捨石水制についても確認することができた。また、捨石水制群が河床の底面せん断力におよぼす影響が数値解析的に検討された。
- (iii) 捨石水制に作用する抗力の数値解が得られた。その結果、透過水制1基目の先端部に大きな抗力が発生して崩壊の危険性が高いのに対し、それより下流側の水制では1基目水制の遮断効果によって抗力がかなり低減することが分かった。
- (iv) 捨石水制群の環境水理機能として、水制間に形成される湛水域の水交換率を検討した。下向き・上向き水制においては直角水制の場合よりも水交換率が大きく、湛水域の停滞性は低いことが明らかになった。

謝辞：水理実験には当時神戸大学学生であった熊田清敬氏のご協力を頂いた。以上、記して謝意を表する。

参考文献：

- 1) Michioku, K., Maeno, S., Furusawa, T. and Haneda, M.: Discharge through a permeable rubble mound weir, J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.131, No.1., pp.1-10, 2005.
- 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.
- 3) 道奥康治・南條雅志・石垣泰輔・前野詩朗：捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル，土木学会論文集，No. 782/II-70, pp.31-50, 2005.
- 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) 山本晃一：日本の水制，山海堂，447P, 1996.

(2005年4月15日 受付)