

透過水制が設置された河川流の解析

ANALYSIS ON A RIVER FLOW WITH PERMEABLE RUBBLE MOUND GROINS

李最森¹・神田佳一²・道奥康治³・前野詩朗⁴

Zuisen LI, Keiichi KANDA, Kohji MICHIOKU and Shiro MAENO

¹学生会員 工修 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)

²正会員 工博 明石工業高等専門学校教授 都市システム工学科 (〒674-8501 明石市魚住町西岡679-3)

³フェロー会員 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)

⁴正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

Since a rubble mound groin has a permeable structure, through-flow water can be purified, pores and concaves of the mound provide living space for aquatic lives, and landscape around the structure is nicer and natural than those of artificial modern structures. In this study, focusing our attention on a set of rubble mound groins, a field observation and a numerical analysis were carried out in Akashi River in Hyogo, Japan, where the groins was partially damaged by a flood flow in 2004. A two-dimensional flow model was developed in order to reproduce flow fields during the flood and to estimate flow force acting on the structure. Hydrodynamics inside and outside the structure was discussed based on the numerical analysis. Characteristics of the flow such as streamline concentration and diversion around the structure, shear stress on the river bed and profiles of drag force acting on the structure were investigated.

Key Word: Rubble mound groin, river flow, discharge of flood flow, two dimensional analysis, local observation

1. 序論

近代以降, 水流を効率的に制御し維持管理を簡素化するために, 主にコンクリートや土砂で構築された不透過型で耐荷力の高い水制が建設されてきた. これに対し, 石礫・木材など自然材料で構築された伝統的な透過型水制は, 流れを柔らかに制御することによって構造物周辺の局所流や洗掘を緩和する水利機能を有する. 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, 河川景観保全などの環境機能も合わせて期待できる. 透過型の河川構造物はこれからの河川整備の理念にも通ずる機能を有し, 今後活用されるべきものと考えられる. しかし, 現時点では構造物内外の流れを解析する手段がないため, これまでの技術経験や実験に基づく定性的知見に基づいて設計されているのが実情である. こうした背景に基づいて, 本研究では, 捨石や粗朶など透過性の自然材料で構築された堰・水制・沈床などの河川構造物の土工設計手法を確立することを目的とし, 構造物内部の透過流も考慮した河川流の解析手法を確立することを目的とする.

著者らは, 堰¹⁾・護岸²⁾・水制^{3), 4), 5)}を対象として捨石構造物周辺の流れや構造物に作用する流体力の特性を主として実験的に検討してきた. 第一段階として固定床開水路を対象に透過構造物内外の流れ特性を明らかにした後, 移動床における水制周辺の流れと洗掘特性を実験的・数値解析的に検討した⁶⁾. 本研究では, これまでの一連の研究で得られた知見を実河川に応用するために, 兵庫県下の二級河川, 明石川中流部に設置された捨石水制群を対象として, 出水時における構造物周辺の流況と流体力の特性を平面二次元流モデルによって明らかにする.

2. 対象とする捨石水制群と河道測量

(1) 対象とする捨石水制群

図-1に明石川水系と対象区間の位置を示す. 明石川は, 神戸市北区山田町藍那に源流を発し明石市東部で播磨灘に注ぐ兵庫県南部の二級河川である. 河口から約8.8kmの右岸側平野橋直下流における約300m延長にわたり11基の捨石水制群が設置された. 下流から上流を望んだ対象区間を写真-1に示す. 河道は緩いカーブで左岸側へ湾

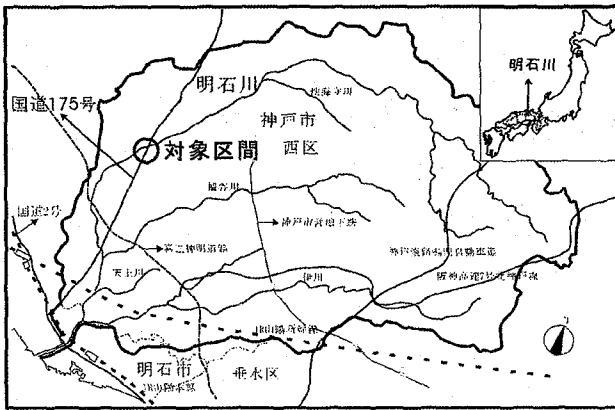


図-1 明石川水系と対象区間

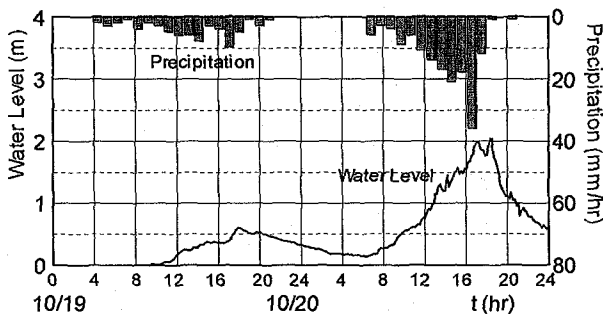


図-2 平成16年10月台風23号出水における雨量・水位記録
(捨石水制群より約4km上流の藤原橋地点)

曲し、この区間の平均的な河床勾配は約1/180である。

明石川の下流域は、人口・産業の密集地域であるため、治水上の安全を確保することはもちろんのこと、河川の親水性と良好な景観を確保し、自然環境と生態系へのマイナス影響を最小化するような河川整備が求められている。そのため、流れを柔らかく制御して堤防護岸を補強し、水生生物などの生息空間を確保するために、間隙を有する捨石水制が設置された。

水制設置後の2004年10月に台風23号が明石川の警戒水位を大きく超える洪水をもたらし、11基の捨石水制のうち上流側三基と下流端の一基が被災した。水制より約4km上流で観測された雨量と水位の記録を図-2に示す。第⑪番水制（最下流）の損壊状況を写真-2に示す。水制の中程から先端にかけて捨石材料が飛散している。

本研究では、捨石水制群を含む河道区間の地形測量を実施し、ピーク流量時の流れや構造物に作用した流体力を数値解析によって再現する。特に、捨石の粒径と間隙率を考慮して透過水制とみなした解析結果と仮想的に水制を不透過構造とみなした場合の流れや流体力を比較し、捨石水制の水理機能を検証する。

(2) 河道地形の測量と解析

SOKKIA社製のトータルステーションを用いて放射観測法により河道地形を計測した。対象領域格子点上の地形情報への補間・変換にはEriksson(1982)のTransfinite補間法⁸⁾を用いた。図-3に得られた河道地形を示す。



写真-1 捨石水制とその周辺の様子（出水後）

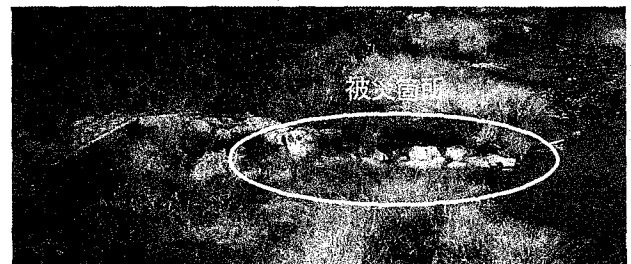


写真-2 捨石水制（第⑪番水制）の被災状況

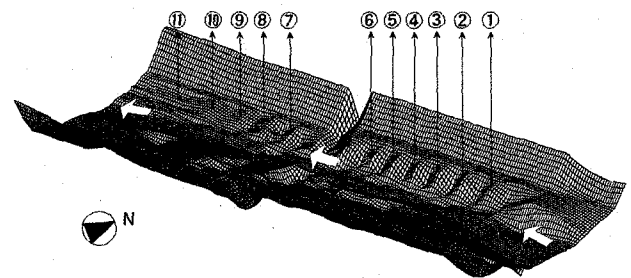


図-3 河道地形（丸番号は捨石水制）

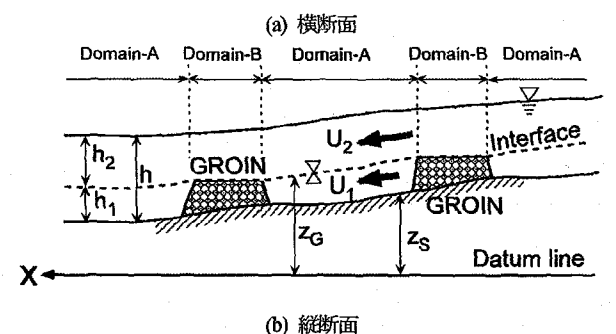
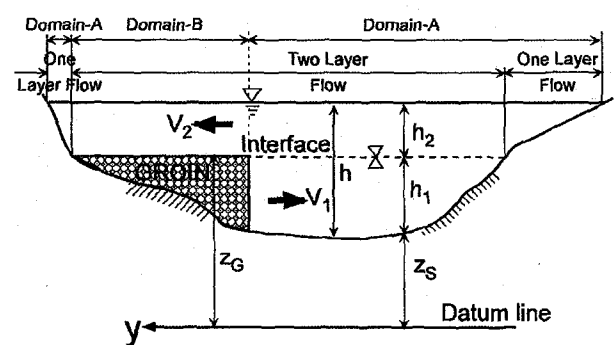


図-4 二次元二層流モデルにおける領域と諸量の定義

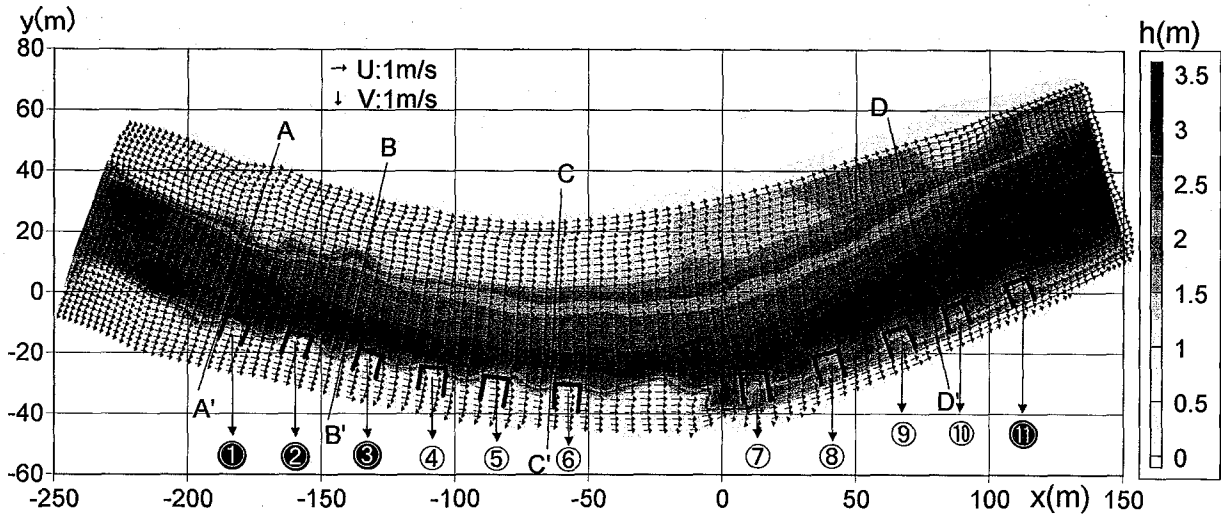


図-5 水制とその周辺の流速解析値
(流速ベクトルの数を1/2に間引いて表記, 丸数字は水制番号, 黒塗りの番号は出水によって被災した水制)

3. 数値解析

(1) 二次元二層流モデルの定式化

出水時の流況を再現するために捨石構造物が設置された河川流を平面二次元モデルによって解析する。捨石水制内の透過流を再現するために、図-4のように捨石の天端をつなぐ平面を境界面として流れを上下二層に分け、諸量を水深方向に層平均して二層浅水流を記述する。モデルの定式化は著者らの二次元二層流モデル⁴⁾に基づくが、次の二点を変更してモデルの汎用性を向上させた。

- ① 上下境界面の高さの縦横断方向変化を考慮する。
- ② 水深が小さい場合に出現する一層流について、前モデルにおいては水面低下にともなう下層流のみを想定したが、実河川側岸部では下層が消失して上層だけが残る一層流となる場合があるため、これを新たに考慮する。

本モデルにおいては、捨石水制内外の質量・運動量交換を考慮するとともに、捨石水制内の流れは捨石の平均粒径と間隙率を用いて流水抵抗係数(捨石に作用する抗力)を運動量保存式に組み込む。

a) 開水路領域(図-4のDomain-A)

開水路領域における運動量保存は次式で記述される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ u_m \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_m \begin{bmatrix} M_m \\ N_m \end{bmatrix} \right\} \\ &= -gh_m \left[\frac{\partial}{\partial x} z_s + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-u_m'^2 h_m}{-v_m' u_m' h_m} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{-u_m' v_m' h_m}{-v_m'^2 h_m} \right] \right] \\ & \quad - \frac{\delta_{m1}^A}{\rho} \begin{bmatrix} \tau_b^x \\ \tau_b^y \end{bmatrix} + \Gamma_m \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} u_1 \frac{\partial h}{\partial x} + \Gamma_m \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} v_1 \frac{\partial h}{\partial y} \\ & \quad + \Gamma_m E q_i \begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ v_2 - v_1 \end{bmatrix} - \Gamma_m \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} q_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 g : 重力加速度、 z_s : 基準面からの水位、 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、 q_i : 上下層間の連行速度、 (τ_b^x, τ_b^y) : 底面せん断力の x, y 方向成分、 E : 連行係数($E=1$ 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、 (u_b, v_b) : 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)、透過性構造物を含む領域においては上下層ともに $\delta_{m1}^A=0$ である。また、下層($m=1$)の時、 $\Gamma_m=1$, 上層($m=2$)の時、 $\Gamma_m=-1$ 。

b) 透過性構造物を含む領域(図-4のDomain-B)

この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」 $(u_s, v_s) = n(u_1, v_1)$ (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」

$$M_s = u_s h_s, N_s = v_s h_s \quad (2)$$

が式(1)の (M_m, N_m) に置き換えられる。上層に関しては開水路領域と同様である。これより、透過性構造物を含む領域における下層多孔体内($m=1$)の運動方程式は、捨石堰で検証された非ダルシー型抵抗則を用いて以下のよう記述する。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} M_s \\ N_s \end{bmatrix} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ u_s \begin{bmatrix} M_s \\ N_s \end{bmatrix} \right\} + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_s \begin{bmatrix} M_s \\ N_s \end{bmatrix} \right\} \\ &= -gh_s \left[\frac{\partial}{\partial x} z_s + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-u_s'^2 h_s}{-v_s' u_s' h_s} \right] + \frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{-u_s' v_s' h_s}{-v_s'^2 h_s} \right] \right] \\ & \quad + \Gamma_m \begin{bmatrix} u_s \\ v_s \end{bmatrix} u_s \frac{\partial h}{\partial x} + \Gamma_m \begin{bmatrix} u_s \\ v_s \end{bmatrix} v_s \frac{\partial h}{\partial y} + E q_i \begin{bmatrix} u_2 - u_s \\ v_2 - v_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \frac{q_i}{n^2} \end{aligned}$$

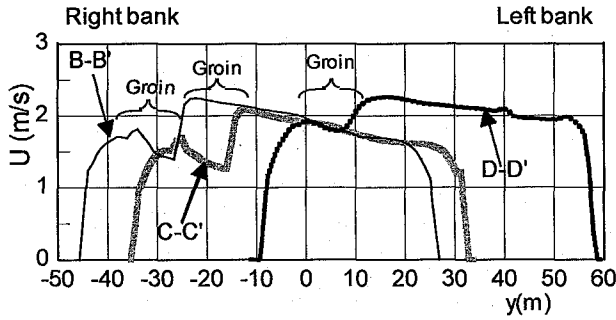


図-6 図-5の三断面における水深平均流速Uの横断分布

$$-\left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \sqrt{u_s^2 + v_s^2}\right) \begin{bmatrix} M_s \\ N_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

抵抗力

上式において、 v は動粘性係数、 K と c は捨石の平均粒径 d_{50} と間隙率 n の関数として定義される多孔体のパラメータである⁷⁾。

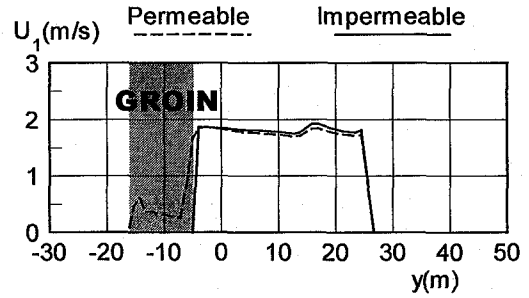
透過性構造物を含む領域の上層 ($m=2$) は透水粗面上の開水路流と考えると、次式の運動方程式が用いられる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ u_2 \begin{bmatrix} M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_2 \begin{bmatrix} M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} \right\} \\ &= -gh_2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \right] z_s + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{-u_2'^2 h_2}{-v_2' u_2' h_2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{-u_2' v_2' h_2}{-v_2'^2 h_2} \right] \\ &+ \Gamma_m \begin{bmatrix} u_s \\ v_s \end{bmatrix} u_s \frac{\partial h_1}{\partial x} + \Gamma_m \begin{bmatrix} u_s \\ v_s \end{bmatrix} v_s \frac{\partial h_1}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} \tau_w^x \\ \tau_w^y \end{bmatrix} \\ &- Eq_i \begin{bmatrix} u_2 - u_s \\ v_2 - v_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} q_i \end{aligned} \quad (4)$$

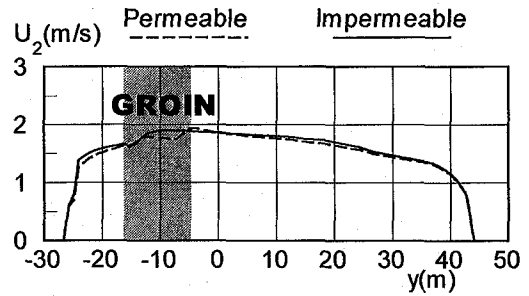
ここで、 (τ_w^x, τ_w^y) は捨石構造物天端における壁面せん断力である。

(2) 対象とする流れの条件

2004年10月の台風23号出水を対象として流況と流体力を推算する。本モデルは非定常流モデルであるが、流量観測が実施されていないことと現地の水位記録がないために、ピーク流量に対する定常流解析を行う。図-2のピーク水位(対象区間の約4km上流地点)と対象区間における河道断面からマンニングの等流公式を用いてピーク流量を $Q=300\text{m}^3/\text{sec}$ と推算し、上流端境界条件を与える。下流端では水位 $H_0=2.1\text{m}$ を与える。設計図書に基づき捨石水制の平均粒径を $d_{50}=0.5(\text{m})$ 、間隙率を $n=0.3$ とする。水制の透過性を評価するために、比較対象として捨石水制を不透過と仮定した場合の解析も実施した。 (x, y) 座標は図-5(後述)のように定義し、これに対する流速成分を (u, v) とする。河床の粗度係数としては高水敷・低水路ともに $n=0.03$ を与える。計算格子間隔は $\Delta x=\Delta y=1.0\text{m}$ 、計算時間間隔は $\Delta t=0.001\text{sec}$ を与え数値解析を実施した。



(a) 下層の流速 U_1



(b) 上層の流速 U_2

図-7 x方向の上下層流速(U_1, U_2) (不透過水制との比較)

4. 水制周辺の流況

図-5に数値解析により得られた捨石水制群周辺の流速ベクトルと水深分布を示す。なお、同図の流速ベクトルは水深平均値であり、1/2に間引いて表記している。丸番号は上流から付した水制番号をあらわし、黒塗り番号は2004年10月の出水で損壊した水制に対応する。詳細を見るために、同図の三断面(B-B', C-C', D-D')における流速の横断分布を図-6に示す。緩やかな湾曲部であるため、最大流速は右岸側へ偏っている。右岸側に配置された水制は堤防法尻付近の流れを大きく減速しており、水制群が効果的に水流抑制機能を発揮していることが確認される。捨石水制の透過性が流れにおよぼす影響を検証するために、同じ幾何形状を有する不透過水制群に置き換えた場合の流れを解析した。図-7には、第①番水制の直上流断面(図-5中のA-A'断面)における上下層内のx方向流速成分(U_1, U_2)に関して、捨石水制(透過水制)と不透過水制とを比較している。捨石水制の場合には、下層の流れが水制へ透過するが、不透過構造の場合には流れが水制上部へ勿ねられるため、捨石水制に比べ最大で 0.2m/sec 程度上層流速 U_2 が大きくなっている。右岸付近では捨石水制の場合において流速がやや減少している。流れの中央付近では捨石水制の場合の方がわずかに流速は小さくあらわれている。

図-8のy方向流速成分(V_1, V_2)を見ると、捨石水制においては下層から水制を透過する流れが存在するため、河道中央へ向かう流れが促進されており、上層においても、右岸付近における正のy方向流速成分が不透過水制の場

合より大きい。逆に河道中央部では、捨石水制の場合の方が(V_1, V_2)とも小さくなっている。

第①番水制周辺の上下層における流速ベクトルを図-9示す。本解析によれば計測不能な水制内部の流れの情報も得ることができ、水制内部と越流部の流速差など流れの空間構造を確認することができる。

5. 水制群に作用する流体力と底面せん断力

(1) 水制群に作用する流体力

捨石水制に作用する流体力(捨石構造物に作用する流体力) F_p は、運動方程式(3)の右辺下線部で示す抵抗項の大きさとして評価される⁴⁾。水制の崩壊はいずれかの部位に発生する F_p の最大値により規定されると考えて、これを F_{pmax} と定義する。各水制に作用する F_{pmax} を図-10に示す。ここでは、 F_{pmax} を上流の流速 U_0 および水深 h_0 で無次元化した $\tilde{F}_{pmax}$ により示している。黒塗りの丸数字は何らかの被災が確認された水制をあらわす。捨石水制①、②、③に作用する $\tilde{F}_{pmax}$ はほぼ同程度であり、最上流端の①にだけに流体力が集中しないように水制が配置されている。捨石水制④、⑤、⑥は、上流にある三基の水制の遮断効果により、抗力が軽減されている。捨石水制⑦～⑨に作用する抗力はこれらよりも増加している。その原因としては、水制⑥と⑦の間隔がやや大きく、水脈が左岸側に曲がった後、水制へ向かう流速が水深とともに増加したことが考えられる。写真-2の被災は図-10の第①番水制で発生しており、本解析により水制の損壊実績がおおよそ再現されている。水制群の配置計画と諸元の設計に際しては、以上のような流体力の分布を考慮することが重要であり、明石川の場合には大きな流体力が作用する上流側あるいは下流側の水制の耐荷力を確保することが必要である。

大きな流体力が発生する部位を推定するために、第①番水制の流体力分布 $\tilde{F}_p$ を図-11に示す。流体力の最大値は水制の先端部ではなく、中部から根元にかけて発生しており、水制中央部の越流水衝部で崩壊しやすいことがわかる。

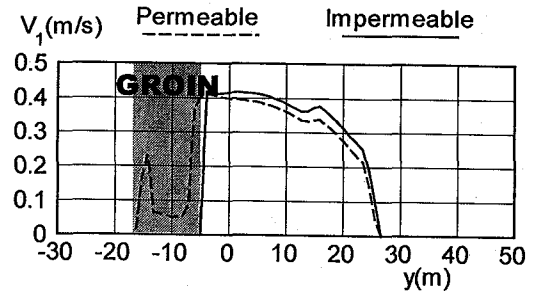
(2) 河床せん断力

水制周辺の河床安定や土砂の局所的な動態を評価するには、数値解析に基づいて算定される河床せん断力

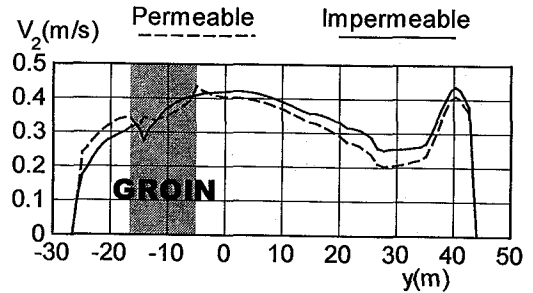
$$\tau_b = \sqrt{\tau_b^x^2 + \tau_b^y^2} \quad (5)$$

$$\tau_b^x = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \tau_b^y = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (6)$$

の分布を捨石水制と不透水水制の場合について図-12に比較する。水制を透過構造とすることによって、水制周辺の河床せん断力が相当に緩和され、構造物周辺の局所的な洗掘・堆積傾向を軽減することができる。

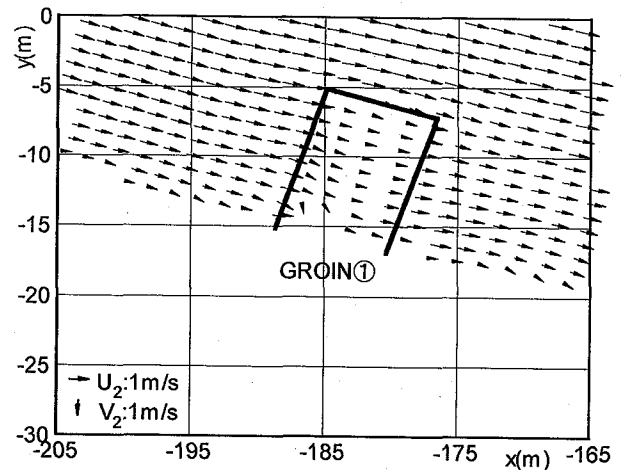


(a) 下層の流速 V_1

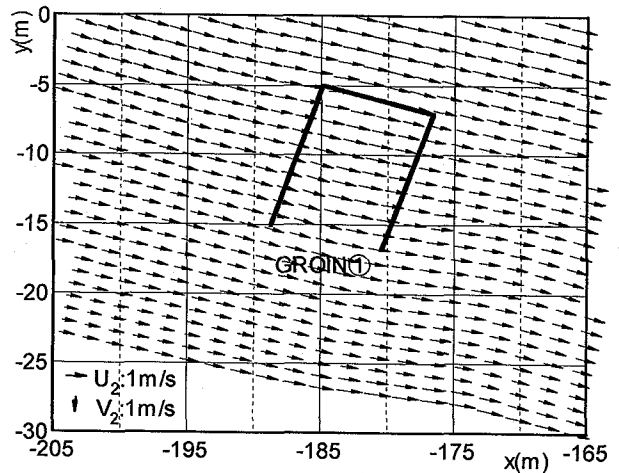


(b) 上層の流速 V_2

図-8 y方向の上下層流速(V_1, V_2) (不透水水制との比較。Vが正の場合は、右岸から流れの中央へ向かう流れに対応)



(a) 下層の流速ベクトル (U_1, V_1)



(b) 上層の流速ベクトル (U_2, V_2)

図-9 第①番水制周辺の流速分布

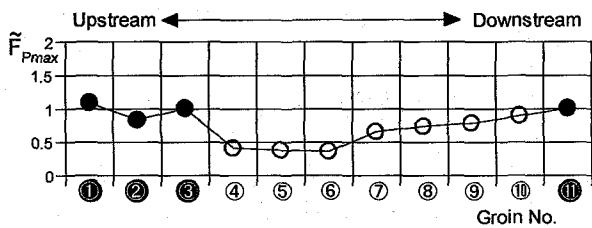


図-10 捨石水制に作用する無次元抵抗力の最大値 $\tilde{F}_{Pmax}$
(黒塗りは損壊を受けた水制)

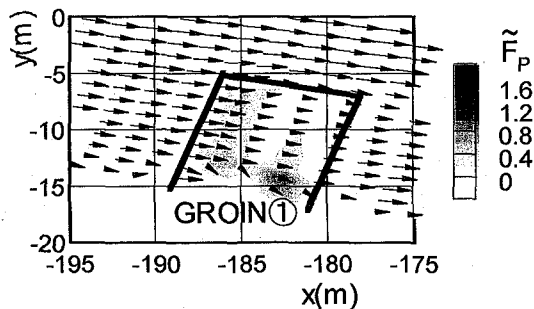


図-11 第①番水制に作用する無次元抵抗力 $\tilde{F}_P$ ベクトルの分布

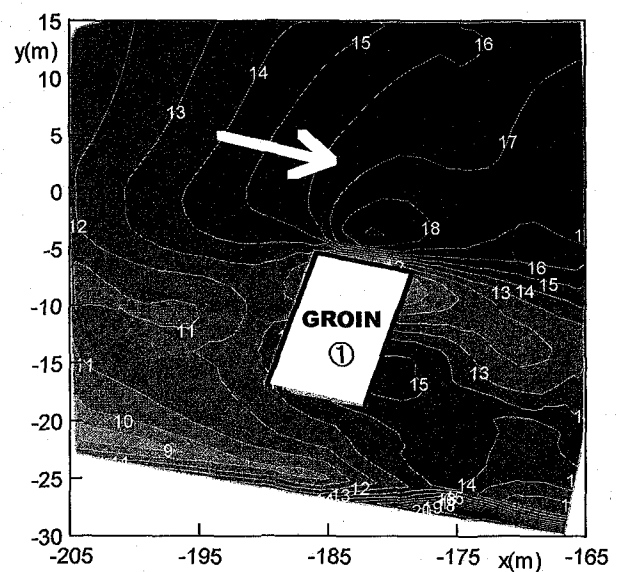
6. 結論

- 1) 明石川の捨石水制群を設置した区間において河道地形を測量し、2004年10月出水時における流れを再現するための地形情報と水制の情報を得た。
- 2) 明石川の捨石水制群を対象として、水制内部を含む周辺流況と構造物に作用する流体力を評価するための平面二次元解析モデルを構築した。
- 3) 捨石水制の透過性が流れや流体力・河床せん断力におよぼす影響を明らかにするために、同じ諸元を持つ不透水水制についても比較解析を実施した。その結果、捨石水制の場合には、局所流や構造物周辺への流体力の集中や河床せん断力が不透水水制の場合よりも緩和されることを確認した。

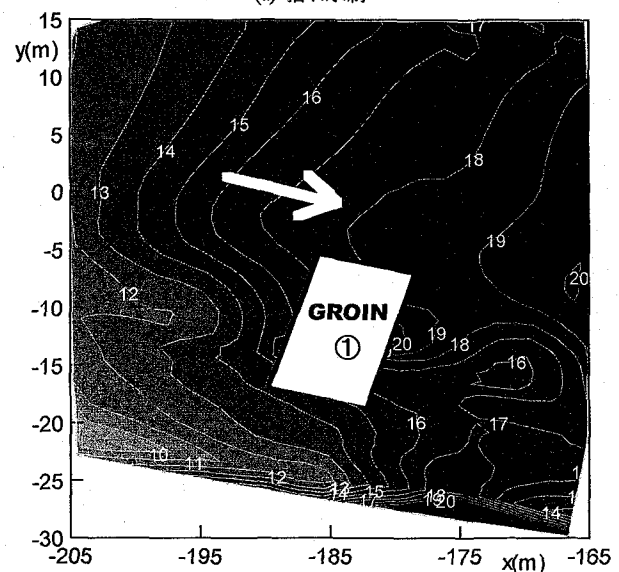
謝辞：本研究を遂行するにあたり、財団法人河川環境管理財団から研究助成を頂いた。また、現地観測に際しては神戸大学工学部および明石高専の学生諸氏に多くのご支援を頂いた。以上、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 道奥・前野・古澤・羽根田：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) 道奥・李・熊田：捨石護岸を有する開水路流の解析 神戸大学大学院自然科学研究科紀要，24-B，pp.25-30, 2006.
- 3) 道奥・石垣・前野・南条・池松：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.



(a) 捨石水制



(b) 不透水水制

図-12 第①番水制周辺の河床せん断力 τ_b (N/m^2)

- 4) 道奥・南條・石垣・前野：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.
- 5) 李・道奥・前野・牛田・藤井：捨石水制群の水理特性について，応用力学論文集，Vol.8，pp.773-782, 2005.
- 6) 李・道奥・前野・和中：捨石透過水制を配した開水路における流れと河床変動，水工学論文集，第51巻，2007.
- 7) 道奥・前野・羽根田・古澤：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.
- 8) 中橋・藤井：格子形成法とコンピュータグラフィックス，東京大学出版会，186P., 1995.4.

(2007.4.5 受付)