

1. はじめに

水制は河岸侵食を防御する治水構造物として利用されている一方、近年では河川環境に多様性を与える手段として利用されるようになり、水制間への土砂堆積を促したり、瀬と淵の造成を目的に使用したりすることも考えられる。このような多様な目的に対して水制の最適な設置法を知ることは重要である。これまで固定床での実験は数多く行われているが、移動床実験は十分に行われているとはいえない。また、これらは水制先端の洗掘のみに着目したケースが多く、背後の堆積や河道の多様性を創出する機能の評価を行ったものは少ない。本研究は、単調化した河道に瀬と淵を有する変化に富む河床形態を創出することを目的とした水制の形状および配置に関する基礎的知見を得ようとするものである。水制群を直線河道の兩岸に規則的に配置し流れを変化させ、その配置が河床変動に与える影響を実験的に検討した。また、こうした河床変動を予測する 3 次元数値シミュレーション手法について検討した。

2. 実験方法および実験条件

実験水路は水路幅  $B=59.3\text{cm}$ 、深さ  $30\text{cm}$ 、長さ  $13\text{m}$  の勾配可変型長方形断面開水路である。本実験は兩岸複数群配置、水制設置角度の影響を明らかにすることを目的とするため、全ケースの水力条件やその他の水制特有の条件を一致させた。水力条件を表 1 に、実験ケースを表 2 に示す。水深  $h$  は下流端水路中央の水深を  $9\text{cm}$  とし下流部の堰上げを固定した。水制模型は幅  $b=1.8\text{cm}$ 、矩形形状の合板を用いた。水制の設置は上流側より  $5\text{m}80\text{cm}$  を  $x=0\text{cm}$  とし、第 1 水制の根元前面を  $x=0\text{cm}$  にあわせた。水制 3 基を 1 群とし、水制間隔は水制長の 1.5 倍の  $22.5\text{cm}$  とした。水制高は  $4\text{cm}$  である。水制長  $l_g$  は図 1 のように、横断方向に水路幅の約 4 分の 1 である  $15\text{cm}$  出るように設定した。4 群配置のケースでは水制群間隔を  $75\text{cm}$  とし、右岸側  $x=0\text{cm}, 150\text{cm}$ 、左岸側  $x=75\text{cm}, 225\text{cm}$  にそれぞれ配置した。

表 1 水力条件表

q(lit/s)	h(cm)	B(cm)	l	V(cm/s)	Fr	Re
12.5	8.0	59.3	1/1000	23.4	0.265	14413

表 2 実験ケース表

ケース名	水制群数 g (cm)	水制向き	水制長 l <sub>g</sub> (cm)	流速計測
DGr4	4	直角	15	(固定床)
DGu4	4	上向き(45°)	20	(河床変動後)
DGd4	4	下向き(45°)	20	x
DGr1	1	直角	15	x
DGu1	1	上向き(45°)	20	x
DGd1	1	下向き(45°)	20	x

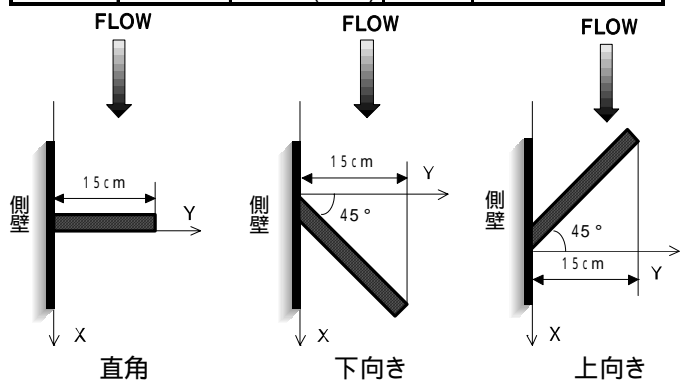


図 1 水制設置平面図

移動床実験では水流が安定する上流側より  $4\text{m}50\text{cm}$  から  $10\text{m}50\text{cm}$  の  $6\text{m}$  を移動床区間とし、平均粒径  $0.04\text{cm}$  の砂を厚さ  $11\text{cm}$  に平らに敷き詰めた。静的洗掘を対象としており、上流からの給砂は行っていない。通水 1 時間後の河床形状を計測した。

流速計測には 2 成分電磁流速計を用いた。本実験では主流側成分(u)と横断流速成分(v)を計測した。座標系は水路中央に沿う方向を x 軸、これに直交し水路を横断する方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とした。計測断面は上流 2 断面と水制先端前面、水制群間とし、DGu4 で 13 断面、DGr4 で 22 断面となった。横断方向には 11 点~15 点、鉛直方向には 3 点~5 点とした。DGu4 では河床変動後であるため、計測できない点もあった。

3. 実験結果

3 1 水制周辺の河床変動

図 2 に 1 群配置の各ケースの第 1 水制群周辺河床コンターを示す。水制の設置角度による水

制周辺の河床形状へ与える影響について 1 群配置のケースで比較する。水制先端部の洗掘はすべてのケースにおいて発生しており，第 1 水制周りが最も掘れるが，その規模は下向き，直角，上向きの順に深く，広くなる．この洗掘は水制の水はねによって水制先端へ流れが集中するためのものである．また第 1 水制横から対岸に向けて洗掘域が斜めに連続して現れる．この洗掘域の中心を結ぶ線と流下方向のなす角度を洗掘伝播角度とし，各ケースの洗掘伝播角度を表 3 に示す．水制間の洗掘・堆積の様子をみると，直角では水制間の中心部に堆積するのに対し，上向きでは水制の根元に堆積している．下向きでは逆に水制背後の側壁近くで洗掘しており，先端の少し後方に堆積する．この違いは水制を乗り越える流れが水制と鉛直をなす方向に向きを変えられることによるもので，下向き水制ではその流れが側壁付近で下降流となり洗掘を発生させている．この洗掘は河岸防御の点からみて好ましくない．

表 3 洗掘伝播角度

ケース名	DGr1	DGd1	DGu1	DGr4	DGd4	DGu4
洗掘伝播角度(°)	21.80	18.62	17.10	17.74	3.81	7.20

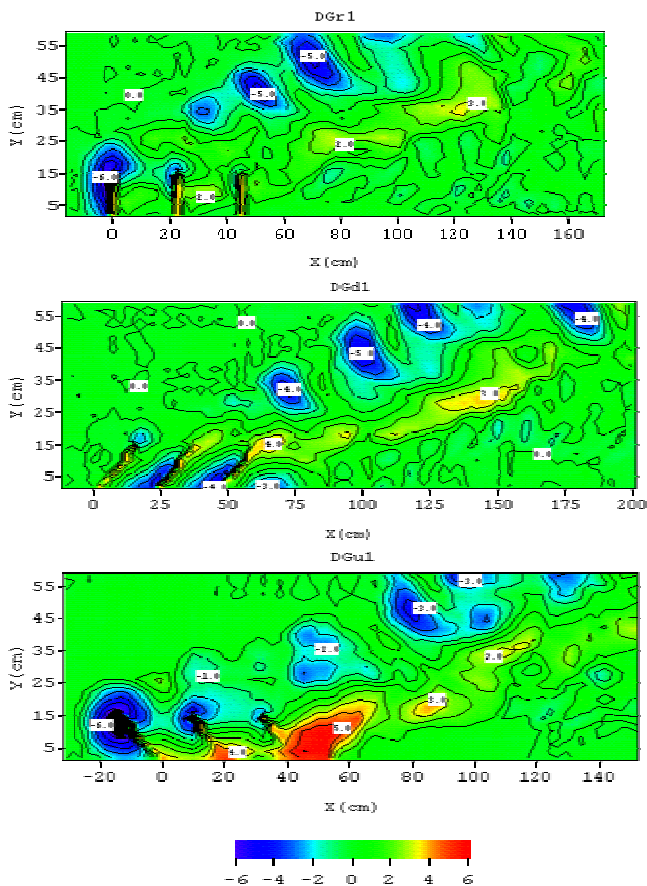


図 2 河床高コンター (1 群配置)

次に複数群配置の効果を 1 群配置のケースと比較し，検討する．図 3 に 4 群配置の各ケースの第 1 水制群周辺河床コンターを示す．洗掘・堆積位置の設置角度による特徴はそのまま出ている．すべてのケースで第 1 水制群の洗掘が小さくなっており，それに伴い後方に出来る堆積も規模が小さくなっている．これは水制を複数群設置することで，全体としての抵抗が大きくなり第 1 水制群周辺の流速が抑えられたためである．洗掘伝播角度を比較するとケース DGd4, DGu4 はケース DGr4 と比べ値が大幅に小さくなっている．このため，ケース DGd4, DGu4 では河道中央付近が連続して洗掘されているのに対し，ケース DGr4 では斜めに発生する洗掘域が第 2, 第 3 水制群前面の洗掘と合致し大きく掘れる結果となっている．この結果は 1 群配置での洗掘伝播角度と水制群設置間隔によって決まると考えられる．

### 3 2 水制周辺の流れ構造

ここでは水路中央部に蛇行した洗掘域が現れ，瀬と淵の形成がうまくいったケース DGu4 の，河床変動後の流れ構造を見ることで，さまざまな流れが河床変動に与える影響を考察する．図

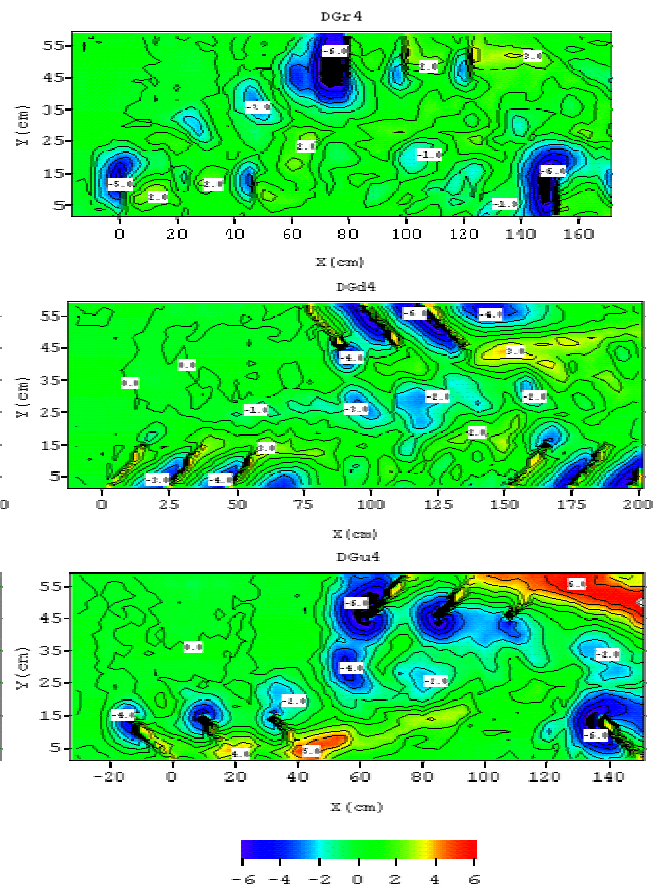


図 3 河床高コンター (4 群配置)

4にU-V流速ベクトルを示す。z=6.5cm, z=4cmでは水制群内では水制と鉛直をなす方向に流れがあり、水制背後でもその流れが維持されている。z=1.5cmになると水制群内の流れが側壁方向に向かうようになる。各水制群の、第2水制前面では流速は上層より小さくなるが、第3水制前面では逆に流速が増し、側壁へ向かう強い流れとなっている。図5に主流速Uの縦断方向分布を示す。水制の影響を受けていない上流のx=-90cmでは、河道中央が速く、両岸が遅い左右対称の流れになっている。その後、流下とともに主流域(y=22,29,36cm)は徐々に速くなっていく。x=-30cmになると水制の影響が見られ、右岸側(y=2.5,8cm)が減速されている。水制群周辺の流速は、水制域で減速され、水制群を越えると流速が回復する。各水制群の第3水制前面と背後では、側壁付近(y=2.5,56.5)の流速が、水制群中央部(y=8,51cm)よりも速くなっている。z=1.5cmでは水制による主流速の減速が大きくなる。また水制間で最も主流速が小さくなる位置がずれ、各水制群の第2、第3水制の間であったものが、第1水制背後になっている。主流域ではx=100cm以降で右岸よりと左岸よりの流速の大小が逆転している。

図6に横断方向流速Vの縦断方向分布を示す。全体にどの縦断面でも第1水制群、第3水制群付近では正の値、第2水制群付近では負

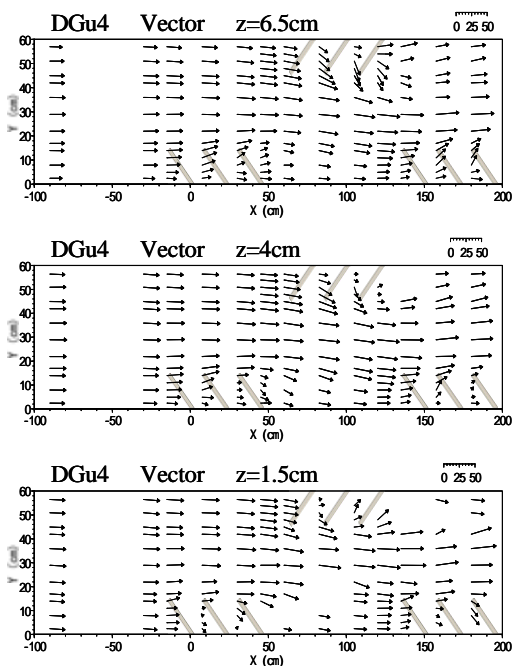


図4 UV流速ベクトル図(DGu4)

の値になっている。つまり水制群から離れる流れになっている。特に水制群のある領域では値が大きくなっている。しかし、側壁付近では流速の変動がほかの水制群内の値と比べ小さい。z=1.5cmの各水制群の第3水制前面では、z=6.5cmとは正負逆の値になっている。つまり底層では水制根元へ向かう流れになっている。

以上をまとめると次のことが言える。上向き水制群周りの流れは大きく3つに分かれる。ひとつは水制先端を回り込む流れで、大きな洗掘を引き起こすもの。ひとつは水制の上部を、水制に鉛直な方向に乗り越える流れ。もうひとつは水制高より低い水深を、水制に沿って側壁へと向かう流れで、この流れが砂を輸送し、水制根元付近で水制を乗り越える時に流速が弱まり、砂を堆積させていると考えられる。

#### 4. 3次元数値計算

##### 4.1 基礎方程式

越流型水制周辺の流れは3次元性の強い流れになる。基礎方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -g \frac{\partial H}{\partial x_i} - F_{xi} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここに、Uは平均流速、Hは水位、ρは水の密度である。また、ijはレイノルズ応力の成分である。レイノルズ応力の成分は、渦動粘性モ

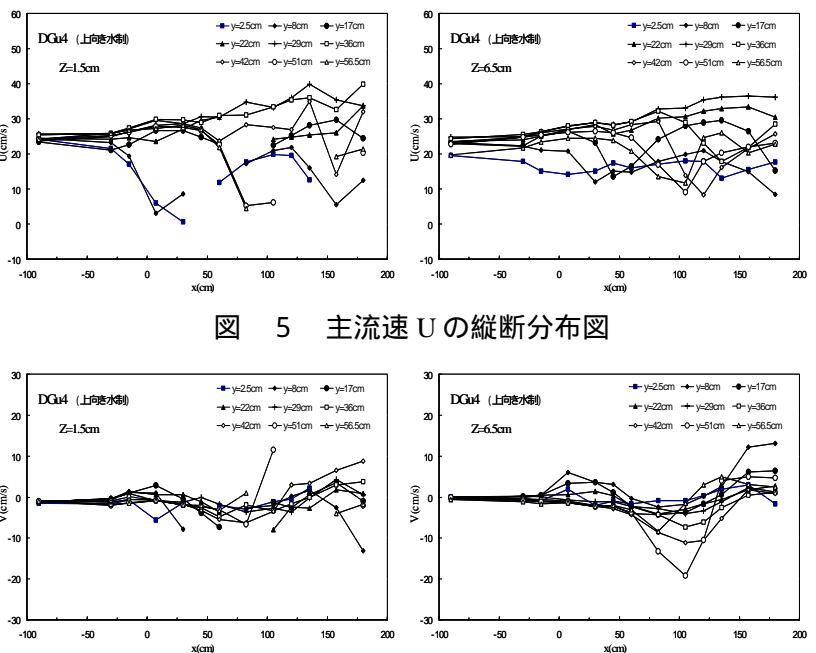


図5 主流速Uの縦断分布図

図6 横断方向流速Vの縦断分布図

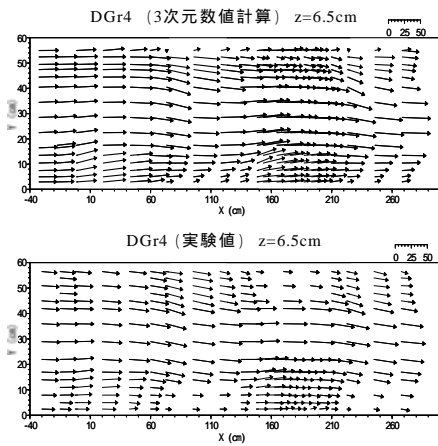


図 7 DGr4 U-V 流速ベクトル図 (z=6.5cm)

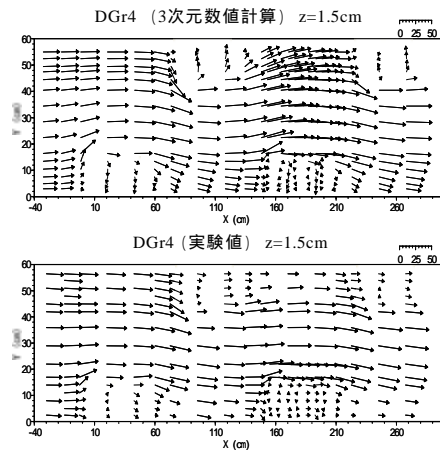


図 8 DGr4 U-V 流速ベクトル図 (z=1.5cm)

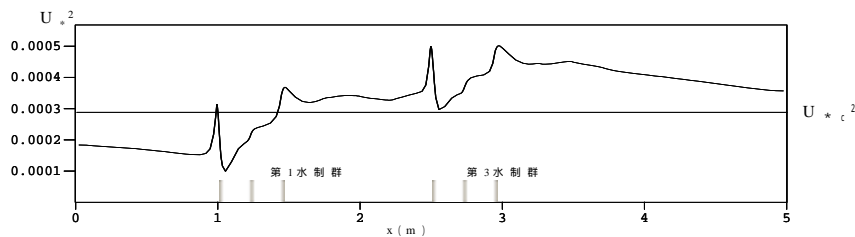


図 9 摩擦速度縦断分布 (計算値 y = 17.5cm)

デルを用いて次式で与える．

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$\nu_t$  は渦動粘性係数であり，対数則分布を仮定して次式で与える．

$$\begin{aligned} 0 \leq \frac{z}{h} \leq 0.8 & : \quad \nu_t = \kappa u_* z \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \\ 0.8 \leq \frac{z}{h} & : \quad \nu_t = 0.16 \kappa u_* h \end{aligned} \quad (6)$$

ただし， $u_*$  は摩擦速度， $h$  は水深， $\kappa$  はカルマン定数である．2次流の計算を安定させるため  $z/h > 0.8$  において  $\nu_t$  を一定としている．

壁面の境界条件は，壁面に垂直な流速は 0 で，平行な流速は壁法則によって与えた．壁面に最も近い点の，壁からの距離とその点の流速を用いて対数則から摩擦速度を算出する．入口での境界条件は，流量  $Q$  を与え， $U$  を流量が一致するように対数則分布で与え  $V=0$ ， $W=0$  とする．

#### 4 2 計算結果と実験結果の比較

図 7，8 はケース DGr4 の  $z=6.5\text{cm}$  と  $z=1.5\text{cm}$  での U-V 流速ベクトルを比較したものである．各水深での水勿ねの具合や流向，横断分布，水制群内の減速など流れの傾向がよく再現

されている．図 9 はケース DGr4 の摩擦速度の計算結果 ( $y = 17.5\text{cm}$ ) である．水制群先端で大きく変化しており，ここで洗掘されることが予想される．第 1 水制群途中から限界摩擦速度を越えているが，上流からの砂の移動もあり洗掘がすすむとは言い切れない．

#### 5. おわりに

越流型水制では，その設置角度により流れの構造が大きく変化し，河床変動へ与える影響が大きい．それぞれ特徴的な流れが，下向き配置では側壁に向かう下降流となり，水制背後の側壁付近に洗掘を生じさせる．上向き配置では水制前面の低層からの流れが砂を輸送し，水制根元に堆積を促す．このことより，護岸を考慮したうえで河床を変化させようとするときは上向き配置がよいといえる．

水制を両岸に複数群配置する場合には，片側 1 群配置時の洗掘伝播角度が河床形態に大きく影響する．

3次元数値計算では固定床における流れの傾向は再現することができた．これを河床変動計算に移行させることが今後の課題である．

指導教官 富永晃宏 教授