

1. はじめに 日本では古くから多くの河川の中に水制を建設してきた。河川の流速を弱め、流れの方向を変えることにより河岸や堤防の保護のために利用されてきた。近年は上記の目的に加え、河川景観改善や周辺の自然環境保全を目的とする「多自然川づくり」の考えが取り入れられている。水制は多様な流れを創出し、河川周辺の生態系にとって良好な環境を創造できるため注目されている。

種々の水制の中でも透過型水制は局所洗堀の抑制が見込まれ、背後の流れを減速することができるが、水制背後の浮遊砂輸送や堆積を考慮した最適な設置方法は確立されていない。本研究では透過型水制として杭出し水制を採用し、杭出し水制の透過率や設置方法が水制背後の流れ構造に及ぼす影響について、PIV 計測により検討した。

2. 実験方法 実験水路は、長さ 7.5m、全幅 0.3m の可変勾配開水路を用いた。側面はガラス張りで、レーザーによる光の反射を防ぐために、全水路底及び設置構造物を黒く塗装した。実験は図-1 に示すように水制模型を設置した。水制の上流端は水路上流端から 386.5cm の位置に設置した。水制高さは 10.7cm とし、非越流条件下で実験を行った。実験条件は表-1 に示す。また、水制模型は表-2 に示すように水制長さが水路全幅の4分の1にあたる 75mm に設定した。杭の列が 1 列、2 列、杭の本数が 4 本、6 本、8 本、1 列目と 2 列目の間隔が 10、20、30 mm と変化させた。また、水制模型を用いずに行ったケース名を none とし、2 列目の杭を 1 列目の杭と杭の中央に置く千鳥配置のケース名の最後に c を付けた。また、透過率 T は 1 列目において水制長 75mm に対して杭のない空間の面積率、投影透過率 T_p は水制を上流から見て、水制長 75mm に対して杭のない空間の面積率とした。

PIV 計測の流れの可視化には、直径 80 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3mm のシート状にしたアルゴンレーザー光を開水路水平断面に照射した。レーザーシートの照射位置は、水平断面に 5mm 間隔で 7 断面 ($z=0.5\sim 3.5\text{cm}$) 設定した。この可視化画像は高速度カメラ(ディテクト)を用いて 1/200s で撮影した。PIV 解析ソフト FlowExpert (カトウ光研)を用いて相互相関法により画像を解析し、16 秒間で 3200 データの流速ベクトルを得て統計処理を行った。

3. 実験結果 今回の実験は 1 列の杭の本数 P (4, 6, 8 本)、杭の列数 L (1, 2 列)、1 列目と 2 列目の間

表-1 PIV 実験条件

$Q(L/s)$	$h(cm)$	$B(cm)$	$U_m(cm/s)$	Fr	I
3.0	4.0	30.0	25.1	0.4	1/1000

表-2 実験ケース

case	水制長 l(mm)	列数 L(列)	杭の本数 P(本)	列の間隔 a(mm)	透過率 T(%)	投影透過率 T_p (%)			
L1P4	75	1	4	10	73	73			
L1P6			6		60	60			
L1P8			8		47	47			
L2P4-10			2		2	8	73	73	
L2P4-10c						7		53	
L2P4-20						8		73	
L2P4-20c						7		53	
L2P4-30						8		73	
L2P4-30c		7		53					
L2P6-10		2		2		12		60	60
L2P6-10c						11			27
L2P6-20						12			60
L2P6-20c						11			27
L2P6-30						12			60
L2P6-30c						11			27
L2P8-10			2		2	16	47		47
L2P8-10c						15			0
L2P8-20		16		47					
L2P8-20c		15		0					
L2P8-30		16		47					
L2P8-30c	15	0							
full	1	15		0		0			
none									

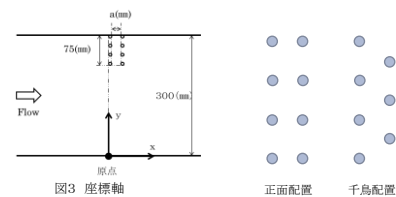


図-1 模型配置図および 2 列設置方法

隔 a(10, 20, 30mm)、2 列目の杭の配置方法(正面配置または千鳥配置)の 4 項目を変化させて行った。そのため、この 4 項目について実験結果を比較する。

(1) 1 列の杭の本数(透過率) 杭出し水制では、透過流が存在するため水制背後に流下方向流れが存在する。1 列の杭の本数が増加するにつれて、透過流量が減少し、杭列背後の流速が低下する。図-2 に水制背後($y=22.5\sim 30\text{ cm}$)における水深平均流速の縦断方向分布を示す。杭の本数の増加に伴い、杭下流の減速が大きくなることが確認できる。これは他の 3 項目によらず同様の傾向が得られた。

(2) 杭の列数 一般的に、杭の本数が増えれば抗力の増加により全体の抵抗が増加することから、2 列の方が 1 列よりも水制背後においてより一層減速されると考えられる。図-3(a)に水制背後層平均流速の鉛直方向分布($x=9, 12, 15, y=22.5\sim 29.5$)を示す。鉛直分布は杭の抵抗が大きくなるほど水面付近の減速が大きくなり、半水深付近で最大値を取る特徴的な分布を示す。全体的には 1 列(実線)と 2 列(点線)を比較して 2 列の方が流速は小さいことが分かる。これは杭の本数によらず発生するが、杭の本数が多いほどより一層減速される傾向がある。

(3) 1 列目と 2 列目の間隔 1 列目と 2 列目の間隔が広

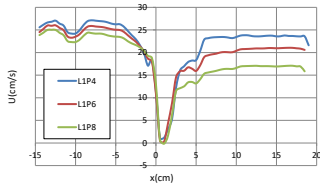
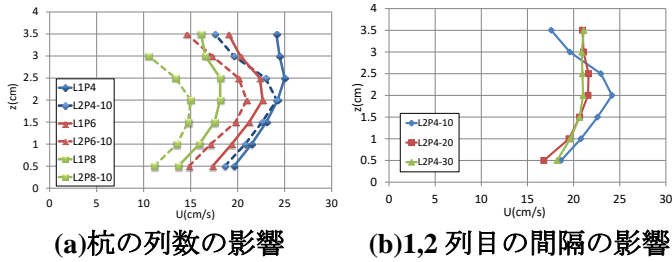
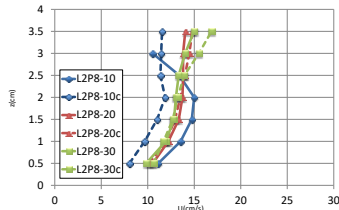


図-2 水深平均流速の縦断方向分布(杭の本数の影響)



(a)杭の列数の影響

(b)1,2列目の間隔の影響



(c) 2列目の杭の配置方法の影響

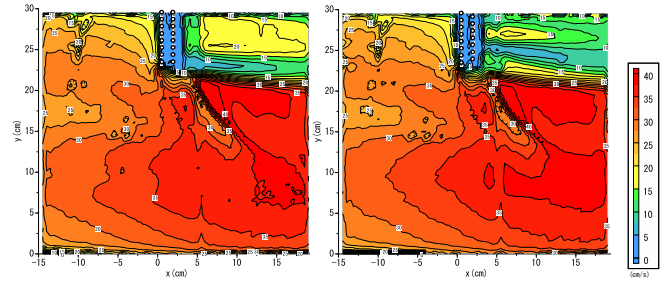
図-3 水制背後層平均流速の鉛直方向分布

なるにつれて、各杭群が独立し1列目の杭群の影響範囲に入らなくなる。杭の抵抗は接近流速の2乗に比例することから、2列目直前の流速が大きくなることで2列目の杭群の抵抗が大きくなり、減速効果が大きくなると考えられる。図-3(b)に水制背後層平均流速の鉛直方向分布を示す。a=20, 30mmではほぼ変化がなく、a=10mmでみられた半水深でピークを取る分布が変化し、水面まで一様な分布に近づく。杭群の縦断杭間隔が流れの3次元構造に影響を与えることが示唆される。

(4)2列目の杭の配置方法 正面配置と比べ千鳥配置にすることで、1列目の杭間を通過した透過流は2列目の杭に衝突する。a=10mmではこの効果により減速が大きくなるが、a=20, 30mmではこの効果が薄れ、正面配置との差は小さくなる。この様子を図-3(c)水制背後層平均流速の鉛直方向分布に示す。図-4にcase L2P8-10, L2P8-10cの平均合成流速コンターを示す。正面配置では水制先端付近下流に低速域が発生するのに対し、千鳥配置ではこの低速域が側壁側へ移動しており、水制背後の流れ構造に違いが認められる。これは2列目杭群の最も主流側の杭の抵抗を受けた流れが主流へ流れ込み、水制背後の透過流量が減少する事によると考えられる。

水制本来の目的である側岸付近の減速効果を見るために、水制上流に対する水制下流壁近傍の流速変動率 U_{bank}/U_0 として、杭列の間隔aに対して図-5に示す。 U_{bank} は水制背後(x=末端から+0.5cm-19.5cm, y=28-30cm, z=0.5-3.5cm)において体積平均した値であり、上流端y-z断面平均流速 U_0 で無次元化した。

U_{bank} は杭の本数の増大とともに減少し、千鳥配置



(a)L2P8-10

(b)L2P8-10c

図-4 平均合成流速コンター

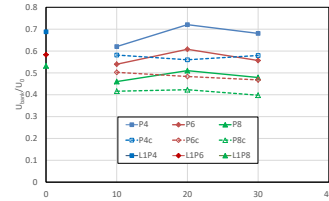
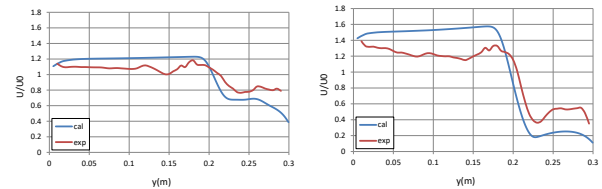


図-5 上流端に対する壁近傍付近の流速変動率



(a)L2P4-10

(b)L2P8-10

図-6 上流端に対する流速変動率(x=15cm)

により減少することは明らかである。しかし、杭の上下流間隔については正面配置でa=20mmの場合に減少効果が小さくなる傾向が見られる他は大きな違いがなかった。

3. 数値計算 杭を障害物として直接計算に取り入れた水深平均の2次元数値計算を試みた。図-7に上流端に対する流速変動率に示すように、杭の本数が増えるほど実験値との差が開いた。主流側では計算値が実験値を上回り、水制背後では計算値が実験値を下回る傾向がある。これは計算が杭の抵抗を過大評価していることによるものだと考えられる。主流では水撥ね効果により加速域が発生、水制背後では杭の抵抗により減速域が発生する。過大評価により、主流・水制背後に与える変動量が大きくなる。そのため、メッシュで杭を表現する点、低Re数乱流モデルの適用や3次元モデルを検討する必要がある。

4. おわりに 杭出し水制背後の流れ構造において、杭の本数の増加に伴い水制背後の流速は減少する。杭を2列にした場合、1列目と2列目の間隔により水制背後の流れが複雑に変化した。間隔が10mmで千鳥配置の場合、下流の流れ構造に大きな影響を与えた。3次元性が示唆される結果が得られたため、今後は3次元での実験・数値解析を行う必要がある。杭出し水制の設置方法の基準を提示できるように、詳細な水路実験と数値解析により流れ構造を解明していきたい。