

1. はじめに

透過型水制は透過度によって低透過型と高透過型がある。高透過型の水制では、局所洗堀の抑制と長距離にわたる低速域の維持が期待される。高透過型水制の代表である杭出し水制は、河床に与える影響が小さく、下流に緩やかに減速をもたらすことから、様々な応用が考えられてきた。これまでに杭水制の機能や円柱群の抵抗特性については明らかにされてきているが、局所的な杭水制背後の浮遊砂輸送や土砂堆積を考慮した最適な設置方法を考える上では、水制下流の流れ構造についてさらに詳細な検討が必要といえる。そこで本研究では、円柱を杭群として用い、杭群の具体的な配置方法が背後の減速効果に与える影響とその抵抗特性を明らかにするために、PIV 実験と数値計算を行い、諸条件変化が杭群背後の流れ構造に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

実験水路は、長さ 7.5m、全幅  $B=0.3\text{m}$  の可変勾配開水路を用いた。3D プリンターで作製した水制模型を図-1 に示すように水路上流端から 3.865m の位置に設置した。水制高さは 5.0cm とし、非越流条件下で実験を行った。水理条件を表-1 に示す。また、杭水制の設置条件を表-2 に示す。杭の設置長さ  $L$  はすべてのケースで水路幅の 1/4 となる 7.5cm に固定した。図-2 のように、透過率( $T = (L - Nd)/L$ )は 0.47, 0.60, 0.73, 0.80 の 4 種類とし、1 列の杭の本数  $N$  と杭の直径  $d$  を変化させて 1 つの透過率につき 4 種類の配置形態を作成した。1 列の場合の配置方法として側岸に最も近い杭は側岸に接しているものと、同じ透過率で側岸に接しないように杭を配置したケースを作成した。2 列の場合の配置方法として杭を同じ横断位置に設置する直列配置と、2 列目の杭を 1 列目の杭と杭の中央に設置する千鳥配置の 2 種類を行った。これらの条件を満たすケース名については、側岸に接していないものは末尾に-UB, 2 列直列配置は M2 のみ, 2 列千鳥配置は先頭に M2, 末尾に-S を付した。また、水制模型を用いずに行ったケース名を none とし、不透過型水制を用いて行ったケース名を full とした。また、投影透過率  $T_t$  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。撮影範囲は  $x=-10\sim 317.5\text{cm}$ ,  $y=0\sim 30\text{cm}$  とし、流下方向に 10 回に分けて撮影した。

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

表-1 水理条件

Discharge $Q$ (L/s)	Water depth $h$ (cm)	Channel width $B$ (cm)	Mean velocity $U_m$ (cm/s)	Dike length $L$ (cm)	Froude No $Fr$	Bed Slope $I$
1.62	4.0	30.0	13.5	7.5	0.22	0.001

表-2 杭水制設置条件

case	杭列数 $M$	杭直径 $d$ (mm)	杭本数 $N$	杭間隔 $s=(L-Nd)/N$ (mm)		透過率 $T=(L-Nd)/L$	case	杭列数 $M$	杭間隔 $s$ (mm)	総杭本数 $N_t$		投影透過率 $T_t=(L-N_t)d/L$	
				M1	M1-UB					M2	M2-S	M2	M2-S
P4D10	1	10	4	11.67	8.75	0.47	P4D10	1	10	8	7	0.47	0.07
P8D5	1	8	5	8.75	7	0.47	P8D5	1	8	10	9	0.47	0.04
P12D3.33	1	3.33	12	3.19	2.92	0.60	P12D3.33	1	5	16	15	0.60	0.00
P3D10	1	10	3	22.5	15	0.60	P3D10	1	3.33	24	23	0.60	0.00
P4D7.5	1	7.5	4	15	11.25	0.73	P4D7.5	1	10	6	5	0.73	0.33
P6D5	1	5	6	9	7.50	0.73	P6D5	1	7.5	8	7	0.73	0.30
P10D3	1	3	10	5	4.50	0.80	P10D3	1	5	12	11	0.80	0.27
P16D3	1	3	16	3.33	3.33	0.80	P16D3	1	3	20	19	0.80	0.34
P2D3.33	1	3.33	2	11.00	9.17	0.73	P2D3.33	1	5	8	7	0.73	0.53
P8D2.5	1	2.5	8	7.86	6.88	0.73	P8D2.5	1	2.5	12	11	0.73	0.50
P10D2	1	2	10	6.11	5.50	0.80	P10D2	1	2	20	19	0.80	0.49
P3D5	1	5	3	30	20	0.80	P3D5	1	5	6	5	0.80	0.67
P4D3.75	1	3.75	4	20	15	0.80	P4D3.75	1	3.75	8	7	0.80	0.65
P5D3	1	5	5	15	12	0.80	P5D3	1	5	10	9	0.80	0.64
P4D2.5	1	2.5	6	12	10	0.80	P4D2.5	1	2.5	12	11	0.80	0.63

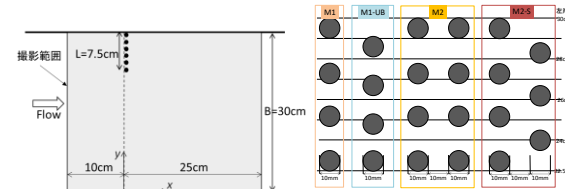


図-1 模型配置図および配置形態

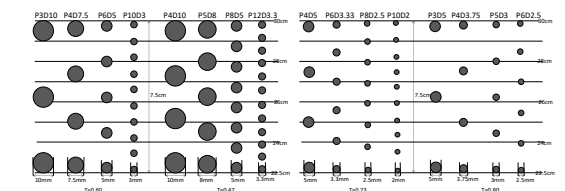


図-2 杭水制配置図

断面に照射した。レーザーシートの照射位置は、5mm 間隔で 7 断面( $z=5\sim 35\text{mm}$ )設定した。高速度カメラ HAS-U1(ディテクト社製)を用いて可視化画像を 1/200(f/s)で撮影し 1024×1024pixel(1pixel=0.0391mm)の avi ファイルとして記録された。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

(1) 透過率による違い

杭群背後の減速量に着目するために図-3 に杭列幅平均流速  $U_{spz}$  の  $x=10\text{cm}$  における鉛直分布を示す。

$$U_{spz}(x, z) = \frac{1}{L} \int_{B-L}^B U(x, y, z) dy \quad (1)$$

列数に関係なく、透過率の減少に伴い杭群下流の流速は減少した。透過率の高い  $T=0.80, 0.73$  のケースでは、 $z/h=0.1\sim 0.4$  で流速が大きくなり、 $z/h=0.4\sim 0.75$  ではほぼ一定となる。一方で、透過率の低い  $T=0.60, 0.47$  のケースでは、鉛直勾配が減少し、分布は一様化している。これは透過率が小さくなるほど底面のせん断よりも杭による抵抗が大きくなるためだと考えら

れる．杭水制範囲を平均しているため，直径の違いによる減速量の差は見られなかった．

次に，減速効果の影響範囲に着目した．杭群下流の平均的な減速効果を見るために，杭水制範囲内 ( $y/L=3\sim 4$ ) での横断面平均流速  $U_{sp}$  を次式で求めた．

$$U_{sp}(x) = \frac{1}{Lh} \int_{B-L}^B \int_0^h U dz dy \quad (2)$$

これを平均流速で無次元化した水制領域流速  $U_{sp}/U_m$  の流下方向分布 ( $x/L=0\sim 45$ ) を **図-4** に示す．先述と同様に，杭群直後は透過率が小さいほど減速されているが，下流に進むにつれて流速は回復し， $x/L=45$  付近では透過率による流速差は小さくなっている．透過率が小さいほど流下方向の流速勾配は急になり，回復速度が速くなっている．これは2列目の杭の配置形態によらず同様の傾向が得られたが，杭群直後でより減速される千鳥型の方が流速勾配は急勾配になっている．この結果は，実河川において必要な減速量に合わせて2基目以降の設置位置を検討する際に活用できる．

杭水制の減速効果の指標として，水制背後において杭の後流の影響がなく最も減速される位置 ( $x/L=2$ ) における  $U_{sp}$  の平均値を算出し，これを  $U_{spm}$  と定義し，減速率  $U_R$  を次式で定義する．

$$U_R = \frac{(U_m - U_{spm})}{U_m} \quad (3)$$

この杭群背後の減速は円柱の抗力によってもたらされる．円柱による抵抗  $D$  は抗力係数  $C_D$  を用いて次のように表される．

$$D = C_D A \frac{\rho U^2}{2} \quad (4)$$

ここに， $\rho$  は水の密度， $A$  は投影面積， $U$  は円柱への接近流速である．本実験の杭群における全抗力  $D_a$  は投影面積を考慮すると次式となる．

$$D_{a1} = C_D N d h \frac{\rho U^2}{2} = C_D L (1 - T) \frac{\rho U^2}{2} \quad (5)$$

上式より，透過率が小さくなるほど全抗力は増大することで背後は減速され，透過率が同じであれば杭の直径と本数に関係なく全抗力が決まることになる．そこで減速率と透過率  $T$  の関係を列数ごとに **図-5** に示すと，透過率  $T$  の増加に伴い減速率  $U_R$  はおよそ線形に減少している．(a) の1列配置は直径および配置形態による差は小さいが，(b) の2列配置は千鳥配置が直列配置より約 0.1 大きくなっている．式(5)では直列配置のように1列目の背後に位置する2列目の杭を考慮できないため，1列配置に限って適用できる．そこで，2列目の杭の抗力を考慮した形で直列型および千鳥型の全抗力を以下のように定義する．

$$D_{a2} = C_D N d h \frac{\rho U^2}{2} + C_D N d h \frac{\rho (\beta U)^2}{2} \quad (6)$$

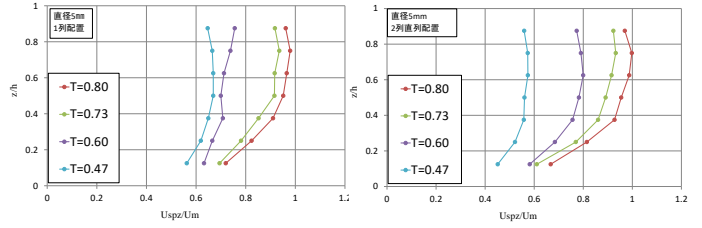


図-3 杭群下流領域の主流速鉛直分布 (a) 1列 (b) 2列直列

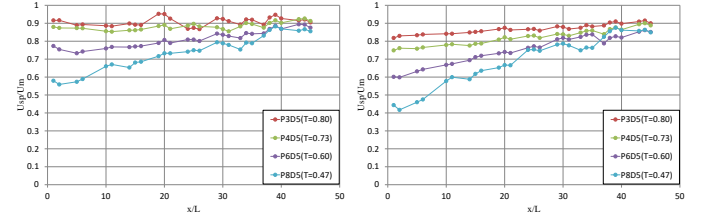


図-4 杭群範囲平均した主流速縦断分布

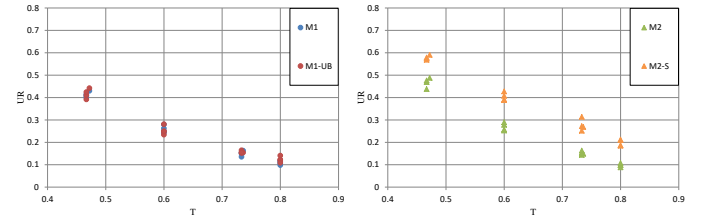


図-5 透過率と減速率 (a) 1列配置 (b) 2列配置

$$D_{a2-s} = C_D N d h \frac{\rho U^2}{2} + C_D (N - 1) d h \frac{\rho (\beta U)^2}{2} \quad (7)$$

$\beta$ : 2列目の杭への接近流速の変動係数である．今回のPIV計測では1列目と2列目の杭列間の流速は計測できておらず，変動係数  $\beta$  の値を求めることはできない．しかしながら，**図-6 (a) (b)** より2列直列型の減速率は1列配置の値との差が小さくなっており，式(6)の第2項が小さくなっていると推測される．これは2列目の杭が1列目の杭の後流範囲に存在することで接近流速が小さくなることによると推測される．また，変動係数  $\beta$  は1列目と2列目の杭列の間隔に依存すると考えられ，今回設定した杭1本分の間隔では  $\beta$  が小さくなっていることも推測される．一方，千鳥配置の減速率は1列配置より大きくなっている．これは2列目の杭が1列目の杭の中央に位置することで接近流速が小さくならず第2項が機能したことで全抗力を増大させたためだと考えられる．

また既往研究より，式中の抗力係数  $C_D$  はレイノルズ数により変化することがわかっている．レイノルズ数は以下の式により算出される．

$$Re = \frac{U_{up} * d}{\nu} \quad (8)$$

ここで  $U_{up}$  は接近流速， $d$  は杭直径， $\nu$  は水の動粘性係数である．接近流速を  $x/L=-0.33$ ， $y/L=3\sim 4$  の範囲で横断面平均した流速としてレイノルズ数を算出したところ，本実験では最小値およそ 200，最大値およそ 1100 となった．既往研究の杭の抗力係数とレイノルズ数の関係から，杭の抗力係数は  $C_D \approx 1\sim 1.3$  とわかった．この値が全抗力に与える影

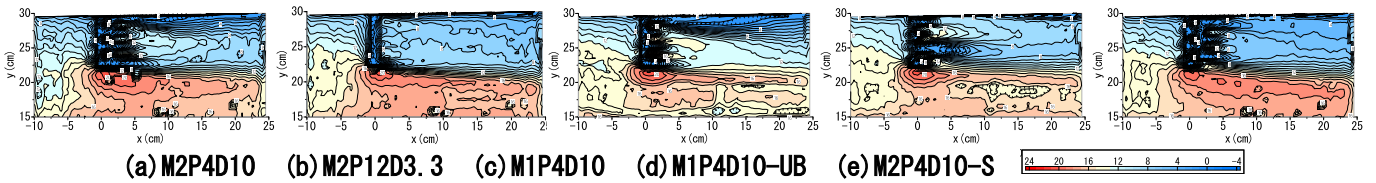


図-6 主流速Uコンター(z/h=0.5)

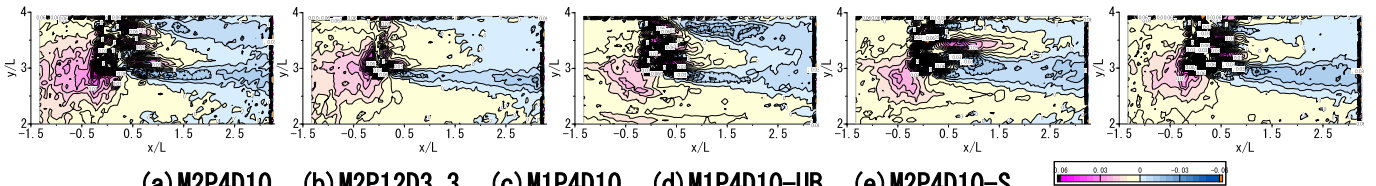


図-7 無次元レイノルズ応力 $-uv/U_m^2$ コンター(z/h=0.5)

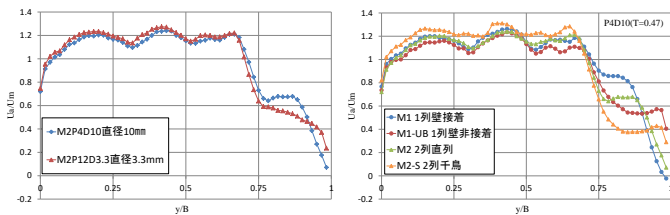


図-8 水深平均流速の横断分布

響は大きくはないと推測され、杭群背後平均の減速率は透過率によって定めることができる。

### (2) 直径による違い

次に、直径や配置形態による違いを見るために、 $z/h=0.5$ における主流速  $U$  コンターを図-6に、無次元レイノルズ応力 $-uv/U_m^2$ コンターを図-7に、水深平均流速の横断分布を図-8に示す。杭群は $y=22.5\sim 30\text{cm}(y/L=3\sim 4)$ に設置している。直径が大きく本数が少なく杭間隔が大きいケースでは杭間の通過流速が大きく杭の後方で減速されるため大きく変動している(図-6(a))。杭間の通過流速は主流域に近いほど大きく、杭間隔が小さくなるほど減少し、一様化に向かう(図-6(b))。杭列より下流では、杭列先端位置に沿って流下方向にほぼ直線的にせん断層が形成されており、非常にゆっくり拡散している。一方、側壁に接した杭によってせん断層の発達が見られる。このせん断層の幅は直径が大きいほど大きく、こちらは比較的速く流下方向の拡散が進行している。図-7(a)(b)において水制下流では、杭列と主流域境界に沿うせん断層と側壁に接する杭下流から発達したせん断層に沿って比較的大きな負の値を示している。この杭群下流・主流域境界および側壁から発達する無次元レイノルズ応力は杭の直径が大きいほど大きくなっていることがわかる。次に、図-8(a)より、杭列先端の主流域のピーク位置( $y/B=0.7$ )付近から杭列内にかけて急勾配で減少し、いったん杭列中央にかけて流速勾配が減少した後、側壁に向かって急勾配となる。これは図-6の主流速コンターで見られた2つのせん断層に対応するものである。直径の大きいケースほど側壁に沿ったせん断層の幅が広いため、直径が小さいケースと比較して側壁に向かう急勾配

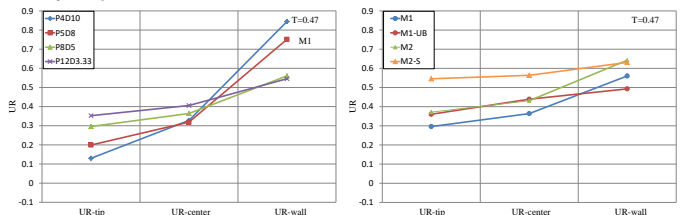


図-9 局所的減速率(a)直径(b)配置形態

がより主流側で始まるのがわかる。以上の特徴は、列数に依存せず確認された。

### (3) 壁の接着による違い(1列配置)

側壁に杭が接している場合(図-6(c))、前述のように離域が形成されたが、側壁に接していない場合は側壁と杭の間を通過する流れが存在するため、離域およびせん断層は現れなかった(図-6(d))。杭によるせん断層は確認されないが、 $x/L=2$ 付近から側壁からせん断層が発達していることが確認される。これは側壁のせん断によると考えられる。図-7(d)から、側壁に沿った負の値の領域が縮小かつ値も小さくなっているが、負の値の領域は存在するため、側壁によるせん断層が新たに発生したと考えられる。図-8(b)から、側壁への接着によらず、杭群先端付近( $y/B=0.75$ )で流速は落ち込む。その後、側壁に接着している場合、側壁付近は杭によるせん断層により水制中央付近から急勾配になり減速している。一方、側壁に接着していない場合、側壁によるせん断層の幅は狭く、水制背後では流速勾配が緩やかな領域が続き、側壁近傍でわずかに流速が落ちた。

### (4) 直列・千鳥配置による違い(2列配置)

直列配置の場合、1列壁接着と同様に側壁に沿った杭によりはく離域が形成された(図-6(a))。一方、千鳥配置の場合、2列目の杭が1列目の杭の中央に存在するため、1列目の杭間を通過した流れが2列目の杭にも衝突し、杭間の通過流速と側壁付近の流速差が小さくなる。そのため、側壁に沿ったせん断層は縮小する(図-6(e))。図-7(e)からも、千鳥配置では直列配置で見られた側壁から発達する負の値の領域はなくなり、2列目の側壁から2番目の杭間から流下方向と平行に負の値の領域が存在している。図

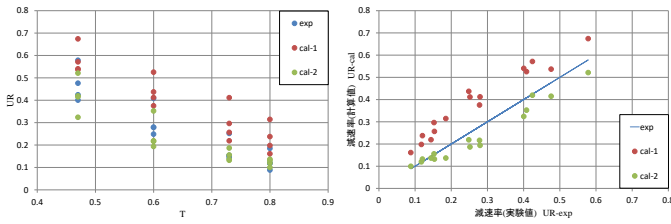


図-10 (a)減速率(透過率) (b)実験値からのばらつき

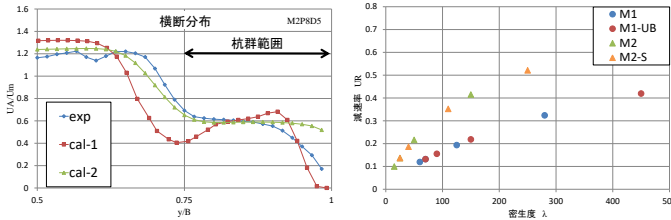


図-11 横断分布の比較 図-12 密度(減速率)

-8(b)からも、(3)の壁非接着のケースと類似し、水制背後では流速勾配が緩やかな領域が存在し、その後側壁近傍で減少している。

#### (5) 直径および配置形態の違いによる局所的減速率

次に局所的な減速率を見るために、減速率 $U_R$ (水制幅 7.5cm 平均)を横断方向に3分割(2.5cm 間隔)し、側壁側から局所的減速率 $U_{R-wall}$ 、 $U_{R-center}$ 、 $U_{R-tip}$ として算出した。透過率 $T=0.47$ における直径(a)配置形態(b)の違いを図-9に示す。図-9(a)より、直径によらず主流側から側壁に向かって減速率は大きくなるが、直径が大きいほど $U_{R-wall}$ と $U_{R-tip}$ の差が大きくなった。図-9(b)において1列で壁への接着を比較すると、壁へ非接着の方が $U_{R-center}$ 、 $U_{R-tip}$ の値は大きい $U_{R-wall}$ のみ小さくなった。壁に接している杭の影響を受けていると考えられる。2列目の杭の配置方法を比較すると、 $U_{R-wall}$ の値は同値であるが $U_{R-center}$ 、 $U_{R-tip}$ の値は千鳥配置の方が大きくなった。2列目の杭に衝突するため千鳥配置の方が減速していると考えられる。この傾向は透過率が小さいほど顕著であった。このように直径や配置形態の影響により杭群背後の局所的減速率は異なるため、設置目的に合わせて適切な直径および配置形態を採用する必要がある。

#### 4. 数値計算

杭群の影響を取り入れた流れの数値計算を行う場合、杭を1本ずつ格子点上に設定する手法(cal-1)と杭群範囲内に空間平均の抵抗として密度 $\lambda$ と抵抗係数を設定する手法(cal-2)がある。前者は詳細な流れ構造の再現の期待、後者は実用的かつ扱いが簡単であることが利点である。そこで本研究では両者を導入し実験結果との比較により再現性の検討を行う。実験と同じ水理条件下で cal-1 は水深平均の低 Reynolds 数型 $k-\epsilon$ モデルの Launder-Sharma モデルを採用し、水制付近は x 軸、y 軸方向ともに 0.2mm 刻みのメッシュを用いた。なお、円形に近づくよ

うに複数の長方形を配置し円柱杭を正方形メッシュで表現した。一方、cal-2 は水深平均の標準型 $k-\epsilon$ モデルを採用し、水制付近は x 軸、y 軸方向ともに 5mm 刻みのメッシュを用いた。前述のように、杭群の全抗力は式(5)で表されるが、密度 $\lambda$ を用いて次式のように表される

$$D_a = C_D \lambda \frac{\rho U^2}{2} = C_D \frac{N d \rho U^2}{a b L} \quad (9)$$

ここで、 $\lambda$ : 密度、 $\alpha$ : 流下方向への支配領域係数、 $b$ : 水制幅、 $C_D \approx 1$ である。今回の PIV 実験では直径による減速効果の違いは透過率と比べて小さいものだったため、直径 5mm のケースのみを検討することにする。水制長 75mm、水制幅 5mm (1列)、15mm (2列)の長方形の杭水制範囲内に、密度 $\lambda$ を 10~500 まで設定した。計算結果を主流速横断分布で表し、杭群先端背後の減速量が実験値と最も近似する密度 $\lambda$ を採用し、支配領域係数 $\alpha$ をケース毎に算出した。

まず(1)と同様の方法で減速率を算出し、実験値との比較を図-10で行う。透過率の増加に伴い減速率は線形に減少する傾向は得られたが(a)、直線で示された実験値と比較して、cal-1は上側、cal-2は下側に分布し両者とも実験値と一致しなかった(b)。図-11に $x/L=2$ における横断分布を示す。実験値と比較して、cal-1は杭群先端背後( $y/B=0.75$ )付近の流速の落ち込みが強く、側壁付近でも再度大きく落ち込んでおり、この2点により減速率が実験値よりも大きくなった原因だと推測される。この2点は杭の抵抗が実験と異なるため発生したと考えられる。一方、cal-2は杭群先端背後の流速の落ち込みは類似しているが、側壁付近の落ち込みがないため減速率は小さくなったと考えられる。cal-2は杭群に密度を与えることで杭群を表現しており、個々の杭の影響を再現できていないため発生したと考えられる。次に、密度に対して減速率を図-12に示すと、密度の増加に伴い減速率は列数に依存しながら緩やかに増加した。よって cal-2 では透過率に加え、密度も減速率を定める重要なパラメータであることがわかった。

#### 5. おわりに

杭群背後の平均的な減速率は杭の直径によらず透過率によって定まり、杭の直径や配置形態は側壁近傍の局所的な流れ構造および減速率に影響を与えた。そのため、実河川に適用する場合は必要な減速量に合わせて透過率を設定し、設置目的に応じて直径や配置形態を決定すればよいことがわかった。数値計算では減速率および詳細な流れ構造の再現はできなかったため、杭の設定方法や密度の採用方法の改善が必要である。今後は土砂堆積を含めた流れ構造の解明や杭群内部の流速計測により2列配置の全抗力の算出等が課題とされる。