開水路における角柱粗度群背後の 流れ構造に及ぼす配置法の影響

富永 晃宏¹・市川 亜也佳²

¹フェロー会員 名古屋工業大学教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
E-mail:tominaga.akihiro@nitech.ac.jp

² 名古屋市緑政土木局 (〒460-8508名古屋市中区三の丸1-1)

開水路に角柱粗度を複数配置する場合に下流の流れ構造に与える影響について基礎的実験を行い検討した。角柱粗度を2個並列に設置する場合に横断間隔を変化させて相互作用を見るとともに、後列の粗度1個をその中間に前列との縦断距離を変化させて配置し、粗度が非越流と越流になる2通りの流量について流速分布をPIV計測により検討した。粗度高さを越流する流れの場合、並列粗度の横断間隔や後列粗度の距離の後流域に及ぼす影響は小さかった。3粗度を設置した場合、前列の粗度の横断間隔が小さいとき、後列粗度との距離が粗度群下流の流れ構造と乱れ構造に大きく影響した。後列粗度との距離が長い方が低速域が長く維持され乱れも抑制された。このような乱れ特性の違いは、粗度群下流に形成される大規模渦の違いによることが示された。

Key Words : flow structure, square column roughness, PIV, wake flow, turbulence, Karman vortex

1. 序論

多自然川づくりの方法のひとつに、河道に巨石を設置することで流れに多様性を持たせ、水生生物の生息環境を確保しようという試みがある。また、魚類の移動障害を防ぐために、連続斜面の落差工に粗石を配置することがある。このような巨石群は、実際の河道では急勾配の区間に設けられることが多いが、魚類生息環境の改善を目的とする場合は、中流部が対象となる場合がある。幅が狭く護岸に囲まれた都市河川においても、河道の多様性に対する要求は高く、名古屋市を流れる山崎川においては、多自然川づくりの一方法として巨石が複数個投入された区間がある。このような流れにおいては、障害物による後流の状況や相互の配置関係の流れに与える影響が重要な検討事項となる。

この例としては、橋脚や杭群、樹木群などの周辺の流れや、水深に比して粗度高さが大きい大規模な粗度の周りの流れがある。橋脚については、今本・大年は並列した2橋脚の後流の干渉を取り扱っている¹⁾。樹木群については群として扱うことが多く、個々の樹木の干渉まではあまり扱われていない。開水路流れでは、粗度群としての抵抗を扱った研究は見られるが^{2), 3)}、複数粗度の干

渉を主眼とした研究はあまりない。大粗度周りの流れ構造を検討した研究として、岡部⁴⁾や高橋⁵⁾は粗面上の球や巨礫の流れ抵抗に及ぼす影響を検討している。田中⁶⁾は開水路の大規模粗度周辺の渦構造について研究している。岡西⁷⁾は景観の視点から、半球粗度が形成する水面変動パターンに着目した研究を行っている。榊⁸⁾は開水路に置かれた球、円柱及び立方体粗度の周りの流れ構造と乱れ特性について、PIV計測により検討している。また、大粗度とその周辺の河床変動を取り扱った研究として、Shamloo⁹⁾や富永¹⁰⁾は、移動床上に置かれた、水深に比して直径が相対的に大きな半球の周りの流れと河床変動について検討している。一方、境界層流れにおいては、角柱周りの流れや後流の干渉に関する研究が数多く行われている。高野¹¹⁾は角柱を複数配置した流れにおいて、圧力分布を計測し流れ構造を検討している¹¹⁾。岡本¹²⁾は有限長角柱の渦流出と乱流後流について検討しており¹²⁾、羽二生・坂本¹³⁾及び坂本¹⁴⁾は、2つの角柱が並列に置かれた場合と食い違いで置かれた場合について、後流の渦運動の変化を検討している。Takemura & Tanaka¹⁵⁾は、非越流の円柱7本を1群とする粗度の背後の流れ構造と抗力を調べた。円柱の間隔が直径の半分となる条件では、粗度群が一体となって大規模な

カルマン渦列が形成されることを示した。

開水路流れにおいて大粗度を扱う場合、水深の変化が大きい場合や河床変動を伴う場合があり、これらが支配的な要素となる場合があるが、ここではこれらの要素が無視できる条件において、粗度要素の後流の相互作用という点に着目して基礎的な研究を行ったものである。開水路に立方体粗度を複数配置する場合に、周辺の流れ構造に与える影響について、粗度間の横断方向配置間隔及び流下方向配置間隔が背後の流れと乱れ構造に与える影響について、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の勾配可変開水路を用いた。水深は非越流時が2.5cm、越流時が6.0cmとなるよう流量を変化させるとともに、下流の堰で調節した。実験条件を表-1に示す。障害物となる模型は一边の長さ $k=3.0\text{cm}$ の亚克力製立方体を用い、流下方向配置間隔 dx が3.0cm、6.0cm、横断方向配置間隔 dy が2.0、3.0、4.0、5.0、6.0cmとなるよう図-1のように設置した。粗度の上流端は水路入口から4mの位置にあたる。巨石が設置された山崎川では、川幅約8mに対し巨石は大きいもので直径が1m程度であることから³⁾、側壁影響も含めて検討することになる。なお、上流側に設置した2つの粗度を前列粗度、下流側に設置した粗度を後列粗度と呼び、前列粗度2つのみのケース及び粗度1個のみのケースも行った。流下方向 x の原点は粗度上流端とし、横断方向 y は水路中央を原点としている。

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400mWのグリーンレーザー光を開水路水平断面及び鉛直縦断面に照射した。レーザーシートの照射位置は、水平断面は0.5cm間隔で、非越流時には4断面 ($z=0.5\sim 2.5\text{cm}$)、越流時には11断面 ($z=0.5\sim 5.5\text{cm}$) 設定した。鉛直縦断面は模型の配置の対称性より $y=0\sim 15.0\text{cm}$ を計測区間としている。この可視化画像は高速度カメラを用いて1/200秒間隔、1断面につき16秒間3200枚の撮影を行った。PIV解析にはFlowExpert (カトウ光研) を用い、相互相関法により画像解析を行った。なお、本研究では、 x 、 y 方向の時間平均流速を U 、 V 、変動成分を u 、 v 、瞬間流速を $\tilde{u}$ 、 $\tilde{v}$ としている。

粗度背後の流れ構造は、水深が粗度高さを越えるか否かで大きく異なる。非越流の場合は、流れはある程度2次元的にみることができ、 $z=1.5\text{cm}$ ($z/k=0.5$) の平面の流れ構造を中心に検討する。越流の場合は流れは3次元性となり、河床からの高さによって流れ構造が大きく変化するが、非越流との比較のために同じ高さにおける流れ構造の比較を行うこととする。

表-1 実験条件

case	横断方向間隔 dy[cm]	流下方向間隔 dx[cm]	水深 h[cm]	流量 Q[l/s]	断面平均流速 U _m [cm/s]	フルード数 Fr	レイノルズ数 Re(=U _m h/ν)					
TE23	2.0	3.0	2.5	0.48	6.41	0.129	1480					
TE33	3.0											
TE43	4.0											
TE53	5.0											
TE63	6.0											
TE26	2.0	6.0						6.0	2.56	14.20	0.185	7890
TE36	3.0											
TE46	4.0											
TE56	5.0											
TE66	6.0											
TS23	2.0	3.0	6.0	2.56	14.20	0.185	7890					
TS33	3.0											
TS43	4.0											
TS53	5.0											
TS63	6.0											
TS26	2.0	6.0						6.0	2.56	14.20	0.185	7890
TS36	3.0											
TS46	4.0											
TS56	5.0											
TS66	6.0											
DE2	2.0	3.0	2.5	0.48	6.41	0.129	1480					
DE3	3.0											
DE4	4.0											
DE5	5.0											
DE6	6.0											
DS2	2.0		6.0	2.56	14.20	0.185	7890					
DS3	3.0											
DS4	4.0											
SE1	5.0											
				2.5	0.48	6.41	0.129	1480

図-1 粗度の配置

3. 時間平均の流れ構造

(1) 2粗度並列の場合

2つの粗度を並列に配置した場合の代表的な流れ構造として、 $z/k=0.5$ における $dy=2\text{cm}$ と 4cm の2ケースについて、平均主流速のコンターを図-2に示す。値は断面平均流速で無次元化している。粗度下流は後流の逆流域が、それぞれの粗度について粗度幅 k の2倍程度下流まで現れる。粗度間は加速されて高速となり、下流へ行くにつれて減速している。 $dy=2\text{cm}$ (DE2) では粗度間の高速域と粗度後方の減速域は粗度下流の $x/k=4$ 程度のところで一体となり、一つの減速域を形成する。一方、 $dy=4\text{cm}$ (DE4) ではDE2のように低速域がなかなか一体とならず、粗度間的高速域と粗度後方の減速域が2つに分かれて存在する領域が下流まで続く。そこで、各ケースの粗度間中央の水路中央軸に沿う主流速の縦断分布を図-5に示す。図には比較として、DE5の $y/k=-3$ の分布を示している。ここでは単独の粗度の影響のみを受けると考えられる。DE2のみ粗度間の加速が小さいことがわかる。主流速は粗度下流端でいったん減速した後、粗度後方で再び増大してピークを取り、その後急激な減少を示し、 $x/k=6.5$ 付近で最小値を取り、さらに下流に向かってゆるやかに増大する。結局このケースが下流の減速が最も大きい。

(a) Case DE2 ($dy=2\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)

(a) Case DE2 ($dy=2\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)

(a) Case DE2 ($dy=2\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)

(b) Case DE4 ($dy=4\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)

(b) Case DE4 ($dy=4\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)

(b) Case DE4 ($dy=4\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)

図-2 2粗度並列の場合の
主流速 U/U_0 のコンター($z/k=0.5$)

図-3 2粗度並列の場合の
乱れ強度 u'/U_0 のコンター($z/k=0.5$)

図-4 2粗度並列の場合の瞬間流速
ベクトルの一例($z/k=0.5$)

$dy=3\text{cm}\sim 5\text{cm}$ では粗度間の加速がほぼ同程度であるが、 dy が大きくなるほど下流の減速は小さくなっている。 $dy=6\text{cm}$ (DE6) になると粗度間の最大流速が若干減少し、その結果、下流側では $dy=5\text{cm}$ (DE5) よりも小さな値を示す。並列粗度の外側 (outside) では、粗度による縮流の影響で加速されて $x/k=2.5$ 付近で最大となり、その後緩やかに減速している。これと比較すると、この粗度下流の減速は並列した2つの粗度の後流の干渉によるものと考えられる。

乱れ強度コンターを図-3 に示す。これも断面平均流速で無次元化している。流下方向の乱れ強度 $u'=\sqrt{u'^2}$ は一般に粗度後流の外縁に形成されるせん断層に沿って最大値を取る。DE2 では粗度の外側のせん断層に沿って高い乱れの領域が見られるが、粗度の内側境界では、2粗度間の加速域で乱れが大きいのみで、この加速域後方の減速域では乱れは小さくなっている。一方、DE4 ではそれぞれの粗度の外縁に高乱れ領域が認められ、粗度間の加速域はむしろ乱れが小さくなっている。この高い乱れの領域は下流で融合し、粗度群の下流側全体が高い乱れを示すようになる。

以上のことから、 $dy=2\text{cm}$ と 3cm の間を境に、後流渦の干渉特性が異なることが示唆される。また、粗度背後には周期的な大規模渦であるカルマン渦が発生することが知られており、本研究でもその存在が確認された。この点の詳細については後の章で述べるが、ここでは図-4に示す瞬間流速ベクトルからその違いを見てみる。DE4ではそれぞれの粗度の後流が、かなり下流まで独立に振動

図-5 水路中央軸上の主流速縦断分布 ($z/k=0.5$)
(outsideはDE5の $y/k=-3$ の分布)

するのに対して、DE2では $x/k=5$ 程度下流で一体となって振動していることが見て取れる。

(2) 3粗度設置の場合(非越流)

3粗度の場合の典型的な流れ構造を、ケースTE23の $z/k=0.5$ における流速ベクトルを用いて図-6に示す。まず、前列粗度群による水はね偏流 (A) によって加速され、粗度間では縮流により加速される領域 (B) となり、この高速流が後列粗度によって大きく横断方向に偏流する流れ (C) を引き起こしている。後列粗度背後にははく離逆流域 (D) が形成され、この領域後方では水路中央に戻る流れ (E) が発生している。計測域下流端の $x/k=12$ において、流速横断分布を見ると、中央が低速で両側岸に向かって増大する、典型的な後流の流速分布となっていることがわかる。

図-7 に $dx=3\text{cm}$ 及び 6cm の代表的ケースの $z/k=0.5$ における主流速コンターを示す。前列の2粗度間の中心線上

の下流位置に粗度を設置することで、粗度群後方に一つの低速域が形成される。前列の並列した粗度の後方では、はく離域が形成され粗度間に高速流が発生する点は同様であるが、後列の粗度により後流域は縮小し、前列粗度の横断間隔 dy が大きくなるにつれて、粗度間の高速流が後列粗度前面で両側へ偏流する流れが強くなる。

後列粗度の後方には、一つの逆流域を含む後流域が形成されている。後流域と両側の主流域の境界では、強いせん断層が形成されているが、下流行くにしたがって後流域の幅が徐々に広がっていく。粗度間隔が小さい場合、 dx の影響が見られ、図-7の(a)と(d)を比較すると、 $dx=6\text{cm}$ では後列粗度後方の逆流域の長さが $dx=3\text{cm}$ の2倍程度となり、強いせん断層が下流まで維持されている。

図-8 に後列粗度の前面の横断面における横断方向流速分布を示す。正の値が左岸方向、負の値が右岸方向を示す。粗度間隔 dy が大きくなるにつれて横断流速が大きくなり、ゼロでない大きさを持つ範囲も増大していることがわかる。 $dx=6\text{cm}$ になると、 $dy \geq 4\text{cm}$ ではピークが若干小さくなり、その値を持つ範囲が横に広がっている。

図-9 に粗度間中心線上の主流速縦断分布を示す。 $dx=3\text{cm}$ では前列粗度上流の流速は粗度間隔が大きくなるほど増大するが、前列粗度間から後列粗度までの間では逆に粗度間隔が大きくなるほど流速は小さくなっている。後列粗度下流ではいったん負になった後、下流に向かって直線的に増加しており、粗度間隔による差は小さい。 $dx=6\text{cm}$ では前列粗度の上流においては粗度間隔 $dy=2\text{cm}$ のケース TE26を除き $dx=3\text{cm}$ のケースとほぼ同様である。TE26では、2粗度並列のケース DE2と同様に粗度前後で最小値を取る特徴的な分布を示しており、粗度

間で特に小さな値となっている。後列粗度下流では、 $dy=2\text{cm}$ (TE26) および 3cm (TE36) で速度の回復が遅く $x/k=10$ 付近まで0に近い値を取り、そこから増大し始めている。 $dy=4\text{cm}$ (TE46) 及び 5cm (TE56) では $x/k=7.5$ 付近から増大し始め、 $dy=6\text{cm}$ (TE66) では $x/k=5$ 付近から急に増大して $x/k=8$ から下流ではほぼ一定値を示している。このように $dx=6\text{cm}$ のケースでは、粗度間隔による影響が、粗度群下流の低速域の形成に現れていることがわかる。

図-10に $x/k=10$ における $z/k=0.5$ の主流速の横断分布を示す。図-10(a)には2粗度並列のケース DE4の分布を併示している。分布は典型的な後流の流速分布を示している。 $dx=3\text{cm}$ ではケース間の差は小さく、最小値では TE43 が最も小さく、TE53、TE63 が次に大きく、TE23 と TE33 が同程度で最も大きい。2粗度並列のケースと3粗度のケースを $dy=4\text{cm}$ について比較すると、3粗度の方が大きな横

図-6 3粗度の場合の流速ベクトルと基本の流れ構造 case TE2 ($z/k=0.5$) (A: 前列粗度による水はね流, B: 粗度間の加速流域, C: 後列粗度による水はね流, D: はく離逆流域, E: 水路中央へ戻る流れ)

図-7 3粗度の場合の主流速 U/U_0 のコンター ($z/k=0.5$)

(a) $dx=3\text{cm}$ のケース ($x/k=1.75$, $z/k=0.5$)

(a) $dx=3\text{cm}$ のケース ($y/k=0$, $z/k=0.5$)

(a) $dx=3\text{cm}$ のケース ($x/k=10$, $z/k=0.5$)

(b) $dx=6\text{cm}$ のケース ($x/k=2.75$, $z/k=0.5$)

(b) $dx=6\text{cm}$ のケース ($y/k=0$, $z/k=0.5$)

(b) $dx=6\text{cm}$ のケース ($x/k=10$, $z/k=0.5$)

図-8 後列粗度前面における
横断方向流速横断分布

図-9 粗度間中心線上の
主流速縦断分布

図-10 粗度下流における
主流速横断分布

断方向変化をもたらしていることがわかる。 $dx=6\text{cm}$ では粗度間隔による差が大きくなり、最小値はTE26、TE36が最も小さく強いせん断層を形成している。TE46、TE56及びTE66はほぼ同程度の最小値を取り、これらは $dx=3\text{cm}$ の場合と同程度の横断方向変化を示している。したがって、粗度間隔が 4cm 以上では、前列と後列の粗度の距離は下流の流れ構造にあまり影響しないと言える。粗度群と側壁間の主流速は、 $dy=2\text{cm}$ のケースが最も大きくなり、 dy が大きくなると粗度の間を抜ける流れが側岸領域に供給されるため、粗度群一体としての流れの遮蔽効果は小さくなっていることがわかる。

粗度群設置の目的が下流における低速域の確保にあるならば、粗度配列によるその効果を検討する必要がある。そのために、粗度群前縁から下流の $x/k=11$ までの領域における $U/U_0 \leq 0.25$ となる領域の面積割合 $Ar_{0.25}$ を指標とし、低速域面積率と呼ぶこととする。図-11にこの低速域面積率と粗度間隔 dy/k の関係を示す。図には後に述べる越流のケースの結果も示している。 $dx=3\text{cm}$ では $dy=2\text{cm}$ で最も大きく0.12程度であり、間隔が大きくなるにつれて緩やかに減少する傾向にあるが、その減少率は小さい。一方、 $dx=6\text{cm}$ では、やはり $dy=2\text{cm}$ で最大となり0.19程度の値を示し、間隔が大きくなるにつれて大きく減少する。本実験の範囲では、低速域をより多く確保するためには、横断方向粗度間隔が粗度の幅より小さく、流下方向の粗度間隔が粗度幅の2倍程度とする条件が優れていることになる。

次に、乱れ強度分布について検討する。図-12は $dx=3\text{cm}$ 及び 6cm の代表的ケースの $z/k=0.5\text{cm}$ における流下方向乱れ強度 u' のコンターである。流下方向乱れ強度は粗度群によって形成される粗度群外側のせん断層に沿っ

図-11 低速域面積率と粗度横断間隔の関係

て大きな値を示し、2列の大きな乱れ領域を形成する。後列粗度下流のはく離逆流域で、乱れが小さい領域が存在する。 $dx=3\text{cm}$ では、流下するにしたがって、高乱れ領域が横断方向に拡大し、水路中央軸上の乱れが徐々に増加している。一方、 $dx=6\text{cm}$ では、粗度群外縁のせん断層に沿う高乱れ領域は幅が狭く、また流下にしたがって幅があまり増大しない。結果として後列粗度下流に低乱れ領域が長く存在する。前列粗度の横断間隔を大きくした場合は、前後列の粗度間を抜ける流れの増大により、後列粗度の下流の乱れが大きくなり、高乱れ領域の幅が大きくなる。図-13に、流下方向乱れ強度 u' の $x/k=7.3$ における横断方向分布を示す。この位置における流下方向乱れ強度は、 $y/k=-1.7$ と 1.7 付近に2山のピークを持ち、水路中央軸上で最小値となる。前列粗度の横断間隔によるピーク位置の違いはわずかである。 $dx=3\text{cm}$ のケースでは、乱れ強度の最大値は $dy=2\text{cm}$ のケース (TE23) が最も大きく、その他は横断間隔の増大とともに減少する傾向にあるが、ほぼ同程度と言える。水路中央軸上の最小値は、ケースによって特定の傾向がなくなればつきがみられる。粗度群の側壁側では、粗度間隔が大きいケースの方が乱

(a) Case TE23 ($dy=2\text{cm}$, $dx=3\text{cm}$)

(b) Case TE43 ($dy=4\text{cm}$, $dx=3\text{cm}$)

(c) Case TE26 ($dy=2\text{cm}$, $dx=6\text{cm}$)

(d) Case TE46 ($dy=4\text{cm}$, $dx=6\text{cm}$)

図-12 3粗度の場合の流下方向乱れ強度 u'/U_0 のコンター ($z/k=0.5$)

(a) $dx=3\text{cm}$ のケース ($x/k=7.3$, $z/k=0.5$)

(b) $dx=6\text{cm}$ のケース ($x/k=7.3$, $z/k=0.5$)

図-13 粗度下流における流下方向乱れ強度 u'/U_0 の横断分布

れの減少率が小さく、より広がりを持っている。 $dx=6\text{cm}$ のケースを $dx=3\text{cm}$ のケースと比較すると、ピークがより先鋭になっており、ピーク値は若干小さい程度である。乱れ分布の幅が小さいために、水路中央の最小値は $dx=3\text{cm}$ に比べてかなり小さくなる。また、横断間隔によるピーク値の変化は小さいが、水路中央の最小値は横断間隔が大きくなるにつれて増大する傾向にある。粗度群の側壁側では $dx=3\text{cm}$ と同様のことが言える。

次に、横断方向乱れ強度 v' のコンターを図-14に示す。この場合も、前列粗度の横断間隔よりも前後列の間隔の影響の方が大きかったため、 $dy=2\text{cm}$ のケースについてのみ示した。 $dx=3\text{cm}$ では、 v' の分布は、粗度の前縁付近で大きな値を示す点は u' と同様であるが、粗度群下流域では u' の分布と全く異なっている。乱れのピークは水路中央にあり、 u' がピークを示した粗度群の外縁のせん断層では大きな値とはならない。これについては、単独の粗度の場合も同様の特性を示すことが知られている。したがって、3個の粗度群が一体となって後流の乱れ構造を決定していると考えられる。しかし一方、 $dx=6\text{cm}$ の場合は、 u' と同様に粗度群の外縁のせん断層に沿って大きな値を示している。このことを明確にするために、図-13と同じ流下方向位置における、横断方向乱れ強度 v' の横断分布を全ケースについて図-15に示す。 $dx=3\text{cm}$ の場合は、多少ばらつきはあるが、粗度間隔によらず水路中央付近でピークを取る1山型分布となっている。乱れの大きさについても粗度間隔による差異は小さい。平均時間が短いこともあり、多少非対称な分布となっているが、粗度間隔が大きくなるほど横断方向の幅が若干拡大

する程度である。 $dx=6\text{cm}$ では、 $dy=6\text{cm}$ (TE66)を除き、乱れの大きさは $dx=3\text{cm}$ のケースより小さくなっている。横断間隔 $dy=3\text{cm}$ 以下では $y=-1.7$ と 1.7 に2山のピークを取るが、 $dy=4\text{cm}$ (TE46)、 5cm (TE56) ではピークがフラットになり、 $dy=6\text{cm}$ (TE66) では水路中央がピークとなる。特に dy が小さい時の dx による違いが顕著であることがわかる。

そこで、レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ のコンターを $dy=2\text{cm}$ のケースについて図-16に示す。 $dx=3\text{cm}$ では粗度群下流域において水路中央軸を挟んで、正と負のピーク領域が存在する。この正の値は左岸側から水路中央に向かう変動 ($v < 0$) により、高速な主流成分 ($u > 0$) が輸送され、右岸からは、右岸側から水路中央に向かう変動 ($v > 0$) により、高速な主流成分 ($u > 0$) が輸送されることを意味している。一方、 $dx=6\text{cm}$ では、粗度群下流側にレイノルズ応力の顕著なピークが認められない。大きなレイノルズ応力は粗度の前縁の水はね部において見られるのみである。この違いは注目すべきであり、後流の渦構造の大きな違いがあるものと推測される。この点については後に瞬間流速構造から考察する。

(3) 3粗度設置の場合(越流)

本研究では、流量が増大した場合に、粗度群を流れが越流するケースについて実験を行った。しかし、今回変化させたパラメータである前列粗度の横断間隔 dy と前後列粗度間隔 dx について、本実験の範囲では流れ構造及び乱れ構造において顕著な構造的な差異は認められなかった。したがって、代表的な時間平均の流れ構造を示

(a) Case TE23 (dy=2cm, dx=3cm)

(a) dx=3cmのケース (x/k=7.3, z/k=0.5)

(a) Case TE23 (dy=2cm, dx=3cm)

(b) Case TE26 (dy=2cm, dx=6cm)

(b) dx=6cmのケース (x/k=7.3, z/k=0.5)

(b) Case TE26 (dy=2cm, dx=6cm)

図-14 3粗度の場合の横断方向
乱れ強度 v'/U_0 コンター (z=1.5cm)

図-15 粗度下流における横断方向
横断方向乱れ強度 v'/U_0 横断分布

図-16 3粗度の場合のレイノルズ
応力 $-uv/U_0^2$ のコンター

(a) Case TS23m (dy=2cm, dx=3cm)

(b) Case TS26 (dy=2cm, dx=6cm)

図-17 3粗度越流の場合の主流速 U/U_0 コンター (z/k=0.5)

(a) Case TS23 (dy=2cm, dx=3cm)

(b) Case TS26 (dy=2cm, dx=6cm)

図-18 3粗度越流の水路中央主流速コンター
(y/k=0.0)

すにとどめることとする。図-17に $dx=3\text{cm}$ 及び 6cm の $dy=2\text{cm}$ の $z/k=0.5$ における平均主流速コンターを示す。同粗度条件の非越流のケースと比較すると粗度群下流の後流による逆流域が縮小し、また下流の低速域が著しく減少する。越流のケースの dx による違いを見ると、 $dx=6\text{cm}$ の方が後列粗度下流の減速域がより小さいが、全体としての流れ構造は類似している。非越流では水路中央の低速域が流下するにつれて拡大するという後流の拡散過程が見られたが、越流の場合、流下とともに後流域が狭まっていく。図-11に示した低速域面積率 $Ar_{0.25}$ と粗度間隔 dy の関係については、低速域面積率は dy の増加とともに若干減少する傾向が見られるものの、前後列の粗度間隔 dx にも依存せず、ほぼ一定と見なしてもよく、その値は非越流の半分以下である。

図-18は、ケース TS23 と TS26 の水路中央鉛直断面の主流速コンターを示したものである。越流のケースでは粗度上面から下流に水平せん断層が形成される。TS26 では粗度前報の減速がやや大きく、粗度後方のは

く離域が減少している。また流速ベクトルからは、後列粗度下流で上昇流が認められ、粗度群の外側境界から水路中央へ向かい中央で上昇する2次流の発生が推測された。これと粗度を越流する流れが支配的となって、流れ構造を決定していると考えられる。さらに越流する場合は、前後列粗度の間を抜ける流れの割合が相対的に減少するため、間隔による違いが出にくくなったものと考えられる。乱れ強度についても粗度群の周辺で大きな値を有するのみで、非越流のような特徴は見られなかった。

4. 瞬間的な流れ構造に関する検討

非越流のケースでは、粗度の配置によって乱れ特性に顕著な変化が認められた。特に前後列の粗度間距離 dx による影響が大きく、粗度後流の渦構造の変化が推測された。そこで、瞬間的な渦構造を見るために、瞬間的流線と横断方向流速のカラーコンターを重ねたアニメーションを作成して検討した。図-19はその静止画像を示した

図-19 瞬間の流線と横断方向流速カラーコンターによる組織構造の可視化

ものである。図-19の(a), (b)は、 $\Delta x=3\text{cm}$ のケースTE23の約5秒間隔の2つの時間を取りだしたもので、(c)は $\Delta x=6\text{cm}$ のケースTE26の一例である。 $\Delta x=3\text{cm}$ では粗度群後方に粗度群の幅規模の大規模なカルマン渦が発生している。この大規模な渦はゆっくりと下流へ移動していく。一方、 $\Delta x=6\text{cm}$ では、粗度群の外側のせん断層に沿って小規模な渦が発生して流下するが、大規模なカルマン渦にまで発達しない。このような Δx による渦構造の違いは、 $\Delta y=4\text{cm}$ までは同様に認められた。

このような大規模渦運動の結果、瞬間流速は場所により特徴的な変動を示した。代表的な位置における瞬間流速 $\tilde{u}$ 、 $\tilde{v}$ の時系列と瞬間レイノルズ応力 $-uv$ を乱れ強度 u' 、 v' で無次元化した時系列を図-20に示す。まず $\Delta x=3\text{cm}$ のケースについて、下流域の水路中央の(a)、せん断層内の(b)では非常に長周期の規則的な変動が認められる。また、 $\tilde{u}$ と $\tilde{v}$ でも異なる周期性を示すことが注目される。レイノルズ応力は、(a)では $\tilde{u}$ と $\tilde{v}$ の周期が異なっていることから正と負の双方の値が発生しているため、時間平均値は小さくなる。(b)では変動の振幅も大きく $\tilde{u}$ と $\tilde{v}$ の相関も高いため、時間平均値は大きくなる。前列粗度後方の(c)では $\tilde{u}$ については変動の周期は短くなり規則性も失われつつあるが、変動の振幅自体は大きいのに対し、 $\tilde{v}$ は変動が小さくなっている。ただし、レイノルズ応力は負の方に偏っていて、短い周期の相関があると考えられる。 $\Delta x=6\text{cm}$ のケースのせん断層内の(d)では、 $\tilde{u}$ と $\tilde{v}$ の変動に規則的周期性はなくなる。時折大規模な変動がみられるが、本実験では計測時間が16sと短いため、これ以上の周期性は議論できない。ここでは $\tilde{u}$ と $\tilde{v}$ の相関はあまりなく、レイノルズ応力も負の値が多いが正の値もかなり現れている。

以上の流速変動の周期特性を明らかにするために、変動流速 u 、 v の自己相関係数を図-21に示す。これには大規模変動の周期がほぼ同一となる領域区分位置と代表的周期を示している。自己相関係数は次式で計算される。

$$R_u(\tau) = \frac{\overline{u(t)u(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{u(t)^2}} \cdot \sqrt{\overline{u(t+\tau)^2}}} \quad (1)$$

図-20 瞬間流速及びレイノルズ応力時系列

ここにオーバーバーは時間平均を意味し、 v' についても同様である。領域区分は①の後列粗度下流の水路中央領域、②の粗度群下流のせん断層領域、③の前列粗度と後列粗度の間から外の領域、④の粗度群後流域外領域であ

図-21 u 及び v の自己相関係数

り、それぞれで特徴的な周期特性を示した。変動流速 u , v の自己相関関数のセカンドピークから、それぞれの渦周期 T_u , T_v を決定した。ここで、次式で与えられるストローハル数を検討する。

$$St = \frac{D}{UT} \quad (2)$$

ここに、 D は粗度の横断長さ、 U は接近流の平均流速、 T は流速変動の周期である。まず粗度1個のSE1の場合、カルマン渦の周期は約3.0 sであり、ストローハル数 $St=0.156$ となった。これは単独角柱の場合の標準的な値 $0.093^{14)}$ より大きい値となっている。本実験の条件は底面と水面が存在し、風洞の2次元角柱とは異なると考えられる。2粗度並列な場合は渦周期が約2.3 sとなり、粗度1個の場合より周期が短くなっている。

3粗度設置の場合、後列粗度下流の領域①は v に約5.0 sの周期が見られ、複数の粗度が一体となり、長さスケールが増大したことを示していると考えられる。前列の2粗度の幅を代表長さとしてストローハル数 $St=0.25 \sim 0.3$ となる。ここでは u の変動周期は v の半分の2.5 sとなった。これは後流渦のスケールが粗度群の幅程度になるため、水路中央では v の変動の正負いずれにおいても u は周囲の高速流が輸送されたためと考えられる。後列粗度斜め後方のせん断層領域②では u , v は全く同じ周期特性を示し、 T_u , T_v ともに約5.0 sである。これは、 v が正のとき周囲の高速流が輸送され $u > 0$ となり、 v が負のとき後流域の低速流が輸送され $u < 0$ となるためと考えられる。前列粗度斜め後方の領域③は u , v ともに1.8 s程度の周期が見られる。これは前列粗度と後列粗度の間を抜ける流れが持つ周期特性を示しており、カルマン渦の特性とは異なると推測される。粗度側方から側壁側にかけての領域④では u , v ともに顕著な周期特性は見られなかった。図-21の(d)は乱れ強度分布及びレイノルズ応力分布が大きく異なった $dx=6$ cmのケースであるが、 u については約5.0 s、 v については約3.5 sの周期が認められるものの、セカンドピークは小さく周期性は明確ではない。

5. 結論

開水路に角柱粗度を複数配置する場合に、周辺の流れ構造に与える影響について、基礎的な実験的検討を行った。角柱粗度を2個並列の設置する場合の横断間隔を変化させて相互作用を見るとともに、後列の粗度1個を前列との縦断距離を変化させて配置して、その影響を調べた。また、流量を2通り変化させて、粗度を越流しない場合と越流する場合を検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) 粗度高さを越流する流れの場合、並列粗度の間隔や後列粗度の距離の影響については、粗度間の流れが後流域に及ぼす影響は小さく、粗度群が一体となって抵抗となり、下流に狭い低速域を形成する。
- (2) 2粗度並列の非越流の場合、互いの交流が干渉して融合する距離は、粗度間隔が大きいほど大きくなり、粗度の間隔が粗度幅よりも小さい場合は、粗度から粗度幅の3倍程度下流で一体となって粗度群幅規模の変動を示す。
- (3) 3粗度を設置した非越流の場合、前列の粗度の横断間隔が小さいとき、後列粗度との距離が粗度群下流の流れ構造に大きく影響した。後列粗度との距離が大きい場合、粗度群下流の後流による逆流域及び低速域が流下方向に長く維持される。この低速域では乱れ強度が小さく、せん断層におけるレイノルズ応力も小さく、このため周囲流と後流の混合が抑制されたために、低速域が長く維持されたものと推測される。

(4) 上述のような乱れ特性の違いは、粗度群下流に形成される大規模渦の違いによる。後列粗度との距離が小さい場合、粗度群の幅いっぱいにはびく大規模なカルマン渦が形成される。一方、後列粗度との距離が大きい場合、粗度群の外縁のせん断層に沿って小規模な渦が発生して流下するが、大規模なカルマン渦にまで発達しない。このような大規模渦特性が、流速変動の強度や相関特性に変化をもたらしている。

これらの結果は限られた実験条件のもとで得られたものではあるが、粗度の配置を考える上で考慮すべき事項を読み取ることができる。低速域の確保という面では越流時の流れ構造に変化が少なかったため、さらに個数を増やすなどの対策が必要と思われる。

謝辞：本研究は日本学術振興会の科学研究費「基盤研究(C)」の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 今本博健, 大年邦雄: 開水路流れに設置された橋脚周辺の水利特性について (2), 京都大学防災研究所年報, 第 27 号 B-2, pp.445-454, 1984.
- 2) 内田龍彦, 福岡捷二, 福島琢二, 田中正敏: 大型粗度上の浅い流れの平面二次元解析とその応用, 土木学会論文集 No.691/II-57, pp.93-103, 2001.
- 3) 富永晃宏・市川亜也佳: 巨石群を底面に配置した開水路流の抵抗特性評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp.I_661-I_666, 2014.
- 4) 岡部健士, 中野晋, 吉田弘: 粗面上に突出した球に作用する流体力, 水工学論文集, 第 34 巻, pp.499-504, 1990.
- 5) 高橋迪夫, 木村喜代治: 礫床河川の流れ抵抗に及ぼす巨礫の影響に関する二, 三の基礎的検討, 水工学論文集, 第 36 巻, pp.241-246, 1992.
- 6) 田中規夫, 細川智徳, 玉井信行: 開水路底面状の大規模粗度付近における渦運動について, 水工学論文集, 第 34 巻, pp.487-492, 1990.
- 7) 岡西健史・藤田一郎・古谷勇樹: 半球粗度粗面が生成する水面形のパターン分類とその特性に関する基礎研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.I_1279-I_1284, 2012.
- 8) 榊卓也, 伊藤佑介, 富永晃宏: 開水路底面における巨石周りの流れ構造, 土木学会第 65 回年次学術講演会, II-200, pp.399-400, 2010.
- 9) Shamloo, H., Rajaratnam, N. and Katopodis, C.: Hydraulics of simple habitat structures, Journal of Hydraulic Research, Vol.39-4, pp.351-366, 2001.
- 10) 富永晃宏・榊卓也: 移動床上に置かれた球状大粗度周りの流れ構造と河床変動, 土木学会論文集 B1, Vol. 68, No. 4, pp.I_823-I_828, 2012.
- 11) 高野暲・新井勲・松阪正芳: 角柱群周りの流れの実験的研究, 日本機械学会論文集(B 編), 47 巻, 418 号, 982-991, 1981.
- 12) 岡本史紀・松永勝秀, 砂走行貞: 平面壁上の有限長角柱の渦流出及び乱流後流, 日本機械学会論文集 (B 編), 56 巻, 528 号, pp.2291-2299, 1990.
- 13) 羽二生博之・坂本弘志: 乱流境界層の中に直立する 2 角柱に作用する変動流体力 (並列に配列された場合), 日本機械学会論文集(B 編), 52 巻, 484 号, pp.3892-3897, 1986.
- 14) 坂本弘志・羽二生博之・小林圭史: 乱流境界層の中に直立する 2 角柱に作用する変動流体力 (食違い配列された下流側角柱), 日本機械学会論文集(B 編), 53 巻, 495 号, pp.3152-3157, 1986.
- 15) Takemura, T. and Tanaka, N.: Flow structures and drag characteristics of a colony-type emergent roughness model mounted on a flat plate in uniform flow, Fluid Dynamics Research 39, pp.694-710, 2007.

(2014. 6. 20 受付)

EFFECTS OF ALIGNMENT METHOD ON FLOW STRUCTURES BEHIND A SQUARE-COLUMN ROUGHNESS GROUP IN AN OPEN CHANNEL

Akihiro TOMINAGA and Ayaka ICHIKAWA

The effects of large roughness group of square columns on the flow structure in a downstream region were investigated experimentally in an open channel flow. Two roughnesses were located in parallel and their interval length was changed, and one roughness was placed backward with 2 kinds of distance on the center line of the front roughnesses. The velocity was measured by using PIV method under two discharge conditions where the roughness was emerged and submerged. In the submerged cases, the effects of lateral and longitudinal distance of each roughness did not so affect the flow structures. In the case of three roughnesses, when the lateral interval length was short, the longitudinal distance between the front and back roughnesses affects significantly to the mean flow and turbulent structures. The long distance setting can keep a low velocity and low turbulence region behind the roughness group. This is caused by the difference of large-scale periodic vortices generated by the roughnesses.