

水制の相対断面形状が主流域の流速に及ぼす影響

指導教員 富永晃宏 教授

三浦 爽

1.はじめに 庄内川の河口 42 km 地点における岐阜県脇之島地区にある辛沢川との合流部に土砂堆積が発生している。過去に、土砂撤去を実施しているが、数年程度で再堆積が生じている。河川の土砂堆積は、河床高上昇、河道閉塞が誘発され、洪水の危険性が高まる。そこで、水制を用いて主流の流れを加速することで、土砂堆積を除去する対策が考えられている。本研究では、このような対策に対する水制の効果を明らかにするために、水制の相対的な長さ、高さを変化させて主流域の流速に及ぼす影響を把握することを目的とする。河道水制が対岸の流れ構造にどのような影響を与えるかに着目して、土砂堆積の抑制に最適な水制の形状を水路実験と数値計算により検討した。

2.実験方法 実験水路は長さ 12 m, 幅 60 cm の勾配可変水路を使用し、水路勾配 $I=1/1000$ とした。水制設置位置を図-1 に示す。水制は不透過型のものとする。水路右岸に水制を設置し、越流条件下で、フルード相似則を用いて、庄内川では中規模出水の約 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ を想定した $Q=0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ で、流量一定で流速計測を行った。下流端水深 $h=5 \text{ cm}$ とした。水理条件については表-1 に示す。また、水制模型は表-2 に示すように幅 4 cm, 水制長さ $L=14 \text{ cm}, 20 \text{ cm}, 26 \text{ cm}, 32 \text{ cm}$, 水制高さ $D=2 \text{ cm}, 3 \text{ cm}, 4 \text{ cm}$ と変化させた。また、遮蔽率 $R_a=(L \cdot D)/(B \cdot h)$ は流水断面における水制の面積率を表す。ここで水深は下流端水深 $h=5 \text{ cm}$ を採用した。流速計測は、I型 2 成分電磁流速計を用い、サンプリング周波数 100 Hz で 4096 個のデータを取得して解析を行った。一定高さで縦断方向には図-1 に示す 4 断面で、横断方向には 3 cm 間隔で平面的に計測を行い、高さは $z=1 \text{ cm}, 3 \text{ cm}$ の 2 断面を計測した。

3.実験結果 本研究では対岸の土砂堆積を抑制するために掃流力を増加させることを意図していることから、水制による対岸域の流速増加率に着目する。図-2 に caseL20D4 の主流速の横断分布を示す。図には後に述べる計算値を並示している。 $z=1 \text{ cm}$ 断面における流速計測は、計測値に異常が見られたため採用せず、今後は $z=3 \text{ cm}$ 断面の考察を進めていく。実験結果から、 $z=3 \text{ cm}$ において、水制の対岸の y 軸方向 40 cm~52 cm の範囲が概ね一定値を示すことが分かる。そのため流速は y 軸方向 40 cm~52 cm の区間平均値を用いる。水制前後の流速の変化は、この区間における水制下流の流速 U_d を水制上流の流速 U_u で除して無次元化した流速増加率 U_r で考える。水制上流の流速 U_u は x 方向 0 cm の流速、水制下流の流速 U_d は $x=60 \text{ cm}, 70 \text{ cm}, 100 \text{ cm}$ 地点で最大流速の発生した流速を用いる。また、

表-1 水理条件(実験及び計算)

	$Q (\text{m}^3/\text{s})$	$h (\text{m})$	$B (\text{m})$	n	I
実験	0.01	0.05	0.6	0.01	1/1000
計算	600	3	70	0.033	1/500

表-2 実験ケース

case	水制長さ $L (\text{cm})$	水制高さ $D (\text{cm})$	遮蔽率 $R_a (\%)$
L14D2	14	2	9.33
L14D3		3	14.00
L14D4		4	18.67
L20D2	20	2	13.33
L20D3		3	20.00
L20D4		4	26.67
L26D2	26	2	17.33
L26D3		3	26.00
L26D4		4	34.67
L32D2	32	2	21.33
L32D3		3	32.00
L32D4		4	42.67

表-3 計算ケース

case	水制長さ $L (\text{m})$	水制高さ $D (\text{m})$	遮蔽率 $R_a (\%)$
L16D1.2	16	1.2	9.14
L16D1.8		1.8	13.71
L16D2.4		2.4	18.29
L24D1.2	24	1.2	13.71
L24D1.8		1.8	20.57
L24D2.4		2.4	27.43
L32D1.2	32	1.2	18.29
L32D1.8		1.8	27.43
L32D2.4		2.4	36.57
L40D1.2	40	1.2	22.86
L40D1.8		1.8	34.29
L40D2.4		2.4	45.71

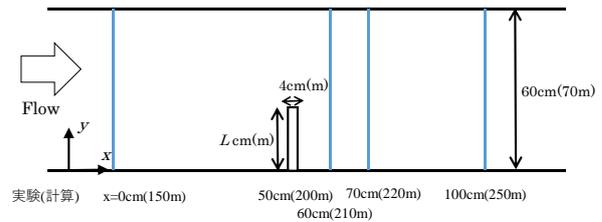


図-1 模型配置図及び流速計測位置(実験及び計算)

今後は水制の高さ及び長さはそれぞれ高さの下流端水深、長さを水路幅で除して無次元化したものを用いる。流速増加率と水制の長さおよび高さ及び遮蔽率 R_a との関係の後に述べている計算結果とともに図-3, 図-4 に示す。図-3 左より水制長さが長くなるにつれて、流速増加率が大きくなることを確認できる。図-3 右より、水制高さを高くするに伴い、いずれの水制の長さでも、増加率は大きくなるのが分かる。図-4 に遮蔽率 R_a に着目した流速増加率を示す。遮蔽率が大きくなるにつれて、流れが妨げられることにより、水制下流の流速が大きくなるのがわかる。概ね遮蔽率と一義的な関係があるといえる。ただし、遮蔽率が 20% 近くの 3 ケース (caseL32D2, caseL20D3, caseL14D4) において、水制高さが最も高い、caseL14D4 の増加率がわずかであるが遮蔽率の大きい caseL32D2 よりも流速の増加率が大きい。これは、水制の長さより、水制の高さが流速の増加率に強く影響を及ぼしていることを意味していると考えられる。

4.数値計算 このような水制の効果を評価するには数値計算による予測が有用と考えられることから、数値計算は河川シミュレーションソフト iRIC NaysCUBE を用い、水制を越流条件で 3 次元数値計算を試みた。

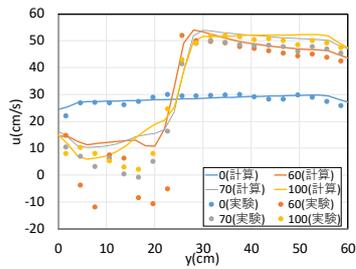


図-2 主流速横断分布

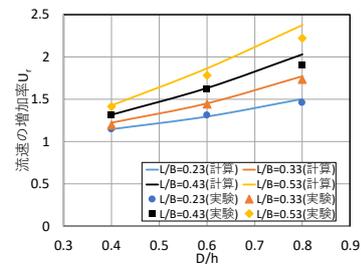
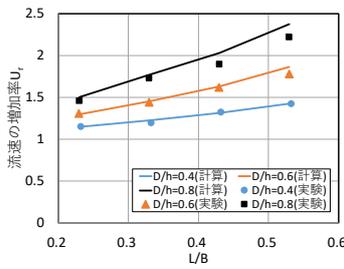


図-3 流速増加率(左:水制長さとの関係 右:水制高さとの関係)

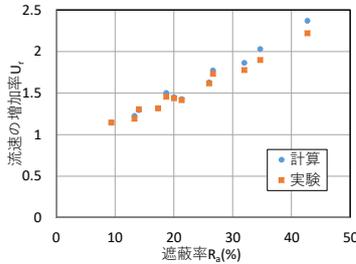


図-4 遮蔽率と流速増加率の関係

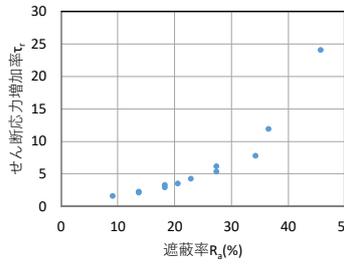


図-5 遮蔽率と τ 増加率

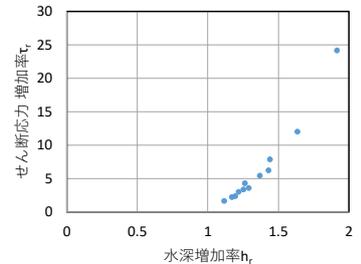


図-6 水深増加率と τ 増加率

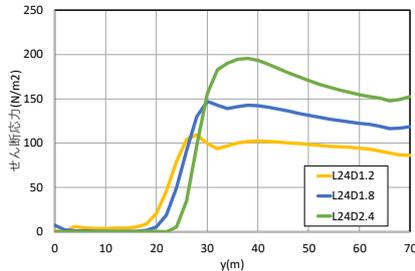


図-7 τ の横断分布

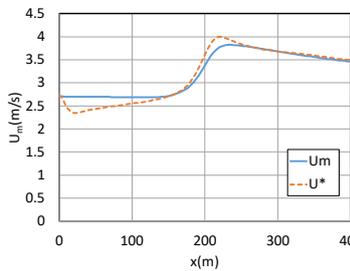


図-8 caseL24D1.2

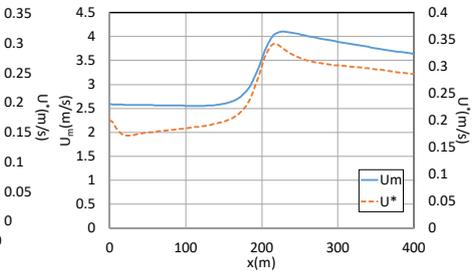


図-9 caseL32D1.2

乱流モデルは二次非線形 $k-\varepsilon$ モデルで、三次精度 TVD MUSCL スキームとした。実験条件と同じ条件で計算を行った。図-2、図-3 及び図-4 の実験値との比較から、計算値は実験値をわずかに上回ったものの概ね一致していると言える。したがって、今後は水制の効果は数値計算で考察していく。そこで、現地河川スケールでの数値計算を行った。水路幅 70 m、水路長さ 400 m とし、水制設置位置は $x = 200$ m とした。流量 $Q = 600$ m^3/s 、水深 $h = 3$ m で表-3 のケースについて計算した。水路勾配 $I = 1/500$ 、粗度係数 $n = 0.033$ とし、計算時間は 500 s とした。図-5 に遮蔽率とせん断応力の増加率の関係を示す。せん断応力の増加率 τ_i は流速の増加率と同様の定義とする。また水制の対岸域のせん断応力の区間平均値は、 $y = 47\text{m} \sim 61\text{m}$ を採用した。遮蔽率の増加に伴い、せん断応力も増加する傾向が得られた。遮蔽率が 13% と 18% 付近を見ると、遮蔽率が同じ場合、水制の高さが高い方がせん断応力の増加率が大きいことが分かった。図-6 に水深増加率 h_r とせん断応力の増加率 τ_i の関係を示す。水深増加率 h_r は $y = 10$ m、 $x = 196$ m における水深を下流端水深 $h = 3$ m で除して増加率を求めた。水深増加率が大きいほどせん断応力の増加率も大きくなることを確認できる。しかし、水深が大きくなりすぎてしまうと、治水安全上、良くないため、水深増加率 h_r は極力小さい方が適していると考えられる。図-7 に $x = 220$ m におけるせん断応力の横断方向分布

を示す。水制の高さを高くすると、せん断応力も大きくなること分かる。また、水制の対岸域が概ね同じ値をとることが確認できる。図-8、図-9 は、 $y = 55$ m における断面平均流速 U_m と、せん断応力から導出した摩擦速度 U^* の縦断方向分布である。実際にせん断応力の計測は困難であり、現場で多く用いられるのは二次元の数値計算であるため、二次元計算への応用を考察した。縦断方向分布を比べてみると、最大値が出る位置は、摩擦速度 U^* の方がわずかに断面平均流速 U_m よりも早いことが分かる。このこと以外はグラフの概形やコンター図も概ね同じ結果が得られたため、二次元計算への応用もできると考える。

5. おわりに 今回の研究で水制の長さと高さを変えた場合の主流域の流速に及ぼす影響として、水制の長さより、高さが増加率に影響を与えていると考えられる。また、庄内川における通過質量百分率の 90% に対応する粒径 d_{90} の $d = 130$ mm を流すために必要な流速は 3.71 m/s と推測される。よって、この砂礫を動かすために必要な水制の形状は断面平均流速の最大値が約 3.8 m/s である caseL16D1.8 または caseL24D1.2 または caseL32D1.2 が最適である。しかし、水制の高さを高くしてしまうと、水深が大きくなり、降雨時に洪水の危険が高まってしまう。そのため、本研究では水制の高さが 3 ケースの中で、最も低く、水深増加率が 1.17 倍の caseL24D1.2 が適していると考えられる。