

1.はじめに 水制は、河岸侵食防止や土砂堆積制御のために用いられる水理構造物である。これまでのコンクリート塗り固めによる護岸は、生態環境の保全や景観の面から好ましくないとされ、水制の利用が期待されている。水制の形式としては、環境面への配慮と柔軟性、経済性の面から蛇籠やカゴマットを用いた透過型水制の施工例が増加している。しかし、このような透過型水制の洗掘による安定性については未だ定かでない。本研究は、2009年3月に設置された庄内川上条水制を研究対象として、現地での河床形状及び流速計測と、カゴマットを想定した透過型水制について室内実験を行い、水制周辺の流れ構造と洗掘の関係について検討するものである。

2.現地観測 庄内川は、河床勾配 1/540 の礫床河川である。上条水制は 8 連水制であり、水制長 20m、設置間隔 60m で、角度は上向き 70° 程度、天端高は平水位 + 0.75m として設計されており、構成材料には金網に碎石を詰めたカゴマットが用いられている。このうち本研究の対象である水制は水衝の最も大きい第 1 基目とした。水制を含む約 90m の区間を対象に、水面を一定として水深 0~1m まで 20cm 間隔でコンターとなるようトータルステーションにて座標を計測した。また、洗掘域では超音波ドップラー流向流速計（リバーキャット）を両端からロープで引張り移動させて、横断面での水深・流速の計測を行った。

図-1 に水深コンター及び計測断面位置を示す。第一水制前には施工の際のヤードが残されており、その前面から第一水制先端後方へと連続的に洗掘域が存在する。また、水制間には砂州が形成されている。次に、図-2 にリバーキャットによる流速分布計測結果を示す。断面 A-A では、水深は横断方向にほぼ一様に分布しているが、湾曲により流速は右岸側に偏って速くなっている。断面 B-B では、水刎ねと主流との合流により局所的に流速の加速が見られるとともに、50cm/s を超える流れの速い箇所が河床が洗掘されている。先端の近傍では流れが剥離しており、流速が弱い。断面 C-C では、断面 B-B と比較して主流域が左岸側に移動しているため、水刎ねの効果が持続していることがわかるが、その一方で右岸側には剥離した流れによる逆流が確認されており、堆積の原因となる水平渦が発生していることもわかる。流速が最大である位置と深掘れ部が完全には対応していないため、水制設置前の河床形状が残っており、今後の出水により洗掘位置が変わる可能性がある。また、水平渦の発生は不透過型水制に見られる現象であるため、カゴマットの柔軟性と流砂等の目詰まりから間隙があまり存在していないことが考えられる。観測は、上条水制の施工完了か

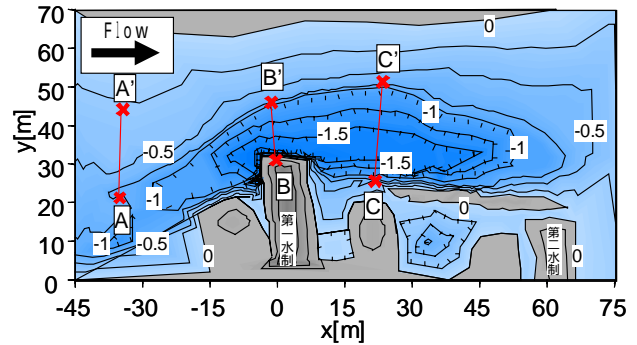
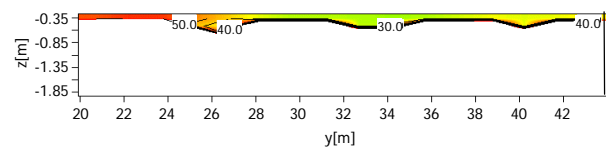
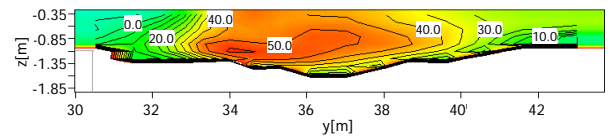


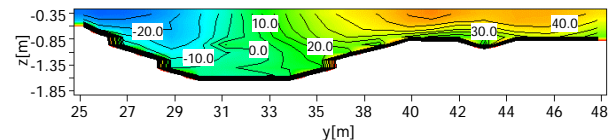
図-1 上条水制周辺の水深と流速計測位置



(a) 断面 A-A (x=-35m)



(b) 断面 B-B (x=-2m)



(c) 断面 C-C (x=21m)

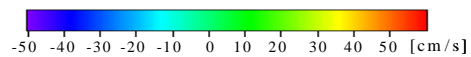


図-2 横断流速分布

ら約 7 か月後であり、それまでに水制を越流する出水が 5 回程度発生した。施工当初には水制前後にヤードが繋がっていたが、観測時には離別している。これは、出水の際に越流したことにより平水時には流れのほとんどない水制前後においても、土砂を流出させる程の力が発生していると考えられる。

3.室内実験 実験水路は、全長 13m、幅 59.3cm、高さ 30cm の勾配可変型長方形水路を用いて、水路勾配を 1/500 に設定した。水制の模型は、図-3 に示すように 1 辺 3cm のカゴマットモデルを連結して、水制長 15cm、水制幅は下段 6cm、上段 3cm の 2 段積みにし、計測区間上流側から 45cm と 90cm に 1 基ずつ配置した。構成材料は、粒径 1~1.5cm の骨材を水とセメントで練り混ぜたもので、空隙率は体積比で約 44.2% である。ケースは平水時と出水時を想定して表-1 に示すように設定した。水制を含む

135cmの区間にて2方向型電磁流速計を用いて固定床での流速計測を行った。図-4 に $z=1.5\text{cm}$ における流速ベクトルを示す。Case1 では水刳ねされた流れ及び透過した流れは直進するが、Case2 では刳ねられた流れが再付着する方向を向いており、この流れが第2水制にぶつかることで逆流し水制間に渦が発生する。これは、透過流量に比べて流量が相対的に増加したことで水制域に流れが入り込みやすくなり、透過流の影響が弱まったためであると考えられる。次に、図-5 に $x=0\text{cm}$ における平均の底面せん断応力 $\overline{\tau_{bx0}}$ で無次元化した流下方向の無次元底面せん断応力 $b_{bx}/\overline{\tau_{bx0}}$ の分布を示す。なお、底面せん断応力 τ_{bx0} は $z=1.5\text{cm}$ における流速 u_b, v_b を用いて次式より算定した。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho C_f}{2} u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (1)$$

図-6 に無次元底面せん断応力の縦断分布を示す。Case1,2 ともに $x=45\text{cm}$ を境に大きく値が増加しており、洗掘の可能性が大きいことがわかる。この増加率はCase1の方が大きく、越流しない比較的小規模の出水においても洗掘が予想される。図-8 に横断方向の無次元底面せん断応力分布 $b_{by}/\overline{\tau_{bx0}}$ を示す。水制先端を中心に正の値が大きくなっており、水制周辺では左岸方向へと砂が移動すると考えられる。これらのことから、水制先端を中心として水制前面から水刳ねに沿って洗掘域が広がることが予想される。

次に、移動床での河床変動実験を行った。河床には平均粒径 0.586mm の砂を敷き詰め、通水時間は65分と設定し、第一水制前には現地でのヤードを想定して礫を配置した。通水後の河床高コンターを図-8に示す。2つのケースでは洗掘が最大となる位置が異なる。Case1ではヤードの前方が最大となり、洗掘域は広範囲であるが、Case2では第一水制先端が局所的に最大となった。一般に流心へ押し曲げられる流量の全流量に対する割合が大きいほど洗掘は大きくなるため、洗掘位置の違いはヤードの投影面積が河積に占める割合が影響していると考えられる。Case1ではヤードの占める面積が大きいので、ヤードにて流速が緩和され、水制への水衝はCase2よりも軽減されていると考えられる。一方、Case2ではヤードの流速緩和効果が相対的に弱くなり、水制先端の方で洗掘が大きくなったものと考えられる。無次元底面せん断応力の分布と同様の傾向がCase2では見られたがCase1ではやはりヤードの影響によりせん断応力の加わる位置が異なると考えられる。以上のことから、流量による洗掘特性の違いにより、現地において平水時にはヤード前が洗掘され、第一水制先端において埋め戻しがなされるが、出水時には逆の関係となることが予測される。

4. おわりに 実験結果は現地で形成された洗掘や水制間の堆積と同様の傾向がみられた。結果から、ヤードと第一水制は一体のものと思なした上での検討が必要であ

表-1 実験条件

Case	水深 $h[\text{cm}]$	流量 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$	平均流速 $u[\text{cm}/\text{s}]$	フルード数 Fr
1	4.0	0.0085	27.7	0.4429
2	8.0	0.0170	32.8	0.3706

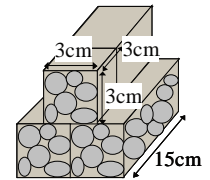


図-3 模型の概略

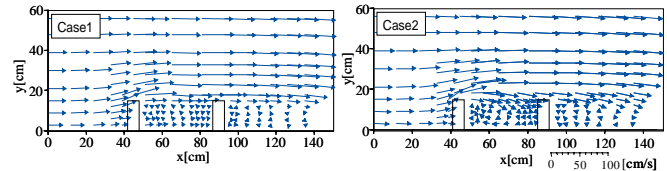


図-4 流速ベクトル ($z=1.5\text{cm}$)

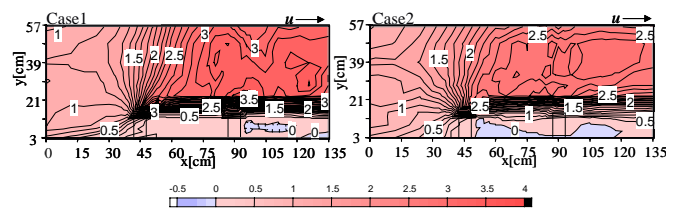


図-5 無次元底面せん断応力分布 (流下方向)

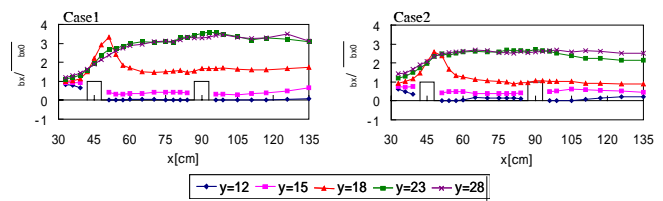


図-6 無次元底面せん断応力の縦断分布

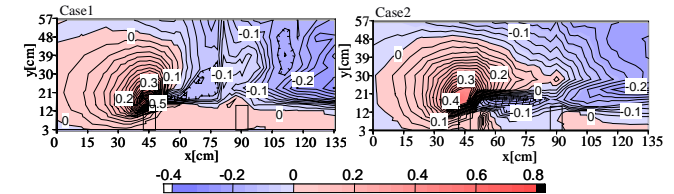


図-7 無次元底面せん断応力分布 (横断方向)

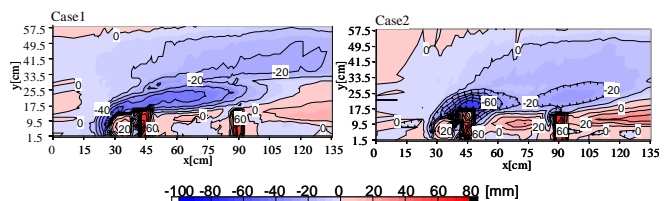


図-8 河床高コンター

り、越流時と非越流時では周辺河道における洗掘のメカニズムが異なる。ヤードの存在が流れに与える影響が大きいと言えるため、出水時のヤードの土砂流出に注目して経時変化について観察することが上条水制の保護には重要である。

参考文献 富永晃宏, 金田雪雄, 神谷昌文, 河川湾曲部における3次元乱流構造の現地計測と底面せん断応力の評価法, 水工学論文集, 第38巻, pp727-732, 1994.