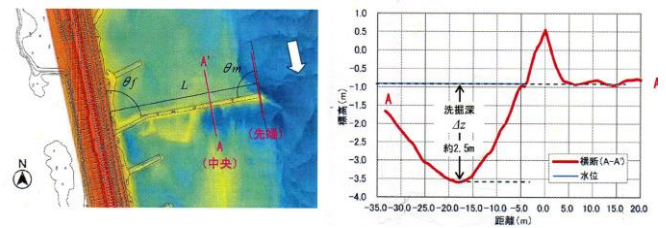


1. はじめに：環境、治水に配慮した河川工法として水制の設置が試みられているが、水制周辺で局所洗掘により破損したり、土砂堆積により埋没したりして長期的な水制の効果が見込まれない場合がある。長期的に機能する水制の成功例として木曽川下流部に設置されているケレップ水制群がある。水制群の間にはワンド群が生成しており、多様な生態系と良好な河川環境が形成されている。低水路の河床低下によりケレップ水制は複断面の水路の高水敷上に設置された形となっており、水制直後で局所洗掘が発生し、これがワンド水域の維持に役立っているが、洗掘の発生機構が解明されていない。その局所洗掘は水制間の環境を維持する上で重要であるため、ケレップ水制周辺の流れ構造の解析が必要である。本研究では高水敷上に存在する大規模水制の維持管理を目的として、河床が大きく変動する出水時に注目し、実験水路を用い水制周辺の流れ構造、また水制直後の洗掘の発生機構を検討した。

2. 木曽川水制下流の洗掘形状：木曽川の水制設置区間では、航空レーザー測量とスワス式音響測深が実施され、水制下流の洗掘の発生状況が把握されている¹⁾。水制の形状特性を図-1に示す。図に示す水制では、水制中央から先端部の下流部において、最大洗掘深約2.5mの洗掘が発生している。また、水制の設置角度と洗掘深の関係は、水制が下流向きほど洗掘深が深くなり、上流向きほど浅くなる傾向がみられる。

3. 実験方法：水制下流に洗掘が発生する要因として、設置角度の影響を調べるとともに、一旦下流に洗掘が発生した場合にこれを維持する機構があるかを調べることを目的として実験を行った。実験水路は全長13m、幅60cmの水路を使用し、勾配を1/2000とした。高水敷の材料は長さ2m、幅40cm、高さ4.3cmの塩化ビニル製の板を5枚並べ、水路幅の40cm、高さ4.3cmの高水敷とし、その上に水制を設置した。水制は上底4cm、下底8cm、高さ2cmの台形断面で、長さを高水敷幅と同様の40cmとなるようにセメントで作成し使用した。水制の延長、洗掘モデルの作成には発泡スチロールを接続し用いた。この水制は不透水水制である。計測する水制の上流と下流に設置間隔を80cm開けて同様の水制を設置した。固定床実験及び移動床実験の水力条件を表-1、表-2に、水制の写真を図-1に示す。固定床実験では高水敷からの水深5cm、流量0.0114m³/sとし、2成分電磁流速計を用いて流速を計測した。移動床実験では中央粒径D₅₀=0.571mmの砂を使用し、第2水制と第3水制の間の高水敷区間に敷き詰めた。高水敷上水深を5cmに設定し、通水開始から90分後の河床の高さをレーザー距離計を用いて計測した。



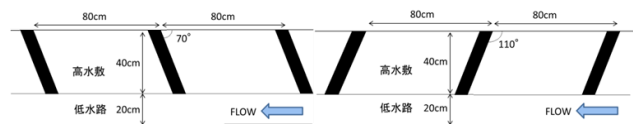
(a) 河床コンター (b) 水制周辺の河床形状
図-1 木曽川ケレップ水制の形状特性

表-1 固定床実験の水力条件

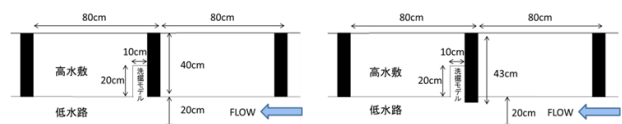
case	水制形状	水制幅 (cm)	設置角度 (°)	洗掘モデル	流量 Q (lit/s)	平均流速 U _m (cm/s)	水深 H (cm)	勾配 I
A	上向き水制	42.57	70	無	11.4	28.55	9.3	1/2000
B	下向き水制	42.57	110	無				
C-1	直角水制	40	90	有				
C-2	直角水制	43	90	有				

表-2 移動床実験の水力条件

case	水制形状	水制幅 (cm)	洗掘長さ (cm)	洗掘幅 (cm)	洗掘深さ (cm)	流量 (lit/s)	水深 (cm)	勾配
D	直角水制	40	10	20	4.3	11.4	9.3	1/2000
E								
F								
G								



(a) case A (b) case B



(c) case C-1 (d) case C-2



(e) case D



(f) case E



(g) case F



(h) case G

図-2 各実験ケースの水路平面図

4. 移動床実験：はじめに図-3に移動床実験結果を示す。case Dの実験結果、水制直下の洗掘は発生せず、砂が堆積した。水制直下で堆積したのは、水制を越流した後の下降流が底面で逆流し、砂を運搬したのものによる。64 ≤ x ≤ 80 の区間では高水敷全体で砂が移動した形跡があり、目視によっても確認できた。高水敷では低水路から高水敷に向けて洗掘が進行し、第2水制から第3水制にかけて弓型に洗掘する。洗掘した砂が下流で弓型に沿って堆積する。洗掘の維持機構を確認するため、case E, case Fでは洗掘モデルを作成し実験を行ったが、case Dと同様の現象が起り洗掘は埋まる。弓型に洗掘する現象は木曾川で確認されており、河床条件を近づけるため水制を延長させたcase Gでも、洗掘の発生機構、また維持機構は確認できなかった。

5. 固定床実験：

(1) 上向水制と下向水制の流れ構造

図-4に上向水制を用いたcase Aの流速ベクトルの結果を示す。水制の上流側では水制の堰上げ効果により流速が軽減されている。また、水制の下流側では水制の流れの遮断効果により、流速が軽減されている。底面近くのz=5.3cmでは流速の軽減とともに、右岸側へ向かう流れが発生している。流れが越流しているz=7.3cmにおいても70 ≤ x で流速の軽減が確認できるが、水制下流10cmの間では流速の軽減があまりない。これは水制直下の底面で流速が軽減され、実質的に水深が低くなり連続式の関係から流速が軽減されなかったと考えられる。水制を乗り越えた流れは重力により低水路方向へ流れ、河岸側の流速はさらに軽減される。また、水制直前のy-z平面では、水制直後で低水路から高水敷への流れが存在している。この流れにより水制を越流した流れがy=35cmで鉛直下向きに発生し、底面において河岸側へ流れる。これらの流れが渦となり、上部では低水路側へ流れが発生している。

図-5に下向水制を用いたcase Bの結果を示す。各断面の水制上流側で水制の斜面の影響により、低水路方向に変えられていることがわかる。水制直下も水制の斜面の影響により、水制を乗り越えた水は重力により流れが河岸方向に変化しており、高水敷との境では高水敷に乗り上げる流れが確認できる。上向水制に比べ水制直下での流速に変化があまり見られないのは、流れに対して下向水制の設置角度が大きいため、上向水制よりも水制による流れの遮断が小さいからと考えられる。case Aと同様に水制直下のy=37.5cm付近で流れの方向が低水路側に向いているが、これは断面z=6.3cm, 7.3cmで確認できる水制を乗り越える流れが強いため、その流速が影響しているものと考えられる。また水制直後においてcase Aと同様に低水路から高水敷へ乗り上げる流れが発生している。しかし、水制先端の水跳ねが弱いため、高水敷へ乗り上げる流れも弱くなり、case Aで発生していた水制直

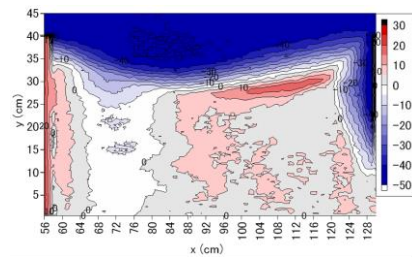
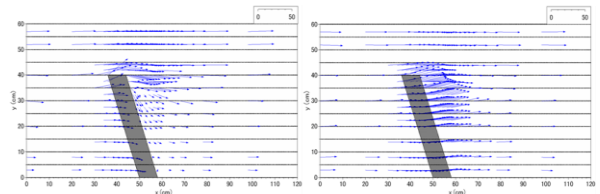
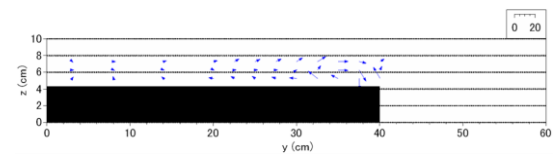


図-3 case D 河床コンター

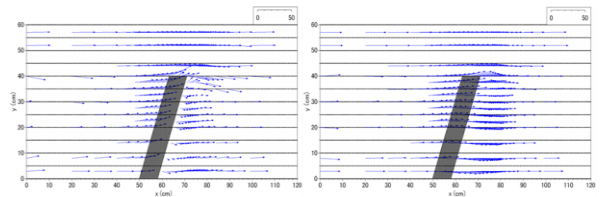


(a) x-y 平面流速 z=5.3cm

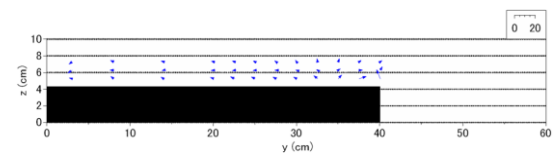


(b) y-z 平面流速 水制直後

図-4 case A 流速ベクトル

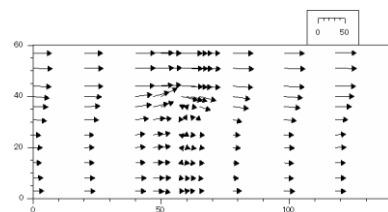


(a) x-y 平面流速 z=5.3cm

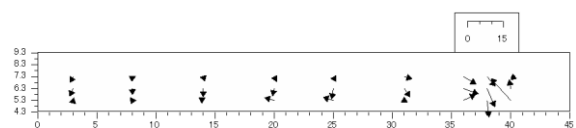


(b) y-z 平面流速 水制直後

図-5 case B 流速ベクトル



(a) x-y 平面流速 z=5.3cm



(b) y-z 平面流速 水制直後

図-6 直角水制 流速ベクトル

後の渦は発生しない。

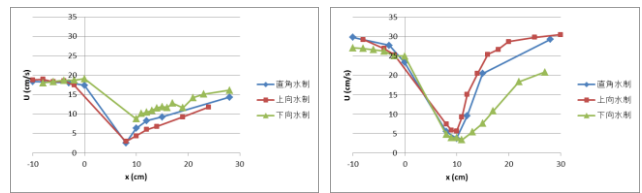
図-6に直角水制を用いた実験結果を示す。上向水制、下向水制と同様に水制先端上流で水跳ねが発生している。

また、水制先端下流で低水路から高水敷への流れによって、二次流が発生している。z=7.3cm では水跳ねと水制下流の高水敷への流れの影響があるのみで、y≤25 では水制の影響はみられなかった。低水路側へ流れる流れ構造は上向水制に似ているが、水制直後で渦は発生しない。図-7に示す流速Uの縦断分布をみると、下向水制は底面近くz=5.3cmのy=20cmにおいて水制直後の軽減率が比較的小さい。また、y=35cmで他水制と流速が同じ程度まで落ちるが、その下流からの流速の上昇率が小さい。これは下向水制が他水制に比べ、y≤30で流れを河岸側へ誘導するからである。同様に上向水制は流れを低水路側へ誘導するため、河岸側では流速が大きく軽減され、低水路近くでは流速が他水制より増幅する。図-8に示す流速Vの横断分布をみると、各水制で河岸からy=30cm付近までは河岸側への流れが発生しているが、y=37.5cm付近をピークにy=30cmから低水路側への流れに変わる。これは水制先端付近の水跳ねした流れが越流して発生したものと考えられる。また、水制の設置角度が小さくなるにつれて、y=37.5cm付近の横断方向流速が小さくなる。これは水制の設置角度が浅いほど、水制下流で発生する低水路から高水敷への流れが強くなるため、水跳ねの流れが河岸側へ押し戻されたと考えられる。

(2) 洗掘内の流れ構造

図-9にcase C-1の流速ベクトルを示す。x-y平面流速ベクトルにおいて、洗掘モデルの下流側から主流が流入し、底面で強い流れが確認できる。その流れにより洗掘モデル内でx-y平面の渦が発生し、断面z=1cmではy=30cm地点から水制直下で主流方向に向かう流れが確認できる。洗掘モデル内での流速はz=1cmが最も大きく、断面が高くなるにつれて流速は小さくなる。z=5.3cmでは洗掘モデル内の渦の影響から、水制直下で低水路側へ向かう流れが確認できる。また、y=20cmで洗掘モデル内から高水敷への流れが確認できる。断面z=7.3cmでは水跳ね効果で主流方向に流れが向いているものの、水制と洗掘モデルの影響は小さかった。y-z平面流速ベクトルのy=67cmにおいて、洗掘モデルの下流側から低水路の流れが流入することによって20≤y≤23の間で小さな渦が発生している。洗掘モデル内に侵入してきた流れは水制直下で上部へ流れるため上昇流が発生する。

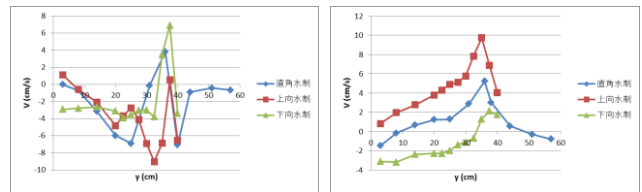
図-10にcase C-2の流速ベクトル図を示す。case C-1と同様に洗掘モデルの下流側から主流が流入するが、水制が延長されているため、case C-1より流れが流入せず流速は小さい。洗掘モデル内でx-y平面の渦が発生しており、水制直下のy=35cm付近から低水路方向に向かう流れが発生していることが確認できる。また、洗掘内の流速がcase C-1に比べ軽減されたことにより、y=20cmで



(a) y=20cm

(b) y=35cm

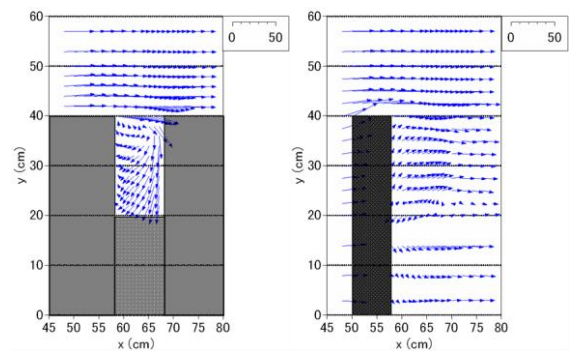
図-7 流速U縦断分布 z=5.3



(a) z=5.3cm

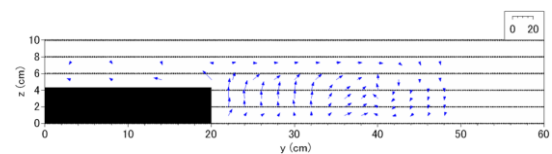
(b) z=7.3cm

図-8 流速V横断分布 水制直後

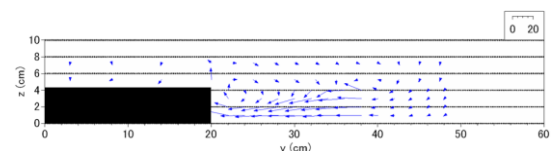


(a) z=1cm

(b) z=5.3cm



(c) y=59cm (水制直後)



(d) y=67cm (洗掘モデル下流側)

図-9 case C-1 流速ベクトル

高水敷に乗り上げる流速が軽減されている。水制直下の真上の上昇流が発生する区間はcase C-1と同様に20≤y≤34である。また、case C-1に比べ低水路に向かう流れの区間が長く、36≤y≤42の区間で発生している。水制直下での上昇流の区間がcase C-1と同じであるのは、洗掘モデル内へ流入する地点がcase C-1と同じy=40cmであるからと考えられる。水制を延長させたことにより低水路と洗掘モデルの流れの境目がcase C-1に比べ長くなっている。この効果により、洗掘モデル内ではy-z平面で渦が発生しやすくなり、z=5.3cmでは30≤y≤40にかけて低水路に向かう流速が増大している。case C-1、case C-2の両ケースとも流入する流れに対して、流出する流れは小さい。

6. 数値計算: 固定床実験の結果の信頼性を確かめるため、固定床実験の条件に近づけて数値計算を行った。また、固定床実験で行えなかった上向水制、下向水制の各水制直後に洗掘モデルを設定して数値計算を行った。計算は河川シミュレーションソフト iRIC のソルバーのうち3次元計算モデルである NaysCUBE を用い、乱流モデルには非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。図-11 に数値計算の結果を示す。流れを主流側へ誘導する上向水制の特性、河岸側へ誘導する下向水制の特性、また、洗掘モデル内の流れ構造など、固定床実験で確認できた現象を再現できた。上向水制、下向水制の各水制直後の洗掘内の流れ構造は、直角水制を用いた結果と同様に、洗掘下流側から強い主流の流入し水制直後で上昇流となって流出する。また、上向水制直後では渦が発生するのに対し、下向き水制では渦が発生せず、低水路と河岸側の2方向へ流出する流れが発生する。

7. まとめ:

(1) 水制直下の洗掘

移動床実験では、出水時の条件のみでは木曾川に存在する水制中央から先端にかけての洗掘が発生しないことがわかった。また、水制直下の移動床に洗掘モデルを作成し洗掘の維持機構を確認しようと試みたが、維持機構は存在しなかった。各ケースで共通して発生した現象としては、水制間で弓状に洗掘することが確認できた。この現象は木曾川の水制周辺にも発生しており、高水敷上の水制周辺の特有の洗掘と考えられる。

(2) 上向水制、下向水制と洗掘深との関係性

木曾川における過去の観測で、水制が上流側に向いているほど水制直下の洗掘深は浅く、下流側に向いているほど洗掘深は深いことがわかっている。今回の固定床実験の結果、上向水制は水制の遮断効果が大きいいため、下向水制よりも速度勾配が大きいことから水制直後の洗掘深が深くなると考えられる。しかし、上向水制は水制直後で渦が発生するため、砂が巻き上がることで洗掘が埋没し、上向水制の方が洗掘深が浅くなったと考えられる。

(3) 洗掘内の流れ構造

固定床実験では、水制直下に洗掘モデルを作成し、その洗掘内の流れ構造を解析した。その結果、洗掘の下流側から主流が多く流入し、水制直下で主流に比べて小さい流速の上昇流が発生した。流出量より流入量の方が多いため、移動床実験結果のように洗掘は維持できないと考えられる。この結果に対し、木曾川における水制間の弓状の河床形状に近づけ、延長させた水制を用いた洗掘モデル内の実験では、洗掘内に流入する流れが軽減される。また、水制直後の低水路へ向かう流れの範囲が広がることを確認できた。木曾川において、上記の現象により流出量が流入量を上回ることによって洗掘が維持されると推測する。

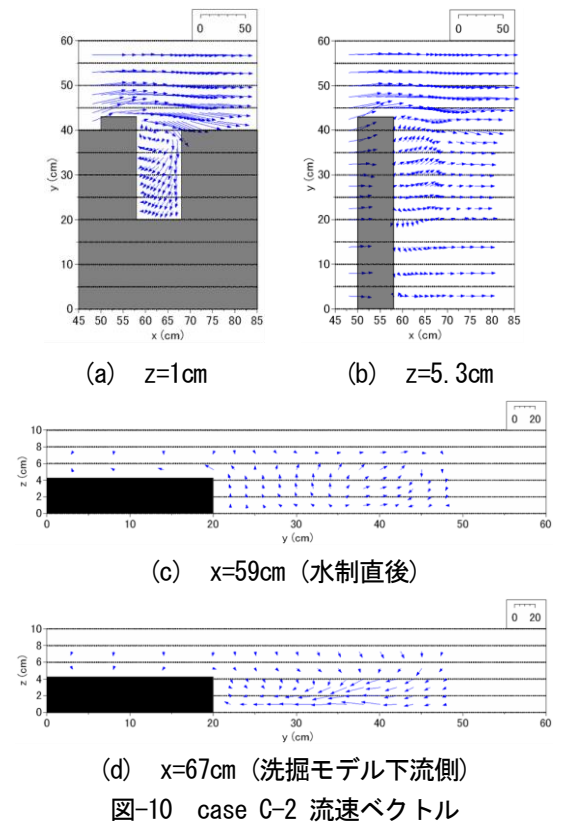


図-10 case C-2 流速ベクトル

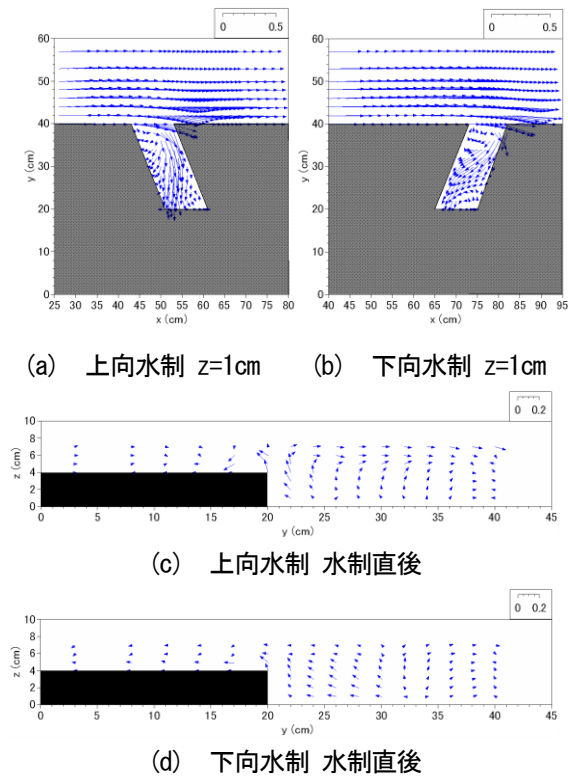


図-11 数値計算結果

参考文献:

- 1) 伊藤猛, 富永晃宏: 大規模水制下流に発生する洗掘の発生機構に関する考察, 水工学論文集, 第59巻, 2015
- 2) 脇田大介: 高水敷上の大規模水制群周辺の流れ構造に関する研究, 名古屋工業大学卒業論文, 2014