

1. はじめに 木曽川では、砂利採取やダム建設に伴い土砂供給量が減少し、河床低下が確認されている。またいくつかの箇所では河床低下に伴い粘性土の露盤化、剥離により露出した砂層の局所的な洗掘が発生しており、最大20m程度の深掘れも確認されている。このような洗掘の拡大は周辺の構造物の不安定化や破損を招く可能性があり、他の河川で発生することも懸念される。本研究では、木曽川河口から37km地点における特に洗掘深の大きい箇所を対象とし、粘性土の剥離要因を検討する。図-1で確認できるように対象区間の右岸側と左岸側の突出部をモデル化し、流路の収縮が洗掘にどのような影響を与えるかに着目して移動床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14m、幅 $B=59.3\text{cm}$ の勾配可変型開水路を使用し、水路勾配 $I=1/1000$ とした。実験は移動床実験で、平均粒径 $d_m=0.611\text{mm}$ の一樣砂を厚さ11cmで敷き詰め実験を行った。上流からの土砂供給を行っていない。以下、現地を模した河岸の張り出し部を右岸側水制、左岸側水制と記述する。設置する水制は高さ10cm、厚さ3mmのアルミ板を組み合わせ、右岸側から張り出し角度が 60° 、左岸側から 30° となるように設置した。水制設置箇所は右岸側水制と左岸側水制の最大張り出し部が20cm重なるようにした。張り出し長さ La 、 Lb は可変とした。流量はインバータモーターにより調節し、流量 $Q=8.5\text{lit/s}$ の際に移動床区間の上流端で水深 $h=5\text{cm}$ となるように調節した。ここで、平均流速 $U_m=28.7\text{cm/s}$ 、フルード数 $Fr=0.41$ である。通水開始から120分後の河床の高さをレーザー距離計を用いて x 軸方向に1cm間隔、 y 軸方向に0.5cm間隔に計測した。左岸側水制2つの水制の位置関係を図-2に、実験ケースを表-1に示す。



図-1 木曽川河口37km地点

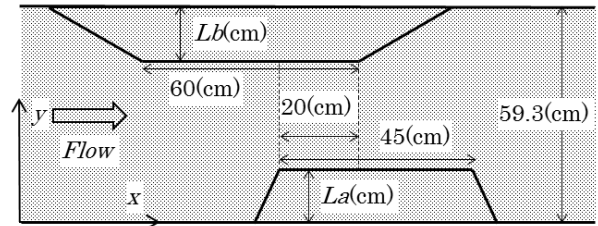


図-2 水制の位置関係

3. 実験結果 図-3に case1, case3, case5 の河床形状コンターを示す。

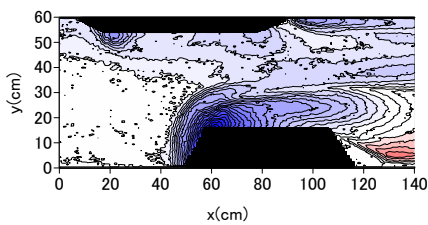
case1 については、張り出しの大きい右岸側の剥離の影響が強く、水路流速が加速され右岸側水制周辺で洗掘が発生していることがわかる。特に右岸側水制上流側では最大10cm程度の洗掘が見られた。また、流路中央付近では最大2cm程度河床低下している。右岸側水制背後では洗掘箇所の土砂が掃流砂として遷移し、堆積していることが確認された。一方、左岸側では堆積は見られず、張り出しが大きい右岸側水制の水はね効果が左岸まで到達していることが推察される。左岸側水制上流端付近でも洗掘は見られるが、洗掘深は最大4cm程度で右岸側ほど剥離流の影響は出していない。次に case3 について、洗掘深は左岸側で最大4.5cm、右岸側で9cm程度となっている。左岸側より右岸側で洗掘深が大きくなっていることより、張り出し長さよりも角度が水制回りの流れに影響を与えることが推察される。流路中央付近では、case1と同様に2cm程度の河床低下が確認された。水制背後ではどちらも堆積が確認できた。case5 についても、右岸側、左岸側共に剥離流による洗掘が見られ、どちらも水制上流側のエッジ部に洗掘が生じている。右岸側水制付近では最大8cm程度の洗掘が確認できた。

いずれのケースも右岸側剥離流の影響が強く、張り出し角度が水制回りの流れ、および洗掘深の支配要因となることが推察される。そこで、張り出し長さは case5 と同様にし、右岸側水制の角度を 30° にして実験を行った。結果を図-4に示す。流路全体で洗掘深が小さくなっており、右岸側の洗掘は case5 よりも浅い洗掘となった。流路中央の洗掘深も小さくなっており、右岸側水制の剥離流が弱くなったことにより流路全体の洗掘深が小さくなっていることが推察される。

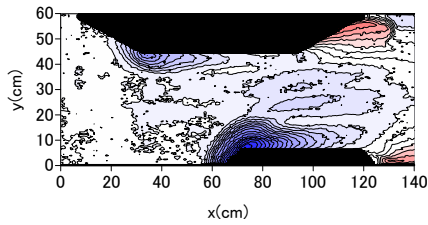
本実験ではそれぞれ張り出し部先端付近の局所洗掘が支配的となり、現地における水路中央のみにおける洗掘を再現することはできなかったが、流路中央に流れが集中し河床低下が生じることは確認できた。

表-1 実験ケース

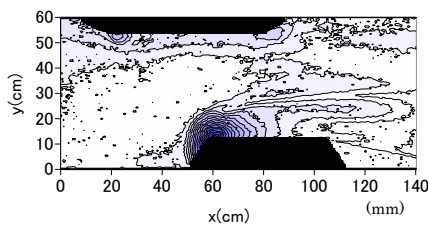
	$La(\text{cm})$	$Lb(\text{cm})$
case1	15	6
case2	15	0
case3	6	15
case4	0	15
case5	12	6



(a) case1



(b) case3



(c) case5

図-3 河床形状コンター

4. 数値計算と固定床実験 狭窄部における底面せん断応力の変化を検討するため水深平均の $k-\epsilon$ モデルによる計算を試みた. 図-5, 図-6 に数値計算で得られた case5 での水制の影響が及ばない断面での τ_{bx} の平均値で無次元化した $\tau_{bx}/\overline{\tau_{bx}}$, $\tau_{by}/\overline{\tau_{bx}}$ のコンターを示す.

$\tau_{bx}/\overline{\tau_{bx}}$ は, 右岸側水制の水はねによって水制前方で大きくなっていることが分かる. 兩岸水制の水はねによって流路中央付近に流れが集中し, 高い値を示している. 最も高い値は左岸側であり, 右岸側水制の剥離流が左岸側まで到達していることが推察される. 一方, 右岸側水制背後では $\tau_{bx}/\overline{\tau_{bx}}$ が負の値を示しており, 逆流域が存在することを表している.

$\tau_{by}/\overline{\tau_{bx}}$ の値が大きい箇所と洗掘箇所はよく一致しており, 横断方向の流れの変化が大きい箇所では洗掘が発生し, 水はねと狭窄の影響で加速された流れにより洗掘が拡大していくと考えられる.

固定床実験と数値計算の case5 における流速を比較し数値計算の精度を検証する. 固定床実験と数値計算による流速ベクトルを図-7 に示す. 実験, 数値計算共に最大流速は $x=60\text{cm}$, $y=15\text{cm}$ 付近で, 最大洗掘深が確認できた箇所と一致する. 流速分布の傾向は概ね再現できている. しかし, 実験では最大 40cm/s であるのに対し計算では 50cm/s 程度まで確認できる. これは数値計算の粗度係数を大きくすることや, 流量を実験と同様に与えることができれば改善されると考

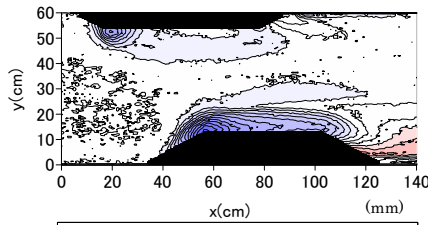


図-4 case5 角度弱

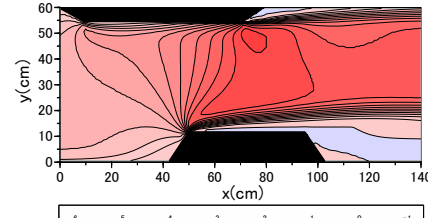


図-5 case5 $\tau_{bx}/\overline{\tau_{bx}}$

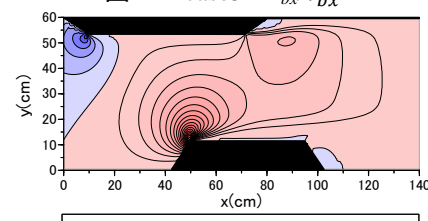
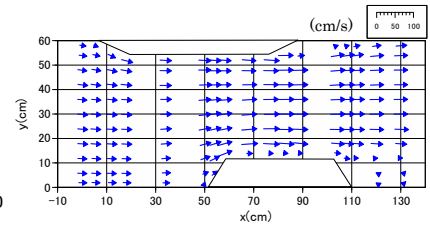
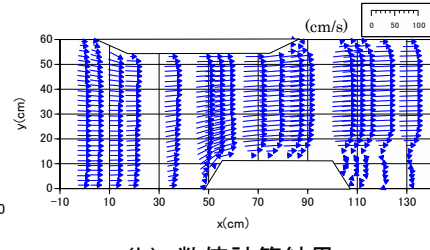


図-6 case5 $\tau_{by}/\overline{\tau_{bx}}$



(a) 固定床実験結果



(b) 数値計算結果

図-7 case5 流速ベクトル

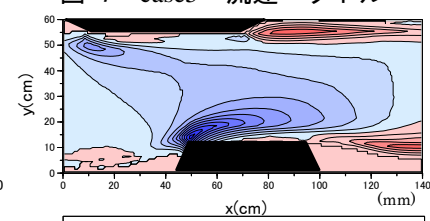


図-8 case5 河床変動計算

えられる. 多少の差異はあるものの, 数値計算の整合性を確認することができた.

河床変動計算で, 流砂量式は Mayer-Peter-Muller の式を, 無次元有効せん断応力は 芦田・道上の式をそれぞれ適用した. 図-8 に河床変動計算結果を示す. 洗掘の発生箇所は実験と一致するが, 実験では見られなかった水制背後の堆積が存在する. これは, 実験より狭窄部の流速が速く計算されていることで掃流砂が増大し, 水制背後の低速域に堆積したことが考えられる. 洗掘深は実験結果より小さく, 洗掘は流下方向に拡大している. 実験のように水制前面の局所的な洗掘は計算できておらず, 改善の余地がある.

5. おわりに 水制によって流路が収縮する際, 流れと洗掘深の支配要因となるのは水制の張り出し角度である. また, 流路の狭窄による洗掘深の増大も確認された. 数値計算は, 河床変動計算に関しては水制前方での局所洗掘の計算には改善の余地がある. 現地で見られる流路中央の深掘れを再現するには至らなかったが, 底面せん断応力は狭窄により流路中央で高い値を示し, 粘性土剥離の原因となっている可能性がある. 今後は河床地形や河床材料の影響を考慮し, 粘土層を模した実験水路での移動床実験や突出部のモデルの改善, 新たな条件を付した数値計算による検討を通して, 深掘れの発生要因を解明していきたい.

