河川狭窄部における局所的深掘れの形成過程に関する研究

名古屋工業大学　学生会員　○久野由雅　名古屋工業大学　フェロー会員　冨永晃宏
名古屋工業大学大学院　学生会員　原　悠二　名古屋工業大学大学院　正会員　佐々直彦

1. はじめに　中部地方を流れる木曽川では，粘性土層露出による深掘れが確認されている．深掘れの発生は，周辺の河川構造物の不安定化や破損を招く可能性があるだけでなく，流れ構造の変化により，生態系のバランスが崩れる恐れがある．また，木曽川をはじめとした沖積河川では，基底部となる礫層の上に粘土層や砂層が重層的に存在する地質構造をしており，他の河川でも深掘れが発生する可能性があるため，早急に原因究明が求められている．本研究では，木曽川河口から 37km 地点における，洗掘深 20m に及ぶ深掘れを対象とした．対象箇所の流路の収縮を形成条件とし，河床の移動条件の非一様性と流量の変化に着目して，移動床実験，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=59.3cm の勾配可変型開水路を使用し，水路勾配 I=1/500 とした．実験は移動床実験で，平均粒径 d_m=0.611mm の一様砂を厚さ 11cm で敷き詰め実験を行った．上流からの土砂供給は 0 としている．**図-1**，**図-2** に示すように木曽川河口から 37km 地点では，左岸の砂州の張り出しと，右岸の突出が特徴的であり，実験ではこれらを水制とみたてることでモデル化した．水制は，高さ 20cm 厚さ 3mm のアルミ板を組み合わせて設置した．流量はインバータモータにより調節し，中規模出水を想定した流量 Q=8 l/s，移動床区間の上流端で水深 h=4cm に調節して 15 分通水した後に，Q=1 l/s ずつ 1 分ごとに平常時を想定した下限流量 Q_l まで下げ，移動床区間の上流端の水深 h_l を調節した状態で 120 分通水した．本実験では，粘性土層の剥離という点にも着目し，一部の砂にアーバンテック社の簡単固まるくん（溶剤含有イソシアネート基末端ウレタン樹脂）を使用し固めることで粘性土層を再現した．粘性土層の剥離に関しても検討を行うため，水制を設置せず，一部の砂層に簡単固まるくんを使用し，流量 Q=8 l/s，水深 h=3.9cm で 120 分通水し実験を行った．通水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 間隔で計測した．水制の位置関係を**図-3** に，下限流量と水深の実験ケースを**表-1** に，簡単固まるくんにより固化した位置を**図-4** に示す．

3. 実験結果　今回，流量 Q=8 l/s 水深 h=4cm で流した後の状態を case0 とする．**図-5** に水制を設置した場合の河床コンターを示す．case0 では右岸側水制の張り出しによる剥離の影響が大きく，10cm ほどの洗掘が発生した．現地で問題となっている深掘れのある左岸側では，水制があることによって一部に流れが集中し，わずかながら洗掘がみられた．予備実験においてこの状態から流量を減らして流した時にさらに洗掘が進行することが確認された．このことから流量を低下させて実験を行ったものである．

case1 と case2 を比較すると，水深が小さい方が，左岸側の洗掘が大きくなることがわかる．右岸側水制の洗掘は case0 から最大深さをほとんど変えずに下流側に洗掘が進行した．case3 と case4，case5 と case6 も左岸側の洗掘は同様の結果であったが，右岸側水制の洗掘は下流側に進行しなかった．

本実験で現地と同様の箇所に発生した左岸側の洗掘結果に着目する．左岸側最大洗掘深 Z_{max}，フルード数 Fr，平均流速 V_1 の関係を**図-6** に示す．フルー

図-1　現地写真

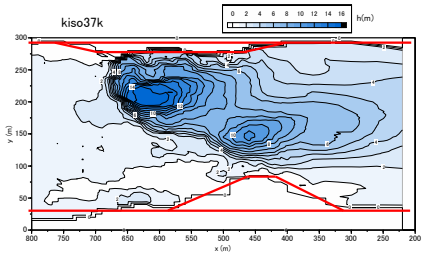

図-2　ADCP による河床高計測結果
（木曽川上流河川事務所提供）

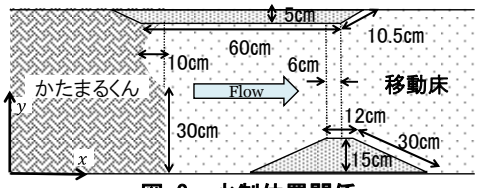

図-3　水制位置関係

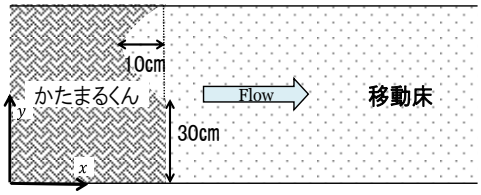

図-4　簡単固まるくん位置関係

表-1　実験ケース

	case0	case1	case2	case3	case4	case5	case6
下限流量 Q_l(l/s)	8	5	5	4	4	3	3
上流水深 h_l(cm)	4	3	2.5	2.8	2.5	2.3	2
上流フルード数 Fr_1	0.532	0.518	0.681	0.460	0.545	0.463	0.571
平均流速 V_1(cm/s)	33.33	28.11	33.73	24.09	26.98	22.00	25.30

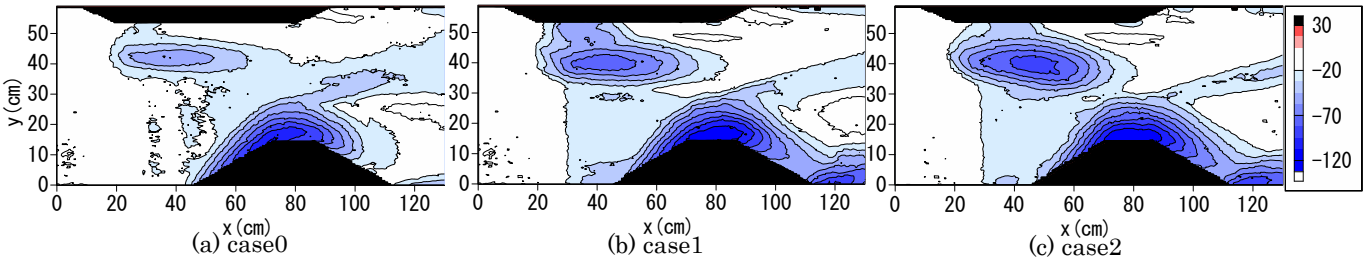

図-5　河床コンター（水制設置時）

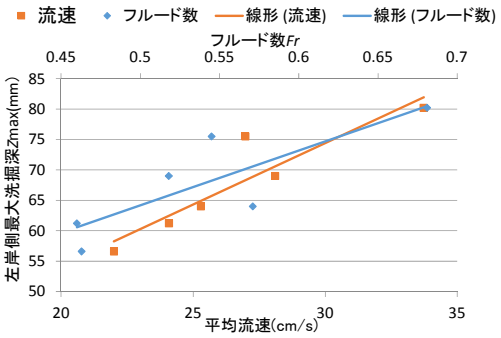

図-6　洗掘深と水理条件の比較

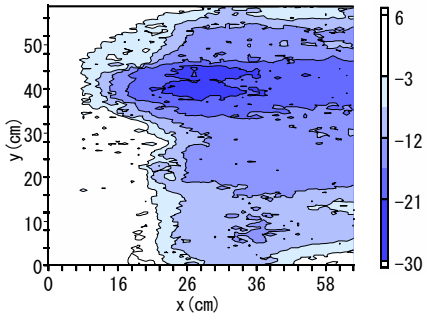

図-7　河床コンター（水制なし）

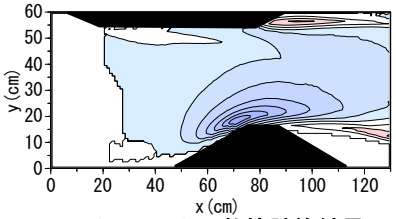

図-8　case2 の数値計算結果

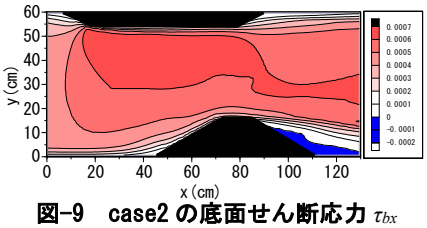

図-9　case2 の底面せん断応力 τ_{bx}

ド数，平均流速が大きくなると洗掘が大きくなる傾向にあるが，平均流速の方がより相関がみられる．流速が速いことで洗掘が進行するきっかけになっていると考えられる．また，流量低下に伴い，フルード数が大きくなり，洗掘部に下降する流れが集中してさらに洗掘が進行する可能性がみられた．

次に水制を設置していない場合の河床コンターを**図-7** に示す．全体として河床低下がみられるが，水制などの障害物は設置していないにも関わらず，左岸側で洗掘がみられる．粘性土層を模したくぼみの箇所が床止め下流の洗掘と同様の作用が働き，洗掘したと考えられる．

本実験では，粘性土層を模した部分で剥離や崩落がみられた．出水時は平均流速も速いため，粘性土を模した部分がもろくなりやすく，流量低下後もフルード数が大きくなると下降する流れの集中により剥離しやすくなり，やがて崩落すると考えられる．粘性土層のエッジ部としての働き，粘性土の剥離が深掘れの進行に影響を及ぼしている．

現地の深掘れの深さまでは達していないが，現地で発生する深掘れのおおよその形状に近づいた．出水時に深掘れのきっかけとなる洗掘が発生し，流量低下後も，一定以上の流速，フルード数であれば時間をかけて洗掘されるということが確認されたが，さらに深掘れが進行するには出水時の三次元的な流れ構造も関係している可能性があり，今後の検討課題でもある．

4. 数値計算

実験の再現性を確かめるために水深平均 2 次元の k-ε モデルによる数値計算を行った．計算条件は，実験条件と同様に流量 Q=8 l/s，水深 h=4cm で 15 分通水後に継続計算で**表-1** のケースのもと 120 分通水した．**図-8** に数値計算で得られた case2 の河床コンターを示す．case2 では右岸側水制の角の周りで掘れているものの洗掘深が小さく，左岸側での洗掘は見られなかった．**図-9** に case2 の底面せん断応力 τ_{bx} 示す．洗掘は見られないものの，左岸側で τ_{bx} の値が大きくなっており，洗掘の可能性があることが分かった．しかし，計算では，洗掘が発生するまでには至らなかった．実際は，粘性土層がエッジ部となることでその箇所の流速が速くなり，より粘性土層が流出しやすい状況が発生するが，計算ではそのような状況を作り出すことは困難であり，再現ができなかったと考えられる．他のケースでも類似した結果となり，左岸側が掘れるという点に関して再現性はなかった．今後は数値計算を行う上で粘性土層の再現も必要であることが分かった．

5. おわりに

本研究では，深掘れにつながる洗掘の発生を確認することができた．出水時に，左岸側砂州の影響を受けて一部の砂層が流出して河床が低下し，流量低下後も河床低下が発生した箇所で洗掘の進行が続くと考えられる．また，粘性土層がエッジ部となり洗掘が進むこともわかった．しかし，実験では右岸側水制が現地よりも掘れてしまっており，現地と異なる条件となっている．現地の状況をより再現できるように設備を調整したり，水制の影響をうけて洗掘が発生しない条件を検討する必要がある．今後も現地での流れをより再現できるような条件を検討するとともに，3 次元的な流れ構造も含めて具体的な深掘れの発生機構を解明していきたい．