

木曽川大規模深掘れにおける渦構造と 深掘れ拡大要因の推定

ESTIMATION OF VORTEX STRUCTURE AT THE LARGE SCOURING AND CAUSES OF EXPANSION OF THE SCOURING AREA IN THE KISO RIVER

岩見収二¹・西澤諒亮²・福岡達信²・福井治²・
河邊宏³・笠井良彦⁴・伊藤嘉⁵・齋藤正徳⁶

Shuji IWAMI, Ryosuke NISHIZAWA, Tatsunobu FUKUOKA, Osamu FUKUI,
Hiroshi KAWABE, Yoshihiko KASAI, Yoshimi ITO, Masanori SAITO

¹正会員 博(工) 株式会社建設技術研究所 中部支社河川部(〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-5-13)

²正会員 修(工) 株式会社建設技術研究所 中部支社河川部(同上)

³非会員 学(工) 国土交通省中部地方整備局木曽川上流河川事務所(〒500-8801 岐阜県岐阜市忠節町5-1)

⁴非会員 国土交通省中部地方整備局中部技術事務所(〒461-0047 名古屋市東区大幸南1-1-1)

⁵非会員 修(工) 国土交通省中部地方整備局木曽川上流河川事務所(〒500-8801 岐阜県岐阜市忠節町5-1)

⁶正会員 博(工) 国土交通省中部地方整備局(〒460-8514 名古屋市中区三の丸2丁目5番1号)

The large local scouring of which maximum depth is up to 20 meters occurs in the Kiso river, and it is still expanding. In the scouring area, complicated flow condition, such as reverse flow, is observed, and it is supposed that it has possibility to drive expansion of the scouring. In this study, vortex structures and causes of expansion of the scouring are estimated by ADCP survey and three-dimensional numerical simulation. As the result, large vortex structures, such as horizontal and vertical vortex, were confirmed. And it is estimated that the vortex contribute little to the upstream expansion of the scouring area. On the other hand, it is confirmed that strong descending current on the upstream edge of the scouring occurs at small-to-medium flood. Then it is estimated that the current drive the increase of shear stress there and upstream expansion of the scouring area.

Key Words : local scouring, vortex structure, 3D numerical simulation, ADCP, Kiso River

1. はじめに

河川で発生する局所洗掘は、その周辺の河川管理施設に支障を及ぼすなど、河川管理上の課題となる。その発生要因は、床固工や橋脚、水制工等の構造物の影響で生じるもの、湾曲外岸等の河道線形の影響で生じるもの、砂州形成に伴って生じるものなど様々である。近年、このような要因の局所洗掘に加えて、河床の堆積構造に起因する局所洗掘が生じるようになっている。例えば利根川¹⁾や浅川(多摩川水系)²⁾のように、いくつかの河川で粘性土堆積層の露出に始まる局所洗掘が報告されている³⁾。このような局所洗掘では、粘性土層の剥離によって急激に洗掘が進むこと、限定された範囲で洗掘が進行することなどが指摘されている。ダム建設や砂利採取等によって河床低下が進行している全国の河川でも同様の局所洗掘が生じる恐れがあり、今後の河川管理における重要な課題の一つになると想定される。

木曽川においても、粘性土層の露出が認められるセグメント2-2区間において、深さが20mにも及ぶ局所的な大規模深掘れが報告されている⁴⁾。その発生要因について、齋藤ら⁵⁾は、中州形成に伴う流れの集中と粘性土の剥離の観点から説明している。一方、高岡ら⁶⁾は、掃流力の増大により洗掘が始まり、三次元性の強い潜り噴流により洗掘が進行した可能性を指摘している。この深掘れの範囲は依然として拡大傾向を示しており、拡大抑制が現状の課題である。また、木曽川のセグメント2-2区間には、規模は小さいものの同様な局所洗掘が認められている⁴⁾⁶⁾ことから、広範囲にわたって粘性土層が露出している⁶⁾⁷⁾ことから、当該深掘れの発生要因や拡大要因を解明することは、木曽川の河川管理に資するとともに、同様の局所洗掘を抱える全国の河川管理に対して有用な知見を与えるものである。しかし、この深掘れの発生、拡大の詳細なメカニズムは解明されているとはいえない。

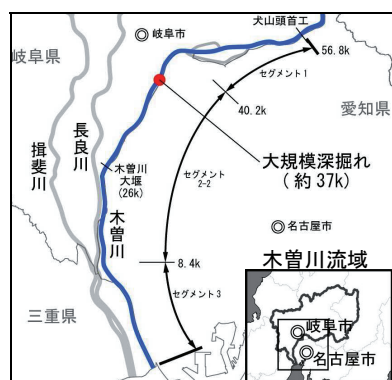


図-1 大規模深掘れ位置図

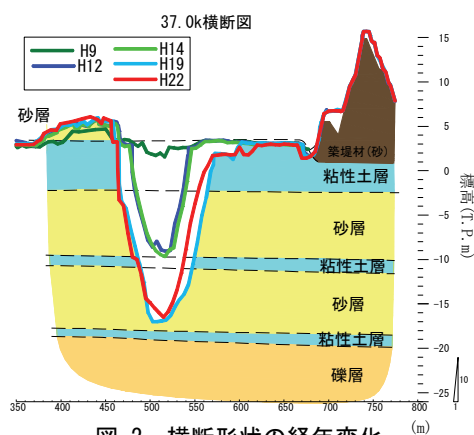


図-2 横断形状の経年変化

本研究では、深掘れ範囲の拡大抑制の観点から、現状における深掘れ範囲の拡大に着目した。現状の深掘れ箇所では逆流域が形成されるなど渦状の複雑な流況が確認されており、深掘れ拡大に影響している可能性が考えられた。そこで、超音波流速計による洪水時の流況観測を行い、深掘れ箇所の三次元的な流況すなわち渦構造の把握を行った。さらに、三次元流況解析によって洪水規模毎の渦構造を把握し、現状における深掘れ範囲の拡大要因の推定を行ったものである。

2. 大規模深掘れの拡大状況

木曽川は、流域面積5,275km²、幹川流路延長229kmの一級河川である。対象とする大規模深掘れは、河床勾配1/4,500、代表粒径0.4mmのセグメント2-2区間の河口から37k付近に位置している(図-1)。低水路河床の大部分は、昭和40年～平成12年の砂利採取や供給土砂量の減少に伴う河床低下により粘性土層が露出した状況となっている⁵⁾⁷⁾。

横断形状の経年的な変化を図-2に示す。図-2には、深掘れ近傍のボーリング調査結果から推定した堆積層を併記している。これによると、現状の洗掘深は最大20mにも及び、樹林化の進行した中州が隣接して形成されている。経年的な変化は以下のとおりである。平成9年頃から洗掘が始まり、平成12年までの短期間に-10m付近に位置する二層目の粘性土層に到達している。その後、一時洗掘の進行が鈍化するものの、平成14年から平成19年にかけて再び急激に

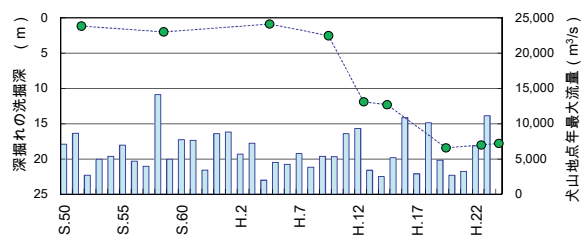


図-3 年最大流量の経年変化と深掘れの進行状況

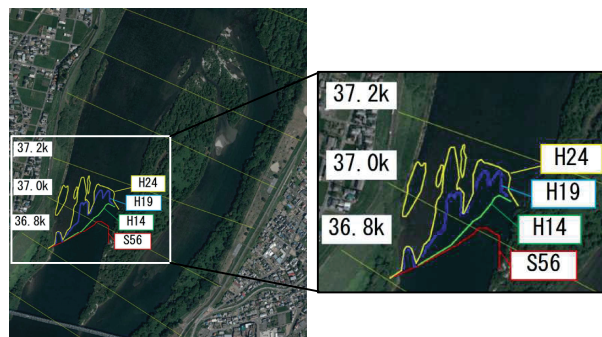


図-4 深掘れ範囲の拡大状況

洗掘が進行し、ほぼ現状規模の深掘れが形成された。図-3にこの期間の年最大流量の経年変化と深掘れの進行状況を示す。最初の洗掘期間(平成9～12年)には、8,600～9,300m³/s規模の洪水が発生し、2回目の洗掘期間(平成14～19年)には10,100～10,900m³/s規模の洪水が生じており、これらの洪水時に洗掘が進行したものと考えられる。一方、二層目の粘性土層に到達した後(平成12～14年)、一時洗掘の進行が抑制されており、粘性土の難侵食性によるものと推定されている⁵⁾。また、平成19年以降、平成23年にも11,000m³/s規模の洪水を経験しているが、洗掘は進行していない。

次に、空中写真から判読した深掘れ範囲の拡大状況を図-4に示す。図-4によると、深掘れ範囲は上流に向かって拡大していることが分かる。また、洗掘の進行が停滞している近年においても深掘れ範囲の拡大は継続している。

3. 深掘れ箇所の流況観測

深掘れ箇所では、平常時においても中州付近で逆流域が形成されており、大規模な渦構造が認められる。このような渦構造が、深掘れ拡大要因の一つになった可能性が考えられる。これより、洪水時の深掘れ箇所における三次元的な流況を把握する観点から、超音波流速計M9-HydroSurveyer ADP (SonTek)による出水時の流況観測(サンプリング周波数1.0MHz～3.0MHz、観測時間150min)を行った。現地では、超音波流速計を小型船に機装し、小型船の喫水を考慮した侵入可能範囲内で観測を行っている。対象とした洪水の流量は、木曽川の平均年最大流量6,400m³/s(犬山地点)に対して、約900m³/sの小規模出水(平成26年9月)である。図-5に、観測時の航走位置を示す。この観測結果のうち、縦断方向の測線における観測結果には、深掘れ以外の範囲にお

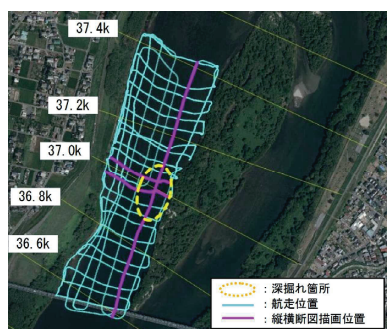


図-5 超音波流速計観測時の航走位置

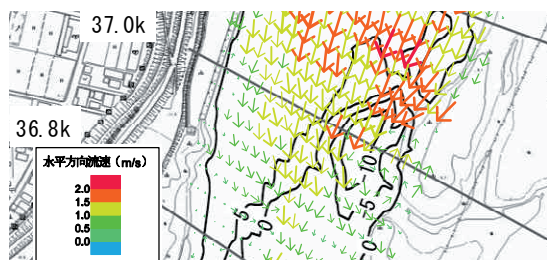


図-6 表面流速ベクトル

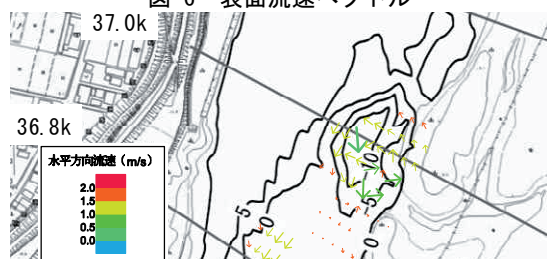


図-7 下層(水深10m)流速ベクトル

いても系統的に強い下降流が認められ、流向に正対する観測船が流況に影響を与えている可能性が考えられた。したがって、本稿では図-5の航跡線の内、横断方向の断面上のデータを用いて分析を行った。

図-6に観測された表面流速の水平方向のベクトル図を示す。これより、深掘れ箇所を覆う水平方向の剥離域が形成され、大規模な水平渦が生じている。また図-7に水深10m付近の流速の水平方向のベクトルを示す。これより、深掘れ内部でも大規模な水平渦が生じている。

1深掘れ部に流入する流れは、深掘れ孔上流端付近から右岸方向に偏向され、低水路中央側から流れ込む流れとともに低水路側の斜面付近に高流速域を形成する。その後、深掘れ孔下流端付近で左岸側に曲げられ、砂州付近で逆流域を生じ、渦を形成している。これは、低水路側からの流れ込みによって形成される右岸側斜面付近の高速領域で圧力が低下し、

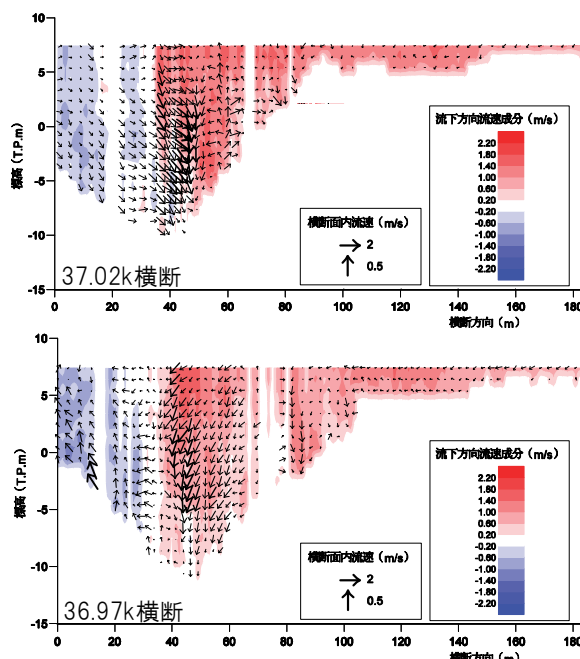


図-9 横断面内の流速ベクトル（上：上流側 下：下流側）

上流から深掘れ孔に流れ込む流れがそこに向かって曲げられ、剥離域を形成するものと推定され、中州側では、その補償流として逆流域が形成されるものと推察される。このような水平渦は、片側に淵を配置した実験水路でも確認されており⁸⁾、中州により片岸からの流入が制限されていることに起因すると考えられる。

次に、深掘れ最深部付近を通る縦断面（図-5参照）の流速ベクトルを図-8に示す。図-8より、深掘れ上流端部から最深部に向けて強い下降流が形成されている。縦断測線の観測結果からは、下降流の上流側に剥離渦が形成されていることを確認している。これらは、床固工下流等の段落ち部でみられる流況⁹⁾に似ており、深掘れ上流端部の粘性土層があたかも床固工のような役割を果たすことによって生じた流況であると想定される。深掘れ最深部付近を通る横断面での流速ベクトルを図-9に示す。図-9より深掘れ内の右岸側では順流、左岸側では逆流となり、上流側横断面では右岸に向かう下降流、下流側横断面では左岸に向かう下降流が形成されている。

これらより、深掘れ孔内では、大規模な平面渦とともに下降流が生じており、らせん状に潜り込む流れが形成されているものと推察される。

以上のように、超音波流速計による流況観測結果より深掘れ孔内の複雑な渦構造が把握された。ここ

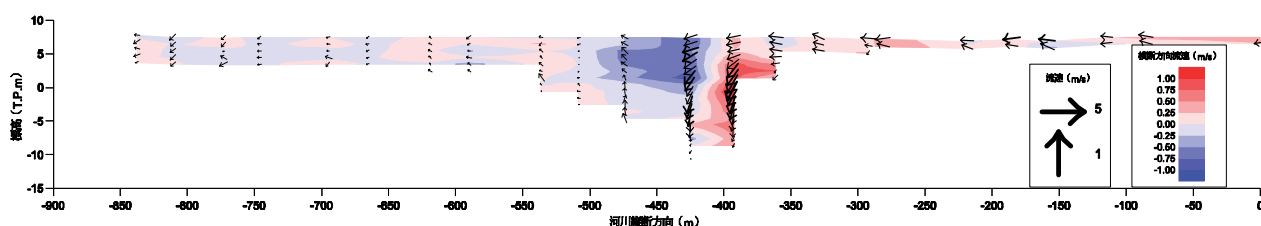


図-8 縦断面内の流速ベクトル

表-1 三次元流況解析の計算条件

項目	内容
解析手法	三次元流況解析 (iRIC-NaysCube)
計算範囲	36.2k~38.4k
対象流量	Q=900m ³ /s (平成26年9月25日 ADCP観測時) Q=2,000m ³ /s, Q=4,000m ³ /s Q=8,600m ³ /s (H11.6洪水規模)
河道形状	平成25年水中測量成果 (定期測量結果) 陸域部はLPデータ
上流端境界条件	犬山地点実績流量
下流端境界条件	痕跡水位 Q=8,600m ³ /s 等流水深 Q=900~4,000m ³ /s
メッシュサイズ	縦断方向: 約30m 横断方向: 約12m
低水路粗度係数	n=0.035 (H11.6洪水 逆算粗度)
高水路粗度係数	0.045~0.050
モデル検証	痕跡水位 Q=8,600m ³ /sで検証
流動構造の確認	ADCP観測結果 (Q=900m ³ /s)による渦構造と定性的に比較

で、段落ち部では潜り噴流によって洗掘が生じることが知られている⁹⁾が、対象としている深掘れ孔内では平面渦を伴う複雑な流況が形成されており、このような渦構造が深掘れ拡大に寄与している可能性を確認する必要がある。また、深掘れ孔内の下降流は深掘れ中層まで減衰されずに到達しており、深掘れ進行に寄与した可能性が示唆される。さらに、観測された流況は小規模洪水時のものであり、他の流量規模での渦構造は把握できていない。

したがって、次章以降では、三次元流況解析により観測された深掘れ孔内の渦構造を再現するとともに、その他の流量規模でのシミュレーションを行い、深掘れ箇所及びその周辺の底面掃流力の分布から深掘れ拡大の要因を推定する。

4. 深掘れ箇所における渦構造の流況解析

三次元流況解析には、動水圧を考慮でき、乱流の非線形性による現象を表現できるiRICソフトウェアのNaysCUBE¹⁰⁾を用いた。乱流モデルは二次非線形k-εモデル、移流項の離散化には三次精度のTVD-MUSCLスキーム、底面及び壁面摩擦の評価にはマニング則を適用した。なお、計算流量は定常で与えている。計算条件を表-1に示す。

(1) 深掘れ部流況の再現計算

超音波流速計で観測された900m³/sでの流況の再現計算を行った。粗度係数は、当該出水における水面形が観測されていないため、痕跡水位が計測されている平成11年洪水 (8,600m³/s) の水面形を概ね再現できる値として設定した。再現計算結果を図-10および図-11、図-12の900 m³/sのケースに示す。表面流速ベクトルは、観測された深掘れ孔内の平面渦の形成状況を概ね再現している。また、深掘れ孔における横断面内での順流と逆流の分布状況、上流側断面における右岸方向に向かう下降流、下流側断面における左岸方向に向かう下降流も概ね再現してい

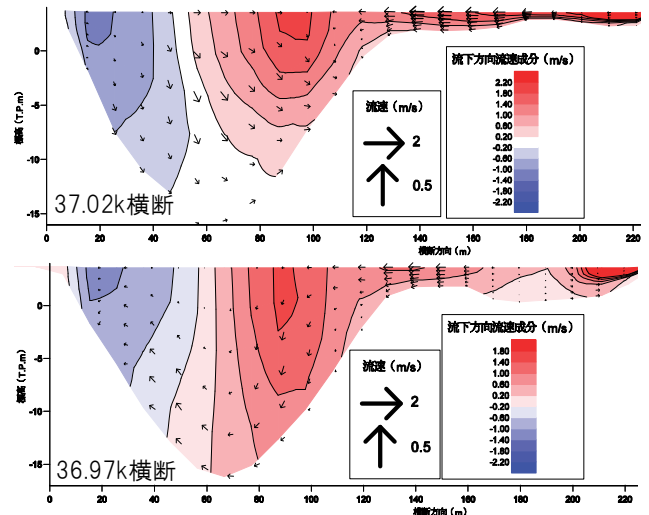


図-10 横断面内流速ベクトル(上:上流側 下:下流側)

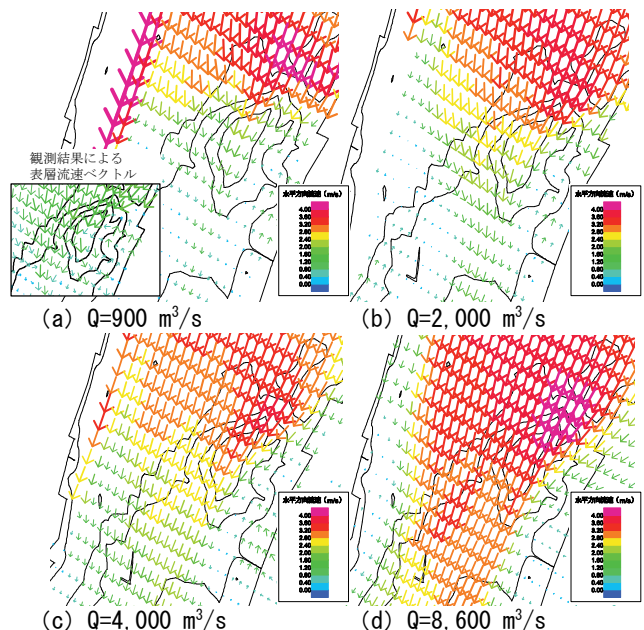


図-11 流量規模毎の表層流速ベクトル

る。縦断面内の流速ベクトルも深掘れ中層に至る下降流を再現しており、深掘れ孔流入直後付近での鉛直剥離渦も表現されている。ただし、計算結果に見られる右岸沿いの高流速など一部流速の再現性に課題がある。

図-13に表層における圧力分布として静水圧からの偏倚の平面分布を示す。これより、深掘れ孔流入直後付近における減速域の圧力が上昇するとともに、流れが集中する深掘れ側面の斜面付近において圧力の低下が認められる。これにより、深掘れ孔上流からの流れが、圧力低下箇所に向かって曲げられるため、平面的な流れの剥離と深掘れ箇所での水平渦が生じるものと考えられる。

(2) 流量規模毎の渦構造

流量規模の変化による渦構造の変化を分析する観点から、表-1に示す900m³/s~8,600m³/sの4ケースの流量での解析を行った。このうち、8,600m³/sは深掘

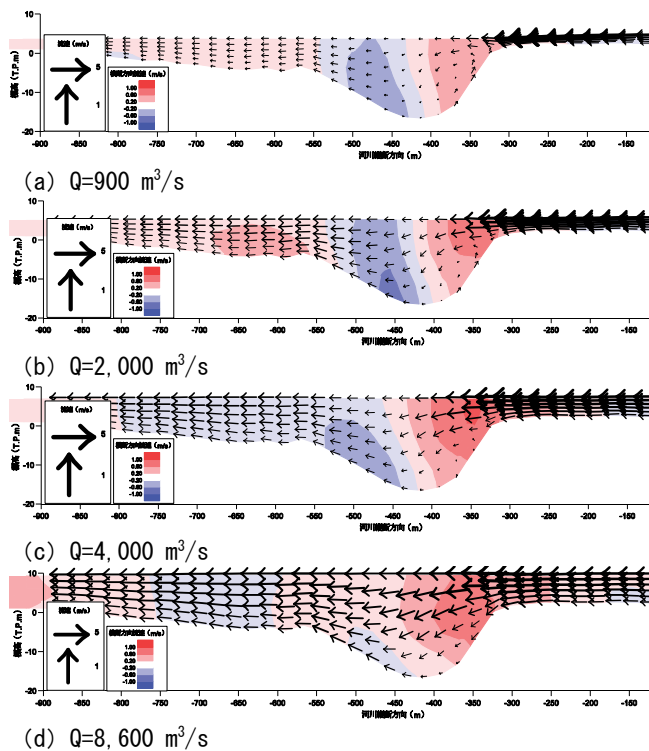


図-12 流量規模毎の縦断面内の流速ベクトル

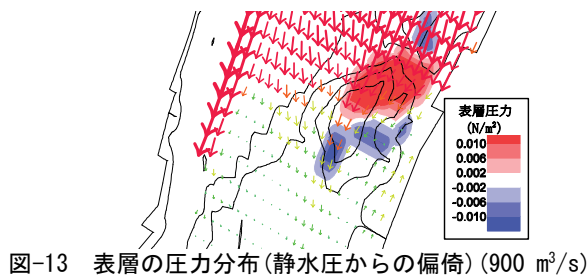


図-13 表層の圧力分布(静水圧からの偏倚)(900 m³/s)

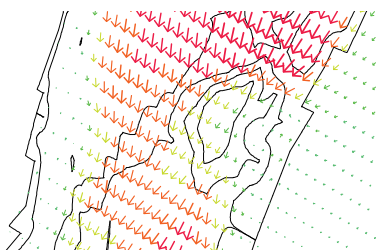


図-14 底層付近($z/h=1/6$)の流速ベクトル(8,600m³/s)

れが形成された平成11年洪水規模、4,000m³/sは中州が冠水し始める程度の流量である。また、900m³/sは前述の再現計算結果である。

図-11に流量規模毎の表面流速の水平方向のベクトル図を示す。900m³/s時に形成されていた平面渦は、流量規模が大きくなるにしたがって縮小しながら下流に移動する。特に、砂州が冠水する4,000m³/s以上になると、砂州上から深掘れ部に向かう流れが形成され、それと同時に平面渦は縮小し、8,600m³/sでは消滅している。なお、8,600m³/sでも底層付近では依然として平面渦が形成されている(図-14)。これらは、深掘れ部に隣接する中州方向からの流入の制限により大規模平面渦が形成されるとした現地観測結果からの推定を支持する結果である。また、

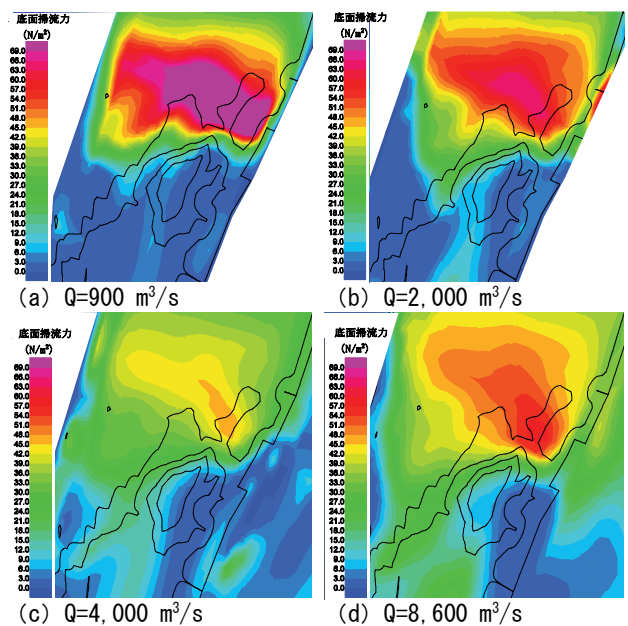


図-15 流量規模毎の底層掃流力の分布

2,000m³/s時には大規模深掘れ箇所での平面渦とともにその下流右岸際の深掘れ箇所でも渦が形成されており、深掘れによって形成される渦構造は流量規模とともに、河床形状の影響を強く受けることが分かる。

次に、最深部を通る縦断面の流速ベクトルを図-12に示す。流量規模が大きくなるにしたがって下方向に潜り込む流れが強くなり、それに伴って鉛直の剥離渦も縮小し、8,600m³/sでは消滅している。また、低流量時に上流端部から深掘れ孔に向かってわずかに落ち込む水面形が形成されるものの、このような水面形は流量の増加につれて認められなくなっている。床固工下流では、潜り噴流が洗掘孔形成に対して重要な要因となる¹¹⁾¹²⁾が、本解析では明確な潜り噴流も形成されなかった。ただし、下層付近においても表層と同程度の流速が得られており、下層に潜り込む流れは表現されている。また、本解析では定常条件のもと下流端に等流水深を与えているが、洪水の非定常性や深掘れ下流側の水位条件、さらには河床変動状況を考慮することによって潜り噴流が形成される可能性もある。

5. 深掘れ箇所の拡大要因の推定

現状においても深掘れ範囲が上流に向かって拡大していることから、三次元流況解析結果より得られる流量規模毎の底層掃流力分布よりその要因を推定した。図-15に流量規模毎の底層掃流力の分布を示す。平面渦、鉛直渦が形成されている深掘れ孔内では、流量規模によらず大きな底層掃流力は生じていない。一方、深掘れ孔の上流端部付近において、掃流力が上昇し、特に流量規模の小さい900m³/s時に顕著である。これは、深掘れ箇所下流の水位が低く、深掘れ上流端部の上下流に局所的な急勾配の水面形が形成されることに起因している。本解析結果によ



図-16 深掘れ孔上流端部
付近の水中写真



図-17 深掘れ孔の側岸端部
の洗掘状況

ると、大流量時では下流側の水位が上昇しており、深掘れ上下流の水面勾配は小さくなっている。この結果は、近年大規模洪水が生じていないにも関わらず深掘れ箇所が拡大していることと一致しており、現状における深掘れ拡大の主要因は、上流端部付近での深掘れ孔に落ち込む流れで生じる掃流力がもたらす侵食によるものであると考えられる。なお、流量規模が大きい場合にも下流水位の条件や洪水の非定常性等により上流端部の掃流力が上昇する可能性がある。図-16に深掘れ孔の上流端部付近の水中写真を示す。これを見ると、表層の粘土層の下流で砂質土層が露出し、深掘れ孔に向かって急勾配の斜面を形成している。渦等の深掘れ孔内の流速により壁面が先行して侵食される場合、高岡ら⁶⁾が指摘するような粘土層がオーバーハングする地形が形成されたのち崩落する拡大機構が推察されるが、図-16に示すように深掘れ孔上流端部ではオーバーハング地形は認められない。これらのことは、深掘れ孔に向かって落ち込む流れに起因する掃流力での深掘れ孔上流端部の侵食が深掘れ範囲の上流に向かう拡大の要因であることを支持している。

なお、深掘れ孔の深さ方向への進行は、現状では停滞しているが、これは、深掘れが最下層の礫層直上に位置する粘性土層に到達していることに加えて、掃流力の上昇をもたらすほどの流れの潜り込みが生じていないことも一因であると考えられる。

一方、深掘れが現在よりも小規模であり深さ方向への進行を継続していた過程では、現状より洗掘孔が浅いため下層に潜り込む流れにより河床の掃流力が上昇し、洗掘が進行した可能性が考えられる。また、図-17に示すように、深掘れ部の側岸端部では粘性土のオーバーハングが想起されるような河床の状況が形成されており、上流端部での深掘れ拡大とは異なるメカニズムでの侵食が生じていると考えられる。これらの深掘れの進行、拡大メカニズムは今後の検討課題である。

6. おわりに

本研究では、深掘れ孔内の渦構造と洗掘拡大要因に関して、以下の知見を得た。

- (1) 深掘れ孔内では、大規模な平面渦及び鉛直渦が形成され、複雑な三次元流況を呈している。
- (2) 平面渦及び鉛直渦は、流量規模が大きくなるに従い縮小し、やがて消滅する。
- (3) 深掘れ箇所の拡大は、上流端部において深掘れ孔に落ち込む流れによる掃流力上昇に起因

する。この掃流力上昇は中小出水規模において顕著である。

以上のように、現状における深掘れ箇所の上流への拡大要因は把握されたが、深掘れ形成後の下方向への進行過程は十分解明されていない。木曽川のセグメント2-2区間では、本研究で対象とした深掘れ程の規模ではないものの、同様の要因で形成されたと推定される深掘れが多数存在しており⁴⁾、深掘れ進行過程を解明することは今後の河川管理における重要な課題である。引き続き、モデルの精度向上を図りながら、深掘れ形成、進行過程を解明していく必要がある。

謝辞：国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室服部教室長、土木研究所自然共生研究センター永山滋也研究員、岐阜大学原田守啓准教授には深掘れの調査内容や検討方針について、多大な御助言を頂いた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 福岡捷二，池田隆，田村浩敏，豊田浩，重松良：利根川下流部における六大深掘れ原因と低水路改修の評価，河川技術論文集，第10巻，pp.119-124，2004。
- 2) 松本将能，工藤美紀男，福岡捷二：平成20年8月浅川洪水（多摩川水系）による土丹河床の大規模洗掘と河道管理方策，河川技術論文集，第15巻，pp.285-290，2009。
- 3) (財)河川環境管理財団 河川環境総合研究所：河道特性に及ぼす粘性土・軟岩の影響と河川技術，河川環境総合研究所資料第29号，2010。
- 4) 栗原太郎，浅野和広，菊池秀之，高橋伸次，黒田直樹：木曽川の局所洗掘箇所における発生要因の分析，河川技術論文集，第19巻，pp.165-170，2013。
- 5) 齋藤正徳，古賀博久，高橋伸次，稲葉傑，浅野和広，黒田直樹，柳瀬伸一，西澤諒亮：木曽川における大規模深掘れの発生要因の分析，河川技術論文集，第20巻，pp.259-264，2014。
- 6) 高岡広樹，永山滋也，萱場祐一：木曽川における深掘れの実態と形成過程に関する研究，土木学会論文集B1（水工学）Vol.70，No.4，pp.1015-1020，2014。
- 7) 永山滋也：沖積河川における露盤化と深掘れの変遷及び実態に関する研究，河川整備基金助成事業研究成果報告書，助成番号24-1215-019，2012。
- 8) 富永晃宏，橋本直彦，松本大三，島田譲治：片側に淵を有する直線河道の3次元流れの構造，応用力学論文集，vol.10，pp.825-832，2007。
- 9) 鈴木幸一，道上正規，檜谷治，M.S.Ibrahim：段落ち部の流況特性，第29回水理講演会論文集，pp.615-620，1985。
- 10) NaysCUBE Ver.3 Solver Manual : <http://i-ric.org/ja/download/get/Ec3CGB>
- 11) 鈴木幸一，道上正規，川津幸治：床固め直下流の流れと局所洗掘について，第26回水理講演会論文集，pp.75-80，1982。
- 12) 内田龍彦，福岡捷二，渡邊明英：床固め工下流部の局所洗掘の数値解析モデルの開発，土木学会論文集，No.768/II—68，pp.45-54，2004。

(2015. 4. 3受付)