木曽川大規模深掘れにおける粘性土層の破壊・ 剥離現象と深掘れ拡大要因の推定

AN ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF SEPARATION AND EXPANSION IN THE SCOURING AREA WITH CLAY OF LAYER IN THE KISO RIVER

端戸尚毅¹・蟹江盛仁¹・栁瀬伸一²・ 鈴木高³・石黒陽平⁴・下舘知也⁵ Naoki HASHIDO, Morihito KANIE, Shinichi YANASE, Takashi SUZUKI, Yohei ISHIGURO, Tomoya SHIMODATE

¹正会員 修(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 学(工) 株式会社建設技術研究所 中部支社河川部(同上)
³正会員 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)
⁴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(同上)
⁵正会員 修(国際協力) 国土交通省中部地方整備局木曽川上流河川事務所(同上)

Riverbed degradation and subsequent exposure of the clay layer have occurred in the Kiso River, which has the local scouring with 20 m in maximum water depth. To identify the progression mechanism and the causes of local scouring expanding, we investigated the riverbed morphology and flow field in case of flood by using the narrow multi-beam sonar and ADCP.

Two kinds of acoustic survey of the riverbed clarifies that the scouring area has moved upstream and developed in the direction of the left bank from 2012 and 2016. As the result of survey and numerical simulation, it is estimated that the scouring area expands when the clay clod peels from the riverbed surface.

Key Words : local scouring, clay layer, narrow multi-beam sonar, ADCP, Kiso River

1. はじめに

沖積河川では,露盤化した河床表層の粘性土層が剥離, 摩耗し下層の砂質土層が露出することで,急激に局所洗 掘が進行することが報告されている^{1),2)}.これに伴い, 周辺における護岸・護床施設や橋脚などの河川構造物の 機能維持の確保に支障をきたすことから,その発生過程 や拡大・進行要因に関する研究が進められている^{3,4,5}.

濃尾平野に位置する木曽川においても1997年(平成9 年)以降に局所的かつ大規模な深掘れが生じており⁶, また,広範囲に露盤化した河床表層の粘性土層に小規模 の局所洗掘が複数認められている.将来,大規模な局所 洗掘の発生や拡大・進行が懸念されており⁷,河道管理 の課題となっている.そのため,深掘れの形成過程や進 行・拡大のメカニズムを解明し,対策工要否の判断基準

を設定することが急務となっている. 局所洗掘の発生メ カニズムや拡大・進行に関する様々な要因が報告されて おり、高岡ら8は、潜り噴流により侵食深が増大すると ともにエッジ部が崩落することで洗掘範囲が上流側へ拡 大する可能性を指摘している.また、木曽川37k付近に 位置する大規模深掘れの進行・拡大要因に対し、岩見ら ⁹は、深掘れ孔に落ち込む流れによる掃流力上昇が拡大 に起因したと推定している.一方で、深掘れ形状の三次 元的な地形変化は調査されておらず拡大状況の変遷も把 握されていない. さらに、洪水時の流況観測データは限 られており、深掘れ周辺の河床に作用する流れ場の解明 が十分であるとはいいがたい、そこで、本研究では木曽 川37k付近に位置する大規模深掘れの発生,拡大・進行 要因の解明と将来予測に資することを目的として、浅深 測量, 流況観測及び三次元流況解析により河道形状と洪 水時の流動構造を調査し、深掘れ拡大要因を推定した.



2. 深掘れ箇所における河床地形測量

(1) 2016年(平成28年)深浅測量結果

図-1に示す河口から37k付近の中洲右岸に形成されて いる大規模深掘れ近傍のボーリング調査結果⁶⁰から推定 した地質横断図,河床表層を撮影した写真を図-2に示す. 図-2には定期横断測量による横断形状の経年的な変化を 併記している.これによると,粘性土層と砂質土層が互 層で構成されており,粘性土層は標高-2mから3m(表 層),-12mから-9m(第3層)に位置している.また, 周辺で実施した簡易ボーリング調査(掘削深5m)の結 果から,表層における粘性土層の土質材料は,上層部が 有機質土の混入が見られる有機質粘土,下層部が比較的 均質な粘土で構成されていることを確認している.

深掘れの地形形状を面的に把握するため,2016年(平 成28年)12月にビームフォーミング方式のナローマルチ ビームソナー(MB2, Teledyne ODOM Hydrographic社 製)を用いた深浅測量を実施した.測量結果を用いて, 図-3に0.5m正方メッシュで作成した陰影起伏図を示す. 表層部から最深部の標高差は約20mであり,深掘れ孔内 はすり鉢の形状であった.深掘れ孔内の上流側の斜面部 は切り立った崖状になっている.また,河床表層に粘性 土層が現存している深掘れ上流側,右岸側では粘性土層 上層部が離脱した形跡が見られる.図-4に示す深掘れ上 流部付近の水中写真から粘性土層内にオーバーハングが



図-3 大規模深掘れの陰影起伏図(木曽川37k付近)





図-4 深掘れ上流部付近 の水中写真

図-5 表層から剥離したものと推 測される粘性土塊の剥離面





形成されていること、図-5に示す河道内で散見された粘 性土塊の剥離面に有機質が混入していることから、有機 質の混入度が高く粘着力が相対的に弱い箇所が剥離して 形成したものと推察される.図-6に河床表層に粘性土層 が現存している範囲を対象として5m四方の平均河床高 との差分による正方メッシュで作成した比高差コンター 図を示す.深掘れ上流側の河床平坦部では右岸側の平坦 部と比較して微小な凹凸箇所が多く、クラックが発生す るとともに粘土質が剥離した形跡が見られる.深掘れ上 流側と右岸側における粘性土層の耐侵食性能が同様であ るものと仮定すると深掘れ上流側の河床に作用する流体 力は粘性土層の剥離限界値を上回ったことが推察される.

図-7に下流から上流方向に望む河床地形の鳥瞰図を示 す.最深部左右岸側の標高-9m付近の粘性土層(第3層) の上面では河床が概ね平坦になっていることから,この 領域は粘性土層の難侵食性によって洗掘が抑制されてい ることが推察される.図-8に河床傾斜角コンター図を示 す.深掘れ孔内の傾斜角は粘性土層(第3層)上部の平 坦部を除き粘性土層で24°~28°,砂質土層で26°~32°で ある.深掘れ孔内の粘性土,砂質土の平均粒径(D₅₀) はそれぞれ0.1mm~0.2mm,0.3mm~0.6mmであり⁶,水 中における土砂の安息角はそれぞれ25°~29°程度,26° ~32°程度¹⁰となることから,深掘れ孔内斜面部の傾斜 角は概ね水中安息角に相当するものと考えられる.

(2) 2012年(平成24年) 3D水中測量結果との比較

図-9に2012年(平成24年)5月に実施された「3D水中 測量」のとの河床高の差分図を示す.3D水中測量はイン ターフェロメトリ方式であるC3D(Teledyne BENTHOS 社製)が使用されている.最深部では鉛直方向への洗掘 の進行は認められず,最深部下流側で堆積傾向にあるこ とがわかる.一方,最深部上流側で表層の粘性土層が離 脱し砂質土層が露出した領域があり,それに伴って急激 に洗掘が進行している.最深部右岸側においても同様に 砂質土層が露出した領域があり,右岸方向に拡大する兆 候を示している.このことから,深掘れは鉛直方向に進 行していないものの,深掘れ範囲は上流に向かって移動 しつつその範囲を右岸方向に拡大していることがわかる.

次に、図-10に3D水中測量から深浅測量を実施した期間までに発生した出水を示す.平均年最大流量を超過する出水は生起しておらず、2016年(平成28年)9月20日~21日に生起した台風16号による出水(約5,700m³/s)が期間最大のものでありその他は4,000m³/sを下回る中小出水であった.また、2016年(平成28年)5月にADCP

(RiverPro, Teledyne RD Instruments社製)を用いて縦横 断方向に水深計測を実施しており、2016年(平成28年) 台風16号が生起する以前に最深部上流側,右岸側の表層 粘性土層が離脱していることを確認している.このこと から,深掘れエッジ部では約4,000m³/sを下回る中小出水 でも表層の粘性土層の離脱が生じることがわかる.併せ て中小出水時に形成される深掘れ孔周辺及び内部の流動 構造を把握する重要性が示された.











3. 深掘れ箇所における流況観測

大規模深掘れ箇所では、約900m³sの小規模出水 (2014年(平成26年)9月)を対象にADCP(M9-HydroSurveyer, SonTec社製)を用いた流況観測が実施さ れており、深掘れ内部で大規模な平面渦構造が形成され るとともに、深掘れ孔内の下降流が深掘れ中層まで減速 されずに到達しており、深掘れの拡大、進行に寄与して いる可能性があることが示唆されている⁹. そこで、異 なる流量時の流動構造を比較するため、ADCP

(RiverPro, Teledyne RD Instruments社製)を用いた曳航 観測を実施した.観測は縦横断方向それぞれ10m~20m 間隔で実施し,ADCPを操作艇(トリマランB型:高速 低揺動型)に設置し観測船から十分離すことで,観測船 回りの流れ場の影響を排除した.対象とした洪水の規模 は,約300m³/sの豊水流量相当の出水(2016年(平成28 年)12月),約1,200m³/sの小規模出水(2016年(平成28 年)5月)であり深掘れ左岸の中洲をほぼ冠水する流量 (約3,000m³/s,準二次元不等流解析による)を下回る.

図-11に水深別の水平方向ベクトル図を示す. これよ り、流量規模に関わらず深掘れに流入する流れは深掘れ 上流端付近から右岸方向に偏向され、低水路右岸側から 流れ込む流れとともに深掘れ右岸側の斜面部に高流速域 を形成する. その後, 深掘れ下流端で左岸側に大きく偏 流され中洲右岸近傍では逆流域が発生し、それに伴って 河床から表層まで大規模な水平渦が発生している.水平 渦の大きさを比較すると,豊水流量相当の出水よりも小 規模出水は深掘れ下流側左岸部で縮小している.水平渦 は下層付近においても表層と同程度の流速を有しており、 水深10m付近の流速ベクトル図から流量規模が大きいほ ど鉛直下方向に潜り込む流れが強いことが推察される. また,水深0m(表層)付近の流速ベクトル図から,深 掘れ左岸側付近は36.8kから37kにかけて上流側に比べ流 路が狭くなっており,低水路右岸側から左岸側へ偏流し た流水が集中していることがわかる. これにより深掘れ 右岸側で表層の粘性土層が剥離・離脱し砂質土層が新た に露出したものと推察される.

次に、小規模出水時における深掘れ最深部付近を通る 縦断面の流速ベクトルを図-12に示す.最深部の流速ベ クトルが河床から1m程度プロットされていない領域は ADCPの計測不能な領域である.深掘れ上流部では相対 的に流速が大きく河床の凹凸にあわせて上向き方向の成 分を有する流れが見られる.また現地調査時に非定常性 の局所的な乱れを確認している.これらのことから表層 の粘性土層が局所的に剥離しやすい水理条件であること が示唆される.なお、深掘れ最深部付近を見ると上流部 では右岸に向かう下降流、下流部では左岸に向かう上昇 流が形成されており、約900m³/sの小規模出水で形成さ れた「らせん状に潜り込む流れ」⁹ は確認できなかった.



図-11 水深別水平方向ベクトル図 (左:豊水流量相当約300m³/s 右:小規模出水約1,200m³/s)



図-12 縦断面内の流速ベクトル(小規模出水約1,200m³/s)

表-1 三次元流量解析の計算条件

項目	内容
解析手法	三次元流況解析
計算範囲	36.2k~38.8k
対象流量	Q=1,200m ³ /s :2016(平成28年)年5月 ADCP観測時
	Q=2,000m ³ /s
	Q=4,000m³/s :深掘れ左岸中洲が冠水する流量を 上回る規模
	Q=6,300m ³ /s :平均年最大流量
河道形状	深掘れ部:2016年(平成28年)深浅測量結果
	深掘れ部以外:2015年(平成27年)定期測量成果
	陸域部: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	等流水深
メッシュサイズ	縦断方向:約10m(36.4k~38.2k),約20m(左記以外)
	横断方向:約5~10m
低水路粗度係数	n=0.035 (H11.6洪水逆算粗度)
高水敷粗度係数	n=0.045~0.050

4. 木曽川深掘れにおける流況解析

大規模出水を対象とする流況観測(曳航観測)は困難 であり、また、微地形の形状に起因する局所的な流動構 造を捉えることはできない.そこで、数値シミュレー ションによって深掘れの進行・拡大要因を推定した.

(1) 解析手法·解析条件

洗掘の発生機構や拡大,進行要因の解明を目的とした 三次元解析は様々な河川で取り組まれている^{例えばIII}.本 研究では微地形の形状に作用する流体力を含めた考察を することを目的とし三次元流況解析によるものとした. 乱流モデルは二次元非線形性*k-ε*モデル,底面及び壁 面摩擦の評価にはマニング則を適用した.計算条件は岩 見ら⁹による「深掘れ部流況の再現計算」を基とし**表-1** に示す.河道形状を最新時点のデータに変更しメッシュ サイズを細分化した.なお,計算流量は定常で与えてい る.

(2) 解析結果と考察

図-13に3m間隔の等高線を併記した底層付近の水平方 向流速ベクトル図を示す.平面渦は流量規模が大きくな るにつれて縮小し,深掘れ左岸の中洲上から深掘れ孔に 向かう流れが生じる平均年最大流量時では消滅している. 図-14に0.5m間隔の等高線を併記した底層付近の流速コ ンター図を示す.表層に粘性土層が残存する河床平坦部 では4,000m³/s時に流速が最大となる.中洲が冠水するも のの中洲上に密に繁茂した樹木群が流下を阻害しており, 中洲右岸の低水路部に流水が集中したことによるものと 考えられる.また,河床平坦部の流速は局所的に不規則 な変化を有していることから,多数のクラック等によっ て河床面に現出した凹凸形状の影響を受けていることが 推察される.次に,図-15に流量規模毎の底面掃流力の



図-15 流量規模毎の底面掃流力の分布図



図-16 底面付近における揚力の 図-17 底層付近(z/h=1/6)の
分布図(Q=4,000m³/s)
鉛直方向流速コンター図

分布図を、図-16に底面付近における単位面積あたりの 揚力の分布図を示す. 揚力係数は河床上の砂粒子の揚力 係数¹²C_L=0.34と仮定した. 底面掃流力, 揚力ともに深 掘れ上流部の表層からエッジ付近にかけて大きくなり河 床地形測量で得られている洗掘箇所(図-9)と一致する. このことから,深掘れ孔に落ち込む流れ(図-17)が侵 食に影響を与えるものであると考えられる. また,河床 平坦部には局所的に1,000N/m²を上回る揚力が作用して いる箇所があることから,このような揚力が侵食面に作 用し河床表層の粘性土層から粘性土塊を剥離する要因と なることが示唆される.

5. おわりに

本研究では、木曽川における大規模深掘れの拡大要因 を把握する基礎調査として、マルチビーム浅深測量、 ADCPを用いた流況観測により、河道形状と洪水時の流 れ場を把握した.その結果、深掘れ上流側、右岸側では 有機質の混入度が高く粘着力が相対的に弱い箇所が剥離 されているものと考えられる.また、深掘れ孔内斜面部 の傾斜角は概ね水中安息角に相当するものと考えられる ことから、表層の粘性土層の離脱後に形成される深掘れ 形状の概略推定が可能となった.平均年最大流量を下回 る中小出水で表層の粘性土層の離脱が生じ、深掘れ上流 部では表層の粘性土層が破壊され剥離しやすい水理条件 であることが示唆された.さらに深掘れ孔内では下層付 近においても表層と同程度の流速を有する水平渦が形成 され流路の狭窄化とあいまって高流速域を形成すること が確認された.

また、三次元流況解析を行い深掘れ箇所に作用する流体力を分析した.計算結果から、表層に粘性土層が残存する河床平坦部では、河床面に現出した凹凸形状の影響を受けて相対的に強い流体力が作用していることが示された.このため、侵食面に作用する流体力が粘着力を上回り、その結果として局所的に粘性土塊が河床から離脱することが示唆された.

一方で、木曽川全域の地質構造(位置,層厚)の詳細 は把握できていない.また、粘性土には有機質土が多数 混入しておりその粘着力は地先により様々であるものと 推察されるが粘性土の性質(硬さ,粘着力等)は未調査 である.このため,引き続き,深掘れ形成,進行・拡大 メカニズムを解明するための調査を継続するとともに, 併せて河道管理に資する実用的な洗掘予測モデルを構築 し,効率的な予防保全型の維持管理や対策工要否の判断 をしていくことが必要である.

謝辞:名古屋工業大学富永晃宏教授には深掘れ調査の内 容について多大なご助言を頂いた.ここに記し謝意を表 する.

参考文献

- 1) 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.
- 2) (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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 忠津哲也,鈴木研司,内田龍彦,福岡捷二:洪水流による土 丹河床高さの経年変化と堰周辺の砂州変形に伴う洗掘深の増 大について,河川技術論文集,第15巻,pp.249-254,2009.
- 6) 栗原太郎,浅野和弘,菊池秀之,髙橋伸次,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.
- 7) 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.
- 高岡広樹, 永山滋也, 萱場祐一:木曽川の深掘れの実態と形 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.
- 9) 岩見収二, 西澤諒亮, 福岡達伸, 福井治, 河邊宏, 笠井良彦, 伊藤嘉, 齋藤正徳: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, 河川技術論文集, 第21巻, pp.137-142, 2015.
- 10) 久宝保:土砂の水中傾斜角について,土木技術,第6巻,第 5号, pp.637-642, 1951.
- 伊藤猛, 冨永晃宏: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,土木学会論文集B1(水工学)71(4), I_1153-I_1158, 2015.
- 池田駿介:移動床河川の湾曲部における二次流と動的横断 衡河床について、土木学会論文報告集、第299号、pp.55-65、 1974.

(2017.4.3受付)