

固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の 誘発と樹林化抑制対策に関する研究

STUDY ON RIVERBED DEFORMATION CAUSED BY FLOOD DISTURBANCE
RESULTING FROM CHANNEL EXCAVATION AND FORESTATION
CONTROL MEASURES ON A STABLE GRAVEL BARS

松田浩一¹・内堀寿美男²・清水義彦³・石原正義¹・藤堂正樹⁴

Kouichi MATSUDA, Sumio UCHIBORI, Yoshihiko SHIMIZU,
Masayoshi ISHIHARA and Masaki TODO

¹正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ (株) 河川部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

²国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所 調査課 (〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3)

³正会員 工博 群馬大学大学院工学研究科 教授 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

⁴正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ (株) 河川部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

Gravel-bed rivers in Japan are now facing a multitude of problems relating to fluvial environment and flood control. These problems include the growth of riparian trees on riverbeds and the high-speed water flow in a low-flow channel, which became pronounced due to increasing channel degradation and cross-sectional elevation change that are triggered by the change in external factors. This study aims to propose effective measures for reproducing gravel bars by leading flood flow over vegetated bars. The bed excavation over the vegetated gravel bar in the segment-1 zone of Watarase River was conducted for the management of riverine trees and the recovery of gravel bars with geomorphic changes caused by flood disturbance. As result of the field survey before and after 2009's flood in Kiryu Ohashi Bridge area, an effective bed variation was caused in the channel excavation area around on a stable gravel bar and it was confirmed that channel excavation was effective forestation control measures on a stable gravel bars.

Key Words : *Bed excavation, gravel-bed river, flood disturbance, riverbed deformation*

1. はじめに

近年、わが国の礫床河川の多くでは、外力変化に伴う低水路河床低下と横断面内比高差の拡大により、河道内の樹林化、低水路部の高速流の発生など治水・環境上の問題が生じている。これらの問題に対して、砂州の切り下げや河道掘削等により、冠水幅や冠水頻度、掃流力の増大による礫河原再生の取り組みが全国で行われている。

上記のような手法に対して、本研究では自然の営力により河川環境の改善、維持管理頻度の低減等を目標として、冠水頻度が小さい固定砂州内に掘削した水路（以下、掘削路と呼ぶ）により、中小洪水（出水）時に砂州内部での洪水攪乱を誘発させ、固定砂州の侵食による低水路部の流速の緩和と樹林化の抑制を目指すものである。

本論文は、上記のような掘削路により河道管理の改善の取り組みが行われている利根川水系渡良瀬川を対象として、出水前後の調査等を通じて掘削路の効果を検証したものである。

2. 渡良瀬川における掘削路の整備状況と桐生大橋掘削路における洪水観測の概要

(1) 渡良瀬川における掘削路整備

足利市、太田市、桐生市を流れる渡良瀬川上流部は、昭和20年代は、みお筋が左右に自由に蛇行する礫床河川であったが、上流草木ダムの建設や堤防整備、高水敷造成などといった人為的インパクトにより、低水路の固定化による水衝部の顕在化、比高差増大による樹林化の進行などの問題が生じている。このような課題に対して、河川管理者である国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所では、施策の一つとして、維持管理の軽減や河道管理における治水対策施設の規模の縮小を目的として複数箇所掘削路の整備を試験的に実施している。

掘削路は、目的に応じて水路規模が大きく異なるが、このうち樹林化対策で今後の攪乱を多く期待する桐生大橋掘削路(写真-2)は河床幅が5m程度であり、低水路幅に対する割合は3%となっている。一方で、水衝部対策を目的とした下流の足利市内の緑橋に設置された掘削路

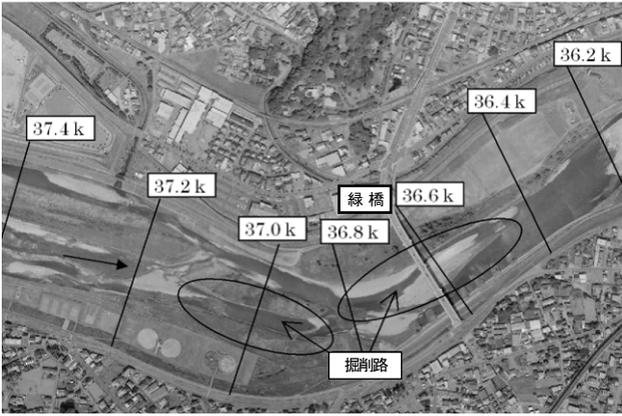


写真-1 緑橋掘削路

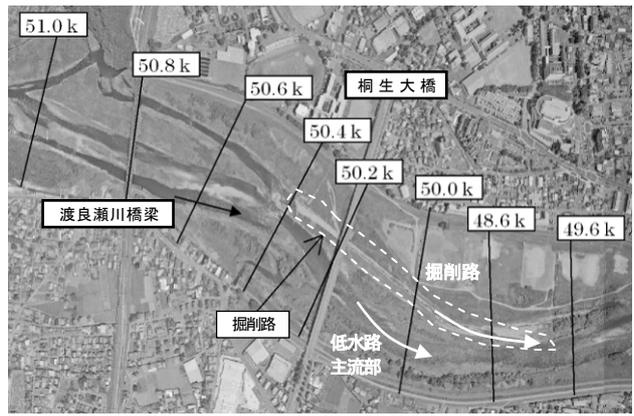


写真-2 桐生大橋掘削路

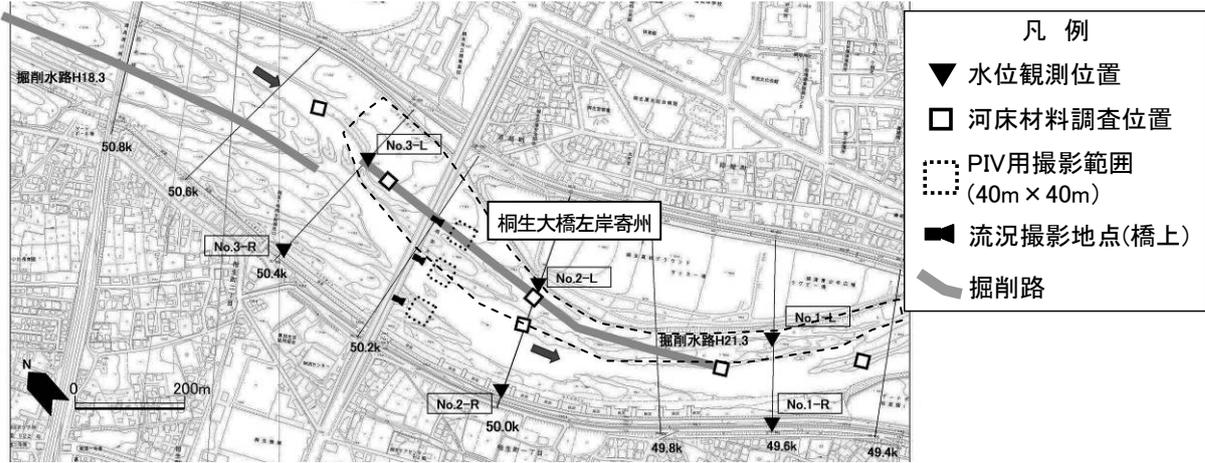


図-1 桐生大橋掘削路 観測施設配置・観測位置状況

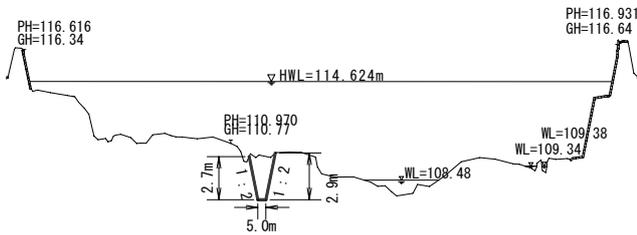


図-2 桐生大橋掘削路 横断面

表-1 桐生大橋掘削路諸元

設置箇所	施工年	掘削路幅 (河床幅) (m)	水深 (m)	掘削路 延長 (m)	掘削路 勾配	掘削路幅 /川幅	目的
距離標 49.6k~ 50.4k	H21.3	5.0	2.7 ~ 2.9	675	約1/110	2.8%	樹林化対策 水衝部対策



写真-3 桐生大橋掘削路 (平成21年5月)

(写真-1)は、河床幅26m、低水路幅に対する割合は約17%程度であり、目的に応じた様々な諸元の掘削路により、その機能や効果の検証が行われているところである。

(2) 桐生大橋掘削路における洪水観測

今回対象とした桐生大橋の掘削路は、樹林化対策を主目的としており、今後出水を受けて攪乱されることを期待しているもので、当初の施工断面は河床幅5m、深さ3m程度と小規模のものである(図-1、図-2、表-1)。

この掘削路を対象として、洪水時の流況や洪水前後の

砂州の状況、河床材料の変化、掘削路の形状変化の把握を目的とした洪水観測を実施した。図-1に水位・河床材料・流速(PIV)の観測施設配置・観測位置の状況を示す。

この掘削路は、平成21年3月に施工され、観測開始時(平成21年5月)までは大きな出水は受けておらずほぼ施工時のままの状況であった。このときの掘削路表層の河床材料は $d_{60}=26\text{mm}$ 程度であり、一方低水路は粗粒化が進んでおり $d_{60}=130\text{mm}$ の石で覆われていた。常時は掘削路に水がわずかに流れるような敷高に設定されている。また、施工前にはハリエンジュなどの樹木が多く繁茂する箇所であったが、樹林化対策により、樹木は全て伐採・伐根された状態であった(写真-3)。

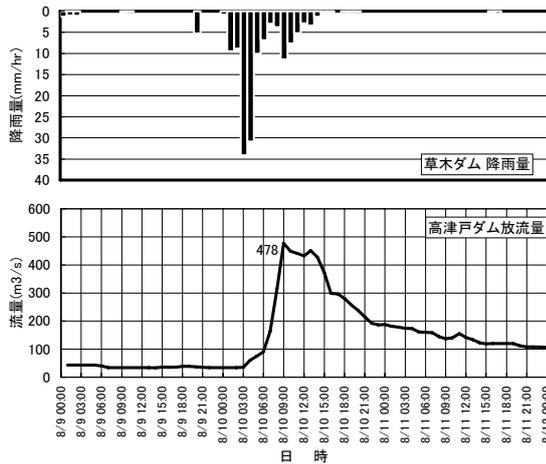


図-3 平成21年8月台風9号におけるハイエト・ハイドログラフ
(草木ダム地点・高津戸地点)

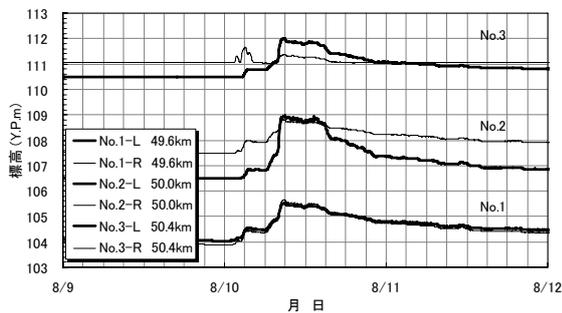


図-4 平成21年8月台風9号洪水での桐生大橋地点水位観測結果

3. 平成21年8月洪水の概要と掘削路による洪水攪乱の効果

(1) 平成21年8月台風9号による出水状況

観測期間中に発生した平成21年8月10日台風9号による出水により桐生大橋掘削路は浸水し、掘削路にも速い流れが生じた。出水前後の状況を写真-4(1)(2)に示す。

流量規模は、対象地点上流にある高津戸地点において約480m³/sであり、途中の小支川や残流域からの流入を考慮すると桐生大橋地点では約530m³/s程度の洪水規模であったと推測される。高津戸地点の流量ハイドログラフ、及び上流草木ダム地点のハイエトグラフを図-3に示す。桐生大橋の平均年最大流量は既往資料より580m³/s程度であることから、今回の出水は平均年最大流量よりやや小さい規模の出水であった。

水位については、水位観測記録から、桐生大橋地点では8月10日午前8時前頃から急激に水位が上昇し、午前9時頃に本出水でのピーク水位を迎えている(図-4)。このときの水位は、50.0k付近では、左岸の高水敷(グラウンド)には達しないものの、掘削路の河岸肩から約1mの水深が発生する程度まで上昇している。

流速については、PIV及び電波流速計による表面流速観測の結果、低水路主流部で最大3.8m/s、掘削路部で最大3.2m/sの流速であり、掘削路と主流部では主流部の方が速く、その差は0.6m/sであった。



写真-4(1) 常時の桐生大橋掘削路流入部

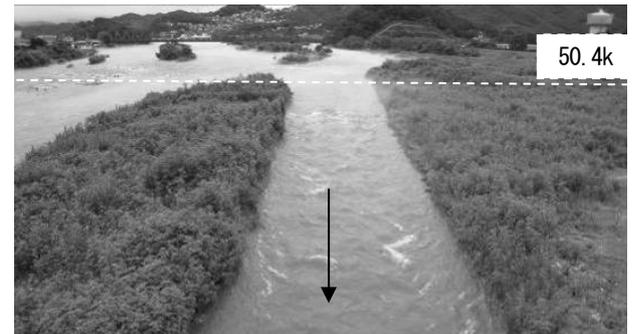


写真-4(2) 平成21年8月洪水時の桐生大橋掘削路流入部
(8/10 12:30)

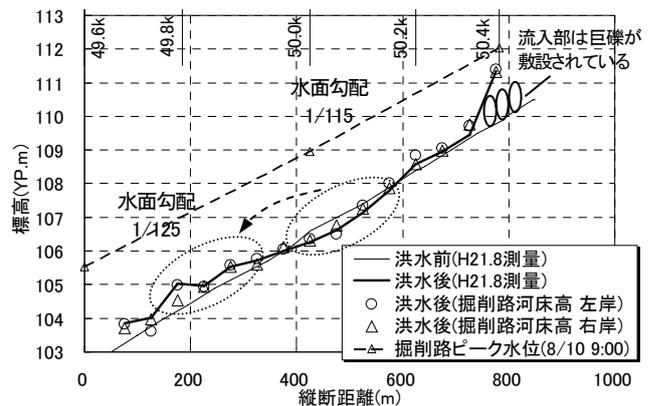


図-5 洪水前後の桐生大橋掘削路河床高縦断面図

(2) 河道の攪乱状況

出水前後の地形測量調査、及び河床材料調査により、掘削路による攪乱効果がどれほどのものであったかを検証した。

出水前後の掘削路断面の測量調査では、掘削路河床高の縦断形は中間部の50.1k前後で河床高が最大30cm程度低下しており、その侵食された土砂がそれより下流側に堆積する傾向が見られた(図-5)。下流側の49.8k付近では左岸側の掘削路法面が崩れており、土砂堆積とともに流れが一部蛇行したような跡が確認された。堆積開始箇所は平面的に掘削路が本川に近づき、水位が高いときには流れが合流し始める箇所であり、湾曲部の内岸側にもあたることから、この箇所掘削路上流側よりも流速が落ちて、堆積が始まったものと推測される。

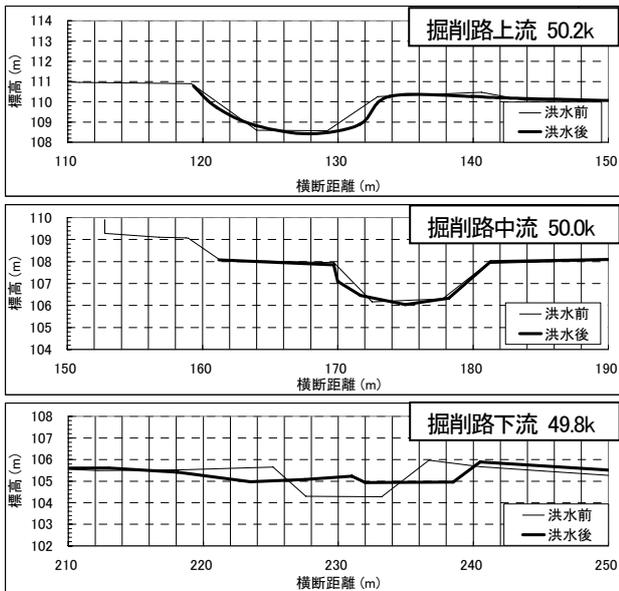


図-6 出水前後の掘削路横断比較

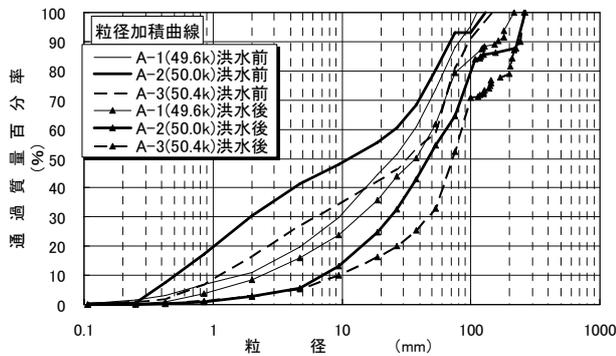


図-7 出水前後の掘削路粒度分布の比較

横断形状では、図-6に示すとおり、掘削路の中・上流部では左右岸に最大20cm程度の側方侵食が確認された。全体的に両岸が連続的に侵食されているが、50.2kでは右岸が、50.0kでは左岸の方が侵食が顕著であり、直線水路である掘削路に蛇行的な流れが生じようとしていることが想定される。下流側の49.8kでは、前述したとおり、河岸は侵食され、掘削路の水路幅は2倍程度に大きく広がっているが、上流側で侵食された土砂が堆積し、河床高が70cm程度上昇している。

河床材料については、洪水前後の掘削路河床の粒度分布を図-7に示す。掘削路の粒径は上・中・下全ての地点において大幅に大きくなっており、代表粒径 d_{60} では、出水前が $d_{60}=25\sim55\text{mm}$ 程度であったのに対し、出水後は $d_{60}=50\sim85\text{mm}$ 程度となった。今回の出水により、特に10mm以下の細粒分が多く流出したと考えられ、写真-5(1)(2)に示すとおり、現地でも出水後の河床には明らかに粒径が大きい礫が目立つようになった。

掃流力の観点から見ると、表-2に示すとおり、掘削路の50.0k地点の水理諸量から無次元掃流力により評価すると、出水前の無次元掃流力は、 $\tau_* = 0.475$ となり、砂の



写真-5(1) 出水前の桐生大橋掘削路 (7月31日)



写真-5(2) 出水後の桐生大橋掘削路 (8月21日)

移動の目安となる限界無次元掃流力 $\tau_{*c} = 0.05$ により評価を行うと、十分に侵食される状態であったと言える。一方、出水後の掘削路の河床材料から算出した代表粒径による無次元掃流力は、 $\tau_* = 0.197$ まで低下し、かなり粗粒化されていることがわかる。なお、この時の低水路部の河床材料は出水前後とも代表粒径で $d_{60} = 120\sim130\text{mm}$ 程度で無次元掃流力評価では $\tau_* = 0.06$ 前後となっており、今回の出水では低水路部の河床はほとんど移動していないと推測される。

表-2 出水前後での掘削路部の無次元掃流力

	出水前	出水後
河床高 (YP. m)	106.60	106.60
最高水位 (YP. m)	108.96	108.96
水深 (m)	2.36	2.36
水面勾配	1/115	1/115
代表粒径 d_{60} (mm)	26.2	63.0
摩擦速度 u_* (m/s)	0.448	0.448
無次元掃流力 τ_*	0.475	0.197

$$\text{※} u_* = \sqrt{ghi} \quad \tau_* = u_*^2 / \text{sg}d_{60}$$

水深 h は観測した水位と河床高との差を利用
勾配 i は観測した水位からの水面勾配を利用

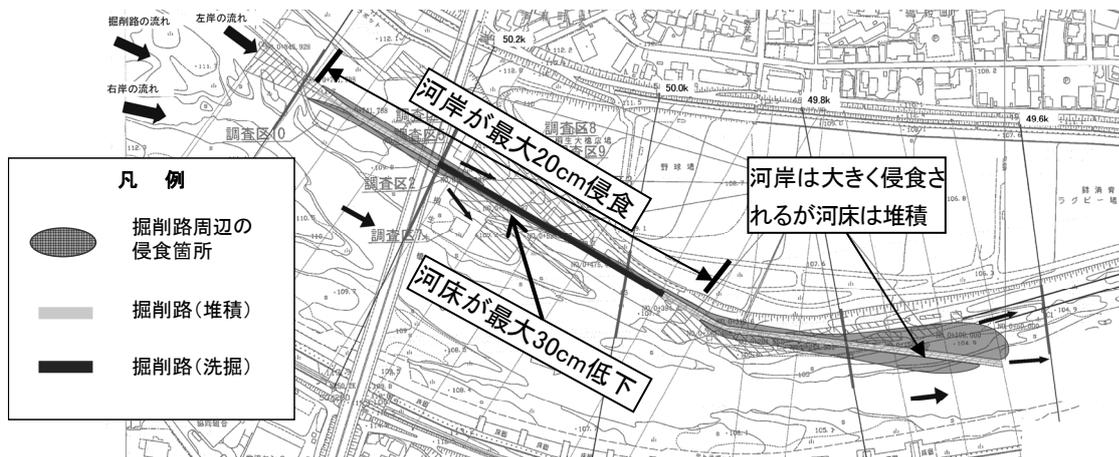


図-8 桐生大橋掘削路における平成21年8月洪水における攪乱状況

(3) 掘削路による攪乱効果

図-8は洪水観測前後の地形測量から得られた今回の出水での掘削路周辺の形状変化(=攪乱状況)を平面的に示したものである。同図における攪乱状況、及び前項までの観測結果から、今回の出水において掘削路設置により以下に示すような河道攪乱の効果が確認された。

- 図-7の出水前の粒度分布に示すとおり、桐生大橋の寄州はもともと細粒分が多く含まれていた。このような砂州に掘削路により流れを誘導することで、今回のような平均年最大流量以下の小規模出水でも、掘削路内の細粒分を流下させるには十分な掃流力が発生した(表-2)。
- この結果、細粒分が流下し、図-6の横断比較図に示すとおり、河岸部は侵食され掘削路幅が広がった。
- 掘削路から流下した細粒土砂は、図-5の掘削路河床高縦断面図に示すとおり、一部掘削路下流部に堆積したが、多くは本川下流部に流下したと推測され、掘削路設置による本川低水路部への一定の土砂供給が実施されたと思われる。これは今後河道内の比高差低減につながる効果と言える。

また、今回得られた事象から、今後予想される掘削路の挙動、効果としては以下が想定される。

- 河岸部は今回流出した土砂と概ね同様の細粒分を含む粒度構成と想定されるため、今回と同規模程度の洪水が発生すれば、侵食を受け、さらなる掘削路幅の拡大や、蛇行の進行が予測される。
- 河床部は、図-7の出水後の粒度分布に示すとおり、今回の洪水で粗粒化が進んだため、これ以上の極端な河床低下は発生しないと予測される。
- 掘削路を設置している砂州自体が移動するような大規模洪水が発生すれば掘削路が閉塞する恐れがあるが、そのような洪水の発生確率よりも今回の洪水規模前後の洪水発生確率の方が高いため、今後も平均年最大流量前後の出水により、現在の掘削路を起因として砂州内の攪乱を誘発する効果が期待できる。

- 最終的には、出水により掘削路の幅が広がれば、掘削路が副水路(セカンダリーチャンネル)として機能し、攪乱の継続と同様に本川主流部の流速低減効果にもつながると予想される。

4. 掘削路による流速低減効果

(1) 流況解析モデルの概要

前述までのとおり、桐生大橋の掘削路は平均年最大流量前後の出水により、引き続き攪乱が誘発され、掘削路が拡大していく可能性が示された。今後、掘削路が拡大していった場合、樹林化抑制効果だけでなく、洪水時に掘削路への流量分担が多くなり、主流部の湾曲部外岸の流速を低減させる効果も期待される。そこで、固定床の平面二次元流解析により、掘削路による流速低減効果を解析した。本検討では、掘削路設置による流速変化を主目的とし、固定床として変化前後の掘削路形状を想定して掘削路設置による流速低減効果を評価することとした。

平面二次元解析は、対象区間を桐生大橋を含む49.0k~52.0kとし、FEM法による三角形メッシュのモデルとした。最小メッシュ幅は2m程度とし、河床高は平成21年定期横断測量より設定した。検証は、平成19年9月洪水で検証を行った諸量を平成21年河道に反映させた。河道樹木は、樹木を一様の剛体とみなして形状抵抗として計算モデルに反映させ、河道内樹木の密度は、最新のH13樹木調査から、樹木範囲はH21航空写真から設定した。

(2) 掘削路による流速低減効果

検討対象とした掘削路は、当初施工された河床幅5m、法面1:2.0の掘削路と、今回出水での最大拡幅幅(49.8kで水路天端幅約25m)を目安として、当初施工された掘削路の2倍の大きさ(河床幅10m)の掘削路の2ケースとした。対象流量は、今回の出水H21.8洪水(526m³/s)、近年最大洪水H19.9洪水(845m³/s)、1/10洪水(1840m³/s)の3ケースとした。代表例として、図-9にH19.9洪水での流速分布を、図-10に同じくH19.9洪水での掘削路設置前後の流速差分布を示す。

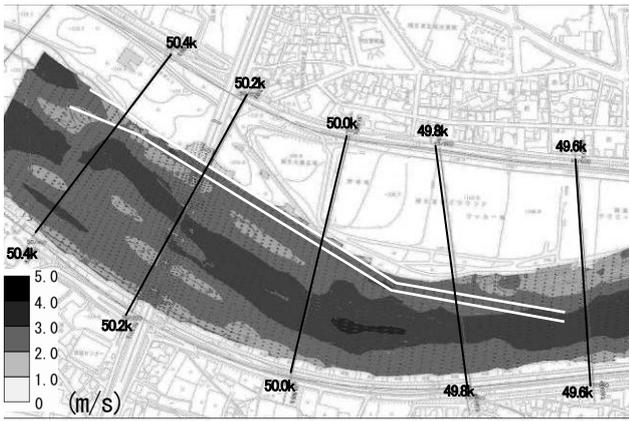


図9(1) 流速分布図 当初規模掘削路 H19.9洪水 (845m³/s)

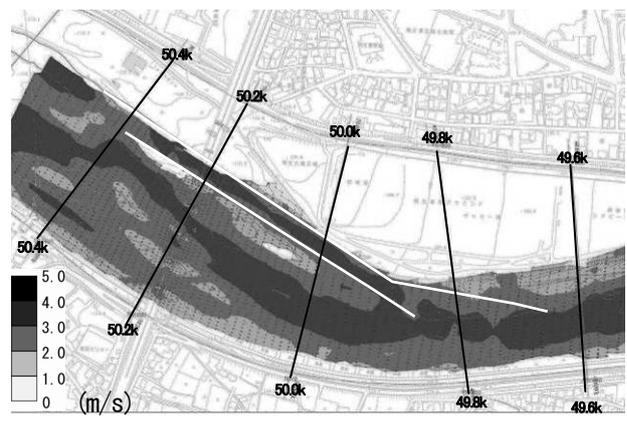


図9(2) 流速分布図 拡幅後掘削路 H19.9洪水 (845m³/s)

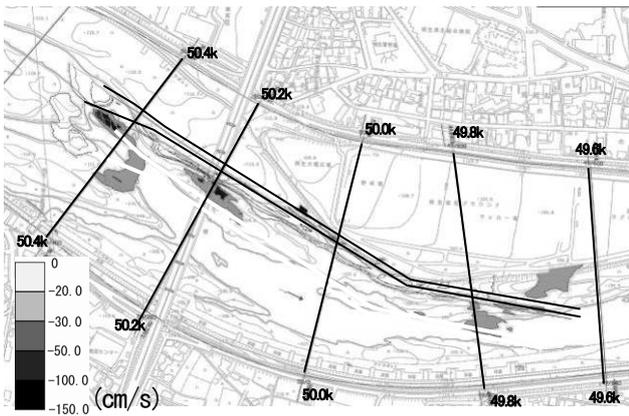


図10(1) 掘削路ありなしでの流速差
当初規模掘削路 H19.9洪水 (845m³/s)

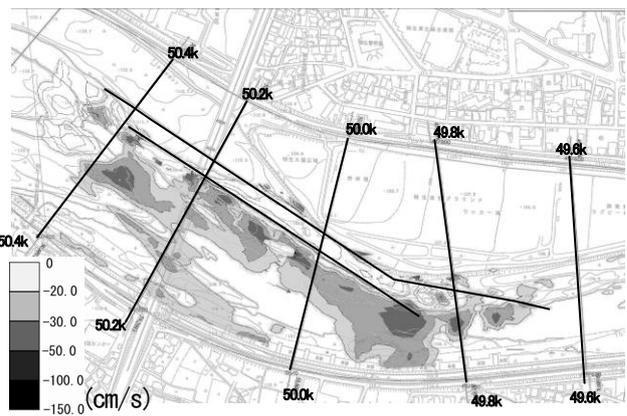


図10(2) 掘削路ありなしでの流速差
拡幅後掘削路 H19.9洪水 (845m³/s)

掘削路設置後の流況としては、図9(1)のように、当初規模掘削路ではどの流速規模であっても主流部の低水路の方が掘削路よりも流速が速い傾向であった。しかし、拡幅後の掘削路では、H19.9洪水や1/10洪水など規模の大きい洪水では、掘削路と低水路主流部との流速はほぼ同等か、場所によっては掘削路の方が速い場合も見られた(図9(2))。

掘削路による流速低減効果は、図10(1)のように、当初規模掘削路では対岸の流速を低減させるような効果はどの出水規模においても発揮されなかった。これに対して、拡幅後掘削路では、どの出水規模においても広範囲に流速低減効果が確認された(図10(2))。これは低水路と同様な機能を掘削路が発揮し、洪水流量を分担した効果によるものである。

掘削路はこのようなセカンダリーチャンネルとして治水的な機能を発揮すると共に、常時はワンドなどの低流速の場として機能する可能性もあり、環境的機能の発揮も期待できる。

ただし、今回の1/10洪水での平面二次元流況解析の結果、掘削路の延長線上の対岸の流速がやや上昇する傾向がみられた。今回実施したケースでは護岸そのものに影響を及ぼすような流速にまで上昇しているわけではないが、今後1/10洪水のような流量規模が大きくなった場合も想定した掘削路の計画が必要であることが確認された。

5. おわりに

本研究は、渡良瀬川の桐生大橋掘削路を対象として、現地での洪水観測を中心に掘削路による砂州の挙動・攪乱状況、掘削路による効果を評価した。その結果、掘削路により平均年最大流量以下の出水でも十分な攪乱効果があり、樹林化対策の一助になる可能性を示した。また、平面二次元流況解析により、掘削路が拡大すればセカンダリーチャンネルの機能を発揮し、湾曲部外岸の流速低減効果を発揮する可能性を明らかにした。

今後はより詳細な掘削路河岸部の河床材料調査等を行った上で、側方侵食を含んだ掘削路を含む河道の挙動について、側方侵食を考慮した河床変動解析を実施し、様々な掘削路のパターンでの掘削路の挙動、効果について検討していきたい。

参考文献

- 1) 岩見収二・清水義彦：洪水攪乱誘発に対する中州掘削と河床材料の効果，水工学論文集第53巻，pp.601-606，2009.2
- 2) 清水義彦・小葉竹重機・岡田理志・新船隆行・岩崎工：洪水攪乱によるハリエンジュの破壊・再生と河道内樹林化について，河川技術に関する論文集第6巻，pp.59-64，2000

(2010.4.8受付)