

洪水攪乱の誘発を目的とした 中州掘削工事の効果評価とその考察

STUDY ON RESTORATION FOR REPRODUCEING GRAVEL BARS IN A FORESTED RIVER BY USING FLOOD DISTURBANCE

清水義彦¹・岩見収二²・石川陽介³・佐藤文泰⁴・磯田忠生⁵・遠藤武志⁶

Yoshihiko SHIMIZU, Syuji IWAMI, Yousuke ISHIKAWA, Fumiyasu SATOU,
Tadao ISODA and Takeshi ENDOU

¹正会員 博(工) 群馬大学大学院工学研究科 准教授 (〒376-8515 桐生市天神町1-5-1)

²正会員 工修 群馬大学大学院工学研究科 博士課程 (〒376-8515 桐生市天神町1-5-1)

³ 工修 前橋市役所建設部 (〒371-8601 前橋市大手町2-12-1)

⁴国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所 所長 (〒326-0822 足利市田中町661-3)

⁵国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所 管理課長 (〒326-0822 足利市田中町661-3)

⁶国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所 調査課長 (〒326-0822 川越市新宿町3-12)

Recently, riparian trees in the course of gravel-bed rivers have been very much increasing, while gravel beach without vegetation has been very much decreasing. This study aims to propose effective measures for reproducing gravel bars by leading flood flow over forested bars. The bed excavation over the forested 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. After a flood on September 2007, an effective bed variation was caused in the excavated area which made a secondary channel due to active sediment transport by flood flow. As results of the field survey before and after the 2007's flood and numerical study on riverbed deformation, the proposed bed excavation method can be regarded as an effective restoration for the management of gravel-bed river with forestation.

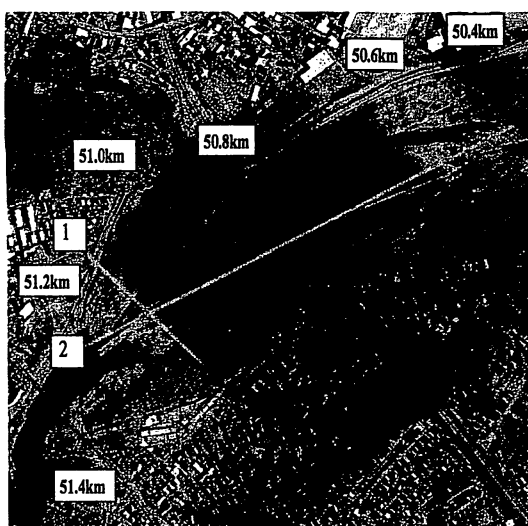
Key Words : *Bed excavation, gravel-bed river, flood disturbance, riverbed deformation, restoration, Robinia pseudo-acacia, river forestation*

1. はじめに

最近の数十年におけるわが国の礫床河川の多くでは、低水路の河床低下と横断面内比高差の拡大によって、非冠水領域や洪水攪乱の軽微な領域の出現、植物の過剰な繁茂、低水路の固定化、低水路周辺での洪水攪乱の集中などが生じている。こうした特徴が顕著に現れ、かつ、植生化が進んだ利根川水系渡良瀬川の礫床区間では、長年、河道内樹林の繁茂が河川管理上の重要な課題として取り組まれてきた。しかしながら、樹林のほとんどを占めるハリエンジュは、丁寧な伐根を行っても礫床内に破断した根茎が残存し、翌年には著しい萌芽が生じ、2~3年で林の再生が生じている¹⁾。

一方、こうした河川環境の劣化を改善するために、砂

州の切り下げ、河道掘削を行って、冠水頻度の増加と掃流力の増大を通じて礫河原再生を目的とした河川工事がなされるようになってきた^{2), 3), 4)}。しかしながら、それら多くの検討が低水路と隣接する砂州部分の比高を下げ、冠水範囲を広げるものであるのに対し、本研究では上流からの低水路流れを砂州内部に引き込む形で砂州の部分掘削を行い、中小洪水において砂州内部で洪水攪乱を生むことを期待した。すなわち、渡良瀬川礫床区間にあって狭窄部下流に形成する樹林化した中州を対象に、平成18年度に砂州内部の部分掘削を行い、中小洪水時に中州内部に流水を導き有意な河床攪乱(流砂運動と河床変動)を誘発することで樹林化の抑制と礫州再生をねらう工事を完了した。本研究は工事完了後生じた平成19年9月出水(台風9号)を通じて、この掘削工事の効果評価を行い、樹林化の進む礫床河川におけるこうした対策の有

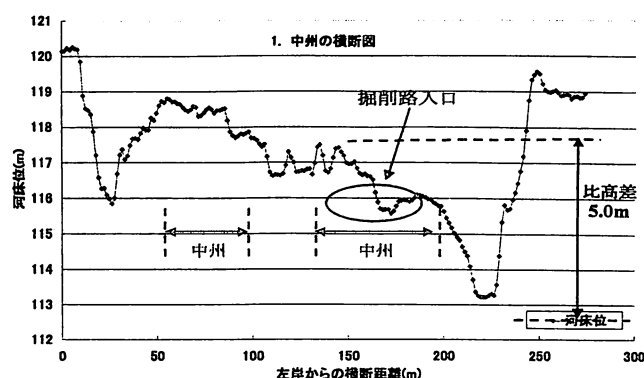


図－1 対象中州の平面形状

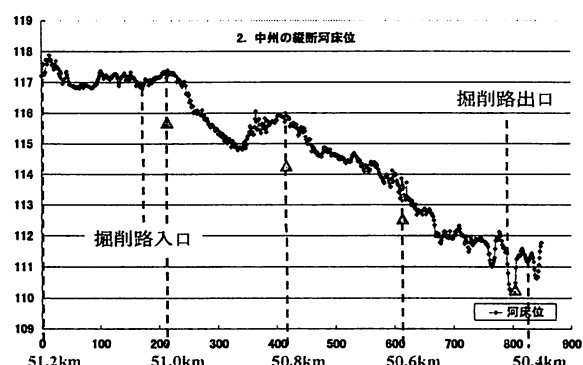
効性を検討したものである。

2. 対象河道の特性と中州掘削工事の概要

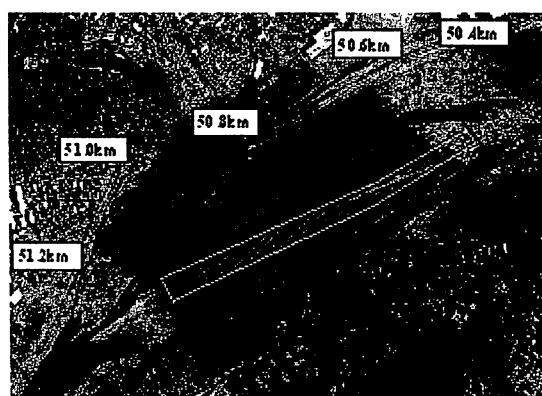
対象とする中州は河床勾配1/130程度の礫床区間にある狭窄部下流に位置する。低水路は中州で分岐し、右岸側低水路には中州先端付近から下流にかけて落差の大きな瀬が形成され、このため中小洪水では右岸側を集中して流れる。ここでの最深河床と中州との最大比高差は約5.0mにもなり、これが中州の冠水頻度低下とともに攪乱規模も低下させている（安定域の出現により恒常的にハリエンジュ樹林地が形成されている）。一方、低水路で粗粒化が顕著に進み、その河床表層は20cm～30cm程度の石で覆われている。図－1は掘削前の中州の垂直空写真（距離杭位置も併記）であり、掘削部分（掘削路）の入り口の上流にある砂州先端付近の横断ライン(1)と掘削路を予定する縦断ライン(2)について掘削前の地形をレーザープロファイラ測量から調べた。図－2は横断ライン(1)の地形（掘削前）を示したもので、掘削路の入り口上流端（中州上流端）は既往出水のフラッシュを受けやすく、新たに掘削を施さなくても良いものと判断した。一方、図－3に示す掘削路予定の縦断ライン(1)から50.8km付近に1m程度の凸地形があるものの、51kmから100m程度、50.8kmから掘削路下流端まで急勾配な地形（1/70～1/100程度）が存在し、ここに出水を導くことで有意な洪水攪乱が得られるものと判断した。中州掘削箇所は、上流側低水路との位置関係を踏まえ、中小洪水時に低水路とつなぐ形で掘削路に流水が導かれるよう平面2次元流解析で考慮した。樹木の伐採・伐根を行って掘削し、その掘削形状は幅40m、中州を縦断する長方形（深さは約1m-1.5m）で中州のやや右岸側に配置し、掘削路左右岸側は現状形状を残した。また、掘削路上下流端の中州も現状のままとした。掘削範囲を図－4に示す。



図－2 掘削前の中州における横断ライン1の横断地形
(丸で囲んだ箇所が掘削路入口の上流にあたる)



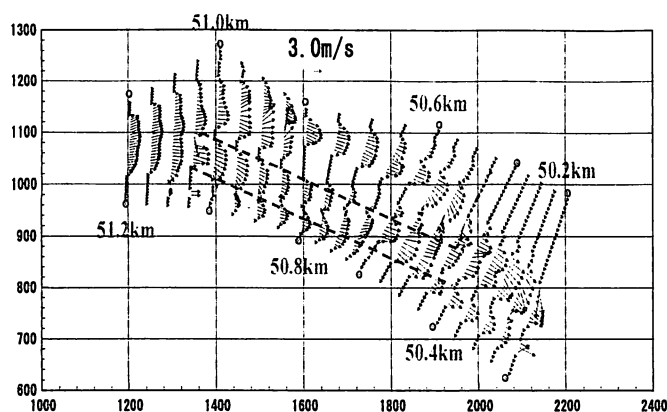
図－3 掘削前の中州における縦断ライン2の地形
(51.0kmから50.4km付近が掘削路を施す縦断ライン1)



図－4 中州内の掘削箇所

3. 掘削が平面流況に与える影響の予測

掘削路を計算河床に反映させた一般化座標系平面2次元流計算を行い、小規模出水（流量200m³/s）時での平面流況を求めた。図－5は計算流速ベクトルで点線に囲まれた領域が掘削箇所である。これより上流側低水路からの流水が巧く中州内の掘削路に取り込まれる状況が分かる。51.2km地点は狭窄部出口であり中州先端はそこに位置するため、過去の出水経験から先端はフラッシュ



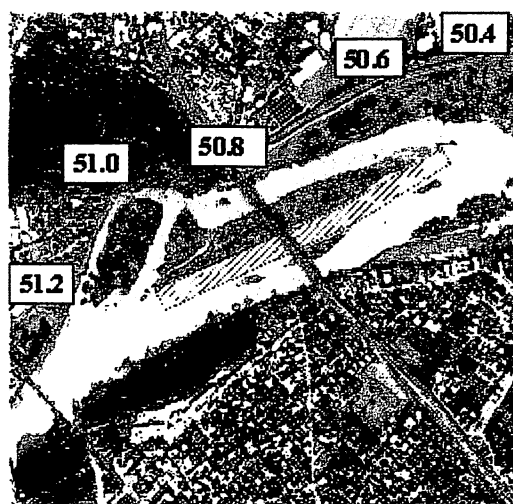
図－5 計算流速ベクトル（掘削部は点線内）

されやすく、上流側低水路床と中州先端河床との高低差は小さい。その結果、入口付近は掘削しなくともある流量規模以上になると掘削路に流水が誘導される。計算によると、 $200\text{m}^3/\text{s}$ 流量以上で掘削路が流路化し、平成15年以降からの流況から見ると年数回（平成15年では年2回）は生じることになる。

4. 台風9号出水による中州の洪水攪乱

さて、掘削工事後、中規模な出水を平成19年9月6日台風9号により経験した。流量規模は対象中州上流地点にある高津戸での流量観測により約 $1000\text{m}^3/\text{s}$ である。これは低水路満杯流量をやや越える規模である。出水中の状況を示す航空写真を図6に示す（斜線部が掘削路に相当）。また、図－7に掘削路を下流方向に見た9号出水前、出水中（ピーク流量時）の状況を示した。

これらより出水時には掘削路に流水が導かれ完全に流路化した。また、今回掘削しなかった中州部分（掘削路左岸側、図－6,7参照）は冠水していないことも確認された。平面流計算から台風9号出水を再現し、中州中央に位置する横断面（50.8km）で横断水位、流速分布を示したものが図8、9である。同図には掘削前の河床形にもとづく計算結果も併記した（痕跡水位の再現計算よりマニング粗度係数を0.035とした）。図－8より今回の出水規模では掘削対象箇所は、掘削しない場合でも冠水する流量規模であることが認められる。しかしながら平成15年においても同程度の出水（高津戸流量で $1100\text{m}^3/\text{s}$ ）が生じ中州の一部が冠水しているが流路化せず、その結果、その後の過剰なハリエンジュ繁茂は全く軽減されていなかった。このことは単に砂州上を冠水させるだけではなく、出水を導くことで有意な洪水攪乱を誘発した本工事の有効性を示している。図－9に示すように台風9号時には掘削路で流速 $2.5\text{m}/\text{s}$ にもなり（同規模流量で掘削路を設けない場合に対し最大2.5倍相当の流速を誘発した）、この場合の移動限界に相当する礫径は10cm程度になる。



図－6 9号出水時の中州の状況（斜線部は掘削）



図－7 出水前、出水中（ピーク流量時）の掘削部
（点線は掘削部の横断範囲を示す）

5. 河床変動に関する考察

図－10に掘削路上流端に近い51.0km、図－11に中央付近50.8km、図－12に下流端付近50.6km地点における台風9号出水前後の横断地形（測量）を示す。これらより掘削路内でのみ顕著な河床変動が生じていることが分かる。掘削路上流では右岸側の側岸侵食と堆積、その下流では河床低下傾向となって掘削路は出水前に比べ急勾配化した。出水後の現地調査から求めた河床材料の粒度構成を図－13に示すと①掘削路の右岸低水路付近では低水路の粗粒化を示す大きな石礫が表層に露出し（平均粒径 23cm ）、

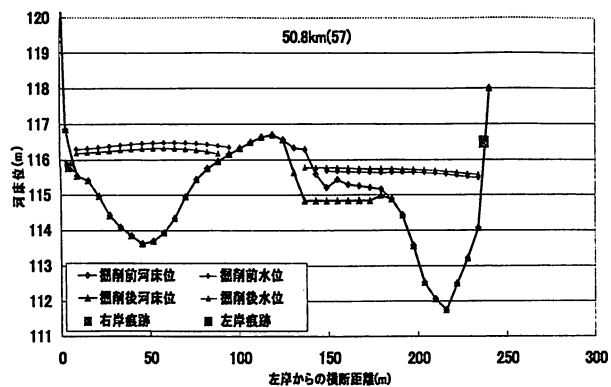


図-8 計算横断水位（掘削有り無しで比較）

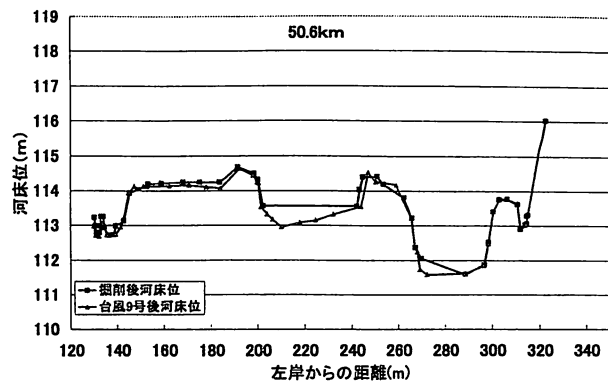


図-12 掘削路下流端付近の河床変動

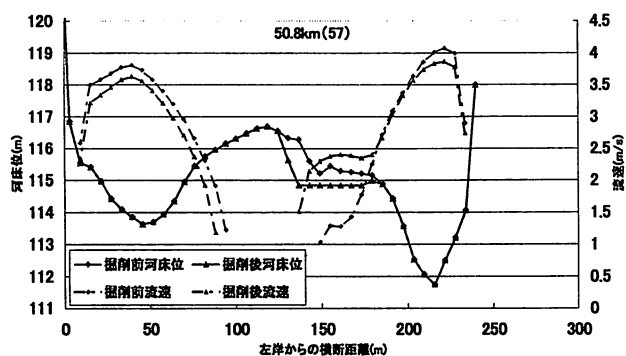


図-9 主流速の横断分布（掘削有り無しで比較）

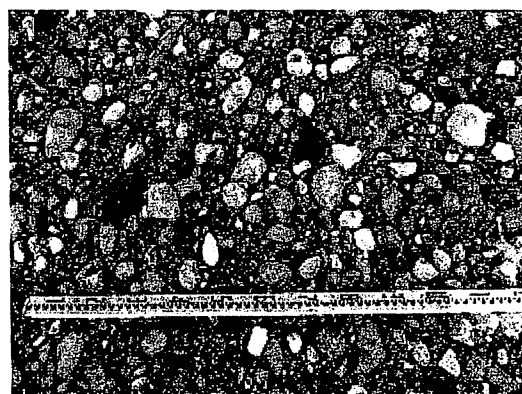


写真-1 出水後の掘削路水際（低水路側）（上）と掘削路床（下）の粒度状況

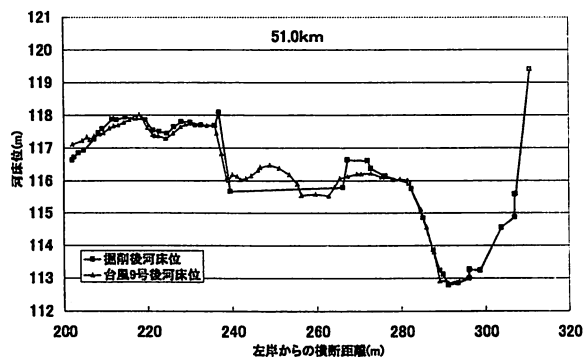


図-10 掘削路上流端付近の河床変動

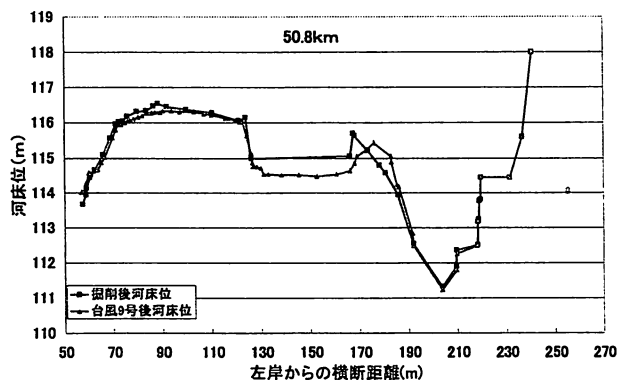


図-11 掘削路中央付近の河床変動

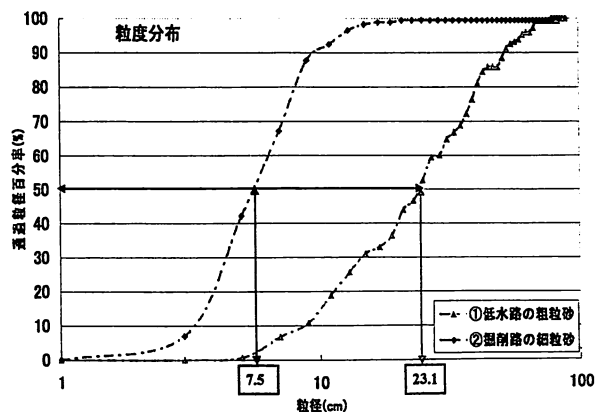


図-13 掘削路水際（低水路側）と掘削路床の粒度分布

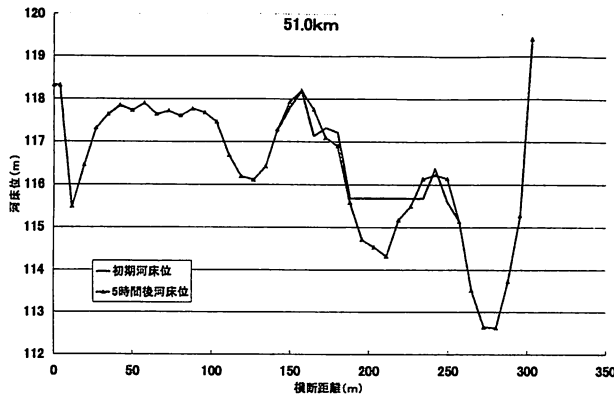


図-14 河床変動計算結果（ピーク流量を5時間通水）

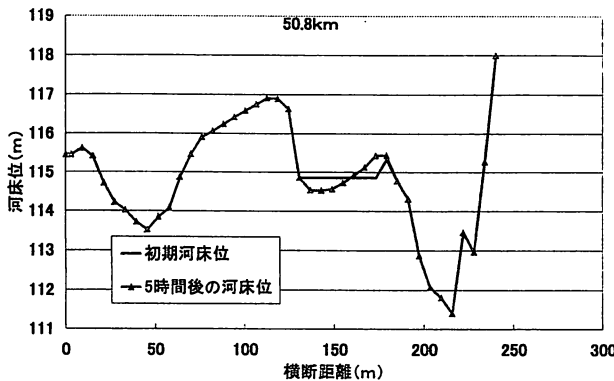


図-15 河床変動計算結果（ピーク流量を5時間通水）

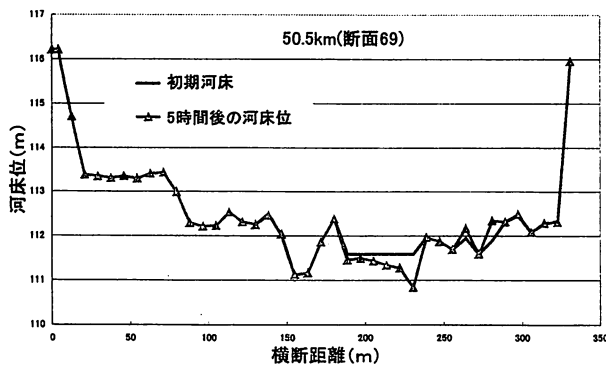


図-16 河床変動計算結果（ピーク流量を5時間通水）

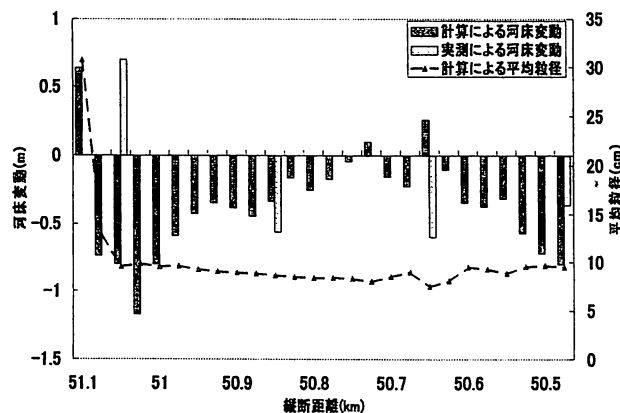


図-17 掘削路内の河床変動の縦断分布と粒度構成

一方、②掘削路河床では平均粒径7cmの砂礫が表層に存在し、深さ方向にも採取したところほぼ同様な粒度構成であった。今回、掘削路で有意な河床変動が生じた要因の1つに、中州を構成する粒度構成が低水路に比べかなり細かいことが予想される。

6. 粒度構成を考慮した河床変動解析による考察

前節までの考察から、掘削路での有意な河床変動が生じた理由の1つに、低水路と中州掘削路周辺の粒度構成のちがいがあげられる。そこで、掘削路に図-13の②、低水路周辺に図-13の①の粒度を初期河床として与えて（深さ方向にもこれらの粒度構成を与える）、河床変動計算を行う。混合砂河床変動計算では河床表層に交換層を設け交換層内の粒度をN個のクラスに分け、各粒径ごとに単位幅流砂量を算定する。粒径ごとの体積占有率を考慮した芦田・道上の流砂量式⁵⁾は次式となる。

$$q_{BS*k} = \frac{q_{BSk}}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_k^3}} \quad (1)$$

$$= 17 \cdot P_k \cdot \tau_{*k}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right)$$

ここに、 $\sigma/\rho - 1$:河床材料の水中比重、 d_k :kクラスの粒径、 P_k :交換層における第kクラス砂の体積占有率、 τ_{*ck} :粒径kクラスの砂礫に対する無次元限界掃流力である。交換層における第kクラスの粒径の体積占有率 P_k は河床上昇の場合(式(2))と河床低下の場合(式(3))に対して、それぞれ次のように表される⁶⁾。

$$P_{k,i,j}^{t+\Delta t} = P_{k,i,j}^t - P_{k,i,j}^t \frac{\sum_{k=1}^N \Delta Z_{k,i,j}}{a} + \frac{\Delta Z_{k,i,j}}{a} \quad (2)$$

$$P_{k,i,j}^{t+\Delta t} = P_{k,i,j}^t - PB_{k,i,j,L}^t \frac{\sum_{k=1}^N \Delta Z_{k,i,j}}{a} + \frac{\Delta Z_{k,i,j}}{a} \quad (3)$$

ここに i, j :平面格子の番号、 $\Delta Z_{k,i,j}$:各計算点の第kクラス砂の Δt 間における河床変動量、 $PB_{k,i,j,L}$:貯留層における第kクラスの粒径の体積占有率、 L :貯留層厚である。貯留層において各層での第kクラスの粒径の体積占有率を記憶する⁷⁾。交換層の底面がかかる貯留層を第L層とすると、河床上昇の場合は第L層に交換層からの堆積分が加えられ、これに応じて粒度分布が変化する。一方、河床低下の場合には低下体積分が第L層から交換層に移動し(式(3)の右辺第2項)、貯留層の粒度分布は変化しない。河床変動計算を進める際に、交換層以上の河床変動が起こらないこと、各粒径がそれぞれ交換層にあるもの以上に出ていかないという条件を設定した。

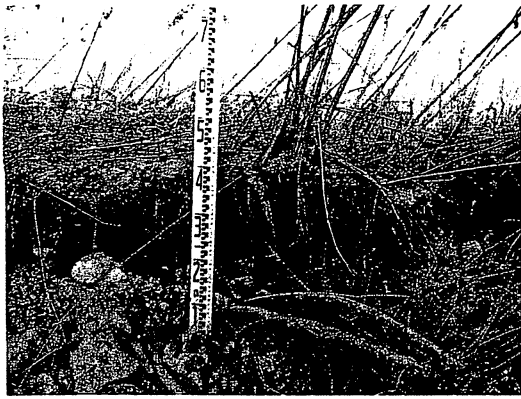


写真-2 表層細粒土層と礫層内に存在するハリエンジュ根茎群

また、交換層の厚さ (a) は最大粒径とした。台風9号出水規模の流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ で一定に5時間通水する。また、上流端では河床変化がないように設定し下流端は一定水位のままとした。

図-14から図-16に計算された河床変動後の地形と変動前の地形を併記する。いずれの断面では河床低下傾向にあり、それも掘削路内で生じている。図-17は掘削路内の河床変動量を縦断方向にプロットしたもので(棒グラフ)、合わせて平均粒径の値(点線)も示した。計算結果では、掘削路流入付近で堆積傾向となった。これは上流側低水路からの粗い石礫分①が掘削路内で掃流できず堆積したと考えられる(堆積砂礫の計算粒径は25cmから30cmとなっている)。その下流区間では逆に河床低下傾向が顕著となり、さらにその下流にかけて河床低下は鈍化してくる。河床材料の平均粒径を見ても初期の平均粒径とあまり変わらない。掘削路流入付近での大粒径材料①による堆積傾向は掘削路への流砂供給を抑制し、流砂の非平衡性からその直下流で顕著な河床低下を引き起こすが、掘削路内にある細粒分(②)の流砂量が次第に多くなることで非平衡性が緩和されてくる。洪水後の河床変動(実測値)も計算されたそれと流下方向にずれはあるが、その傾向は対応している。掘削路の河床では深さ1m以上は②の粒度構成があるものと推測されるので、今後、同規模の出水を受けても同様な流砂運動が生じると考えられる。しかし、河床低下につれて次第に大粒径成分の表層割合が多くなるため、河床低下は緩和されることが予想される。

7. まとめ

樹林化した砂州上において掘削路を設けたが、樹林化

対策の第1段階としては、表層の植生を剥がし表層細粒土層の除去を行うだけでも軽微な流砂運動が生じる可能性があり、礫床の回復と言った面で有効な場合もある。しかし、ハリエンジュ林を形成する場合、その根茎群は表層細粒土層よりも深い礫層部まで侵入している場合が多く(写真-2)、礫層そのものが洪水攪乱を受ける必要がある。そのためには石礫の移動を可能とする掃流力の確保が必要で一般には掘削を行う場合が多い。

ところで低水路との比高差を小さくして砂州の冠水頻度増加をねらう掘削工事はこれまで行われてきたが、その効果は必ずしも十分に発揮していないものも少なくない。掘削部分に流水を導き、洪水攪乱を河川のダイナミズムを利用して誘発させ、樹林化の対策と礫床の再生をねらう点に本掘削工事の特色があり、台風9号出水を通じてその効果が検証された。本研究では砂州幅の約半分に相当する掘削路を設けたが、出水を砂州上に導く場合には、より小さなスケールの掘削でも可能性がある。例えば、樹木伐採に使う重機の搬入路を利用するなど今後は規模の小さな掘削路の有効性も検討すべき課題といえる。また、河床材料の深さ方向の粒度構成が砂州の河床変動を左右する要因であるため、粒度の鉛直構造についても十分把握しなければならない。

本研究を進めるにあたり、河川整備基金研究助成を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 植木真生・福島雅紀・山下武宣：河道掘削および砂礫の敷設供給に対する河床の応答、河川技術論文集、第13巻、pp.381-386, 2007..
- 3) 眞田淳二・浦上将人・前野詩朗・渡辺敏：2006年7月出水を経験した旭川下流部礫河原再生箇所のモニタリング結果と考察、河川技術論文集、第13巻、pp.129-134, 2007.
- 4) 竹内義幸・青木研・渡邊雄二・加村大輔：四万十川入田地区における砂礫河原再生のモニタリング中間結果について、河川技術論文集、第13巻、pp.119-122, 2007..
- 5) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号、pp.55-63, 1977.
- 6) 平野宗夫：Armoringをともし河床低下について、土木学会論文集、第195号、pp. 55-65, 1971.
- 7) (社) 砂防学会編：山地河川における河床変動の数値計算法、pp. 49-51, 山海堂、2000.

(2008. 4. 3受付)