

横断工作物を活用した砂州の攪乱 と河岸侵食防止に関する検討

STUDY ON SANDBAR DISTURBANCE AND PREVENTION OF RIVERBANK EROSION BY USING STRUCTURES

高野 和成¹・武藤 裕則²・田村 隆雄³・桑原 正人⁴
Kazunari TAKANO, Yasunori MUTO, Takao TAMURA and Masato KUWAHARA

¹徳島大学大学院創成科学研究科 (徳島市南常三島町2丁目1番地)

E-mail: c612341001@tokushima-u.ac.jp

²徳島大学大学院社会産業理工学研究部 (徳島市南常三島町2丁目1番地)

E-mail: muto_yas@tokushima-u.ac.jp

³徳島大学大学院社会産業理工学研究部 (徳島市南常三島町2丁目1番地)

E-mail: tamura@ce.tokushima-u.ac.jp

⁴パシフィックコンサルタンツ株式会社 (大阪市北区堂島浜一丁目2番1号)

E-mail: masato.kuwahara@os.pacific.co.jp

Key Words: cross bar, sediment environment, quicksand, change in river bed, river protection

1. はじめに

河床材料が土砂である以上、河床形状は流水の作用や土砂供給によって変化する。また、ダムや堰などの整備により土砂の供給が少なくなれば河道の攪乱が減り、砂州の発達は見られなくなる。これらの状況が長く続けば、濬筋の位置が次第に固定され、河道環境に悪影響を及ぼす。その要因を回避するため、護岸整備や根固め整備など様々な河川で対処法的に対策を進めている。しかし、砂州の変動を予測するなど、将来の河道特性を見据えた対応でないため、河道の状況が変われば再対策が必要になり、コストや時間がかかる。

限られた区間でも河道内にある堆積土砂を状況に応じて戦略的に動かすことができれば、土砂環境の改善になる。戦略的な対策の一つとして、人や重機による掘削と埋戻しの手法がある。しかし、実施可能な時期が河道内であるため非出水期限定（通常11月～翌4月）になることや掘削による汚濁の発生など多くの課題がある。

一方、水制やその他構造物を期間限定で配置し、流水の作用により河道内を攪乱すれば年間を通して土砂移動が期待できる。そのため、本研究ではダム下

流区間の土砂供給が制限され、二極化が懸念される那賀川（直轄管理下流区間）について、横断工作物（主に水制）を河道内に様々な位置や角度で設置し、流水の作用によって砂礫堆の攪乱や河岸侵食防止につながるか検証する。

2. 那賀川下流区間の特性

那賀川下流区間は勾配1/860、約10kmの区間が直線河道である。過去には河道内に多くの利水施設（上広瀬堰、下広瀬堰、大井手堰、一の堰、竹原堰、乙堰、大西堰、イコス堰）が整備されてきた。いわゆる利水優先とした河道形態である。しかし、現在は1955年（昭和30年）にダムが整備され、利水施設の統廃合が進み、残っている施設は南岸堰（一の堰）と工業用水を取水するために建設されたイコス堰（潮止堰）のみである。

北岸堰は構造物として存置されるが、固定堰部（突出部）は切り下げられた形状（令和6年現在工事中）になるため、取水（貯留）機能は失われる。

堤防については1690年頃から整備され、現在の堤防が概成（直線河道化）したのが1955年頃である。その後、河道形態は時代によって変化し、1968年（昭

和 43 年)には図-1 のとおり流路と寄洲が明確に分かれた規則性のある交互砂州となる。これらの河道特性は 1990 年(平成 2 年)まで約 20 年続き、治水優先の河道形態に変化したと推測できる。その後は、徐々に形成された砂州が波長増大しながら現在に至っている。

その他の特性として、図-2 に平成 29 年と令和 3 年に測量された横断面図(7.4k)を示す。5 年程度で最深河床高は約 2.0m も下がっており、10.6k から河口区間だけでも H.W.L 以下の河道空間は 33,584 千 m³ 増加(河床低下)している。さらに図-3 に 6k 付近の河床材料特性を示す。平成 26 年から平成 30 年にかけて平均粒径 22mm から 33mm と粗粒化している。図-4 は古庄雨量観測所(7.0k 地点)の河道内流量(過去 10 年間分)を示す。平均年最大流量は 4,500m³/s、2014 年や 2015 年は年最大流量が計画高水流量(9,300m³/s)程度流下しており、複数の地域で浸水が生じている。一方、近年は 1,000m³/s 程度と少ない状況であり、限界摩擦速度 0.191m/s(下流区間全体の平均粒径 45mm により岩垣の式にて算出)に対し、摩擦速度 0.114m/s しか発生しない。そのため、土砂移動が限られることから、さらに二極化(堆積・固定化)が進行すると推測される。

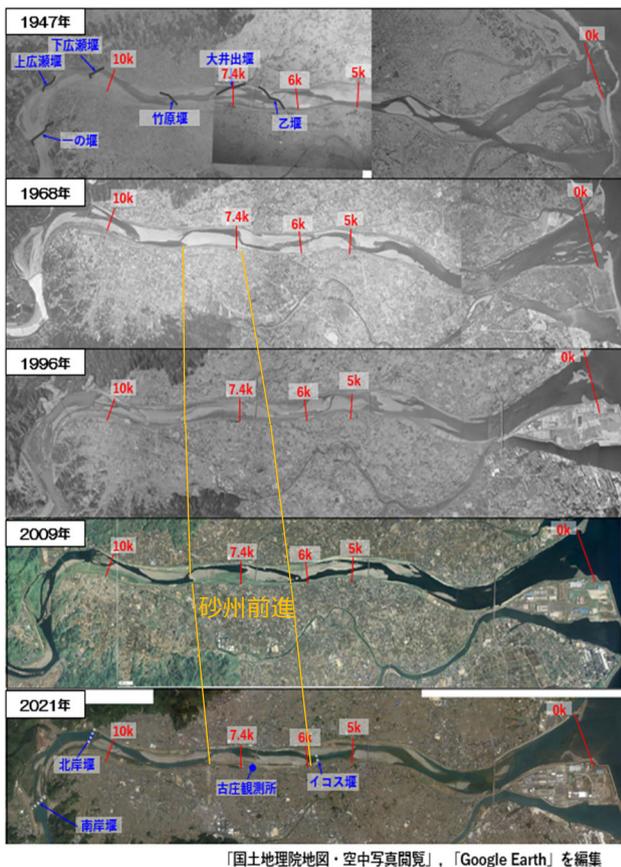


図-1 那賀川 0k~10k における航空写真の変遷

3. 数値実験用水路モデルによる検証

本検証では横断工作物によって砂礫堆の変動がどう変化するか、また、変動量は時間とともにどのように推移するか確認する。さらに、水制の配置が砂礫堆の攪乱と河岸侵食防止の役割を同時に果たすことができるか砂礫堆の形状や周辺の流況により検証する。

(1) 検証方法と固定堰による影響

那賀川の上流区間では長安ロダム(64k)の下流に 1991 年からダムで堆砂した土砂を置土還元し、河道内の環境改善に繋げている¹⁾。ただし、置土の下流には川口ダム(50k)が位置しており、検討対象区間が土砂供給の影響を受けるまでは時間がかかる。検証に用いる解析ソルバーは iRICNays2DHver4 とし、平面二次元河床変動解析により行う。那賀川下流部は長年の洪水履歴や利水堰の設置・撤去、治水整備、砂利採取、置土の影響を受けて、砂州の移動量や波長は変化しており、その要因を特定するの

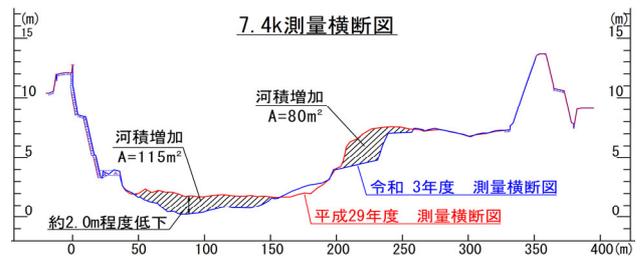


図-2 7.4k 地点の河道横断面図(平成 29 年と令和 3 年)

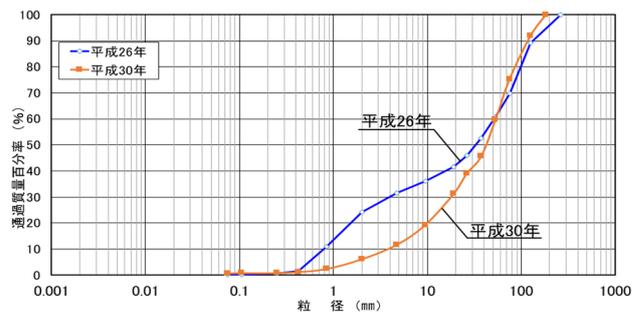


図-3 6.0k 地点の粒径加積曲線図(平成 26 年と平成 30 年)

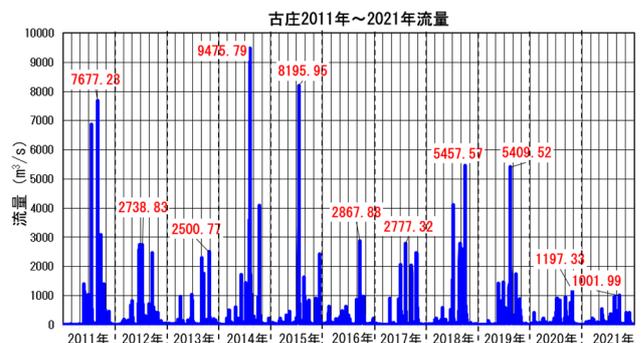


図-4 古庄観測所地点の 10 年間流量グラフ

が難しい。そのため、那賀川下流の直線河道区間を想定し数値実験用のモデル河道（交互砂州）を生成した。図-5 に初期河床形状を示す。まず、助走計算として計画高水勾配を有する平坦河床に高水流量相当の $10,000\text{m}^3/\text{s}$ を 400 時間通水して交互砂州を形成し、これを初期河床とした。境界条件は周期境界・平衡給砂条件とした。河道幅是那賀川下流区間の低水路幅と同様の 250m とし、メッシュサイズは流れ方向 25m 、横断方向 10m とする。流量は平均年最大流量 $4,500\text{m}^3/\text{s}$ がピークとなるモデル波形を作成し、10 年後の変状を確認するため 10 回繰り返し作用させる。河床材料は平成 30 年の河床材料調査で得られた平均粒度分布を設定した。粗度係数は 0.03 とする。図-6（上）はモデル河道に横断工作物を設置せず河床変動解析を実施した通水後の図であり、明確に交互砂州が確認できる。

図-6（下）は 7k 地点を拡大し、河床形状と流速ベクトルを示した。この砂礫堆形状が他 CASE と比較検討するうえで基本となる。

図-7 は堰を配置し河床形状と河床変動を示したものである。那賀川にはこれまで複数の堰が設置・撤去された経緯があり、河道形態や河床形態に影響を与えた可能性もあることから、堰による変動を確認した。モデルとする堰は平面形状や写真の記録が残っている大井出水堰とした²⁾。堰のモデルは不透過型固定床（堰高 1m と推定）とし、位置は交互砂州の前縁線上に再現した。結果、堰配置による砂礫堆の変動は 10cm 未満であり大きな変化はない。

一方、堰下流の左岸側で土砂が堆積（河床高 4.0m 程度上昇）し、右岸側で深掘れ（河床高 2.5m 程度低下）する。よって、堰下流側では明確な河床変動が確認できたため、変動させたい砂礫堆より上流側へ水制を配置する。

(2) 水制のモデル化

今回対象とした水制は、流下能力への影響を最小限にするため透過型水制とする。工法は人力で且つ短期間での施工が可能であり、水制周辺の土砂移動及び、河岸侵食防止に効果がある聖牛とする。

聖牛は一般的にセグメント 1 での適用と整理³⁾しているが、適用外の場合に聖牛を設置しても侵食と堆積による河床地形改変効果が得られることを検証している^{4) 5)}。よって、那賀川でも適応可能と判断する。次に水制を配置し、河道内に攪乱が生じるか検証する。なお iRICNays2DHver4 では水制の入力コマンドがないため、河道内に植生が分布すると見立てた属性（植生抗力係数、植生密生度、植生高）と

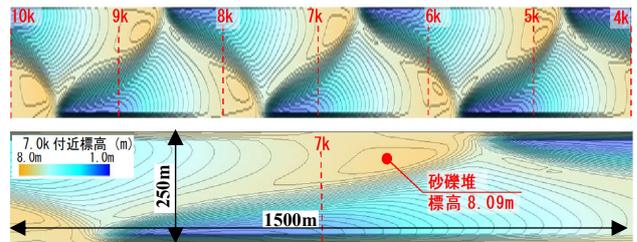


図-5 初期河床形状(上)と 7k 周辺における河床形状

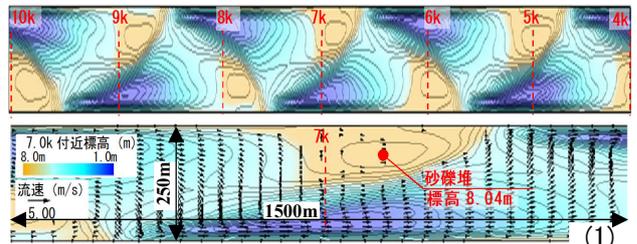


図-6 通水後の河床形状(上)と 7k 周辺における河床形状及び流速分布(下) (CASE1)

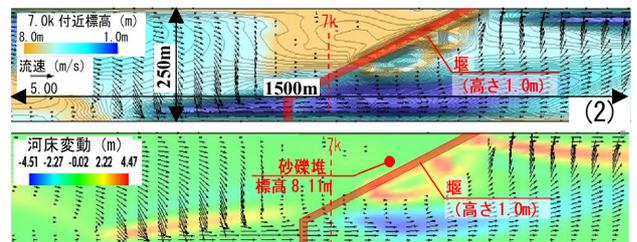


図-7 堰設置後の 7k 周辺における河床形状と流速分布(上)及び河床変動(下) (CASE2)

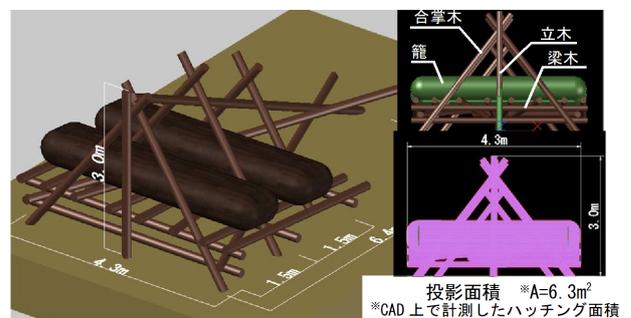


図-8 中聖牛の三次元モデルと投影面積の根拠

して反映した。また、植生密生度 a_s は次のように示す（式 1）⁶⁾。ここで、 n_s は植生本数、 D_s は植生の平均幹径、 S_s はサンプリング格子幅である。

$$a_s \leq \frac{n_s D_s}{S_s^2} \quad (1)$$

今回、想定する水制は図-8 に示すとおり、1. で紹介した中聖牛とする。伝統工法であり木津川でも設置され、土砂環境改善に役立っている⁷⁾。

中聖牛を植生として取り扱う場合、流体力が作用する投影面積が 6.3m^2 であるため、これを h (3.0m) で除すると 2.1m となり、これが D_s に相当するとした。よって、メッシュサイズ ($25\text{m} \times 10\text{m}$) における 1 基

当りの植生密生度は $2.1/250=0.0084$ となる。

メッシュ当り配置できる基数は、 $250\text{m}^2/27.52\text{m}^2=9$ 基となることから植生密生度は $0.0084 \times 9 \text{ 基}=0.0756$ とする。当該数値は実験等により検証する必要があるが樹木群落別の密生度によると草本類 0.031 から竹林 0.286 の範囲⁸⁾となる。

(3) 水制による影響

図-9 は各 CASE 別に異なる場所に水制を配置し、通水後の河床形状と流速ベクトルを示す。

CASE3 は砂礫堆周辺の左岸側に水制を配置、向きは CASE2 において堰下流部の攪乱（河床低下）に繋がった直角向きとした。しかし、砂礫堆周辺の土砂変動は確認されない。これは不透過型の堰下流で発生した越流洗堀現象が起きず、透過型であるため A 地点の流速が 3.5m/s から 2.0m/s に低下し、土砂移動が制限されるためである。

CASE4~6 は砂礫堆上流の滞筋部に水制を配置、向きは下向き、直角向き、上向きとし、河道中心部に張り出す水制長は各 CASE 同じとした。流向変化による砂礫堆の攪乱を期待したが、水制先端周辺に土砂が堆積する程度であり、砂礫堆周辺の土砂変動は確認されない。

CASE7~9 は砂礫堆の対岸側にこれまでの CASE より長い水制を配置、向きは直角向き、上向き、下向きとし、河道中心部に張り出す水制長は各 CASE 同じとした。その結果、これまでと異なり砂礫堆に変化が生じた。

CASE7 の B 地点は河床変動が通水前後で累計 2.7m 低下した。平均年最大流量 ($4,500\text{m}^3/\text{s}$) が最初に生じる際、 1.5m 程度下がり時間の経過とともに砂礫堆の地形は下がっていく。これは砂礫堆 B 地点の流速が 4.0m/s 程度と水制配置前より早い流速が生じ、掃流力が増した結果である。

図-10 は 7k 地点の断面について通水後の河床変動と河床形状を CASE1, 7, 8, 9 で重ね合わせた図になる。水制を設置しない CASE1 は砂礫堆中央部と右岸滞筋側の地形高差が 6.7m と大きく二極化が懸念されるのがわかる。

CASE7 は砂礫堆中央部で河床低下するが、CASE8 や 9 はそれほど変化なく、どちらかと言えば、B 地点下流の左岸水際部に流路が変化している結果となる。

C 地点で発生している流速は CASE7 が 2.03m/s 、CASE8 が 3.15m/s 、CASE9 が 2.77m/s となり水際の流速低減効果をもっとも高いのが CASE7 である。

よって、検討では水制設置により河岸侵食防止の役割も期待したいため、水際部において流速低減となる直角向き水制 (CASE7) を実河道モデルで配置し、砂礫堆の変動になるか検証する。

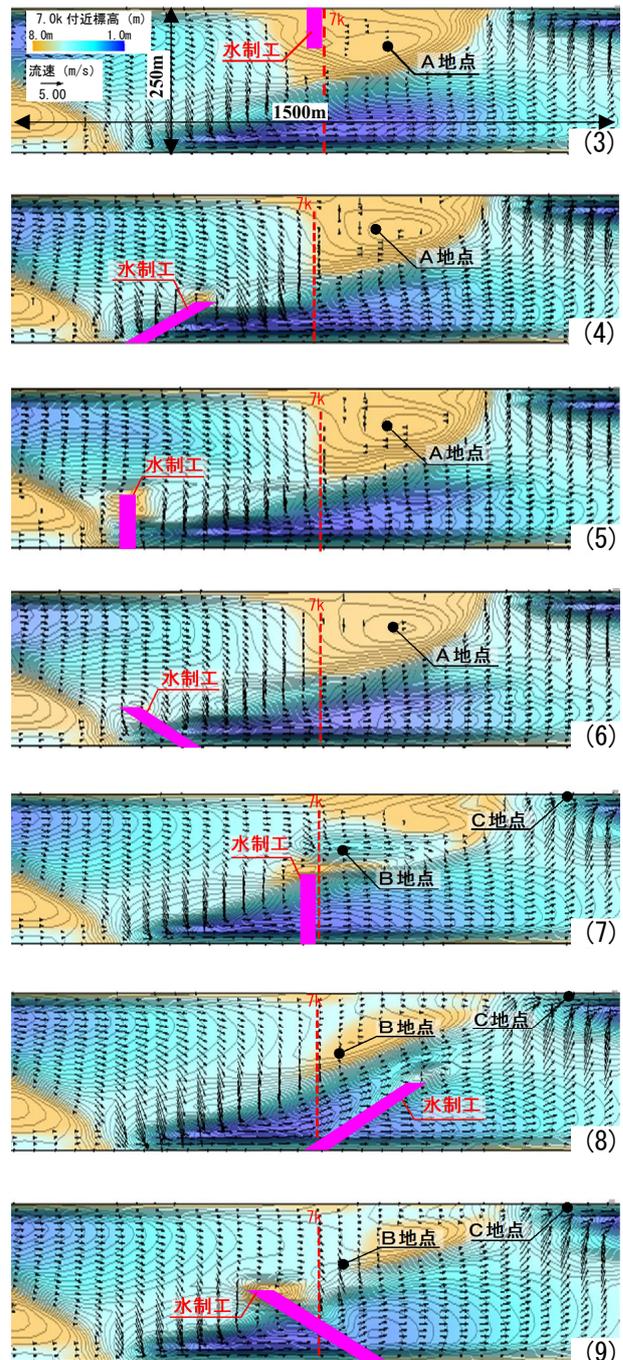


図-9 水制設置後の 7k 周辺における河床形状と流速分布 (CASE3~9)

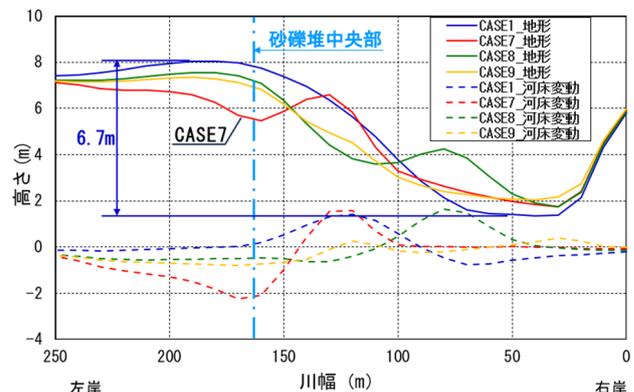


図-10 7k 地点における CASE7~9 の通水後地形高と河床変動

4. 実河道モデルによる検証と考察

ここでは、実河道モデルで水制を配置し河床変動解析を実施した。解析条件を表-1に示す。解析ソルバーは数値実験水路モデルと同様である。図-11は水制設置前の通水後における河床変動解析結果を示す。図-11(上)は水制設置前の令和3年度に取得した地形(水制配置前)にこれまでと同様の流量を与え、砂州と流路が確認できるように近年観測された最大流量時(1,000m³/s)の河床形状を示した。砂礫堆の形状は2021年航空写真とほぼ同様になる。そのため、平均年最大流量が繰り返し作用しても河床形状は大きく変化しないことが把握できる。

図-11(下)は通水前後の河床変動量を示す。通水前後でもっとも土砂が堆積する箇所は左岸10.0k付近であり、反対に河床低下する箇所は左岸10.8k付近となる。なお、イコス堰周辺においても河床低下する。これらの現象は北岸堰切下げの影響が出ているものであると推測できる。よって、今後、北岸堰下流側は上流からの土砂が時間をかけ下流に供給され、下流区間の粒度特性が変化すれば、砂礫堆形状も変化すると推測される、したがって引き続き、切下げの影響をモニタリングする必要がある。

図-12は水制設置後の通水後における河床変動解析結果を示す。

水制は砂礫堆が前進、間延びしている区間の左岸滞筋上7.8kに配置、向きは直角向きとした。工法は水路モデルと同じ中聖牛とし、植生密生度・植生高としてメッシュに反映する。図-12(上)は、砂州と流路が確認できるように1,000m³/s時の河床形状を示す。水制先端の砂礫堆形状が変化し流路として水が流れている。図-12(下)の河床変動量を確認すると水制先端部で河床低下し、水制の下流水際部で土砂が堆積していることから、砂礫堆の攪乱が確認できる。

表-1 解析条件

項目	設定値
対象河川	那賀川下流区間
地形データ	令和3年横断面
解析範囲	0.0k~12.0k
メッシュサイズ	50m×10m
粗度係数	低水 0.030, 高水 0.034
粒度分布	平成30年調査時粒度分布
流量	ピーク流量 4,500 m ³ /s 波形の10波(全650時間)
解析時間	36時間, Core(TM) i7-11850H
境界条件	上流端=等流 下流端=等流
給砂条件	上流端において平衡給砂

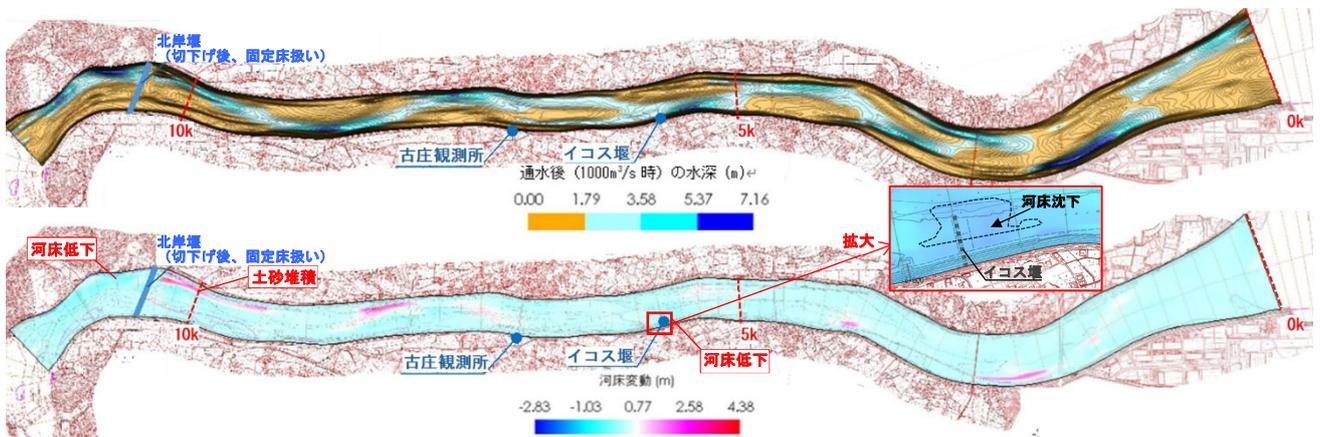


図-11 那賀川 0k~12kの水制設置前における通水後の河床形状(上)及び河床変動(下)の解析結果

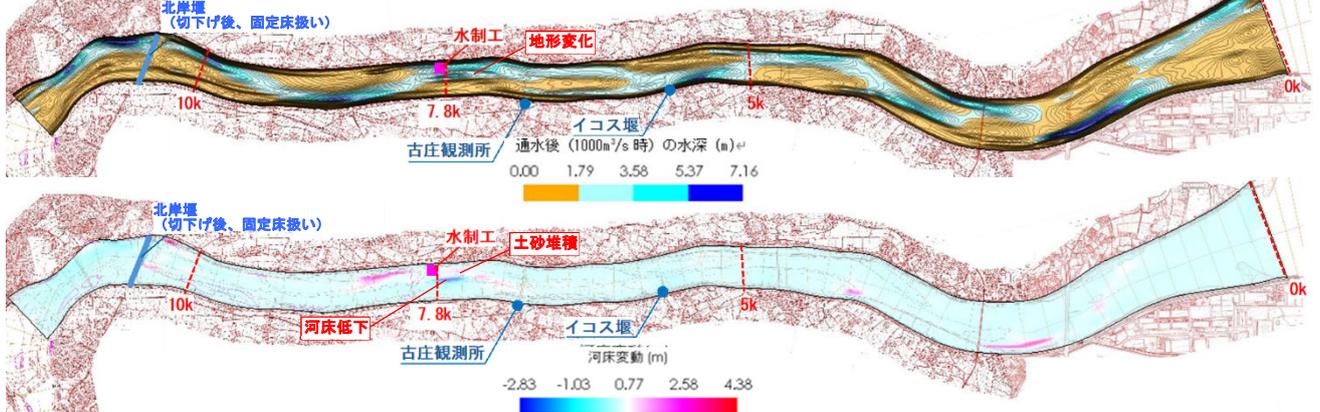


図-12 那賀川 0k~12kの水制設置後における通水後の河床形状(上)及び河床変動(下)の解析結果

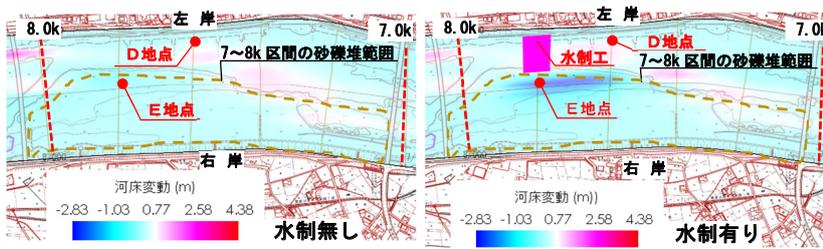


図-13 那賀川7~8kの水制設置前河床変動(左)と水制設置後河床変動(右)の解析結果

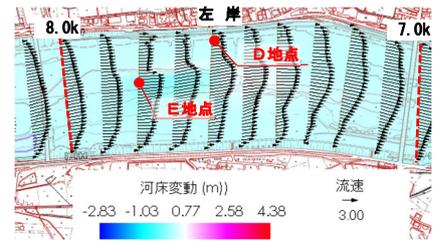


図-14 那賀川7~8k水制設置後のピーク流量最大時河床変動と流速

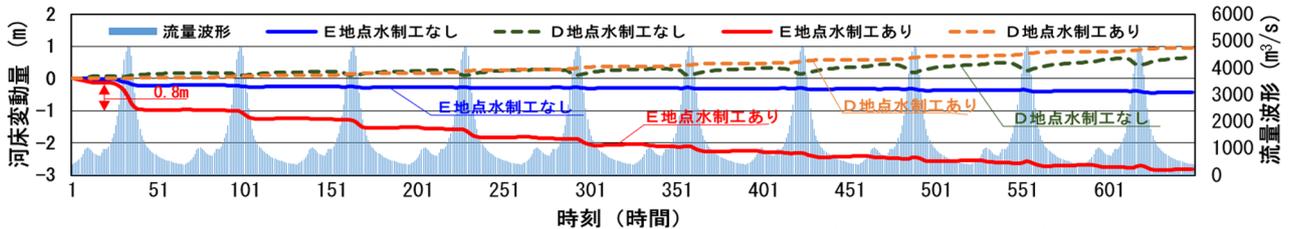


図-15 7.6k(D地点), 7.8k(E地点)における水制設置前後の流量波形と河床変動推移

図-13 は水制周辺の変動を分析するため7~8kを拡大し、水制設置有無による通水後における河床変動を示した。水制設置後のD地点は累計0.9m土砂堆積、E地点は累計2.8m河床低下する結果となる。図-14 はピーク流量時の河床変動及び流速を示した。図-15 はD、E地点の河床変動量を時刻歴で示した。水制を設置した場合、最初の波形時に砂礫堆では0.8m河床低下し、その後は、波形毎に河床低下が続く。一方、河岸沿いは時間の経過とともに堆積する傾向となることから、砂礫堆の攪乱と河岸侵食防止の役割を同時に期待することができる。

5. 結論

河道内に横断工作物を設置した場合の河床変動を複数解析し、形成される砂礫堆の変動を確認した。攪乱させたい砂礫堆の対岸濡筋上に流路を分断するように直角向きの水制を配置することで、砂礫堆中心部に河床低下が生じることを数値実験水路モデルでの検証で確認できた。また、実河道モデルによる検証でも効果が得られた。

これらの要因は、水制を設置することで水制先端部の流速は小さくなるが、先端部から少し離れた位置では急縮部の現象と同様に局部的に流速が大きくなり、掃流力が増したことが要因である。また、水制から下流側では流向が河岸方向を向き、流速が著しく遅くなるため土砂堆積を促すことに繋がった。よって、供給土砂が限られた中でも水制を配置することで、砂礫堆に堆積する土砂の攪乱や河岸侵食防止など土砂環境改善に繋げることが可能であることを確認した。

今回、中聖牛に着目したが、異なる水制において砂礫堆に攪乱が生じるか確認すること、また、水制を樹木(植生密度、植生高)に見立て解析を実施した

が、実際の水制配置形状と異なるため、モデルの妥当性をさらに検証する必要がある。

今後、水制の優位性を高め、発展させるためには作用する流況を考慮した水制のあり方や水制を再利用できる仕組み、水制と置土の組合せによる相乗効果など様々な視点で検討していく。

謝辞：本研究を進めるにあたり、四国地方整備局那賀川河川事務所より貴重なデータを提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 武藤裕則：那賀川における持続的土砂管理へ向けた取り組み、ダムと環境の科学IV、京都大学学術出版会、pp. 359-379、2023
- 2) 山本秀樹：那賀川北岸用水の歴史を考える、徳島県技術士会、pp. 1-11、2019
- 3) 山本晃一：護岸・水制の計画・設計、山海堂、第5章、pp. 81-104、2003
- 4) 田住真史、角哲也、竹門康弘：伝統的河川工法「聖牛」に関する知見の整理と木津川における試験施工、京都大学防災研究所年報第61号B、pp. 748-755、2018
- 5) 田住真史、竹門康弘、小林草平、角哲也、：木津川の河床地形管理における伝統的河川工法「聖牛」の活用、京都大学防災研究所年報第62号B、pp. 734-765、2019
- 6) 清水康行、竹林洋史、井上卓也、濱木道大、岩崎理樹：Nays2DH Solver Manual、II基礎式、pp. 4-29、2011
- 7) 小林慧人、北野大輔：木津川地域住民による「伝統工法中聖牛」の復活アカウントビリティ行政サービス部門No. 21、pp. 1-5、2023
- 8) 前野詩郎、渡辺敏、藤塚佳晃：簡易に得られる植物特性値を考慮した水理解析モデルの精度向上の提案、土木学会論文集No.803/II 73、pp. 91-104、2005

(2024. 5. 31 受付)