

大量の細粒土砂流下時を想定した河道設計の留意点

田端幸輔・大谷 周・福島雅紀

1. はじめに

近年、大規模洪水時に大量に発生した細粒土砂が河道内に堆積することで生じる氾濫のリスクが高まっている。筑後川水系赤谷川では、平成29年7月の九州北部豪雨において、河床材料と比して小さな粒径の土砂が上流から多量に供給された。これが下流の河床勾配の緩い河道に堆積することで、河床上昇・河道埋塞が引き起こされ、写真-1に示すような氾濫被害が発生した¹⁾。このような氾濫に備え、被害を軽減するための対策を講じていく必要があるが、そのためには河床材料と同じ粒径の土砂により給砂条件を設定する従来の河床変動計算手法をそのまま用いることは適切でない可能性がある。

本研究は、大量に発生した細粒土砂の堆積に伴う氾濫のリスクが高い河川区間における河床変動計算手法、河道設計・管理手法の構築を目的とし、高濃度の土砂供給を可能とした急勾配直線水路および赤谷川水理模型（延長100m、縮尺1/30）を用いた実験により、細粒土砂が大量に流下し堆積、氾濫を引き起こす状況を再現するとともに、細粒土砂の堆積を生じにくくするために河道設計で考慮すべき留意点を整理した。

2. 大量の細粒土砂流下時に想定される現象

2.1 一般的な土砂流下機構との違い

土砂供給の多い山地の直下の急勾配河川は、主に石礫で構成されている。通常、洪水時には上流から細粒分～石分までの幅広い粒径の土砂が供給され、河床構成材料である石礫の供給量に応じて、急勾配河川の河床縦断形状が形成されると考えられる。このとき、砂や細礫分については、石礫からなる河床と混ざらず通過し、砂を主材料とする下流区間に至って河床材料と混じり合いながら流下する²⁾。

これに対し、集中豪雨等により山地が広範囲に



写真-1 平成29年7月の赤谷川の状況

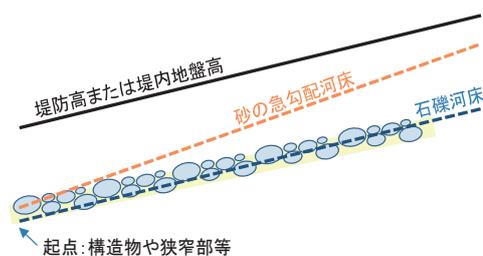


図-1 高濃度な砂・細礫供給時の急勾配河川の勾配変化

崩壊すると、砂分～細礫を大量に含む高濃度の土砂が、石礫からなる急勾配河川の上流部に供給される。このような状況下では河床表層に存在する石礫が砂や細礫の下に埋没することになる。そして、構造物や狭窄部等を起点として、元の石礫河床よりも急勾配の砂河床が形成される（図-1）。この状態で越水や溢水が生じると、河道内の流量低減に伴い土砂流送能力が減少するため、急激な土砂堆積が生じる。これが河道埋塞を引き起こし、上流からの水と泥流が堤内地に氾濫すると考えられる。

2.2 急勾配水路における砂の供給量と河床の応答

河道埋塞が発生する状況を確認するため、急勾配直線水路を用いて、砂の供給量と河床の応答に関する実験を行った。勾配1/50、幅0.2m、長さ10mの直線水路の水路床に、粒径0.2mmの砂を厚さ0.2mで敷き均した。そして、水路上流端から珪砂F7号（平均粒径0.2mmの一樣砂）の土

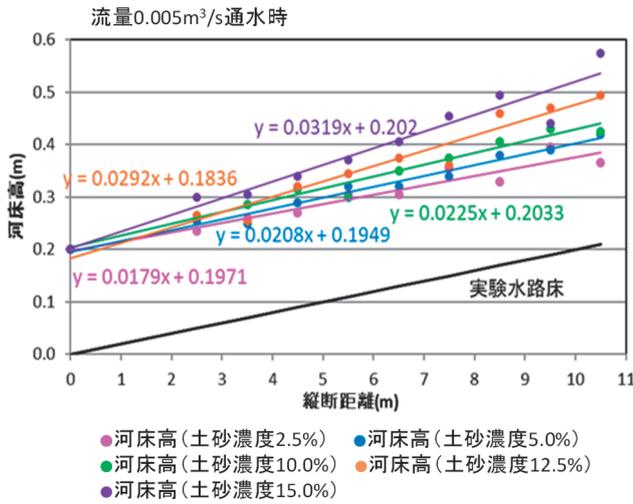


図-2 供給土砂濃度別の河床高縦断分布

砂を供給し、河床が概ね平衡状態となるまで20～30分間通水した後、河床高縦断形状を計測した。通水流量は0.005～0.02m³/s、供給土砂濃度は2.5～15%とした。高濃度での土砂供給を再現するため、模型上流端付近にホッパ（容積：0.55m³）を2台設置し、ベルトコンベアで随時土砂を補給しながら、所定の土砂濃度が得られるようにホッパ下端の孔の開度を調整した。

図-2に、流量0.005m³/s流下時における供給土砂濃度別の河床高縦断分布を代表して示す。土砂濃度5%の時に河床勾配が概ね1/50となり、水路床勾配と概ね一致していることが分かる。すなわち、この水路では、1/50の河床勾配に対し、流量0.005m³/sが流下した時の平衡土砂濃度が5%であったと解釈できる。これに対し、濃度の増加に伴い、河床勾配が急になることが確認できる。

2.3 既存の流砂量式による計算値との比較

急勾配実験水理で確認された河床勾配と土砂濃度の関係について、既存の流砂量式による計算値と比較した。以下に計算方法の概要を示す。急勾配実験の流量、水路幅、河床勾配、粒径を与条件とし、等流を仮定した場合の全掃流力または有効掃流力（全掃流力から、河床表層に形成される河床波による形状抵抗分を差し引いたもの）から、掃流砂量、浮遊砂量を求め、掃流砂量と浮遊砂量の和（空隙を含む）を流量で除すことで土砂濃度を算定した。なお、限界掃流力には岩垣式を、掃流砂量式には芦田・道上式を、浮遊砂巻き上げ量式には岸・板倉式をそれぞれ用いた³⁾。

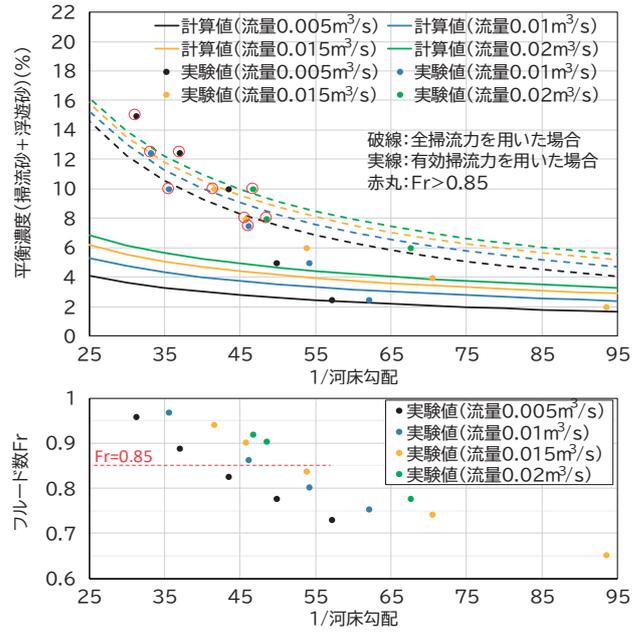


図-3 勾配と土砂濃度、フルード数Frの関係

図-3に、勾配と土砂濃度、フルード数Frの関係を示す。上段は河床勾配に応じた土砂濃度の計算値と実験値の比較を行った結果であり、実線は掃流砂量算定時に有効掃流力を用いた結果を、破線は全掃流力を用いた結果をそれぞれ意味する。下段は河床勾配に応じたFrを示している。

勾配が1/55より緩い場合では、土砂濃度は2～4%程度で、有効掃流力を用いて評価した土砂濃度の計算値と概ね対応している。一方、勾配が1/55より急になるあたりで土砂濃度が5%を越えはじめる。この範囲ではほとんどのケースでFrが0.85を超えており、土砂濃度の実験値は、有効掃流力を用いた計算値との乖離が大きくなり、全掃流力を用いた計算値に対応する傾向にあることが確認できる。これは、勾配が急になりFrが高まると、水面のうねりが河床波の波長と同位相となる波状河床あるいは反砂堆が形成され、全掃流力によって土砂が流送される状態になっていたためと考えられる。

以上の結果は、大量に土砂が供給される状況下では、Frに応じて適切に掃流力を評価することの必要性を示唆している。例えば、急勾配区間に有効掃流力を用いた方法を適用すると、土砂濃度を過小評価してしまうため、急勾配から緩勾配へと勾配が変化する箇所が生じる顕著な土砂堆積を適切に表現できない可能性があると考えられる。

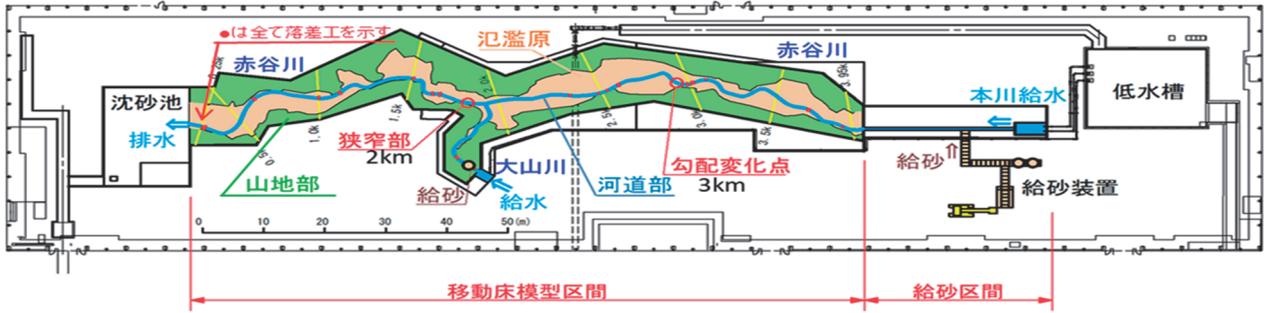
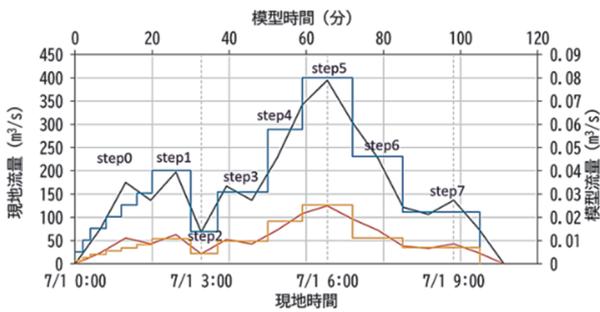
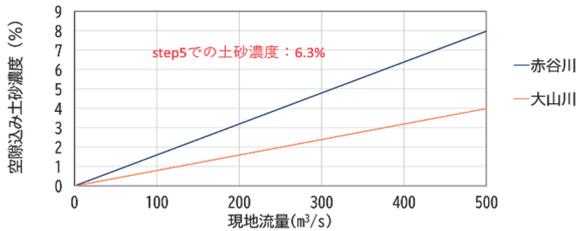


図-4 模型平面図

—赤谷川(現地流量) —大山川(現地流量) —赤谷川(模型流量) —大山川(模型流量)



(a) 流量ハイドログラフ



(b) 流入土砂量の濃度

図-5 流量ハイドログラフと流入土砂量の濃度

表-1 実験case

case	河道条件
1	H29河道(移動床)
2	H29河道(固定床)
3	整備計画河道(固定床)
4	整備計画河道(固定床)+樹林帯

で、所定の給砂量を設定できるようにした。支川大山川の給砂についてはホップ型の給砂装置を用い、所定の給砂量を設定できるようにした。

3.2 実験条件

図-5に、流量ハイドログラフ、流入土砂量ハイドログラフを示す。流量は、流出計算による実績流量を基に設定した。流入土砂量については、先に示した急勾配直線水路から流量と土砂濃度の関係式を作成し、これによって各流量に応じた土砂流入量を算定した後、総流入土砂量が0~4km区間における堆積土砂量の実績値と一致するように、供給土砂量を補正した。供給土砂の総量は、赤谷川、大山川でそれぞれ15.79m³、0.72m³ (空隙込み) である。供給土砂の粒径は、2.5~3.0km付近の堆積土砂の多くを占めていた極細砂 (0.085~2mm) および細礫 (2~4.75mm) ¹⁾を1/30縮尺の模型で再現するため、珪砂F7号 (平均粒径0.2mmの一樣砂) を用いた。これは、縮尺からするとやや大きめの材料であるが、これより小さい粒径を用いると粒子レイノルズ数が25以下となり、現地と異なる河床形態である砂漣が模型上に生じることで、相似性が満足されないおそれがあるためである。

実験caseの河道条件を表-1に示す。case1、2は実績の河道埋塞および氾濫の再現、case3、4は対策実施後の効果把握を目的とし、河道整備および水防林としての樹林帯設置を考慮した。case1では河床に粒径0.2mmの砂を敷き詰めた移動床

3. 河道埋塞に伴う洪水氾濫の再現実験

3.1 模型の概要

赤谷川の河道埋塞に伴う洪水氾濫を再現し、氾濫被害を軽減するための対策を検討するため、0km (赤谷川と筑後川との合流点) ~4km区間を対象とした縮尺1/30の赤谷川水理模型 (延長100m、河床勾配1/70の無ひずみ模型) を、国土技術政策総合研究所河川水理実験棟内に製作した。

図-4に模型の平面図を示す。落差工が15箇所に設置されており、2kmが狭窄部、3kmが勾配変化点となっている。大量の土砂供給条件に対応するため、ベルトコンベアによる給砂装置を構築した。土砂はバックホウによりベルトコンベア上に置かれた後、ベルトコンベアにより水路上流端に逐次供給されるようにした。このとき、ベルトコンベアに取り付けた摺り切り板の高さを調整すること

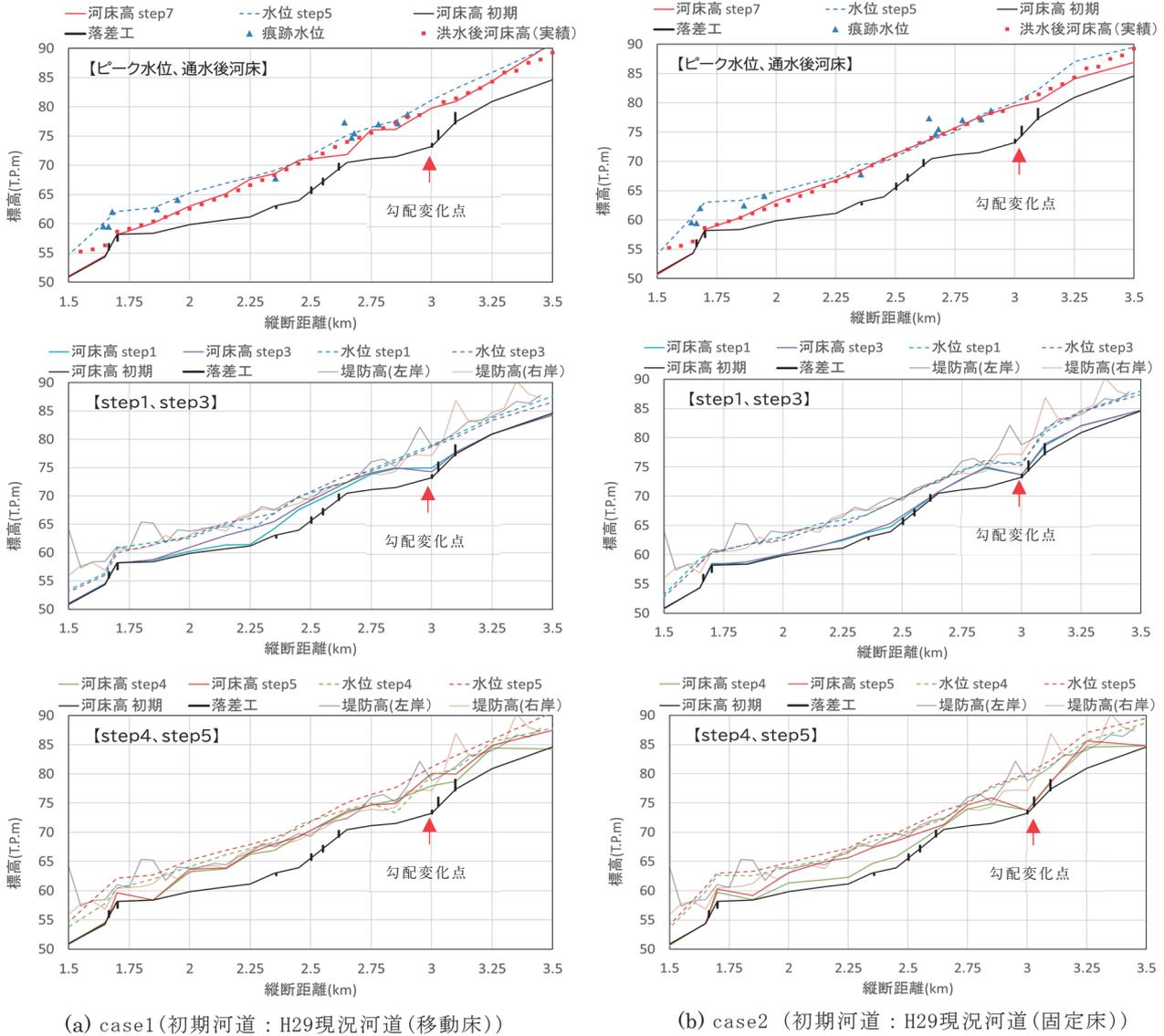


図-6 水位及び河床高縦断の時間変化(case1、case2)

とし、case2以降は、河床をモルタルで整形し固定床とし、粗度係数が $0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ となるように玉石を貼り付けた。case4は対策後の河道にさらに追加対策として樹林帯を設置した。

通水中は、図-5に示した各stepにおいて、水路中央部での河床高及び水位を5m（現地換算で150m）程度毎にメジャーによる直接計測を縦断的に実施し記録した。

3.3 実験結果

3.3.1 赤谷川の河道埋塞および氾濫の再現実験

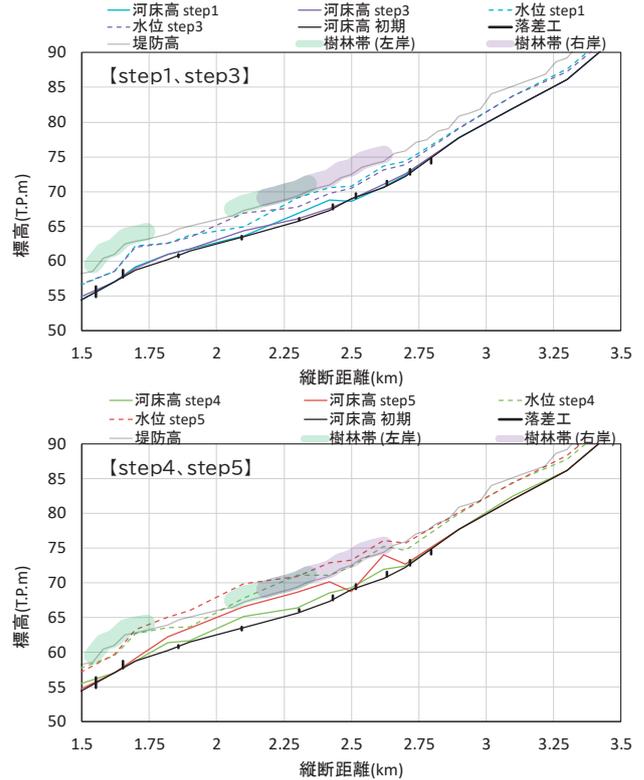
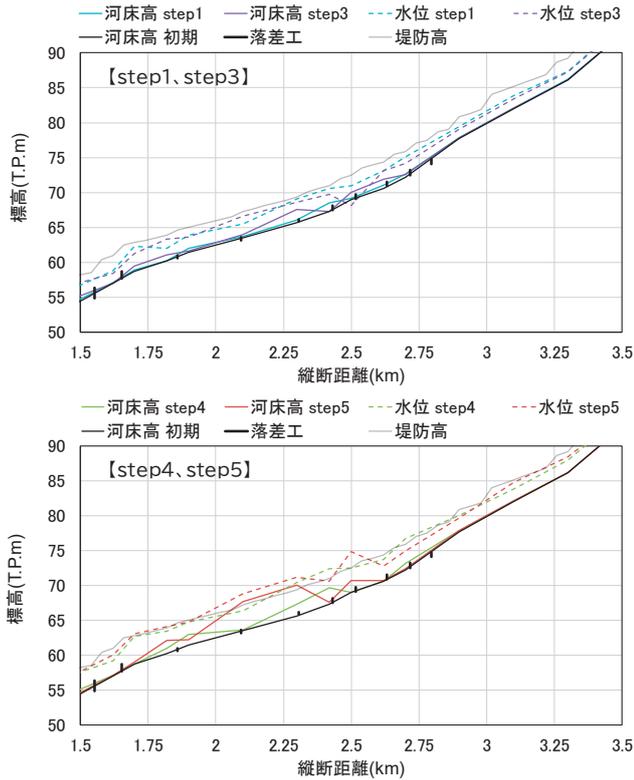
図-6に、case1、case2の水位及び河床高の縦断図を示す。上段の図は、ピーク時の水位と通水後の河床高を、痕跡水位、洪水後の実測河床高とともに示しており、中段、下段の図はstep1、3およびstep4、5の結果をそれぞれ示している。

上段の図より、case1、2ともにピーク時の水

位は痕跡水位を概ね再現している。洪水後の河床高についても、概ね実測値を再現しているが、初期河床を固定床条件としたcase2の方が、2.6km付近等の再現性が比較的高いことが確認された。

図-6の中段、下段の図によると、case1、case2ともに、1波形目のstep1から勾配変化点下流の2.75km付近で土砂堆積が進行しはじめ、流量規模が $200\text{m}^3/\text{s}$ を越えるstep1には、2.75km付近の水位が堤防高を超え、氾濫が生じた。2波形目のピーク付近となるstep4、step5では、氾濫が生じた2.75kmより下流の広い区間で顕著な堆積が生じ、土砂と洪水による大規模な氾濫が生じた。

以上より、赤谷川の河道埋塞および氾濫は、次の機構で発生することが確認された。①上流から供給された高濃度な砂が、勾配変化点に徐々に堆積する。②勾配変化点付近で流下能力の小さい箇



(a) case3(整備計画河道) (b) case4(整備計画河道+樹林帯)
 図-7 水位及び河床高縦断の時間変化(case3、case4)

所から氾濫が発生する。③氾濫することで下流の河道内流量が減少することで掃流力が低下し、土砂の過剰堆積を引き起こし河道埋塞が生じる。これが、大規模な洪水氾濫を発生させる。

なお、初期河床を移動床条件としたcase1では、step4まで徐々に河床が上昇するが、固定床条件としたcase2の場合では、step4までは河床上昇量は小さく、step5で急激に上昇するという興味深い結果が得られた。コンクリート水路や露岩部等の固定床上を砂が流下する場合、移動床に比べて限界掃流力が低下する等の理由から、堆積が容易には生じない一方で、流砂量がある値を上回ると急激に堆積局面へと移行することが知られており⁴⁾、本実験においても同様の現象が生じたものと推察される。現地においても、元河床を形成する石礫分の上を砂や細礫分が流下する時間帯では、このような現象が生じていた可能性があり、詳細な機構解明に向け引き続き検討が必要であるが、ここでは河床変動の再現性が比較的高かった固定床条件で以降の実験を行うものとした。

3.3.2 対策による氾濫被害軽減効果

case3以降は、河道条件を整備計画河道に変更して実験を行った。整備計画河道では河道線形の

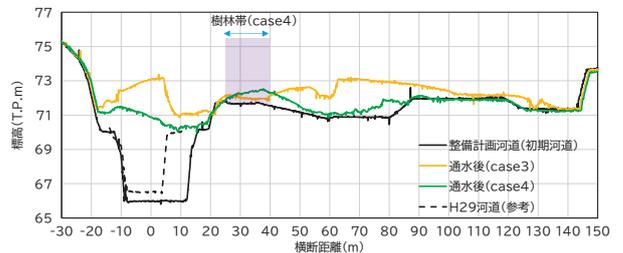


図-8 通水後の横断形状の比較(2.3km地点)

是正、川幅拡幅、河床掘削が対象となり、整備計画流量を計画高水位以下の水位で流下できるように設計されている。case4では、水位が高まり氾濫が生じやすいと考えられる湾曲外岸部に樹林帯(水防林)を設置した。樹林帯は、一般的な水防林の諸元⁵⁾とされる樹林帯幅15m、樹林帯密度120本/100m²を参考とし、これを概ね再現するように模型縮尺を考慮した上でプラスチックによる立体網状構造体を設置した。

図-7に、case3、case4の水位及び河床高の縦断分布をそれぞれ示す。現況河道から整備計画河道へと改修することで流下能力が向上し、整備計画流量以下となるstep4までの間は、顕著な氾濫は生じないことが確認された。また、現況再現

(case2) で顕著であった勾配変化点での堆積は、step5まではほとんど生じなかった。ただし、整備計画流量を超える規模となる2波形目のstep4では、case2と同様、勾配変化点(2.7km)下流の2.6km付近で河道埋塞が生じ、ピーク流量となるstep5では大規模な氾濫が発生した。

樹林帯を設置したcase4では、氾濫後に植生内に土砂が捕捉されることで河岸際の地盤高が高まっていることが、図-8から確認できる。また、氾濫原の土砂堆積量が、case3に比べて少なくなっている。このことから、河道沿の樹林帯は、植生内の土砂捕捉によって自然堤防帯が形成され、川幅が規定されることで、掃流力を大きく低減させることなく土砂を下流に流す機能が維持されやすいと考えられる。樹林帯は水の氾濫は許容するが、家屋等の破壊を引き起こし災害後の復旧作業を困難にする土砂の氾濫量を軽減できる効果があり、対策の一つの考え方として活用できる可能性がある。その一方で、流木化することが懸念されるため、流木化するリスクの低い樹種(竹林等)を選択する必要がある⁵⁾。

4. おわりに(河道設計の留意点)

これまでに経験したことのない豪雨発生時に、河床材料に比して小さい粒径の土砂が多量に供給される場合がある。このような場合、勾配変化点で顕著な土砂堆積が生じ、流下能力の低い箇所から洪水氾濫が起こり、その下流で掃流力が減少することで更なる土砂堆積が進み、最終的に河道が埋塞することで氾濫が発生することが実験から確認できた。細粒土砂の堆積を生じにくくするためには、河道設計実施時に、以下の点に留意する必要があると考える。

- 河床勾配が急でフルード数Frが0.85を越える区間で高濃度の砂の流下が想定される場合、有

効掃流力を用いた流砂量式では土砂濃度を過小に評価することになるため、勾配変化点での堆積～氾濫に至る状況を表現できない可能性がある。このような場合には、有効掃流力ではなく全掃流力を用いた検討も行い、河道埋塞および氾濫の危険性を総合的に判断していくことが望ましい。

- 有効掃流力か全掃流力のいずれを用いるべきかを判定するフルード数Frの閾値(0.85)は、対象とする粒径や粒度分布によって変化する可能性があり、今後、体系的な実験等を通じて汎用化を図っていく必要がある。当面は、河道埋塞の要因となり得る砂～細礫分に対し、本閾値が適用されることを想定している。
- 細粒土砂の堆積を軽減させるためには、流下能力不足箇所からの氾濫をなるべく生じさせないことが肝要である。よって、流下能力不足箇所では、河道掘削を着実に進めていく必要がある。ただし、勾配変化点付近では、土砂の過剰な堆積によって氾濫が生じ河道埋塞を引き起こす危険性があるため、例えば樹林帯の設置により、洪水の氾濫は許容するが土砂の氾濫量をなるべく軽減させるような対策も視野に入れた減災の工夫を施すことが望ましい。

参考文献

- 1) 筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会：筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会報告書、2017
- 2) 藤田光一、宇多高明、服部 敦：水系土砂収支分析のための「有効粒径集団」の考え方の提案、土木技術資料、第37巻、第12号、pp.34～39、1995
- 3) 公益社団法人土木学会：水理公式集〔2018年版〕、第2編第5章流砂、pp.281～291、2018
- 4) 久加朋子、竹林洋史、藤田正治：固定床と移動床が混在する場における動的平衡河床の不可逆性、土木学会論文集B1(水工学) Vol.71、No.4、I_889～894、2015
- 5) 浜口達男、本間久枝、斉藤松美：水害防備林、土木技術資料、第28巻、第9号、pp.51～56、1986

田端幸輔



国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部河川研究室 主任研究官、
博士(工学)
Dr. TABATA Kosuke

大谷 周



国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部河川研究室 研究官
OOTANI Amane

福島雅紀



国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部河川研究室 主任研究官、
博士(工学)
Dr. FUKUSHIMA Masaki