

河道セグメント2における細粒土砂堆積に伴う 高水敷再形成の簡易予測手法の開発

武内慶了* 大沼克弘** 佐藤慶太*** 服部 敦**** 藤田光一*****

1. はじめに

砂礫を河床材料とする河道セグメント2では、低水路河床部をウォッシュロードとして流下する細粒土砂が水際や高水敷上の植生繁茂域に一部捕捉され堆積することが知られており^{1),2)}、河道管理の面からもその重要性はすでに認識されていた³⁾が、実務上実効性のある予測ツールはほとんどなかった。川内川の事例(図-1,2)では、一連の区間に渡って低水路を拡幅した後、約7~9年という比較的短期間で元の川幅と同程度まで高水敷が再形成された。これは細粒土砂の流送量が砂礫に比べてはるかに大きい³⁾ので、その一部が堆積する条件がひとたび整うと、河積の減少が速やかに生じうることを意味している。掘削に対してこのような応答を示す河道については、拡幅の仕方を工夫するなど維持管理労力を低減することが重要である。その検討のため、高水敷再形成の予測技術として、通常用いられている河床変動計算手法とは異なり、植生繁茂域へのウォッシュロード堆積を対象としたモデルが必要とされる。そこで本研究は、川内川を事例として高水敷再形成の実態を明らかにし、その知見に基づいて高水敷再形成の簡易予測手法を構築し、実河川への適用性について検討した結果について報告する。

2. 細粒土砂堆積に伴う高水敷再形成の実態

川内川の検討対象区間(66.8~77.2km)における横断形状変化を観察した結果、図-3に示すように主に河岸付近に堆積するタイプ(以下、河岸際凸型)と、図-4に示すようにほぼ一様に堆積するタイプ(以下、一様堆積型)が見られた。

高水敷再形成が生じた一連区間ごとに、上流端からの流下距離と低水路・高水敷水深比の関係から、各堆積タイプの発生領域を調べた結果を図-5に示す。堆積タイプは目視により判断し、河岸侵

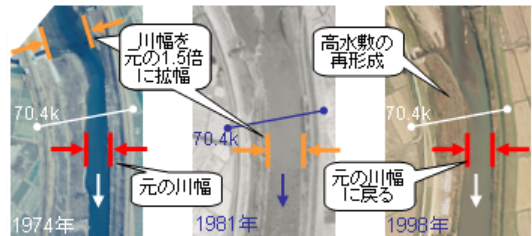


図-1 拡幅後に生じた低水路幅の縮小
(川内川70.4k付近)

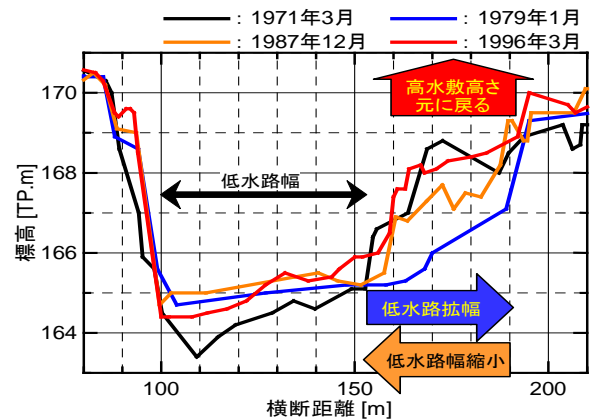


図-2 拡幅後の横断形状変化(川内川70.4k)

食等により明確に区別できないものについては、分析対象から除外した。低水路水深 h_m 及び高水敷水深 h_f は、当該横断測量の実施年月から次の測量実施年月の間に発生した最大流量流下時の水位 H_s を1次元不等流計算により算定し、図-3、4に示す低水路及び高水敷平均河床高 Z_{bm} 、 Z_{fm} との差分として求めた。また、一連区間の上流端から対象断面までの距離として流下距離 L を求めた。河岸際凸型と一様堆積型が混在する領域があるものの、 h_f/h_m が同等である場合、 L/h_f の増加に従い一様堆積型から河岸際凸型に変化する。また、 L/h_f が同等である場合、 h_f/h_m の減少に従い一様堆積型から河岸際凸型に変化する。これらの傾向は、砂州の位置が直線部、湾曲部(内岸側)によらない。以上より、一連の砂州において、堆積形状は上流部ほど一様堆積型に、下流部ほど河岸際凸型になる。また、低水路・高水敷の比高差が小さい (h_f/h_m が1に近い) 高水敷再形成の初期段階においては、砂州上流端からの距離によらず一様堆積型となる傾向にあることがわかった。これ

Development of the simplified estimation method for flood plain reformation by accretion of fine-grained soil in river segment 2

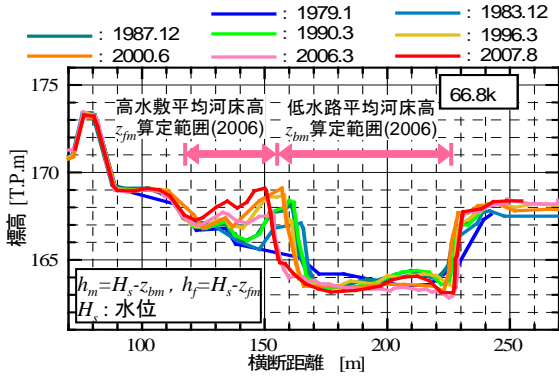


図-3 横断方向拡散型の例 (66.8k)

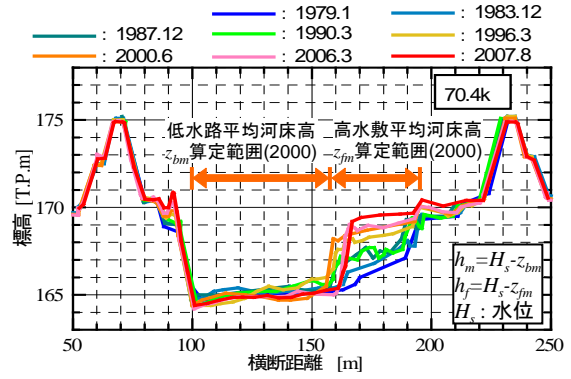


図-4 縦断方向移流型の例 (70.4k)

らの結果から、一様堆積型は一連区間の上流端側において横断方向にほぼ一様な細粒土砂濃度と見なせる低水路部の流れが高水敷上にそのまま乗り上げて下流に移流していく際に、細粒土砂が植生により捕捉され堆積するため、形成されると推察される。

3. 横断形状変化の簡易予測モデルの構築

3.1 予測モデルの基本的考え方

前章に述べた分析結果を踏まえ、形成メカニズムを次の2つに分けて考え、それぞれに応じた横断形状変化の簡易予測モデルを構築した。河岸際凸堆積型は、その横断形状が藤田ら²⁾による近似計算結果と良く類似しており、低水路部を流下する細粒土砂が横断方向に拡散し、高水敷上の植生による捕捉・堆積により形成されると考えられる。よってこのタイプを「横断方向拡散型」と定義する。一方、一様堆積型は、細粒土砂の横断方向拡散現象からは説明できない堆積形状を呈しており、細粒土砂が上流から縦断方向に移流し、植生による捕捉・堆積により形成されると考えられる。よってこのタイプを「縦断方向移流型」と定義する。基本的考え方を以下に示す。1)縦断方向に擬似等流を仮定し、横断面での河道形状変化を対象とした。2)細粒土砂の供給方法は、前述の横断方向拡散型、縦断方向移流型に対応させ、低水路からの拡散、上流からの移流の2通りを選択できるものとした。3)植生の効果を考慮した。4)取扱う細粒土砂は単一粒径とした。5)細粒土砂の堆積のみを考慮し、堆積範囲を予め与える方法とした。なお、領域区分図として図-5を用い、4.の計算で用いる細粒土砂の供給方法を選択した。

3.2 基礎方程式及び計算の手順

横断形状変化の簡易予測モデルに用いた基礎方

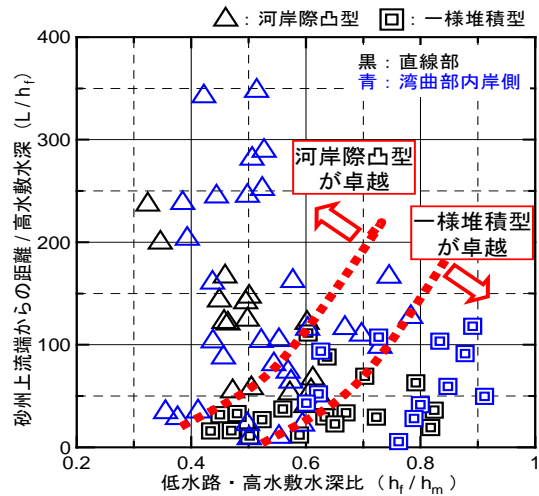


図-5 各堆積パターンの発生領域

程式を示す。まず、流れの基礎式として、流下方向に擬似等流を仮定した河道横断方向の運動方程式である(1)式と連続式(2)式を用いた。

$$gI_b - \frac{gn_b^2 \bar{u}^2}{h^{4/3}} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h \varepsilon \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$Q = \int h \bar{u} dy \quad (2)$$

ここに、 g : 重力加速度、 I_b : 河床勾配 (擬似等流仮定によりエネルギー勾配と同等)、 n_b : 粗度係数、 \bar{u} : 流下(x)方向の水深平均流速、 y : 横断方向の座標、 ε : 横断方向の渦動粘性係数 (= $\beta u_* h$)、 u_* : 摩擦速度、 h : 水深、 Q : 流量を示す。

次に細粒土砂堆積に関する基礎式を示す。同様に擬似等流を仮定し、河道横断面方向の浮遊砂濃度に関する拡散方程式を(3)式、流砂の連続式を(4)式に示す。

$$D_n \frac{\partial^2 (\bar{c}h)}{\partial y^2} + \frac{\partial D_n}{\partial y} \frac{\partial (\bar{c}h)}{\partial y} - D_n \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial \bar{c}_b}{\partial y} - c_b \left(\frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial D_n}{\partial y} + D_n \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + (q_{su} - w_0 c_b) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = \frac{-1}{1-\lambda} (q_{su} - w_0 c_b) \quad (4)$$

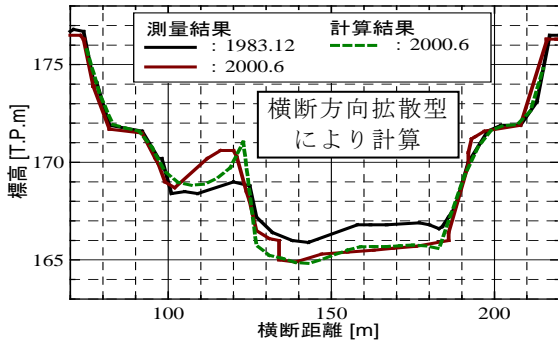


図-6 再現計算結果 (川内川74.0k断面)

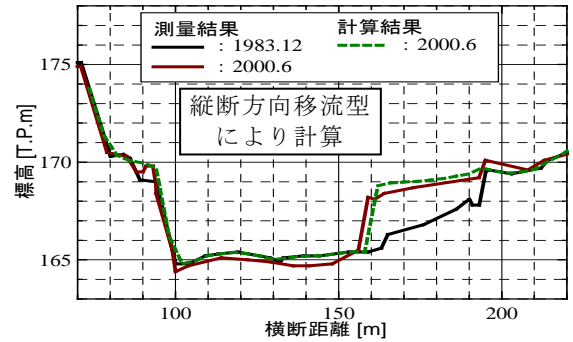


図-7 再現計算結果 (川内川70.4k断面)

ここに、 Z_b は高水敷再形成域における高水敷面の標高、 c :浮遊砂濃度、 c_b :河床底面の浮遊砂濃度、 \bar{c} :浮遊砂の水深平均濃度、 D_n :横断方向の拡散係数、 q_{su} :浮遊砂の河床からの巻き上げ量、 w_0 :土粒子の沈降速度、 λ :土粒子の空隙率、 t :時刻を示す。

横断方向拡散型の場合には、細粒土砂の低水路からの拡散による供給を再現するため、境界条件として、一般に用いられるウォッシュロード濃度式 $c = aQ$ から得られる濃度を河岸近傍の低水路部に与え、植生域においては藤田ら⁴⁾の考え方に従い、(3)、(4)式ともに、 $(q_{su} - w_0 c_b)$ を $(- \sigma w_0 c_b)$ に置き換えて計算した。なお、これは堆積速度 $R_D = \sigma w_0 c_b$ とおいたことを意味する。 σ は浮遊土砂の捕捉率を表す。このような境界条件の与え方としたのは、高水敷植生域へ供給される細粒土砂の濃度は植生域に最も近い低水路部の濃度によって決まるものであり、また、低水路部は流下断面の中でも流速が大きい領域であり、浮遊する細粒土砂が良く混ざり合うことから、低水路内での濃度がほぼ一様と見なせると考えたからである。一方、縦断方向移流型の場合には、上流からの一定濃度供給に伴う植生域への細粒土砂堆積を再現するため、(3)式を用いず植生部のみに細粒土砂の一樣濃度を与え、(4)式の $(q_{su} - w_0 c_b)$ を $(- \sigma w_0 c_b)$ に置き換えて計算した。実際は低水路部にも細粒土砂が供給されるものの、出水時の摩擦速度が大きく、ほとんど河床に堆積せず流下すると考え、植生部のみの細粒土砂堆積を対象とした。本研究では $\sigma = 1/3$ と設定した⁴⁾。

浮遊砂の鉛直濃度分布式は(5)式に示す Lane-Kalinske型の濃度分布を用いた。

ここに、 D_z :鉛直方向の拡散係数($= \kappa u_* h/6$)、 z :鉛直方向の座標を表す。(5)式を鉛直方向に積分すれば、水深平均濃度 \bar{c} が得られる。

$$\frac{c}{c_b} = \exp\left(-\frac{hw_0 z}{D_z h}\right) \quad (5)$$

流量 Q を与え、(1)式から得られる水深と流速及び、細粒土砂の粒径と供給濃度を(3)式に代入し、河床底面濃度 c_b を未知数として解いた。 c_b を用いて(4)式を解き、河床高の変動量を計算した。

4. 計算条件の設定方法及び計算結果例

横断形状変化の簡易予測モデルによる計算に必要な条件のうち、細粒土砂の粒径及び供給濃度については、高水敷再形成に対し直接的に影響を与えることから、それらの設定に注意を要する。ここでは、川内川において実際に採水観測された結果を用いて、細粒土砂粒径及び供給濃度を以下の手順により設定した。1)複数回分の採水に含まれる浮遊砂の粒度分布を平均化した。2)実際に高水敷に堆積する細粒土砂の最大粒径を把握し、それ以下で1)の粒度分布を再構成した。3)観測結果から、前述の濃度に関する係数 a の幅をある程度定め、計算により再現性の高い細粒土砂粒径と供給濃度の組み合わせを求めた。図-6及び図-7にそれぞれ、川内川74.0k(横断方向拡散型)及び70.4k(縦断方向移流型)を対象とした再現計算結果を示す。いずれも細粒土砂粒径を0.08mm、供給濃度 \bar{c} はそれぞれ $6.5 \times 10^{-7} Q$ 、 $3.0 \times 10^{-7} Q$ とした。また、74.0k(図-6)断面は低水路河床が低下傾向にあるため、出水時の冠水深を適切に考慮すべく、測量年月を迎えるごとに低水路部の河床変動量を反映・更新した。横断方向拡散型となる74.0k断面(図-6)では、河岸部の高水敷高さは概ね再現できているものの、河岸部の裏側の堆積は十分に表現されていない。計算結果から河岸付近の堆積部斜面の横断勾配は約40度となっており、計算に与えた細粒土砂粒径の水中安息角より大きくなっていることから、堆積形状が水中安

息角以下で安定する効果が組み込まれていないこと、及び、低水路内濃度に比べ小さいながらも、縦断方向移流型による細粒土砂供給を見込んでいないことが考えられ、改善の余地を残す。縦断方向移流型となる70.4k断面（図-7）では、高水敷の形成幅及び堆積高さは良く再現されている。対象区間で実際に観測された浮遊砂濃度は、粒径0.1mm以下で $\bar{c}=4.5\sim 5.7\times 10^{-7}Q$ 程度であり、横断方向拡散型で与えた濃度と大きな違いはない。縦断方向移流型で与えた濃度は横断方向拡散型で与えた濃度に比べ小さい。これは、細粒土砂が一連の植生域を縦断方向に移流するに従い、対象断面より上流側で捕捉され、縦断距離の増大に従い細粒土砂濃度が減少したものと説明できる。

5. まとめ

上流端からの距離Lに着目し、細粒土砂堆積に伴う横断形状変化のタイプごとに、その発生領域を調べた。次に横断形状変化の簡易予測モデルを開発した。適用対象とする河川の浮遊砂観測結果を用いることで実現象を表現でき、さらに細粒土砂の供給方法を組み合わせることによって、現状より精度の高い予測ができる見通しを得た。このモデルの開発によって、従来定性的に取扱われていた細粒土砂堆積現象を、定量的に評価することが可能となった。より精度の高い予測計算実施のために、1次元河床変動計算と組み合わせ、低水路部の河床変動を見込む方法の開発も併せ、今後の課題である。また、実際の河道変化は、細粒土砂の堆積現象が中心であるものの、河岸侵食現象が共存する可能性があることがわかっている。より精度の高い予測手法とするためには、河岸侵食の

影響も考慮する必要がある。横断形状変化の簡易予測モデルを河道管理に活用することにより、以下に示す効果が期待される。1)計画性の観点から、河積減少速度を算定し、将来生じ得る河積維持のための河道掘削のタイミングを推定することが可能となる。2)河積減少速度をより小さくすることを目的とし、河道掘削形状の検討が可能となる。3)必要流下能力を確保する手段の検討を想定した場合に、対象期間内における河道掘削による維持管理労力を算定するツールとして活用できる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、国土交通省九州地方整備局川内川河川事務所より、貴重な調査データを提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題、土木学会論文集、第345号/II-1、pp.1～19、1984.5
- 2) 藤田光一、John A. MOODY、宇多高明、藤井政人：ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小、土木学会論文集、第551号/II-37、pp.47～62、1996
- 3) 藤田光一：流砂系における土砂動態のとりえ方と広域土砂動態制御への展望、2000年度（第36回）水工学に関する夏期研修会、pp.B-4-1～4-15、2000
- 4) 藤田光一、李參熙、渡辺敏、塚原隆夫、山本晃一、望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション、土木学会論文集、第747号/II-65、pp.41～60、2003
- 5) 河道特性に関する研究—その3—～河床変動と河道計画に関する研究、第46回建設省技術研究発表会報告、pp.600～651、1992

武内慶了*



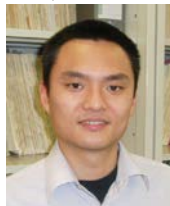
国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 研究官
Yoshinori TAKEUCHI

大沼克弘**



国土交通省国土技術政策総合研究所環境研究部河川環境研究室 主任研究官
Katsuhiko ONUMA

佐藤慶太***



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 部外研究員、博(工)
Dr. Keita SATO

服部 敦****



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長、博(工)
Dr. Atsushi HATTORI

藤田光一*****



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部流域管理研究官、工博
Dr. Koh-ichi FUJITA