礫・シルト充填河床モデルを用いた 植生を伴う流路の変動解析

NUMERICAL ANALYSIS OF CHANNEL DEFORMATION ON THE BASIS OF GRAVEL-SILT MIXTURE MODEL IN RIVER BED

関根正人¹・矢島英明²

Masato SEKINE and Hideaki YAJIMA

1 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2 正会員 工修 建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11, 当時, 早稲田大学大学院学生)

The channel deformation of gravel-bed river with vegetation zone was investigated in the present study. The channel is assumed to be constituted by a gravel-silt mixture. In order to simulate such a phenomenon, the erosion rate of silt from gravel bed surface is the important factor to be considered. The formulation by Ashida and Fujita (1986) was applied here in the numerical model. Numerical computation was conducted by considering the effect of silt erosion and deposition on the channel deformation. As a result of this, it was confirmed that the depositional configuration like a terrace formed just inside the vegetation zone, which was mentioned by Fujita et al. (1996).

Key Words: gravel bed river, gravel-silt packed model, vegetation, numerical analysis, washload.

1. 序論

著者らは、近年、鬼怒川 54.5 ～ 56.5km の区間を対象として洪水前後に引き起こされた流路変動について現地調査を含めた研究を進めてきている。このような河川の礫床区間における流路変動の特徴の一つとして、低水路を構成する主要材料である礫に比べてはるかに粒径の小さな微細砂あるいはシルトが、河岸水際付近あるいは高水敷に堆積することが挙げられる。藤田ら¹⁾は、川内川や米国 Powder River における調査ならびにデータの解析結果を裏付けとして、(1) 水際付近へのシルトの堆積、(2) 堆積部分への植生の繁茂、(3) 植生帯への更なるシルトの堆積によるテラス状の地形の形成、の結果として高水敷が形成されることを指摘し、これが実際に生じた低水路川幅の縮小の原因になったと論じている。このような礫とシルト(あるいは微細砂)からなる顕著な粒径差をもつ材料の移動床過程を考えていく上では、礫間からのシルトの巻き上げ量の評価法や、この巻き上げが引き起こされる混合粒径河床の取り扱い方などをより合理的で精緻なものへと

変えていくことが重要である。これまでの河床変動計算を概括すると、たとえば板倉・岸²⁾の式など主として砂床河川を想定して導かれた巻き上げ速度式が適用されることが多いが、この関係式を礫間に存在するシルトなどの浮上・巻き上げに適用できるか否かは定かではない。また、混合粒径河床の変動を予測する場合には、一般に、交換層の概念に依拠した取り扱いがなされてきたが、上記のシルトの巻き上げの取り扱いと河床のそれとは当然密接に関わりをもつため、両者の間で整合性のとれた解析法をとることが望ましい。以上の点に鑑み、本研究では、芦田・藤田³⁾が実験結果を基に導いたシルトの巻き上げ速度式を適用することにし、この考え方を生かした混合河床モデルを考案した。

2. 礫・シルト充填河床モデルと解析の概要

(1) 概要

本研究では、これまで必ずしも的確に取り扱うことのできなかった「礫・シルト混合材料」からなる河道の流路変動過程について解析した。詳細は後述

することにして、解析手法の骨子を列挙すると、以下ようになる。すなわち、(i) 浅水流方程式に依拠した平面二次元流れの解析⁴⁾、(ii) 縦横断方向の勾配の影響を考慮して拡張化された掃流砂量関数を用いた礫の輸送量の評価、(iii) シルトの河床からの巻き上げ予測式³⁾と、水深平均化された移流拡散方程式に基づくシルトの輸送に関する解析、(iv) 斜面崩落モデル⁵⁾による河岸浸食の取り扱い、ならびに(v) 後述する礫とシルトからなる二粒径混合河床を取り扱う「礫・シルト充填河床モデル」を用いた河道の変動予測計算、などからなる。

浮遊した土砂の濃度に関しては、上記の通り水深平均化された移流拡散方程式を解くことで評価することにしたが、この際には底面近傍濃度 C_b を評価することが必要となる。ここでは、濃度の鉛直方向分布としてLane-Kalinske型の指数分布に従うものとして、水深平均濃度と C_b とを関連づけて解いている。また、濃度拡散係数については、従来通り水の乱流拡散係数に等しいものと近似した。

本研究で検討の対象とする現象としては、序論で説明したような「植生群落内へのシルトの堆積とそれに伴うテラス状の地形の形成過程」である。

(2) 礫河床からのシルトの巻き上げ速度

いま、河床の主たる骨格が礫により構成され、その間隙をシルトが埋めているような礫床河床について考える。シルトは、水流の作用を受けて浮遊形式の移動をするため、その河床からの動き出しは、一般に「浮上」あるいは「巻き上げ」と表現される。なお、シルトのその後の移動が浮遊砂であるのかウオッシュロードであるのかはここでは問題とせず、従来の考え方に倣って土砂の移流・分散過程として取り扱うことにする。さて、シルトの河床からの巻き上げ量の評価についてはこれまでにいくつかの研究がなされている。しかし、ここで想定しているような礫床からの土砂の巻き上げ量の予測に適用できる予測式はほとんどなく、わずかに芦田・藤田³⁾の式があるだけである。そこで、本研究では、この関係を用いることにする。この予測式の詳細については原論文の説明を参照することが望ましく、ここでは論文構成上必要な知見、すなわち基本的な考え方と導かれた巻き上げ速度式そのものについてのみに簡単に説明しておく。

芦田・藤田³⁾は、図-1に示すような礫とシルト（あるいは細砂）からなる河床について実験的な検討と、確率論的手法に基づく理論的な取り扱いから、シルトの巻き上げ速度式を導いている。彼らによれば、粒径 D_G の礫骨格の頂部に相当する河床表面の高さを η 、礫頂部からシルト層の上面までの鉛直距離を Δ_s とする。そして、最も重要なことは、粒径

図-1 礫・シルト混合河床に関わる定義

D_s のシルトの巻き上げ量は、その上の水流の掃流力に加えてこの Δ_s の影響を顕著に受けるということにある。これは、シルトの浮上に礫による遮蔽効果が無視し得ないためである。芦田・藤田により導かれた巻き上げ速度式を整理し直すと、次のように書き表わされる。

$$E_s = \frac{2}{3} K F_s \sqrt{\frac{3}{R_s + 1}} \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{c k^2}}{\xi_o} \int_{\chi_o}^{\infty} \sqrt{\chi^2 - \chi_o^2} e^{-\frac{\chi^2}{2}} d\chi$$

$$\xi_o = \frac{w_o}{u_*}, \chi_o = \frac{\pi}{8} C_{D_o} \frac{\xi_o^2}{c k^2}, C_{D_o} = 2 + \frac{24}{\frac{w_o D_s}{\nu}} \quad (1a, b)$$

ここに、 E_s は単位時間・単位面積当たりに巻き上げられるシルトの体積をその最終沈降速度 w_o で除した無次元量を表す。また、式中の c は揚圧力係数、 k は遮蔽係数であり、前者は $R_e^* = u_* \Delta_s / \nu$ の関数となり、また、後者は Δ_s / D_G の関数となるそれがそれぞれ示されている。そこで、この関数を考慮することで、 E_s の評価が可能となる。なお、 R_s はシルトの水中比重、 ν は水の動粘性係数、 C_{D_o} は抗力係数であり、 K は定数(=0.035)である。

(3) 礫・シルト充填河床モデル

礫とシルトからなる混合河床の変動を予測する上では、この芦田・藤田の巻き上げ速度式を適用するのがその信頼性において最良の選択であることはすでに述べた。そこで、ここではこれを組み込んだ河床変動解析法について考えることにする。従来の河床変動計算では、一般に「交換層」という概念を導入して「河床面高さ」と「礫とシルトの混合比率」の時空間的な変化を評価する。その際、交換層の厚さを90%粒径の数倍程度にとるなどして、この層内で礫とシルトが均一に混合されるとしてきた。しかし、芦田・藤田の予測式を実際に適用しようとすると、式(1)中に現れる c および k を支配する物理量である「礫間を埋めるシルトの上面の高さ」 Δ_s を同時に評価しつつ変動計算を進めていくことが必要

図-2 礫-シルト混合河床における変動の概念図：図の着色部にシルトが充填されている。
(a) 基本形, (a) → (b) → (c) シルトの堆積のみが生じた場合の変動, (b) → (d) 礫の堆積のみが生じた場合の変動

となる。このような取り扱いを可能とするため、本研究では、以下に説明するような河床の取り扱い方法を考案した。以下、これを「礫・シルト充填河床モデル (Gravel-Silt packed model)」と呼ぶ。

ここでの基本的な考え方は、(a) 河床は原則として礫群によりその骨格が形作られる、(b) シルトは礫骨格の間隙を充填するように存在するが、間隙を充填して余りある量のシルトがある場合には、礫頂部を越えてシルトだけの堆積層が形成される、というものである。さらに、芦田・藤田よれば、礫間からのシルトの巻き上げは、 Δ_s が礫径 D_G 以上になると生じないとされるため、ここでは礫径に相当する厚さの表層（言い換えれば、コントロール・ボリューム）を河床表面下にとって、土砂の混合を考えていく。そこで、粒径 D_G を一辺とする立方体をコントロール・ボリュームにとって説明していくことにする。この中に含有される礫の体積は $\pi D_G^3/6$ であり、 D_G^3 のボリュームのうちシルトによって充填される体積は、礫以外で占められる体積から水で満たされる空隙部分を差し引いたものということになる。そこで、敢えてこの空隙を λ_p と記すと、このコントロール・ボリューム内に含有されるシルト体積の上限値 $V_{S\text{ packed}}$ は、

$$V_{S\text{ packed}} = (1 - \lambda_p)(1 - \pi/6) D_G^3 \quad (2)$$

となる。また、このコントロール・ボリューム内に存在するシルトの含有率 F_s は、

$$F_{S\text{ packed}} = \frac{(1 - \lambda_p)(1 - \pi/6)}{\pi/6 + (1 - \lambda_p)(1 - \pi/6)} \quad (3)$$

となる。このように礫骨格の間隙がシルトで充填された状態を **full-packed condition** と呼ぶことにする。次に、同一のコントロール・ボリュームにおいて、礫頂部から Δ_s の高さまでしかシルトが充填されていない場合について考えると、図-1 より、ここに含まれるシルトの体積 V_s は、

$$\frac{V_s}{D_G^3} = (1 - \lambda_p) \left[1 - \zeta - (\pi/12) \left(1 + \cos \theta + \frac{1}{2} \cos \theta \sin^2 \theta \right) \right] \quad (4)$$

となる。ここに、 $\zeta = \Delta_s/D_G$ 、 $\cos \theta = 1 - 2\zeta$ である。また、このコントロール・ボリューム内のシルトの混合比率 F_s は次のように書き表される。

$$F_s = \frac{V_s}{\pi D_G^3/6 + V_s} \quad (5)$$

そこで、コントロール・ボリューム内のシルト体積 V_s を求めることができれば、この式から F_s を求めることができる。一方、 V_s が既知であれば、式 (4) の関係を ζ について解くことで Δ_s を求めることができる。このように、河床表層のコントロール・ボリューム内に存在するシルトの体積に関する保存則から V_s の値の時間変化を追跡していくことにより、河床面下のシルトに関する情報がすべて得られることになる。

図-2 には、河床上昇が生じる場合を例に変動パターンの模式図を示した。これを用いて河床の取

図-3 数値解析結果：(a) 水路床高等値線図，(b) 表層におけるシルトの含有率，(c) 摩擦速度の等値線図
図中の破線で囲まれた部分が植生群落区域を，点線が水際線をそれぞれ表す．一点鎖線は，図-4の横断面位置を表す．

り扱いの概要について説明する．ここでは，前述の通り，最も上位に位置する礫の頂部を河床表面とし，これ以下に位置する礫は互いに接するように密に配置されているものと近似する．図-2の場合には，便宜上，第二層目の礫の底部を仮想境界にとり，これより上に存在する礫およびシルトの体積保存則を考えていく．まず，図-2(a)から(b)を経て(c)へと至る過程は，シルトのみの堆積が生じる場合を表す．この場合には，礫骨格の配置に変化が生じないため，堆積するシルト体積に見合った厚さだけシルト面が上昇する．この図-2(a)から(b)の過程では，礫骨格の隙間に更なるシルトの充填が行われるだけであるので，河床面高さは変わらない．しかし，図-2(b)から(c)の過程においては，礫上部に新たにシルトの堆積層が形成されるため，このシルト層の上縁が新たな河床面ということになる．この過程の解

析では，まず最初に礫群の間隙中の未充填部分の体積を求め，この過程で生じた総堆積量からこの量を差し引いた体積 ΔV_s を評価する．次にこの体積に見合ったシルトの堆積層が生じるものとして，その厚さ l_{SILT} を $(\Delta V_s / D_G^2) / (1 - \lambda_p)$ により求める．一方，図-2(b)から直接(d)へと変化する過程は，礫のみの堆積する場合を表している．図-2(d)左側には礫の上面が δ_G だけ上昇する場合の模式図が示されている．図のように礫間がシルトで充填されていない河床に対して芦田・藤田の巻き上げ速度式を適用しようとする，礫頂が河床表面と一致するような礫配列となるように置き換えて河床を捉えることが必要となる．そこで，ここでは，図-2(d)右側に示したように，礫ならびにシルトの体積がそれぞれ等価な配列をもつ河床に置き換えて，シルトの巻き上げを考える．この場合には，仮想境界より上方に

あるシルトの体積が変わらないためシルト上面の位置も不変である。いま、仮にこのあとも礫のみの堆積が続くとすると、やがてはシルトの充填が一切なされていない礫表層が生み出されることになる。前述の通り、 $\Delta s/D_G$ が1を越えるとシルトの巻き上げは生じないため、さらにこの変化が続いたとしても、これ以降のシルトの巻き上げは生じないため、もし新たにシルトの堆積が生じるまではシルト面高さの変化は止まることになる。

以上、説明を簡単にするために礫あるいはシルトの堆積が単独で生じる場合の考え方を示したが、両者が同時に堆積を起こす場合や、これとは逆に浸食が生じる場合についても基本的には同一の考え方に基づいてこれを取り扱うものとする。

最後に、礫頂部の高さならびにシルト体積の時間変化量について説明する。まず、礫に関しては、その存在比率を考慮しつつ体積保存の関係式に基づいて計算し、河床骨格をなす礫頂部の高さを求める。一方、仮想境界面上に存在するシルト体積に関しては、次の体積保存の関係から評価する。ここでは、 $D_G \times D_G$ の大きさの底面上の直方体を想定し、この中に含まれるシルト体積を V_{SILT} としてある。

$$\frac{dV_{SILT}}{dt} = D_G^2 w_o (C_b - E_s) \quad (6)$$

次に、この体積 V_{SILT} から表層のコントロール・ボリューム内のシルト体積 V_s を求める。その際、シルトで充填済みの礫層がある場合には、式 (2) を考慮することになる。そして、この V_s の値を式 (4) に代入し、これを η について解くことで、シルトの上面の高さを評価することができる。

ここでは、礫径 D_G に一致する大きさのコントロール・ボリュームをとって説明してきたが、実際には $\Delta x \times \Delta y$ の大きさをもつ計算格子に対してこの取り扱いを行うことになる。また、この「礫・シルト充填河床モデル」は、 Δs を合理的に評価することを主たる目的として導入されることになるが、これ以外の礫の移動やシルトの巻き上げあるいは堆積の量についてまで従来と異なる取り扱いをしたわけではない。この点に注意が必要である。また、幾何学的に理想的とも言えるこのような状態を仮定することの影響についても検討の余地がある。これについては今後の課題である。ただし、このような考え方によれば、ここでは触れなかった三粒径以上の混合砂礫に対しても拡張して取り扱うことが比較的容易である。

3. シルトの堆積に伴うテラス地形の形成

本研究では、礫床河川の流路変動に及ぼすシルト

図-4 注目断面における諸量の横断方向分布：
 (a) 横断面形状（破線が初期河床），(b) 表層におけるシルトの含有率（初期値は0.389），(c) 摩擦速度，ならびに (d) 無次元巻き上げ速度と浮遊砂の底面近傍濃度

の堆積の影響について考える。具体的には、シルトの堆積が植生によって促進されるとの指摘があることを考慮して、著者らがこれまで進めてきた解析⁴⁾の延長線上に本解析を展開する。すなわち、初期状態として、底面幅 14 cm、横断方向勾配 1/3、Bank の高さ 7 cm の台形断面を有する移動床直線流路の水際付近に、植生群落が左右交互に存在するような場を想定する。初期水路床は、その骨格を粒径 2.5 mm の礫で形成し、その間隙を 0.1 mm のシルトが充填しているものとする。解析に当たっての水理条件ならびに植生条件は、前報によるもの⁴⁾と同一であり、たとえば、流量を 5.16 l/s、平均水路床勾配を 0.008、植生密度を 1.25 とする。解析に当たっては、植生群落が周期的に複数組存在するものとし、上下流端で周期境界条件を適用することで、植生群落に

見合ったいわば平衡状態の解を求める。

ここでの主な解析結果を図-3および図-4にまとめて示した。なお、この解析結果はほぼ動的平衡状態におけるものと言える。まず、図-3には、通水開始から90分後の水路床高、表層におけるシルトの含有率ならびに摩擦速度の等値線図をまとめて示した。まず、図-3(a)の水路床高に関しては、植生群落の流路中心軸側の境界面に沿うようにその外側に洗掘域が形成される。この点は前報⁴⁾で議論した礫のみの場合と変わらない。一方、図-3(b)に示した表層に占めるシルトの含有率について見ると、植生帯の端に沿ってその内側にシルトの比率が高い区域があることがわかる。特に図中に一点鎖線を付した横断面の周辺では、かなり内側にまで黒で塗り分けられた区域、すなわち表層がシルトで100%占められている区域が及んでいることがわかる。これは、この区域にシルトが層をなして堆積したことを表す。この一方で、流路中心部には白で塗り分けられた区域、すなわち表層がほとんど礫のみになっている区域が現れている。これは、この部分のシルトが表層から巻き上げられたことを意味し、全体として顕著な土砂の分級が生じていることがわかる。図-3(c)には流れ場に関わる情報として、参考までに摩擦速度の分布を示してある。この図より、シルトの堆積域では結果として摩擦速度が大きく低下していることが見て取れる。

図-4には、図-3に一点鎖線を付して示した横断面における諸物理量の分布をまとめてある。まず、図-4(a)より、この断面の左岸側にシルトがテラス状に堆積していることがわかる。また、図-4(b)よりこの堆積域の表面がシルトのみで構成されていること、ならびに、その右側の流路中央部では逆にシルトが存在していないこと、などが理解できる。最後に、図-4(c)(d)より、この断面の植生帯内では、浮遊土砂を運び込むことはあってもこれを再浮上させるほどの掃流力がないことが見て取れる。なお、テラス状の地形が植生帯の下流側で顕著に成長しないのは、植生の前面を通して運び込まれたシルトの堆積がその上流側に限られ、下流側の土砂濃度の供給が側面を通しての拡散によるものだけとなるためと判断している。

このように、植生によってシルトが捕捉され、結果としてテラス状の地形が形成されることが数値解析によっても理解された。序論で紹介した低水路川

幅が縮小する現象は、ここでの解析対象と同様のメカニズムによって引き起こされるのではないかと考える。

4. 結論

本研究では、礫床河川における流路変動の予測を合理的に取り扱うための手法について検討した。ここでは、礫の間隙からのシルト(細砂)の巻き上げ量を予測する手法として最も信頼性の高い芦田・藤田の予測式を適用することにした。そのため、この予測式の考え方と整合性のとれた解析手法となるように「礫・シルト充填河床モデル」と名づけた河床表層の取り扱い方を導入した。本研究では、この解析手法を用いて、植生帯内に堆積したシルトが新たにテラス状の地形を形成する過程を再現することに努め、概ねその目的を達することができたと考える。しかし、未だ十分な検討とは言えず、今後に残された課題は少なくない。更なる研究を進めていく予定である。

謝辞：本研究は、河川懇談会共同研究(関東地方整備局下館河川事務所)の一環として、また国土交通省建設技術研究開発助成「環境ホルモンの無害化と暴露量削減に関する研究開発」の一部として行われたものである。

参考文献

- 1) 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, No.551/II-37, 47-62, 1996.
- 2) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, Proc. ASCE, Vol.106, HY8, 1325-1343, 1980.
- 3) 芦田和男, 藤田正治: 平衡・非平衡浮遊砂量算定の確率モデル, 土木学会論文集, No.375/II-6, 107-115, 1986.
- 4) 関根正人・矢島英明: 植生群落を伴う河道の流路変動予測に関する研究, 水工学論文集, 第48巻, 1045-1050, 2004.
- 5) 関根正人: 斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション, 水工学論文集, 第47巻, 637-642, 2003.

(2004.9.30 受付)