

バングラデシュ国・メグナ川における 河道変動問題への数値解析手法の適用

APPLICATION OF THE NUMERICAL ANALYSIS TO THE MORPHOLOGICAL BEHAVIORS OF THE MEGHNA RIVER IN BANGLADESH

長田信寿¹・細田 尚²・村本嘉雄³

Nobuhisa NAGATA, Takashi HOSODA and Yoshio MURAMOTO

¹正会員 工修 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

Morphological processes of actual river have been investigated by means of numerical analyses in this paper. The Meghna river which is one of the major rivers in Bangladesh has encountered with some problems on morphological behaviors. In our study reach of the Meghna, two main problems have been occurred. One is the bank erosion around the meander bends, and the other is the local scouring near the abutment of Meghna bridge. In order to cope with these problem, we developed a numerical model which can be applied to the bed deformation due to both bed and suspended loads, and to the bank line shifting due to bank erosion. The model is applied to the above problems in the Meghna river, and then we discuss the reproduction of morphological process and evaluate the effect of countermeasure on the local scouring.

Key Words : Channel process, Numerical analysis, Bank erosion, Local scouring

1. はじめに

実河川において構造物あるいは河道法線の蛇曲によって、河岸近傍への偏流が生じる場合には、河岸近傍河床の低下さらには河岸侵食により、洪水安全度が大きく低下するため、これに起因する多くの災害事例が、国内外において報告されている。

このような問題に際して、現象の解明、予測あるいは対策を行う上で、近年、スキーム及び計算機の発達により、数値解析的アプローチに対する期待が高まりつつある。そのような中で、河岸侵食による流路変動の解析は、従来より直線流路に関して多くの研究が行われている^{1)・2)}。湾曲・蛇行流路に関しては、関根³⁾、清水ら⁴⁾、守田・江頭ら⁵⁾、著者ら⁶⁾の実験水路における河岸侵食現象に対して数値解析がなされている。しかし、実河川への適用例は少なく、S. Darby・C. Thorne⁷⁾が一次元的な解析により計算を行っているが、実河川の平面2次元的な河岸線の移動・流路変動を計算した例はほとんどないのが現状である。

ここでは、バングラデシュのメグナ川の河道変動を対象に数値解析を行い、当河川で実際に生じている問題点に対して水理量との関連性、対策案の効果等について検討を行う。まず、次章で、メグナ川の概要、発生している問題等について述べる。

2. メグナ川の概要

メグナ川は、バングラデシュ3大河川(ガンジス川・ブラマプトラ川・メグナ川)の一つであり、流域面積は約77,000km²(パドマ川合流地点)、河道延長は約880kmである。また、流況特性としては、高水期と低水期の流量の差が大きいのが特徴である⁸⁾。

本研究の対象とした区間の河岸線経年変化を1989年から1995年について図-1に示す。

対象区間はメグナ橋より上流7km、下流3kmの10km区間である。この中で特に河岸侵食の著しい区間は、対象区間上流蛇行部右岸のR6~R9、メグナ橋上流左岸のL1~L4、及びメグナ橋下流右岸のRD1~RD4である。これらの区間においては、1989年~1995年の6年間で、年平均にして約20~30m、年最大で約50mの河岸の後退が観測されている。

河岸侵食は、それ自体も住民の家屋・土地を奪うため重要な検討課題であるが、最近このような河岸侵食がメグナ橋に与える影響についても懸念されている。メグナ橋は1991年2月に完成したが、同年洪水期にL1付近の河岸侵食が生じ、メグナ橋直上流左岸の護岸が倒壊するに至った。そこで、1993年、左岸橋台上流の埋め立てを行い護岸を施工、さらに捨て石を行うことによって、現在では当地点で河岸、護岸の崩壊は見られない。しかし、この付近で局所

洗掘が生じており、原因の解明、対策が検討されている。

以上のように、現在メグナ川の本研究対象区間では、蛇行部での河岸侵食およびメグナ橋直上流の局所洗掘という2つの大きな問題を有している。そこで、本研究では、これらの原因あるいは今後の対策を考える上で、特に水理量との関連性について明らかにすることを目的として河道変動の数値解析を行い、基礎資料を提供することを目的とする。

3. 計算手法

(1) 基礎式

a) 流れの基礎式

流れの基礎式は、一般座標系で表示された平面2次元の連続式と運動方程式である。ただし、湾曲・蛇行流れにおいては、2次流による横断方向への運動量の輸送が、主流の横断方向流速分布に影響を及ぼす(例えば、山坂・池田ら⁹⁾)ことから、運動方程式において、その影響を考慮している。

以下に、連続式と ξ 方向の運動方程式を示す。

[連続式]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{U h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{V h}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[ξ 方向の運動方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q \xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(U \frac{Q \xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(V \frac{Q \xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(\frac{\partial \xi_x}{\partial t} + U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{N}{J} \left(\frac{\partial \xi_y}{\partial t} + U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & - k_{sn} \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} \{ \xi_x (u_s A_n h \sin 2\gamma) - \xi_y (u_s A_n h \cos 2\gamma) \} \right] \\ & - k_{sn} \xi_x \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} \{ \eta_x (u_s A_n h \sin 2\gamma) - \eta_y (u_s A_n h \cos 2\gamma) \} \right] \\ & + k_{sn} \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} \{ \xi_x (u_s A_n h \cos 2\gamma) + \xi_y (u_s A_n h \sin 2\gamma) \} \right] \\ & + k_{sn} \xi_y \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} \{ \eta_x (u_s A_n h \cos 2\gamma) + \eta_y (u_s A_n h \sin 2\gamma) \} \right] \\ & = -g h \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b \xi}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2 h} \right) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2 h} \right) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u' v' h} \right) + \frac{2 \xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u' v' h} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 h :水深、 $Q \xi$:流量フラックスの反変成分、 (M, N) : x, y 方向の流量フラックス、 z_s :基準面からの水位、 (U, V) :流速ベクトルの反変成分、 J :座標変換のヤコビアン、 g :重力加速度、 ρ :水の密度、 u_s :主流方向の水深平均流速、 γ :流線

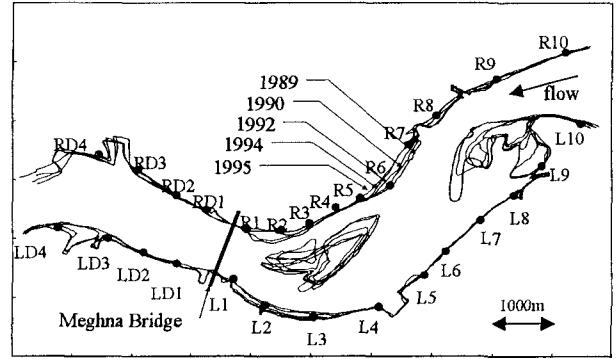


図-1 メグナ川河岸線の経年変化

と x 軸のなす角度、 τ_b^ξ :底面せん断応力の反変成分、 $-u'^2, -\overline{u'v'}, -v'^2$: $x-y$ 座標系の水深平均レイノルズ応力の成分である。(2)式において、左辺第6項~第9項が、2次流による付加項である。これは、Kalkwijk・De Vriend¹⁰⁾が提示したものと同様に、主流方向、横断方向流速の鉛直分布を仮定し、それを水深積分したのち一般座標系に変換した結果、付加された項である。また、(2)式における k_{sn} 、 A_n は、次式の通りである¹⁰⁾。

$$A_n = \frac{u_s h}{r}, \quad k_{sn} = 5 \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} - 15.6 \left(\frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right)^2 + 37.5 \left(\frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right)^3 \quad (3)$$

ここに、 r :流線の曲率半径、 κ :カルマン定数、 C :シェジエの係数である。

b) 河床変動の基礎式

ここでは流砂の移動形態として、掃流砂、浮遊砂の双方とも考慮することとする。まず、掃流砂量の計算には、主流方向にはM.P.M式¹¹⁾、横断方向には長谷川式²⁾を用いる。なお、主流・横断方向の流砂量を一般座標系における流砂量の反変成分 q_b^ξ, q_b^η に変換する手法については文献¹²⁾を参照されたい。

次に、浮遊砂について述べる。まず、水深積分された浮遊砂の連続式を一般座標系で表示すると、以下の通りである。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial t} (ch) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{c}{J} Q \xi \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{c}{J} Q \eta \right) \\ & = \frac{1}{J} w_0 (c_{be} - c_b) \\ & + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ h \left(\frac{D_x \xi_x^2 + D_y \xi_y^2}{J} \frac{\partial c}{\partial \xi} + \frac{D_x \xi_x \eta_x + D_y \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ h \left(\frac{D_x \xi_x \eta_x + D_y \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial c}{\partial \xi} + \frac{D_x \eta_x^2 + D_y \eta_y^2}{J} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 D_x 、 D_y :それぞれ x 、 y 方向の分散係数である。また、式中の河床近傍の浮遊砂濃度 c_b は、水深平均浮遊砂濃度 c より、浮遊砂の鉛直分布を指数分布と仮定して求める。また、土粒子の沈降速度 w_0 はRubeyの式¹³⁾で求め、基準面濃度の算出には、Lane-Kalinskeのモデル¹⁴⁾を用いる。

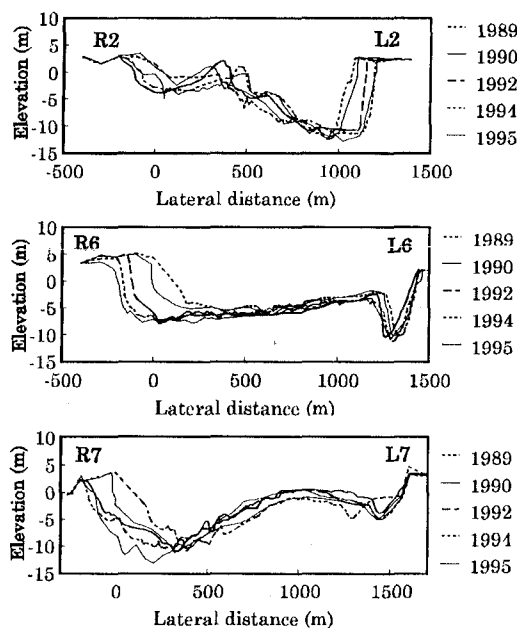


図-2 侵食過程にある断面の横断形状経年変化

以上により、次式で示す一般座標系で表示された流砂の連続式を用い、河床高 z_b の変動量を計算する。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_b^{\xi}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_b^{\eta}}{J} \right) + \frac{1}{J} w_0 (c_{be} - c_b) \right) = 0 \quad (5)$$

(2) 河岸侵食の計算法

前節で述べた河床変動計算により、河床の低下・上昇の計算は行えるが、河岸の側方侵食・河岸線の移動を表現するには、河床低下と河岸侵食を関連付ける何らかのモデル化が必要となる。

これに関して、著者らは、従来より、河岸近傍の河床の変形に伴い、河岸崩落判定条件式を満足する場合に、河岸の崩落が生じ、崩落土砂は安息角で堆積するとして計算を進めていた⁶⁾。しかし、ここでは実河川を対象とすることから、長期間・大領域の計算が必要となる。そこで、河岸侵食モデルを簡略化する必要があり、以下にその手法について述べる。

a) 侵食過程にある河岸形状の特徴

まず、メグナ川において、侵食過程にある断面を抽出し、その特徴について考える。図-2はR2L2, R6L6, R7L7断面の横断形状の経年変化図である。

侵食過程にある河岸形状が相似性を保つことは、流路変動実験により、IKEDA¹⁵⁾が従来より指摘している。図-2より、メグナ川についても河岸形状の相似性を保ちながら、侵食が進行していることがわかる。そこで、この形状を指数関数で近似することによって表現し、それを利用して河岸侵食のモデル化を行う。

b) 河岸侵食のモデル化

前述の特徴を踏まえ、図-3に示すように河岸侵食をモデル化する。まず、①を初期形状とすると、河床変動計算の結果、河岸形状が②のように変化したとする(図-3a)。次に、相似性を仮定し指数関数で

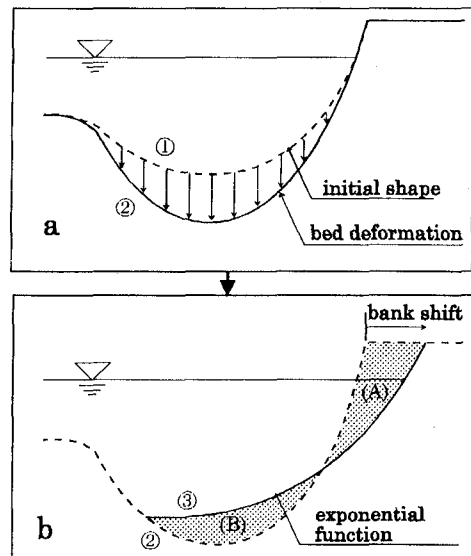


図-3 河岸侵食のモデル化

表した③と前述②の比較を行い、長谷川²⁾が提示したモデルと類似の考え方で、河岸侵食による供給土砂量(A)と、それによる洗掘域の埋め戻し量(B)が等しくなるよう河岸後退量を算出する(図-3b)。

なお、河岸形状を表現する指数関数形は、IKEDA¹⁵⁾が示したものと同様に次式で表す。

$$h = H \{1 - \exp(-n/\Delta)\} \quad (6)$$

ここに、 h ：水際より n 離れた地点の水深、 H ：最大水深である。また、原論文では Δ は側岸の排除厚として定義されているが、ここでは、藤田ら¹³⁾と同様に H/Δ を斜面勾配に関するパラメータとみなし一定値として扱う。従って、最大水深 H が測量横断面図より定まれば、 Δ も一意的に決定することとした。ここでは、メグナ川におけるいくつかの拡幅過程にある断面の測量横断面図と関数形の適合性を考慮して、 $H/\Delta=4.0$ とした。なお、藤田ら¹⁶⁾も、宇治川の測量資料より $H/\Delta=4.0$ としている。

(3) 数値解析手順

ここでは長期計算が行えるよう以下の手順で計算を行った。

- ① 日データとして設定された、流量、下流端水位を境界条件として与え、定常とみなせる状態になるまで流れの計算のみを行う。
- ② 得られた定常流れ場を用いて、流砂量の計算を行い、河床変動量を算出する。
- ③ 河床形状の変化より、前述した河岸侵食モデルを用いて、河岸の侵食量、河岸線の後退量を計算し、新しい計算格子を構築する。
- ④ 以上の手順を繰り返して河道変動計算を進める。

4. 河岸侵食現象への適用

本章では、3.で述べたモデルを、メグナ川の河道変動に適用する。対象区間は蛇行形状をなし、河岸侵食が著しい前出図-1に示す約10km区間である。

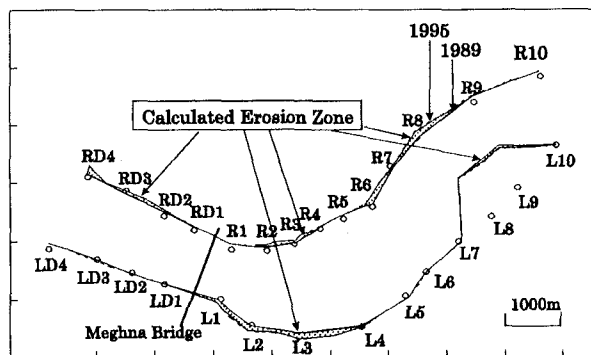


図-4 河道変動計算結果

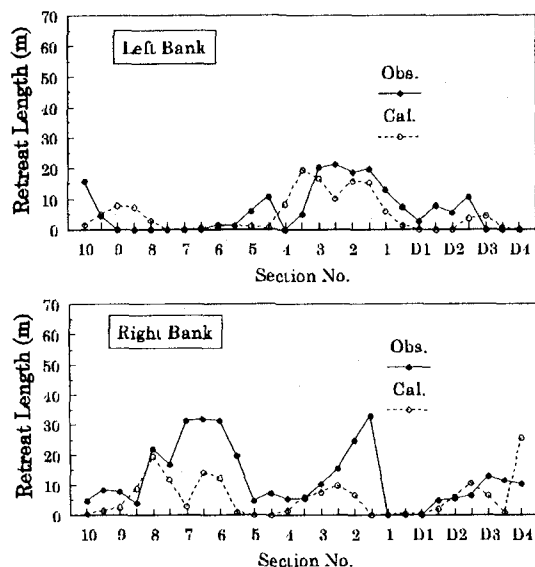


図-5 河岸後退量の実測値と計算結果

(1) 計算条件

計算対象期間は、1989年の河床形状を初期形状とし1995年までの6年間である。

境界条件としては、上流端に流量、下流端に水位を与える。しかし、入手可能であり且つ年間を通して蓄積されたデータとしては、JICAプロジェクトにより設置された自記水位計の1995年5月以降の水位データ¹⁷⁾しかない。そこで、下流端水位としては1995年5月から1996年4月までの水位データを繰り返し用いることとし、流量は既往の検討成果⁸⁾より水位に対応して与えた。河床材料の粒径は、現地資料を参考に、0.15mmの一樣砂として扱った。

(2) 計算結果と実測値の比較

まず、モデルの現象再現性を検証するため、河岸侵食に関して、実測値と計算結果を比較する。図-4は、計算開始時(1989年)と6年経過後(1995年)の河岸線平面形状である。侵食位置を明確にするため、侵食が進行した個所にはマークを施している。

計算結果において、侵食区間はR9～R6, R4～R2, RD2～RD4, L10～L8, L4～L1となっており、前出図-1の実測値と比較すると両者の適合性が高いことが分かる。従って、侵食位置については本モデルで十分な再現性があると言える。

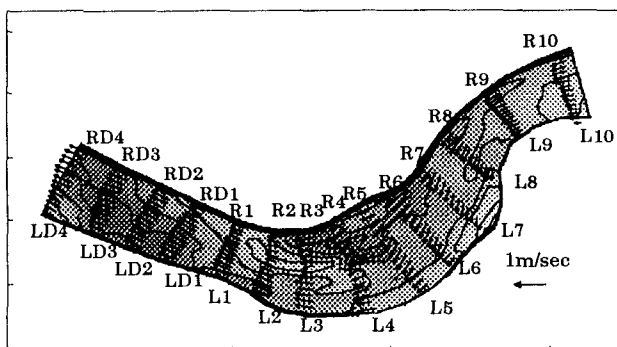


図-6 流速ベクトルと摩擦速度の平面分布図

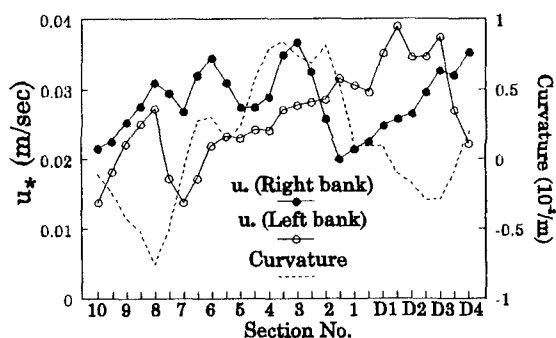


図-7 河岸近傍摩擦速度と流線曲率の縦断分布

次に定量的な評価を行う。図-5は右岸、左岸それぞれの河岸侵食量を年平均値で示したものである。実測値、計算結果を比較すると、定量的にも妥当な結果を示す区間もあるが、侵食量分布傾向は一致しているものの両者に差が見られる区間もある。これは、境界条件として用いた流量が1995年の1年分であったため、計算結果がこの年の流況特性に大きく影響されたこと、対象区間の河岸・河床材料を空間的に均一と仮定し、地域的な分布を考慮しなかったことなどが原因と考えられる。

しかし、図-4に示したように、侵食位置については、ほぼ一致しており、また前述した条件の簡略化にもかかわらず、実測値との量的な差が図-5に示した程度であることは、本モデルで基本的には現象が再現されていると判断できる。従って、次に、計算結果を用いて、河道変動の特性について考察する。

(3) 流況特性と河岸侵食

図-6に、流量5000m³/sec、下流端水位3.5mの条件下(ほぼ満杯流量)の、流速ベクトル図と摩擦速度の平面分布図を示す。平面流況としては、対象区間上流湾曲部で右岸側に寄った主流が、R3L3断面付近の中央砂州により、湾曲部外岸(L4)へ向かう流れと、内岸(R3)への流れに分流している。湾曲部において

は、主流が徐々に外岸に移行し、蛇行頂部より下流に向かうに従って、外岸の摩擦速度が大きくなる(R10~R6, L6~L1)。また、中央砂州により内岸へ分流した流れは、R2~R3付近で摩擦速度が大きくなり、このあたりで浮遊砂を巻き上げ、河床の低下・河岸侵食を生じさせ、さらに下流のRD1付近での摩擦速度の減少とともに、この付近で堆積を生じさせていると考えられ、これは現地での傾向と合致する。

次に、深掘れ、河岸侵食の分布特性と水理量の関係について考える。長谷川²⁾は流線の偏倚と2次流の影響から河道変動機構を系統的にまとめている。ここでは、それを踏まえ、河岸近傍の摩擦速度と流線曲率の縦断分布(図-7)を用い、深掘れ及び河岸侵食位置について考察する。なお、同図において曲率は流路中央での流線曲率であり、時計回りを正とする。

まず、対象区間において、湾曲による最大深掘れを示すのは現地測量よりR9, L4付近であるが、これらは、流線曲率の絶対値が大きい区間(R9~R7, L5~L2)の外岸で、摩擦速度勾配が大きい地点に対応している。これに対して、河岸侵食量が大きい地点は、最大深掘れ地点の下流に位置しており、そこでの2次流強度は必ずしも大きくない(例えば、R6は河岸侵食量は大きいが流線曲率から見れば、むしろ内岸である)。図-5と図-7の比較により判断すれば、河岸侵食が生じる位置は2次流強度では決定できず、摩擦速度が大きく且つ正の勾配を有している区間であると考えらる。これについて、河岸の侵食過程から考える。河岸侵食は、①河岸の洗掘、②河岸土塊の崩落・堆積、③堆積土砂の流送というサイクルで進行する^{18), 19)}。このうち、①の河岸の洗掘は、河岸形状が急勾配となるため、摩擦速度の勾配よりも、その大きさに関係すると考えられる。一方、③の堆積土砂の流送は、通常の河床変動と同様に、摩擦速度の大きさのみでなく勾配に影響される。従って、上記の位置で河岸侵食が生じたものと考えられる。

5. 局所洗掘現象への適用

2.で述べたように、メグナ橋の安全度に影響を与える可能性があるものとして、メグナ橋直上流左岸の突堤近傍の局所洗掘が注目されている。本章では、局所洗掘の原因、対策工の効果等を明らかにするため、突堤の形状が表現できるように当地点に限定して数値解析を行い、その結果について考察する。

(1) 計算条件

計算対象区間は、突堤(L1~メグナ橋)の上流L3, R3断面から下流LD1, RD1断面とする。計算期間は約1ヶ月であり、流量・水位は前章で述べたものと同様である。

初期河床形状は、前章と同様に1989年のものを用いるが、局所洗掘現象に重要な影響を与えていると考えられる突堤部が含まれるメグナ橋より上流左岸の河岸線形状は、JICAプロジェクト¹⁷⁾により水平角、鉛直角、距離が同時に測定可能なEDM(光波測距儀)

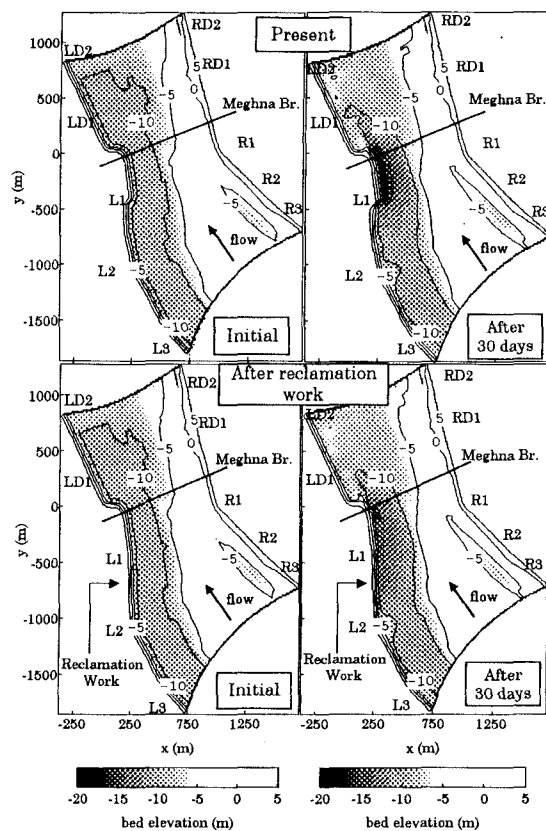


図-8 局所洗掘計算結果

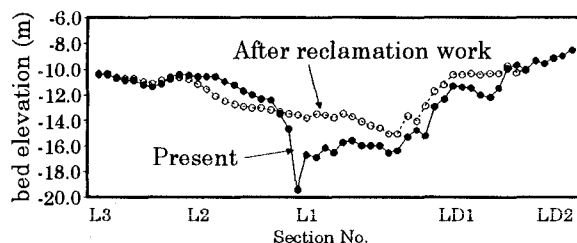


図-9 最大洗掘河床高縦断図(計算結果)

を用いて詳細に河岸線を計測したデータを用いる。また、計算において局所洗掘がどの程度再現できるか明確となるように、初期河床形状において標高-10mより深い部分は河床高として-10mを与えて計算を開始した。なお、突堤区間は護岸工を行っているため、3.(2)で述べた河岸侵食計算は行わない。

(2) 計算ケース

当地点では、局所洗掘の抑制を目的として、いくつかの対策案が模索されている。その一つにL2付近から突堤部先端L1付近にかけての法線形状を滑らかにする埋め立て案がある。そこで、ここでは、現状の河岸形状における局所洗掘の進行過程の計算と併せ、この対策案を実施した場合の数値解析も行い、その効果を算定する。

(3) 洗掘原因と対策工の効果

図-8は、上図が外部境界として現況河岸形状を用いた場合、下図が(2)で述べた対策工を実施した場合の計算結果(左図:初期河床,右図:30日経過後)であり、図-9は各断面で最深河床を示す位置の河床高

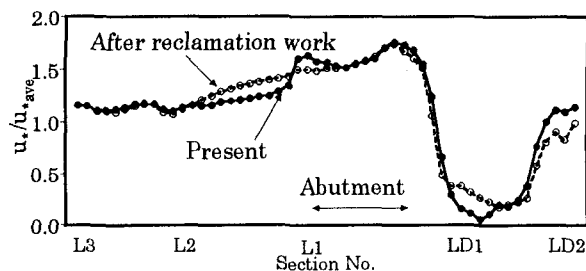


図-10 左岸近傍における摩擦速度の縦断分布

縦断分布図である。

当地点の局所洗掘原因は、現地計測を通じて、①突堤の存在による突堤前面の流速の増大、②湾曲による2次流の影響、③L1近傍河床の地質の相違の可能性、④中央砂州により分流した内岸(R3)側からの流れの水衝部となる可能性が指摘されている¹⁷⁾。このうち③については、計算上考慮していないため評価できないが、前出図-6、図-7より、2次流強度については、L1付近では既に小さくなっており、また、R3からL1に向かう流れも顕著でないことから、②、④のあたえる影響は小さいと考えられる。次に①で述べた突堤の存在による局所的な流速の増大について検討するために、摩擦速度の縦断分布(河岸近傍摩擦速度 u_* を対象区間の平均摩擦速度 u_{*ave} で除して表示)を図-10に示す。同図より、現況河岸形状では、突堤先端部で急激に摩擦速度が増加しており、これが原因でこの付近で縦断方向の流砂量分布の勾配が大きくなり、局所洗掘の原因になったと考えられる。

次に対策工の効果について考える。最大洗掘深は、図-9より、現況河岸線を用いた計算結果が30日経過後で約20mであるのに対し、対策工を実施した場合は約15mとなっており、局所洗掘が抑制されていることが分かる。これは、埋め立てによって、L1付近の河岸の突起形状がなめらかに下流から接続されたことにより、流れの構造が変化したためと考えられる。すなわち、図-10に示すように、現況河岸線の場合の計算結果と比較して、摩擦速度の縦断分布が緩やかに変化しており、流砂量の縦断勾配が小さくなったことが原因と考えられる。

6. おわりに

本研究では、河岸侵食により河道変動が生じている実河川にも適用可能な数値解析モデルを構築し、バングラデシュ・メグナ川で問題となっている湾曲部河岸侵食現象、突堤部の局所洗掘現象に適用した。さらに数値解析結果を用いて、それらの発生要因を水理量に着目して考察するとともに、局所洗掘現象に対してはその対策工の評価を行った。今後は、このような実河川の河道変動現象に対して河岸材料特性が重要であることが指摘されている¹⁹⁾ことから、そのような観点から研究を進めていきたい。

謝辞：本研究はJICAによるJapan-Bangladesh Joint Study Project¹⁷⁾に関連して行われたものであり、

測量・データの収集、また現地観測を通じて貴重なご意見をいただいた関係諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 平野宗夫：拡幅を伴う流路変動について、土木学会論文報告集, 第210号, pp. 13-20, 1973.
- 2) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文, 1983.
- 3) 関根正人：側岸侵食を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 553/ II -34, pp. 51-59, 1996.
- 4) 清水康行・平野道夫・渡辺康玄：河岸侵食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集, 第40巻, pp. 921-926, 1996.
- 5) 守田克成・江頭進治・金 海生・青木章浩・大槻英樹・湾曲河道における流れの集中度と河岸侵食に関する研究, 土木学会第52回年次学術講演会概要集第2部, pp. 434-435, 1997.
- 6) 長田信寿・細田 尚・村本嘉雄・Rahman M.M.：河岸侵食過程における流砂の非平衡性を考慮した流路変動の数値解析, 水工学論文集, 第41巻, pp. 889-894, 1997.
- 7) S.Darby, C.Thorne: Numerical Simulation of Widening and Bed Deformation of Straight Sand-Bed Rivers, Journal of Hydraulic Engineering, April, pp.184-202, 1996
- 8) 村本嘉雄・藤田裕一郎・河内友一：メグナ河下流部における洪水流と河道変動, 京都大学防災研究所年報, 第37号, B-2, pp. 421-440, 1994.
- 9) 山坂昌成・池田駿介・酒寄建之：一樣湾曲流路の流れの三次元解析, 土木学会論文集, No. 411/ II -12, pp. 99-108, 1989.
- 10) Kalkwijk, J.P.Th., de Vriend, H.J.: Computation of the Flow in Shallow River Bends, J. Hydraulic Research 18 No.4, pp.327-342, 1980.
- 11) Meyer-Peter, E., Müller, R.: Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Congr., pp.39-64, 1948.
- 12) 長田信寿・細田 尚・村本嘉雄・Md.M.Rahman：側岸侵食を伴う河道変動の数値解析, 京都大学防災研究所年報, 第39号, B-2, pp. 415-428, 1996.
- 13) Rubey, W.W.: Settling velocities of gravels, sand and silt particles, American J. of Science, Vol.25, pp.325-338, 1933.
- 14) Lane, E.W., Kalinske, A.A.: Engineering calculation of suspended sediment, Trans. A.G.U., Vol. 22, 1941.
- 15) Ikeda, S.: Self-Formed Straight Channels in Sandy Beds, Proc. ASCE, Vol.107, HY4, Part1, pp.389-406, 1981.
- 16) 藤田裕一郎・川口雅慎：高い河岸の形状とその挙動に関する検討, 土木学会第51回年次学術講演会概要集第2部, pp. 640-641, 1996.
- 17) Y. Muramoto, K. Hasegawa, Y. Fujita, T. Utami, T. Hosoda, K. Kanda, N. Nagata: Study of Morphological behaviours of the river Meghna, The proceeding of final seminar on Japan-Bangladesh Joint Study Project on flood, 1997.
- 18) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二：河道の変動に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, 第14号, B, pp. 275-297, 1971.
- 19) 福岡捷二・小暮陽一・佐藤健二・大東道郎：自然堆積河岸の侵食過程, 水工学論文集, 第37巻, pp. 643-648, 1993.

(1997. 9. 30受付)