浮遊砂が卓越した河川の河床変動予測について

PREDICTION OF BED DEFORMATION IN A RIVER DOMINATED BY SUSPENDED SEDIMENT

金 海生*•高柳則男 **•福田忠弘 ** Haisheng JIN, Norio TAKAYANAGI and Tadahiro FUKUDA

A three-dimensional (3D) sediment transport model—NKhydro3D was applied to predict sedimentation in an intake canal to which water is diverted from the Ganges River in Bangladesh. Sediment transport in the Ganges River is dominated by suspended load. The simulation results show that the computational distributions of both the sedimentation and the suspended sediment concentration were consistent with field measurements during the flood season. A depth-integrated two-dimensional (2D) model is commonly employed in such simulations because the computational area is wide and the flood season lasts about half a year in the Ganges River. The simulation results by a 2D model under these circumstances are unreliable because of the non-equilibrium distribution of suspended sediment concentration and local flow patterns. Therefore, verification by measured data is absolutely necessary when a 2D model is applied to such phenomenon.

Keywords : Ganges River, intake canal, sedimentation, suspended sediment, 3D model, depth-integrated 2D model, concentration distribution, diffusion coefficient

1. はじめに

バングラデシュ国(以下バ国)の大部分は、西から流入する Ganges川(バ国で Padma川とも呼ぶ)、北からJamuna川、東から Meghna川の三大国際河川によって造られた氾濫原である。そのうち Ganges川は、流域面積約100万km²(うち4%がバ国内に)、総延長約2,600km、ヒマラヤ山脈の南斜面に源を有する。そのGanges川は、インドからバ国に流入し、バ国内でJamuna川、Meghna川と順次合流して最後は Meghna 川となって Bengal 湾に注ぐ河川である(図-1)。

Ganges 川の平均流量は約 11,000m³/s であるが、乾期 と洪水期の流量差が大きく、水位差が 9m 以上にも達す る。バ国を流下する Ganges 川(Jamuna 川合流まで)の 平均勾配は 1/20,000 程度で緩いが、7 月から 10 月に継続 する洪水期には水深が 10 数 m と深くなり、記録最大流量 は 76,000m³/s (1998 年)、流速が 2.5m/s 以上にも達する。 河道は砂州が発達し、浮遊形式の微細土砂による河床変動 が活発である。その影響で、バ国では取水施設や水路など の土砂堆積が問題となっている。

14.2 万 ha の 灌漑能力を有し、50 年前に完成した Ganges-Kobadak (GK) 灌漑プロジェクト (図-1) に

** コンサルタント海外事業本部 環境事業部 水環境部

おいては、毎年4ヶ月以上継続する洪水期における取水 路内の土砂堆積により、Ganges川水位の低い乾期に約4ヶ 月間(12月~3月)に亘って Ganges川から取水不能の 状態に直面している。



図-1 バングラデシュ国とその主要な河川

^{*} 技術本部 中央研究所 総合技術開発部

著者らは、バ国 GK 灌漑プロジェクト取水路水理検討業 務(2007~2009年)において、同取水路堆砂のメカニ ズム解明および対策検討を目的として、移動床水理数値解 析モデルによる堆砂解析を行う機会を得た¹⁾。対象水域で は、水深が深く、流況、とくに取水路流入部の流況が複雑 である上、浮遊形式の微細土砂が卓越するため、本業務で は自社開発の3次元移動床水理解析モデル—NKhydro3D モデルを適用することとした。

本報は、このような浮遊形式の微細土砂が卓越した河川 の河床変動解析において、3次元モデルの再現性や、従来 の平面2次元河床変動解析モデルの問題点などをとりま とめたものである。

2. GK 灌漑プロジェクト取水路堆砂解析

GK 灌漑プロジェクトは 1950 年代に計画され、1962 年 に Ganges 川から取水を開始した。以来、拡張を経て、現 在では灌漑可能面積14.2万haを有するバ国の最重要な プロジェクトの一つとして、地域経済や住民の生活向上 に莫大な効果をもたらしている。しかし、GK 取水口付 近の Ganges 川の河床材料は主に細砂で、取水口の上流 約2km に位置する Hardinge 鉄道橋地点の平均粒径は約 0.15mm²⁾で、下流ほど細かくなり、洪水期に浮遊砂によ る土砂流送が活発になっている。例えば、2007年洪水期 に観測した浮遊砂濃度は 200~1,300ppm の範囲に変化 していた¹⁾。そのため、取水路内に、毎年4ヶ月以上継続 する洪水期に土砂が大量に堆積し、入口付近では最大堆砂 深が 6m にも達する。この堆砂により、Ganges 川の水位 が低下する乾期には、取水路入口河床高が Ganges 川水位 より高くなり、約4ヶ月間(12月~3月)に亘って取水 路が閉塞し、Ganges 川から取水不能の状態に直面してい る。取水を再開するため、毎年約20万m³の土砂を浚渫 することが余儀なくされている。図-2に堆積土砂浚渫後 の取水路および堆砂した洪水期後の取水路の写真(2007 年洪水期後に撮影された)を示す。図-2 (b) の写真に 示されたとおり、取水路入口の河床が水面から露出してい るため、取水路内に土砂は入口付近に堆積が多く、奥部に 行くにつれて堆積が減少する傾向が判った。

著者らは、2007 年から 2009 年にかけて、取水路の堆 砂メカニズムの解明および対策の検討に資するため、現地 観測ならびに移動床水理数値解析モデルによる堆砂解析を 実施した。

図-3に取水路付近(Hardinge Bridge 水文観測所)の 1980~2002年間の水位観測データを示す。22年間、水 位は最高 15.19m + PWD(1998年、PWDはバ国基準面 高)、最低 4.22m + PWD(1993年)であり、変動幅は約 11m であった。Ganges 川は、乾期に水位が低く流量も小 さいため、土砂流送はほとんどないが、洪水期に水位が著 しく上昇し、10,000m³/s以上の流量が続き土砂流送、と くに浮遊砂流送が活発になる。このような水理特性を考慮 して、堆砂解析は洪水期の全期間(6月後半から12月前 半の約半年間)を対象とした。また、本川の水理特性を取 水路の流入条件として取り込むため、解析範囲はGanges 川本川(取水路入口を中心に川幅約2~5km、延長約 15kmの区間)も含めることとした。解析は広範囲の長期 土砂流送現象を対象とすることとなるが、対象水域の水深 が深く、流況、とくに取水路流入部では回転流の発生によ る複雑な流況となる上、浮遊形式の微細土砂が卓越するた め、ここでは自社開発の3次元移動床水理解析モデル— NKhydro3Dモデルを適用することとした。



(a) 堆砂浚渫後の取水路(3月、乾期)



(b) 土砂堆積した洪水期後の取水路(2008年1月)

図-2 GK 取水路写真



NKhydro3D モデルでは、平面座標系に構造物、中洲境界、 河岸線などの任意境界に対して柔軟性がある境界適合型直 交曲線座標系を用い、鉛直座標に、自由表面および移動床 などの自由移動境界が存在するため、sigma 座標を適用し ている。図-4に解析範囲および解析メッシュ(水平方向) を示す。直交曲線メッシュは、領域別に解析点の疎密をフ レキシブルに調整することができ、本解析では取水口近傍 の河川と取水路内に密なメッシュを配置し、シミュレーショ ンの効率化を図った。NKhydro3D モデルにより、流れと ともに掃流砂と浮遊砂輸送を解析し、水位、流速、河床高 変化(堆積、侵食)、浮遊砂濃度分布などが求められる。モ デルの支配方程式などの詳細は文献1)を参照されたい。

2007 年洪水期に実施した水位、流速、流砂(河床材料、 浮遊砂)、河川横断測量のデータを利用して、洪水期全期 間である 2007 年 6 月 20 日~12 月 8 日の水理、流砂条 件でモデルの検証解析を実施した。図-5にHardinge Bridge 地点の水位、流量ハイドロを示す。図-5(a)の Talbaria 地点は Hardinge 橋から 13kmの下流に位置し ているため、Hardinge 地点とTalbaria 地点の水位観測値 を用いて解析の下流端水位条件を設定した。6月の河床深 浅測量結果を初期河床条件とした。その他条件設定の詳細 は文献 1)を参照されたい。

図-6に取水路入口 SS_I 測点(位置は図-4(b)の▲ 点を参照されたい)の浮遊砂濃度水深分布の解析結果と観 測値の比較を示す。解析結果は若干濃度を高めに再現する 傾向があるが、観測値とよく一致している。また、浮遊砂 濃度の水深分布は比較的に均一で、水面付近と河床付近の 濃度差が小さかった。

図-7に2007年洪水期間中土砂堆積深の解析結果(コ ンター)を示す。赤系の色は堆積を、青系は侵食を表し ている。洪水期間中、取水路入口に最大6m程度、ポン プ場付近でも3m程度の土砂堆積が生じた。この結果は、 2007年洪水期後に撮影された図-2(b)の写真と一致する。 一方、Ganges川本川では、ほとんどの領域が河床侵食傾 向にあることが示されている。

図-8に洪水期に土砂堆積による取水路流入部、中間部、 ポンプ場付近の断面変化の解析結果を観測結果と比較して いる。図-9にはGanges川本川の断面変化である。断面位 置は図-4(b)を参照されたい。なお、図中の6月(June) の断面は解析の初期河床高となっている。取水路、本川とも に解析結果は同時期の断面測量結果とほぼ一致していること が判る。また、洪水期間中、取水路入口で管理浚渫を行って いたため、当領域の堆砂解析結果は実績を若干上回っている。



図-4 解析範囲および直交曲線解析メッシュ





図-5 2007年6~12月の水位、流量





図-6 浮遊砂濃度の水深分布





参考に、2007年8月24日、Ganges川流量約40,000 m³/s、 取水流量約38.2m³/s時の、取水路入口付近水深平均流速 ベクトルを図-10に示す。取水路入口前面のGanges川 本川では2m/s以上の高流速であるが、取水路に入った 直後に0.5m/s程度に低下し、さらに水路中間部より奥で は0.2m/s以下まで低下している。また、取水路入口から 300mまでの区間では主流が左岸側に寄り、右岸側で逆流、 すなわち回転流が生じた。このような流れの流速変化に起 因して浮遊砂濃度の空間分布が変化し、取水路内の堆砂お よびその分布が生じたことが考えられる。

以上の河床変動、浮遊砂濃度分布の解析結果およびその 他水位、流速分布の観測値比較(水位・流速の詳細は文献1) を参照されたい)から、NKhydro3DモデルはGanges川 本川からGK取水路内までの水理・流砂変化プロセスを 十分に再現でき、GK取水路の堆砂解析に適用できること が判った。



図-8 2007年洪水期間中取水路堆砂による断面変化比較



図-9 2007 年洪水期間中 Ganges 川本川の断面変化



図-10 2007 年 8 月 24 日 (Ganges 川流量約 40,000m³/s、 取水量 38.2m³/s) 取水路入口付近の水深平均流 速ベクトル

3. 平面2次元モデルによる堆砂解析

一方、上述した堆砂解析は広範囲の長期土砂流送現象を 対象としているため、計算負荷が重く(業務実施当時の最 速デスクトップパソコンで1回の計算が約1日掛かった)、 従来、平面2次元モデルで解析を行うのが一般的である。 ここで、平面2次元モデルの適用性を確認するため、平 面2次元モデルを用いた同期間の堆砂解析を実施した。

用いたモデルは、同境界適合型直交曲線格子をベースに、 掃流砂と浮遊砂流送による河床変動を求める平面2次元 移動床水理解析モデルである。モデルの詳細は文献1)を 参照されたい。

図-11 に平面 2 次元モデルによる河床変動解析結果 (2007 年 8 月 24 日までの堆積)を示す。洪水期中盤の 8 月時点で、取水路入口の土砂堆積はすでに同洪水期全期間 の実測堆砂量を越え、しかも本川側に取水路内以上の堆砂 が発生した。この堆砂量および分布は実績から大きく乖離 しており、平面 2 次元モデルでは本研究のような堆砂現 象(河床変動)を再現することができない結果となってい る。



図-11 平面 2 次元モデルによる堆砂の解析結果 (洪水期間中 2007 年 8 月 24 日までの堆積)

(1) 河床変動解析結果の影響要因1:浮遊砂濃度分布

以上の解析では、掃流砂による河床変動解析に3次元モ デルも、平面2次元モデルも同じ手法を適用している^{1),3)}。 平面2次元モデルによる河床変動解析で再現性が劣る原 因を分析するため、河床変動解析のうち、浮遊砂による河 床変動の解析法を考察してみよう。

浮遊砂の場合、河床変動は沈降量と巻き上げ(再浮上) 量の差によって発生するとされる。流れが速く巻き上げが 優勢となるとき、河床侵食が生じ、逆に沈降が支配的とな るとき、堆積が生じる。浮遊砂流送による河床変動は以下 の式で計算できる。

 $\frac{\partial Z_b}{\partial t} \bigg|_{\substack{\eth o \circ \overrightarrow{P} \neq \overleftarrow{w}, \overrightarrow{w} \in \mathbb{L}^{3,0}}} = (沈降による河床上昇 - 浮上による河床$ $低下) = \frac{1}{1-\lambda}(\omega_k C_b - q_{su})$ (1)

ここに、 Z_b は河床高、 λ は河床材料の空隙率、 C_b は河 床付近の浮遊砂体積濃度(SS 濃度)、 q_{su} は河床面から砂 粒子の巻き上げによる浮上量、 ω_k は粒径 d_k の砂の沈降速 度である。 *q_{su}* は経験式により推定する必要があり、以上の平面 2 次元解析と3次元解析は同じ推定式を用いた^{1),3)}。しかし、 河床付近の浮遊砂濃度*C_b*については、3次元解析では濃 度の水深変化が直接計算され、河床付近メッシュの濃度計 算値を直接適用することができるが、平面2次元解析で は水深平均濃度*C*のみが直接計算で求められ、*C_b*は*C*の 関数(経験式)を用いて推定されるのが一般的である。

今回の平面2次元解析では、拡散係数 ε_{sz} が渦動粘性係数 ε に等しいと仮定し、さらに水深平均の拡散係数を用い、 濃度の水深分布が平衡であることを前提として、C_bを下 記式で求めた⁴。

$$C_b = f(C) \cong \frac{\beta_C}{1 - e^{-\beta_C}} C , \qquad \beta_C = \frac{\omega_k h}{\varepsilon}$$
(2)

ここで、 ε は水深平均の拡散係数である。Prandtl 理論 によれば $\varepsilon = \frac{\kappa}{6}hu_*$ 、hは水深、 u_* は摩擦速度、 κ (= 0.4) は

von Karman 定数である。

平面 2 次元モデル解析の水深平均濃度 Cから式(2)で 推定した河床付近濃度 C_b と 3 次元モデル解析結果を比較 してみる。河床高の変化による影響を取り除くため、濃度 比較の解析はすべて河床高を変化させずに、初期河床高の まま(図-8、図-9 の 6 月河床断面)で行った。

図-12に取水路入口 SS_I 測点(位置は図-4(b)の▲ 点を参照されたい)における浮遊砂濃度の水深分布の比 較を示す。参考のため、Ganges 川本川 SS_G (図-4(b) の右上△点)地点の濃度水深分布の比較も示す。

取水路入口 SS_I 地点では、図-10 に示すよう、流速 が遅く、平衡濃度分布を前提とした平面2次元解析濃度 の水深変化は急となり、河床付近と水面付近の濃度差がよ り大きくなる。一方、実際の取水路入口部は、Ganges 川 本川の速い流れから取水路内の遅い流れへの変化域となっ ている。平面2次元モデル解析の水深平均濃度はこのよ うな流れ変化を反映した非平衡濃度であり、その場の水理 量に見合った平衡濃度から乖離して、本ケースの場合では、 Ganges 川本川から流入しているため、水深平均濃度は平 衡濃度値より高くなる。この水深平均濃度から式(2)で 推定した河床付近の濃度 が過大となったため、式(1) で 計算した河床堆積量も大きくなると考えられる。一方、3 次元モデルの濃度解析結果は、その水深分布にも非平衡性 を反映しており、実績と一致したため、河床変動も正確 に解析できたと思われる。また、図-6(b)と図-12(a) に示されている同時刻の3次元解析結果の濃度水深分布 の違いは河床条件が異なることによるものである。前者は 河床堆積を伴い河床上昇を考慮しているが、後者は河床高 が変化しない条件で解析したため、水深が深く、それに起 因して全体的に濃度が若干高くなっている。



図-12 SS濃度水深分布の比較(Ganges川流量約39,200m³/s、取水流量36.8m³/s、河床変動なし)

一方、Ganges 川 SS_G 地点においては、平面 2 次元解 析の濃度水深分布の推定結果が 3 次元解析と差があるも のの、その差は小さい。これは、当該領域において、流れ の急変が発生しておらず、濃度の水深分布は平衡濃度分布 で近似できることになる。そのため、取水路入口付近を除 く Ganges 川本川領域では平面 2 次元、3 次元解析から得 られた河床変動に大きな違いが生じていない。

以上のような濃度水深変化の平衡分布からの乖離を改善 するため、拡散係数 *ε*_{sz} と渦動粘性係数 *ε*の関係を調整し てみた。

拡散係数 ε_{sz} を渦動粘性係数 ε の倍数とし、1.0~5.0倍 の範囲で解析を行った。図-12 に取水路入口 SS_I 地点 と Ganges 川本川 SS_G 地点の濃度変化を示す。拡散係数 が大きくなることにつれ、平面 2 次元解析で推定した河 床付近濃度は水面濃度との差が小さくなることが判る。本 川 SS_G 地点では、 ε_{sz} を ε の 2 倍にした場合、平面 2 次 元解析濃度の水深分布は 3 次元解析結果とほぼ一致した。 一般的に、 ε_{sz} を ε の 1.2 倍程度にすると推定の濃度分布が 実測濃度分布にほぼ一致すると言われているが⁴⁰、以上の 解析では、 ε_{sz} を ε の 2 倍程度にする必要があることが判っ た。

一方、取水路入口 SS_I 地点では、*ε*_{sz} を ε の 5 倍にしても、 平面 2 次元解析の濃度水深分布は 3 次元解析に近づくが、 依然河床付近の濃度は、高い傾向にある。

参考に、拡散係数の設定を変化させた場合の土砂堆積 の解析結果を図-13に示す。図-13(a)、(b)の結果を 拡散係数=渦動粘性係数の結果(図-11)と比較すると、 拡散係数の増大に伴って、取水路内入口付近の土砂堆積 が減少することが判る。拡散係数 ε_{sz}を渦動粘性係数 εの 5倍にした場合、取水路中間部より奥での土砂堆積は3次 元解析結果に比べ若干多いが、取水路内入口付近の土砂堆 積はほぼ同じになる(図-13(c))。しかし、入口前面の Ganges 川本川側の過堆積傾向は解消されず、ε_{sz} = εの結 果と同様に実態と大きく乖離している。また、拡散係数の 設定により変化は小さいものの、Ganges 川本川の河床低 下領域においては、平面2次元解析の河床低下量は3次 元解析より大きい。

(2) 河床変動解析結果の影響要因 2: 流況(流速分布)

以上の検討から、拡散係数と渦動粘性係数の関係を調整 することで、一部の領域においては、平面2次元モデル でも浮遊砂濃度の水深分布や河床変動の解析結果が実績に 近づけることができるが、依然再現できない領域が存在す ることが判る。

河床変動に影響を及ぼすもう一つ要因は掃流力であ る。掃流力は流速と直接関係しているため、ここで、流況 (流速分布)を考察してみる。図-14にGanges川流量 40,000m³/s、取水流量 38.2m³/s 時、取水路入口付近の水 深平均流速ベクトルの平面 2 次元解析結果と 3 次元解析 結果の比較を示す。なお、河床変動による影響を取り除く ため、解析は河床高を変化させずに、初期河床高のまま(図 -8、図-9の6月河床断面)で行った。図-14(b)の3 次元解析結果が図-10の同 3 次元解析結果と同じになら ないのは河床変動の条件の違いによるものである。

図-14に示すとおり、3次元解析も、平面2次元解析 も、取水路入口に回転流が再現できているが、回転流の分 布および主流部の速さは3次元モデルの解析結果がより 実績に近い(現地観察印象)。平面2次元モデルの解析で は、主流流速が0.5m/s程度で、3次元結果の倍ほど速く、 さらに右側の逆流が強くなっている。また、Ganges川本 川においては、平面2次元解析の流速が3次元解析より 若干速く、そのため、本川の河床侵食量が3次元解析よ り大きくなっている。

このような局所的な流況予測精度の問題は、平面2次元 モデル固有の近似化に由来するものであるため、改善が難 しい。平面2次元モデルは、水深平均の流速などをパラメー ターとするため、水深によって流向が変化する、とくに水 面と河床付近の流向が逆になる2次流(流線湾曲に起因 する)の強い局所流に対しては、予測に限界が来すことと なると考えられる。



図-14 Ganges川流量約40,000m³/s、取水流量約38.2m³/s時、取水路入口付近の水深平均流速ベクトル(河床高は同じ)

4. おわりに

水深が深く、流況が複雑で、浮遊形式の微細土砂が卓越 するバ国 GK 灌漑プロジェクト取水路の土砂堆積を自社 開発の3次元移動床水理解析モデル—NKhydro3Dモデル で検討し、実績データとの比較から、NKhydro3Dモデル は浮遊砂の濃度分布や堆砂分布を十分に再現できることが 判った。一方、従来の平面2次元モデルでは、浮遊砂濃 度およびその水深変化の非平衡性や、局所的な流況の影響 により、河床変動を再現できない可能性があることも判っ た。拡散係数の調整で、限界があるものの、浮遊砂濃度変 化の非平衡性による影響を多少改善することは可能である が、局所的な流況予測精度は、平面2次元モデル固有の 近似化に起因するものであるため、改善が難しい。したがっ て、浮遊砂が卓越した河川の河床変動予測は、とくに平面 2次元モデルを用いた場合、解析結果の合理性分析や、実 績データを用いた検証などが重要となる。 謝辞:本論文内容の一部はGK 灌漑プロジェクト取水路 水理検討業務の結果に基づくものである。当業務に関し、 種々の御協力・御助言をいただいた荏原製作所の関係者お よびバングラデシュ国側の委員会、その他関係各位に深く 感謝する次第である。

参考文献

- Ebara Corporation and Nippon Koei Co., Ltd.: Hydraulic Study for Intake Canal Improvement for Urgent Rehabilitation of Pumping Facilities of G.K. Irrigation Project for Sustaining Rural Economic Development, 2009
- Environment and GIS Support Project for Water Sector Planning (EGIS) : Riverine Chars in Bangladesh environmental dynamics and management issues, The University Press Limited, 2000
- 3) 金 海生、千田健一、佐々木成人、山田裕康:河口土砂流検 討に平面2次元移動床解析モデルーNKhydro2Dモデルの適 用、こうえいフォーラム、No.13、2005
- 4) 土木学会:昭和 60 年度版水理公式集、p.226、1985