

低堰堤堆積土砂のフラッシュ に関する数値解析

NUMERICAL SIMULATION OF FLASHING SEDIMENT FROM LOW DAM

後藤孝臣¹・田中良樹²・北村忠紀³・辻本哲郎⁴

Takaomi GOTO, Yoshiki TANAKA, Tadanori KITAMURA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 工修 名古屋大学工学研究科博士課程後期課程学生 地圏環境工学専攻
中部電力(株)電力技術研究所(〒459-8522 名古屋市長区大高町字北関山20番地の1)

²愛知県企業庁(〒479-0837 愛知県常滑市新開町6-1-5)

³正会員 博(工学) 名古屋大学助手 地圏環境工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴正会員 工博 名古屋大学教授 地圏環境工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Low dam that has little reservoir capacity often needs to flush deposited sediment, and it threatens the safety of the hydraulic structure along the flushing channel. It is important to evaluate horizontal topography of flushing channel as well as longitudinal bed profile. The depth-average 2-D flow model with bed deformation was applied to simulate the process of flushing sediment from low dam. This model can treat bank erosion and channel-widening process, using the boundary fitted coordinate system according to the movement of boundary of flow area. The simulated results were compared with those of physical model test to discuss validity and limitation of the present numerical model.

Key Words : Bank erosion, flushing, sediment, movable-bed model test, 2D-numerical simulation

1. はじめに

中部地方の山岳河川は、他の日本の河川と比較すると土砂生産量が多く、特に発電ダム貯水池などでは、満砂に近い状態で運用されていることが見受けられる。そのため、しばしば排砂などを行い、必要な容量の確保に努めている。この容量の確保は、治水面から言えば土砂流入のポケットを有することであり、また利水の面から言えば必要な時に取水できる調整能力をもつことでもある。さらに、各種工作物の埋没などの予防にも繋がる。このように山岳河川のダムや堰堤は、その規模に関わらず、このように容量を考えることは治水、利水の面から有効な手段であることには変わらない。この容量確保の基礎となる堰堤上流部の河床形状に関する研究は、河道に設置された構造物からの排砂研究として古くより行われている。例えば、芦田・澤井¹⁾は、砂防ダムに設けられたスリットダム上流部の河床形状について、実験を用いて考察しており、芦田・江頭²⁾や水山・下東³⁾は、1次元の河床変動計算を用いてダム上流部の河床形状を定量的に評価している。

このように大規模の貯水池からの排砂を対象とした研

究は1次元的な取り扱いが中心であるが、農業、電力の取水堰堤のように、比較的小規模の堰堤の場合、1次元的な取り扱いよりも流路形状と水路工作物の相対位置に関わる2次元考察が望ましい。さらに、河川の線形が湾曲や蛇行しているとその関係はより複雑となる。このような平面線形を考慮し実河川を対象とした平面2次元解析は、清水⁴⁾、西村・金尾⁵⁾による現地河川の適用や、側岸侵食モデルを工夫した長田・細田⁶⁾の検討など数多く存在する。しかしながら、ダムや堰堤からの排砂を対象とした2次元解析は、著者らの知る限りではShen⁷⁾、Olsen⁸⁾、国内では水山⁹⁾により実施されている程度である。ダムや堰堤からの排砂問題の解析で難しい点は、堤部における境界条件の変化(水位低下)により、河床低下とそれに伴う側岸侵食が生じることで、水際位置が変化していくことにある。ShenやOlsenの解析では、こうした問題について水面より出る格子を陸部として取り扱う手法により対応している。しかし、この方法では側岸侵食にとって重要となる水際部の流れをうまく再現できない可能性がある。著者¹⁰⁾らはすでに河床低下に伴う側岸侵食による水際線の変化を、流れの境界の変化に応じて格子の再配置を行う手法により解析、評価している。

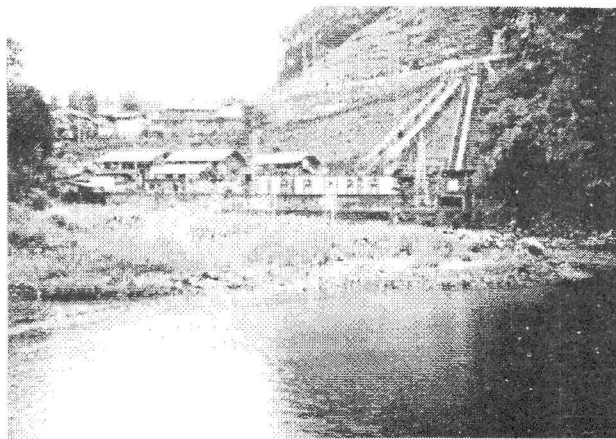


図-1 現地概要図

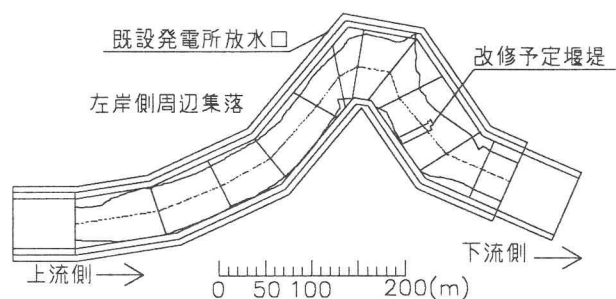


図-2 堰堤付近状況の概要平面図

本研究ではこうした著者らによる手法を堰堤からの排砂問題に適用する。まず、対象河川の現地調査、移動床実験¹¹⁾を行い、その後この解析手法を用いて、移動床実験との比較を行う。さらに現地の排砂効果について検討した。

2. 現地の状況と現場調査

粕川は、岐阜県西濃地域の伊吹山を水源とし、木曽川水系の揖斐川に注ぐ流路延長43.5km、流域面積119.5km²の2級河川である。この河川の比較的中流部(流域面積78.4km²)地点に、大正初期に建設された春日発電所の粕川堰堤(高さ6.36m)が存在する。建設後、伊勢湾台風をはじめ大型の出水にも幾度か見舞われ現在ではほぼ満砂状態となっており、堰堤の上流部では堆積土砂による河床上昇が見られる。逆に下流域では堰堤による掃流土砂の遮断により激しい河床低下が見られる。河川周辺の状況および環境は、平均河床勾配が約1/80河川がダム上流部約80m付近で強く湾曲し、湾曲部直上流左岸側に既設の発電所とその放水設備が位置する。そのため、湾曲部内岸に相当する右岸では、堆積土砂が山の様な状態となっている。また、当地域においては、河川勾配が1/100以上と急勾配であるため、河床材料は粒径の100mmを越えるものも多く見受けられる。一方、外岸側に相当

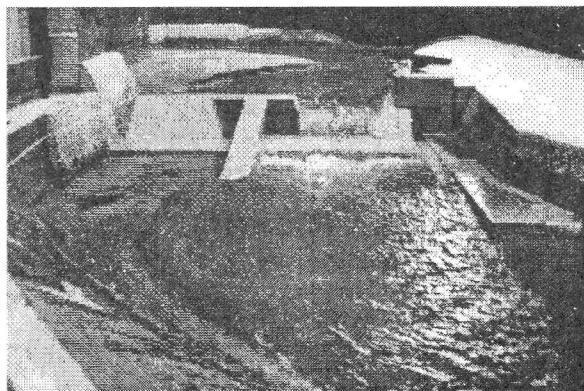


図-3 堰堤部模型概要

表-1 実験ケース(模型諸量)

実験種類	高さ×堰堤開口部幅
Run-1	8.3cm×26.7cm
Run-2	8.3cm×40.0cm
Run-3	10.0cm×26.7cm
Run-4	10.0cm×40.0cm
Run-5	10.0cm×53.3cm

する左岸には、既設発電所の放水設備を有し、常時発電とともに水を放流している。洪水時にはこの発電を停止するため放流水が止まり、放水設備の埋没が問題となっている。図-1に堰堤左岸から上流湾曲部と既設の発電所の写真を示す。

ところで、現地の状況を考慮した数値解析、水理実験を実施する場合、現地地形を定量的に把握する必要がある。ここでは、この現況河川に対して10断面の横断測量を実施し、河床横断形状のデータを作成した。また、堰堤上流部の水際付近において右岸、左岸それぞれを数地点、表層と下層に分けて堆積土砂のサンプリングを実施し、現地河床材料の粒度分布を把握した。

3. 水理模型実験¹¹⁾

(1)実験概要

模型は無歪みの1/30縮尺で、現地の堰堤上流部400m程度を再現することとした。模型平面図を図-2に示す。実験に用いる模型砂は、河床材料の現地調査結果から、現地の平均粒径に対して1/30幾何縮尺を適用しほぼ均一粒径に近いケイ砂4号(平均粒径 約0.88mm)を用いた。現地河床の大部分は、armour coatで覆われている。本来模型の河床材料はそのarmour coatの河床材料を使用し、給砂については底層における細かな河床材料で実施するのが望ましい¹²⁾と考えられる。しかし、今回の移動床実験では、砂の維持管理の面、さらにarmour coatが掃流される出水時を想定しているため、給砂用の砂と河床粗

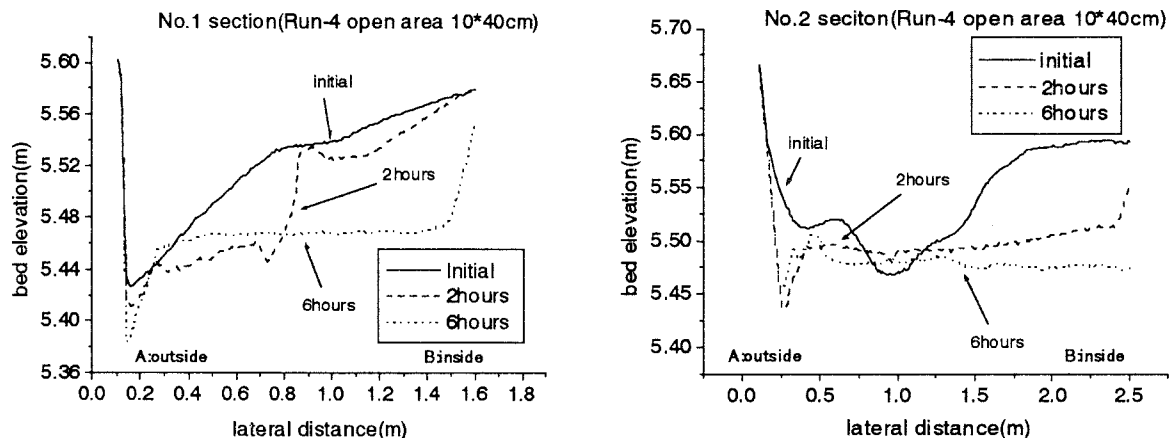


図-4 河床横断面形状の時間的変化(実験結果)

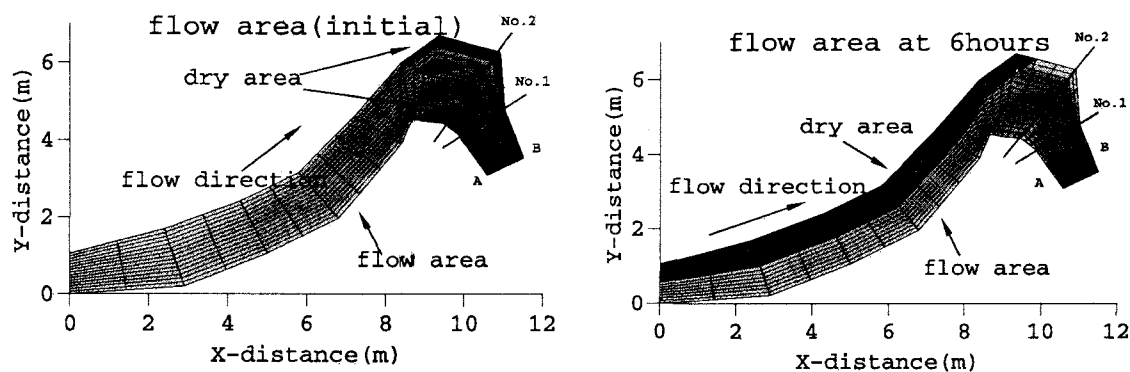


図-5 実験における水際の変遷状況(左: 通水初期, 右: 6時間後)

度を構成する砂との区別をせず、ほぼ粒径の整ったケイ砂4号一種類を用いた。

この実験では、既設の低堰堤に開口部を設置したとき、堰堤上流側の河道形状がどのように変化していくか、開口部の大きさと共に検討することとした。実験を開始して通水し、2時間毎に水を止め、レーザ変位計を用いて河床形状の変化を追った。開口部の位置は現在取水口がある堰堤左岸側既設ピアの位置を原点として、開口部の幅、高さ（既設堰堤天端標高-開口部敷標高）を設定した。図-3に堰堤の概要図を示す。各開口部の大きさに応じた堰堤を、表-1に示す実験ケース分用意し、開口部の違いに応じた上流部の河床形状を観察した。

(2)水理実験結果

図-3の写真では、堰堤上流部分の右岸（湾曲内岸側）の堆積土砂が侵食される状況が観察できる。洪水時に堰堤の開口部により、まず堰堤直上流近傍の河床低下が起こる。次に堰堤近傍の河床低下とともに水位の低下により掃流力が増し、この付近の広い領域で土砂の移動が始まる。その結果、図-3に示すような、陸域部堆積土砂の崩落が始まる。なおこの崩落は、ある時間間隔毎に間欠

的に起こり、一度にある程度固まった土砂が崩落する。この実験における初期河床形状は、既設堰堤の条件の下、ほぼ平衡状態にある河床に基づいて作成されたものである（横断測量の結果を利用）。この結果から考察すれば、仮に現状の河床形状に対して、現状の堰堤に開口部を設置し、洪水に見舞われた場合、まず堰堤上流部の河床低下が進み、その後間欠的に側岸の崩落、侵食が進むことが予想される。上流からの給砂が停止した場合の流路の形状は、著者ら¹⁰⁾の検討によれば、まず側岸の侵食から始まり横断的に平衡状態に達した後、河床低下が長い時間をかけて進行することを示している。著者らの実験では側岸の横断勾配をほぼ安息角に近い状態で整形しているため、今回の実験のように、ほぼ動的平衡状態に近い河床形状からの河床変動とは異なった結果が得られている。すなわち河床形状の変遷は、流路幅、勾配といった水理諸量に対して、どちらかのバランスが崩れた場合、その崩れたものを補う方向に河床は変形していくことがわかる。

図-4は、堰堤から約1m上流のNo.1断面、同様に約2m上流のNo.2断面における河床横断面図を示す。No.2断面では湾曲部の途中にあるため、その影響を受け、外岸側（左岸）の部分で局所的に洗掘しているところが見

られる。水路を再現している上流端より河道は緩やかに左に湾曲している。このNo.2断面やその付近ではその左に湾曲している影響から流路が右岸側に偏っている。そのため、No.2断面では、湾曲部の内岸側である右岸の砂州がわずか2時間ほどで全て洗掘、崩落していることがわかる。これは開口部の大きさに関係なくすべての実験ケースで同様な傾向であった。

図-5は実験初期における水域と、実験末期(6時間後)における水域との違いを示す。上流部では、右岸側で河床低下がおこり水域が狭くなるものの、下流部では砂州の崩落、それにともなう土砂供給などの作用によって流路が拡大し水深が浅くなっている。なお、今回の実験では水位は測定していないため、写真とビデオによってこの水域図を作成した。

4. 流路変動を伴う平面2次元河床変動解析

(1) 解析の概要

実河川の河床変動計算を行う場合、先の様に側岸の侵食、崩落や局所的な洗掘によって、流路が変動することがある。これは、数値解析を行う上では解析領域の変化となり、計算を不安定にさせる要因でもある。この問題を取り扱うため、地形に関する情報を詳細に分割した平面固定格子に与えておくとともに、流れを解く格子は、水際の位置に応じて決定された解析領域で境界適合格子に展開する方法を採用した。

(2) 流れの基礎式

流れの方程式は、水深平均化された平面2次元流れのモデルを用いる。基礎式は、一般形保存式をベクトル表示すれば以下の様になる。

$$\text{div}(\phi \mathbf{h} \mathbf{u} - \Theta \text{grad } \phi) = S_\phi \quad \text{-----}(1)$$

ここで、 $\mathbf{u}$:流速ベクトル、 h :水深である。(1)式において ϕ 、 Θ 、 S_ϕ をそれぞれ次の様に現すと、それぞれ、連続式、 u 、 v の運動方程式が得られる。

・連続式

$$\phi = u \quad ; \quad \Theta = 0 \quad ; \quad S_\phi = 0$$

・ u -方程式 (x 方向成分流速)

$$\begin{aligned} \phi = u \quad ; \quad \Theta = v_r h \\ S_\phi = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ + \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \text{div} (v_r h \text{ grad } u) \end{aligned}$$

・ v -方程式 (y 方向成分流速)

$$\phi = v \quad ; \quad \Theta = v_r h$$

$$\begin{aligned} S_\phi = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} - C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \\ + \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) \right] - \text{div} (v_r h \text{ grad } v) \end{aligned}$$

ここで、 u : x 方向成分流速、 v : y 方向成分流速、 h :水深、 g :重力加速度、 ζ :基準面からの水面高さ、 C_f :水路床の摩擦抵抗係数であり、乱流応力 τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} はBoussinesq近似により表現する、このとき、本研究では、渦動粘性係数 ν_t は、摩擦速度を u_* として、

$$\nu_t = \alpha u_* h \quad \text{-----}(2)$$

とした。ここで、 α は経験定数であるが、本研究では $\alpha=0.1$ とした。 u 、 v の方程式において、両辺に全く同じ拡散項が存在しているが、これは収束計算の過程では共に考慮され、収束解が得られたのちは、共に相殺される。

流れ場の解法は、著者ら¹⁰⁾と同様である。境界条件は、まず上流端では流量を与える。下流端では、開口部の幅に応じた限界水深を与える。

(3) 河床変動解析手法

解析における流砂量式は、非平衡性を無視して芦田・道上式¹³⁾を用いる。さらに、流線の曲がりによる2次流の効果と河床の傾斜の効果 considering、流砂の運動方向角(Φ)を次式で与える^{14) 15)}。

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} - N_* \frac{h}{r} \right) + \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{1}{\mu_d \mu_f}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad \text{-----}(3)$$

ここで u, v :水深平均流速の x, y 方向成分、 h :水深、 r :流線の曲率、 μ_d :砂の動摩擦係数、 μ_f :砂の静止摩擦係数、 τ_* :無次元掃流力、 τ_{*c} :限界掃流力、 z_b :河床高さ、 n :底面流向に直角軸である。2次流の効果に関して、実験時の観察によると湾曲部付近の流れには河床波の形成とそれに伴う水面波の形成が見られ、このような攪乱が2次流の十分な発達を妨げる可能性もあるため、解析対象領域全域で2次流の効果を検討しないケース($N_*=0.0$)と、2次流の効果を検討するケース(Engelund¹⁵⁾による標準値 $N_*=7.0$ を与える)の両者を比較検討することにした。

側岸侵食のモデルは、隣接する格子点の傾斜角が安息角以上かどうか判別し、安息角以上であるなら安息角に等しい傾斜角をもつ滑り面に沿って崩壊が生ずるとし、質量保存を考慮して河床の高さの再配置を行うこととする^{6) 16)}。境界条件は、下流端で河床を固定とし、上流端で平衡流砂量を仮定している。

(4) 解析結果

まず、2次流の効果を検討しない場合の結果を示す。

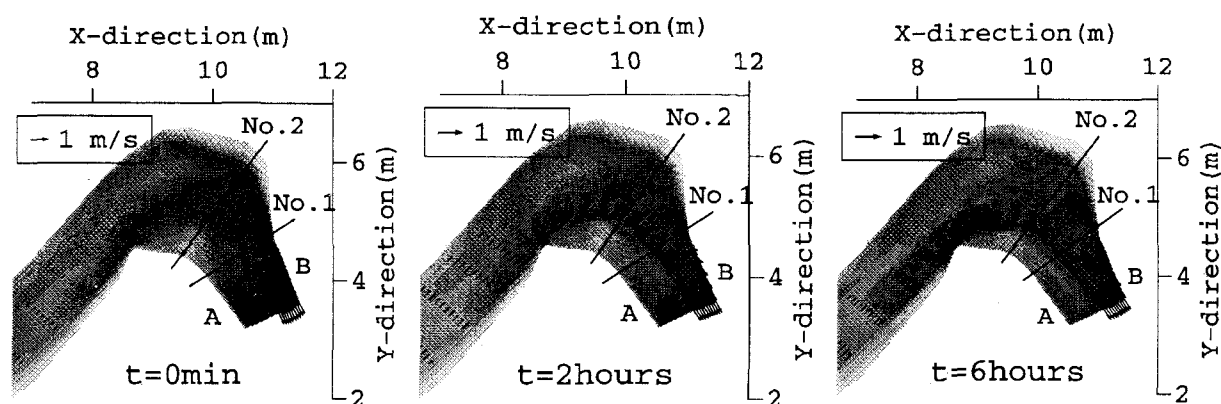


図-6 湾曲部の流速分布

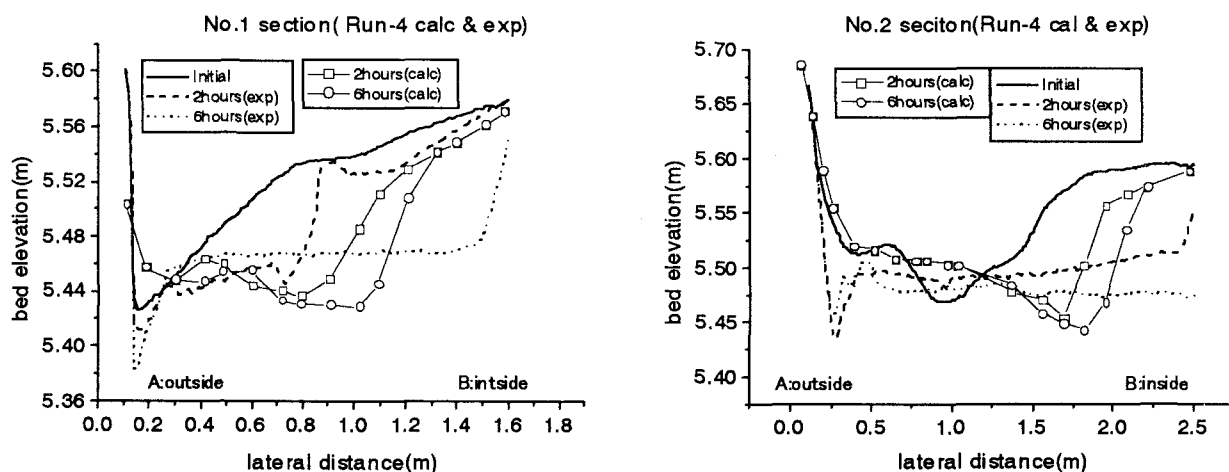


図-7 河床横断面形状の時間的变化(解析結果)

図-6に堰堤上流側の湾曲部における流速分布を示す。図中、流速ベクトルが示されている領域が水域に相当している。実験では時間の経過とともに水域が広がるが、解析では局所的な河床低下が卓越し、逆に小さくなる傾向が見られた。

図-7は、解析による堰堤上流部のNo.1, No.2断面における河床横断の時間的变化を示す(実験値も添付)。湾曲部に流入する時に、両岸の高い地形の影響を受け、流路が狭められ強く縮流している。その結果、図-7に見られる様に湾曲部出口付近では縮流に伴う掃流力の増加により、局所的な河床低下が顕著に見られる。また、河床低下に伴い、この部分における流路はさらに小さくなる。一方、実験では、断面によって時間の差はあるが、側岸の崩落と土砂供給によって、流路は一方向的に拡幅する傾向にあった。また全体的に、実験では、2~4時間程度で右岸側の砂州が全て崩落、侵食したが、解析では、砂州が侵食される傾向は概ね再現できているものの砂州の完全な崩壊を再現するには至らなかった。

図-8は、湾曲流れに伴う2次流効果を考慮した場合の流速分布、No.2断面における河床形状の比較図を示す。平面的な水域部分、側岸の侵食、崩落の過程をそれぞれ

比較すると、2次流効果を考慮しない方が実験との整合性は良い。

これらの結果から、側岸の侵食、崩落に伴う流路の拡幅過程が、まだ十分にモデル化できていないと考えられる。解析では、側岸の斜面上における限界掃流力を評価¹⁷⁾、河川の平面線形による2次流の影響と側岸の傾斜角の影響を考慮した流砂の方向角の評価^{14) 15)}、水中、空中を問わず安息角以上の傾斜が生じた場合の側岸の崩落^{6) 16)}をそれぞれ考慮し、河道の平面線形の再現を行っている。一方、実験における側岸の侵食、崩落は、このような考え方だけに起因するものではなく、河床波による水面動揺や、水の乱れなどにも影響されていると考えられる。本来、流路の拡幅に伴い水深が低下すれば掃流力の低下とともに安定状態に達するはずだが、この実験においては、流路の拡幅がかなり進行しても、土砂の移動が観察されていた。本解析結果を見た限り、これまで一般的に用いられてきた河岸近傍の河床低下によって側岸が侵食、崩落していくというモデルは、今回のような急勾配流れには、単純にそれを適用するのは難しく、今後このような事象をうまくモデル化する必要がある。

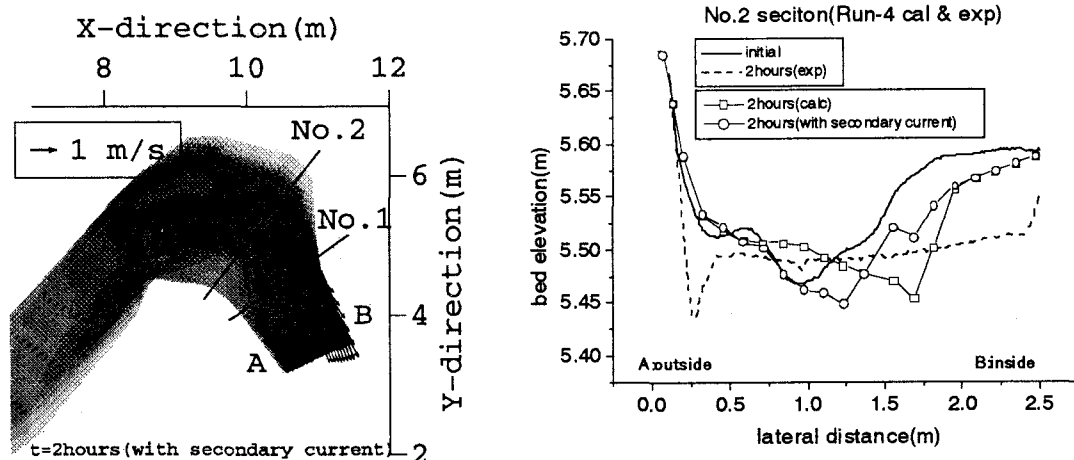


図-8 湾曲流れに伴う2次流効果を考慮した解析結果

5. まとめ

本研究では堰堤改修工事に際し、移動床水理実験と数値解析を用いて、堰堤からの堆積土砂のフラッシング状況を検討した。さらに得られた実験データと解析結果を比較検討することにより、数値解析モデルの妥当性を検討した。

その結果、数値解析モデルによって、河道の状況とフラッシング効果を概略検討できることが確認できるものの、水面動揺などの乱れの多い部分では、側岸の崩落や流砂の評価方法などが十分モデル化できていないため、侵食量を過小評価した。今後、より精度の良い解析を行うためには、側岸侵食や流れに及ぼす急勾配流れでの水面動揺などの効果をより詳細に検討する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 芦田和男, 澤井健二: ダム堆砂の排除に関する研究(2), 京大防災研究所年報, 第22号, B-2, pp.329-340, 1979.
- 2) 芦田和男, 江頭進治, 村岡猛, 里深好文: 砂防ダムの流出土砂調節機能に関する研究, 京大防災研究所年報, 第30号, B-2, pp.421-439, 1987.
- 3) 水山高久, 下東久巳, 下田義文, 井戸清雄: スリットを有する砂防ダムに関する実験的研究, 第28回水理講演会論文集, pp.723-728, 1984.2.
- 4) 清水康行: 沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究, 北海道大学学位論文, 1991.2.
- 5) 西村達也, 金尾健司, 福岡捷二: 河川合流部の洪水流と河床変動, 第48回年次学術講演会講演概要集, 第II部, pp.126-127, 1993.
- 6) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄: バングラディッシュ国・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, 水工学論

文集第42巻, pp.985-990, 1998.

- 7) Hsieh Wen Shen: Flushing sediment through reservoirs, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.37, 1999, No.6, pp.743-757.
- 8) Nils. R. B. Olsen: Two-dimensional numerical modelling of flushing process in waters reservoirs, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.37, 1999, No.1, pp.3-16.
- 9) 水山高久, 阿部宗平, 矢島重美, 井戸清雄: 2次元河床変動計算のスリット砂防ダムへの適用, 新砂防, Vol.42, No.5(166), pp.21-26, 1990.
- 10) 後藤孝臣, 北村忠紀, 辻本哲郎: 土砂供給停止による河床低下と砂礫河岸拡幅の進行過程, 水工学論文集, 第44巻, pp.765-770, 2000.2.
- 11) 後藤孝臣, 辻本哲郎, 寺本敦子: 移動床実験・河床変動解析による低堰堤貯水池からの排砂効果の検討, 河川技術に関する論文集, 第5巻, 1999.6
- 12) 芦田和男, 高橋保, 道上正規: 河川の土砂災害と対策, 森北出版, 1983年7月.
- 13) 芦田和男, 道上正規: 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第14号 B2, pp.259-273, 1971.
- 14) Nakagawa, H. T. Tsujimoto and S. Murakami: Non-equilibrium bed load along side bank, *Proc. 3rd Int. Sym. River Sedimentation, Jackson, Mississippi, USA*, pp.1029-1065, 1986.
- 15) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, *J. Hydr. Div., ASCE*, 100(11), pp.1631-1648, 1974.
- 16) 関根正人: 側岸侵食機構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.533/ II -34, pp.51-59, 1996.2.
- 17) Lane, E.W.: Design of stable channels, *Trans. ASCE*, Vol.120, pp.1234-1260, 1955.

(2000.4.17受)