

遷移を伴う流れによる浸食流路の数値計算法

徳島大学工学部 正 員 岡部 健士
(株)ウエスコ 正 員 ○高橋 邦治
(株)長大 正 員 中久保 喜昭

1. まえがき

大口径の水抜き穴あるいはスリットを有する砂防ダムの上流において低水時に形成される浸食流路は、常流・射流が混在する流況の下で発達する。そして、その横断面形状は流れの遷移点の移動や掃流力の縦断分布状況に支配されて複雑に変化する。本文では、このような浸食流路の2次元数値解析モデルを構築するとともに、モデル実験への適用を通してその適合性を検討した結果について報告する。

2. シミュレーションモデルの概要

流れの計算には、(1)および(2)式に示す1次元開水路不定流の基礎式を用いる。ここに、(1)式では、流れの連続条件に及ぼす河床位の変化や流水層中を運動する砂粒子の影響が考慮されている。そして、(1)および(2)式より流れの1次元流況を求めたのち、鉛直断面分割法を用いて掃流力の横断方向分布を算定する。流路変形方程式は2次元直交座標系について記述すると(3)式のようなものである。ここに、 q_x 、 q_y は流れ方向、横断方向の単位幅流砂量であり、芦田・道上、平野¹⁾の成果を参照すれば(4)~(6)式のように表される。なお、(4)、(6)式中の無次元限界掃流力 τ_{*c} の計算には、斜面勾配の影響を考慮したLane・Carlsonの式、(7)式を用いる。ところで、(4)、(5)式は平衡状態の流砂現象を仮定して導かれたものであるが、実際の流路の流砂現象はとくに水際線付近において非平衡性の強いものとなっている。そこで、中川・辻本²⁾の縦断方向非平衡流砂量式を拡張し、 q_x および q_y の計算値 q_{Te} に(8)式のような補正を加える。ここに、 Λ は流砂の平均step lengthであり、(9)式のように粒径 d に比例するものとみなす。

以上の諸式を差分法により離散化すれば、流路変形過程の追跡が原理的には可能となる。しかし、流れ方向に水面幅が変化する場合、たとえば等間隔の直交格子上で(3)式を離散化しようとするれば水ぎわ線上での境界条件の取り扱いが極めて複雑なものとなる。また、横断形状を詳細に表現するために計算格子を非常に多く設定する必要も出てくる。これらの問題点を解消するために、本モデルでは(3)式を(10)式のように一般曲線座標系に関するものに変換した。

基礎式を離散化した結果の記述は紙面の都合上省略するが、(1)および(2)式の離散化はMacCormackが提案した2段階差分法に従って行い、一方、(10)式の ψ および ϕ に関する微分項の離散化には、それぞれ芦田・岡部³⁾の方法および中央差分法を適用した。また、流れの計算と河床変動計算は時間ステップごとに独立して

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -\frac{\partial A_s}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = g A (-i_f - \frac{\partial H}{\partial x}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right\} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{q_x}{u_* d} = 1.7 \tau_* (1 - \frac{\tau_* c}{\tau_*}) (1 - \sqrt{\frac{\tau_* c}{\tau_*}}) \quad (4)$$

$$q_y = \tan \gamma \cdot q_x \quad (5)$$

$$\tan \gamma = \frac{\tan \theta}{\mu} \sqrt{\frac{\tau_* c \cos \theta}{\tau_*}} \quad (6)$$

$$\tau_* c_s = \tau_* c_o \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi_R} \cos \theta} \quad (7)$$

$$q_T = q_{Te} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{y_s}{\sin \gamma \cdot \Lambda} \right) \right\} \quad (8)$$

$$\Lambda = K_s d \quad (9)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} J \left\{ \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{q_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{q_y}{J} \right) \right\} = 0 \quad (10)$$

ここに、 t :時間、 x :流れ方向座標、 A :流積、 Q :流量、 A_s :堆積土砂層の断面積、 g :重力の加速度、 H :水位、 i_f :摩擦損失勾配、 z :河床位、 λ :砂の空隙率、 d :粒径、 τ_* :局所的な無次元掃流力、 u_* :局所的な摩擦速度、 $\tau_* c$:移動限界掃流力、 θ :河床横断勾配角、 $\tau_* c_o$:横断方向勾配がない場合の無次元限界掃流力、 ϕ_R :砂礫の水中安息角、 q_{Te} :平衡状態の流砂量、 y_s :水際からの横断方向距離、 $\mu = \sqrt{\mu_k \mu_s}$ (μ_k :砂粒と河床砂礫間の動摩擦係数、 μ_s :砂粒の水中静摩擦係数)、 γ :砂粒子の移動方向と主流方向のなす角度、 q_x 、 q_y :それぞれ一般座標系における流砂量の反変成分、 J :座標変換のヤコビアンである。

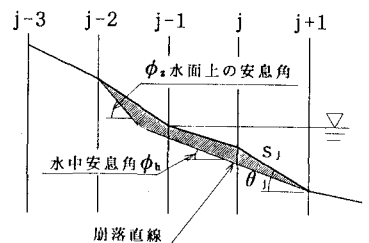


図-1 崩落のモデル化

行うことにし、(1)式の右辺の値には1ステップ前の計算値を用いた。

ところで、流路の側方浸食が進み、水ぎわ付近の横断方向勾配がある限界値より大きくなると側岸の崩落現象が生じる。本モデルでは、図-1のように、水面位の上および下方で勾配がそれぞれ ϕ_h および ϕ_z と変化する崩落面を仮定して側岸形状の修正を行うとともに、崩落量を横断方向の流砂量に上乘せした。

3. 実験値との比較検討

実験は、スリット付き砂防ダムの上流で満砂した堆砂層が低水時に再浸食される過程を想定して行われた。実験には、平均粒径 1.73mm 、水中比重 1.65 の均一砂を用いた。初期河床形状は、下流端より 1m 付近までは急勾配、その上流側では緩勾配となるように設定するとともに、流路の蛇行を防ぐために横断形状をV字型に成型した。そして、まず、約 30cc/s の定常流量を通過して堆砂層を流れに十分なじませたのち、流量を 200cc/s に増加させ、その後における流路の発達過程を計測した。図-2および図-3は、実験結果を示すとともに、これと計算結果とを比較したものである。計算は、 $\Delta\psi=0.1$ 、 $\Delta\phi=0.001$ 、 $\lambda=0.35$ 、 $\tau_{*c}=0.045$ 、 $n=0.015$ 、 $\phi_h=37.4^\circ$ 、 $\phi_z=75^\circ$ 、 $K_s=100$ の条件で行われた。また、流れの計算において、運動方程式に拡散型の人工粘性を付加し、時間ステップ Δt は、流れに関するCFL条件に基づいて算定した。

さて、図-2の結果を詳細に検討すると、下流部における流路幅の拡大過程ならびに、ある程度時間が経過したのちそれが固定される様子が良好に再現されているが、上流部の計算結果では、実測値に比較して縦浸食量が少なく、後者に見られる下に凸な横断形状が十分には再現されていない。一方、図-3では、最深河床位線の勾配急変点が急速に塑上し、これに伴って流れの遷移断面位置も塑上してゆく状況がよく再現されている。ただし、すでに述べたように、上流部における縦浸食量が小さめに計算されている。また、計算結果には若干の数値不安定が生じている。この原因は上流端からの給砂量をゼロとしたためであり、本モデルの本質的な欠陥ではない。

4. あとがき

以上、流れの遷移を伴う浸食流路の発達過程の数値計算モデルのフレームワークを提示するとともに、その妥当性を検証した。今後は、縦浸食が卓越する上流部の横断形状の再現性がさらに高まるようにモデルに改良を加えるとともに、混合砂礫の場合への拡張法を検討する予定である。

[参考文献] 1)平野: 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, 1973. 2)中川・辻本: 砂礫の運動に伴う移動床砂面の擾乱発生過程, 土木学会論文報告集, 第291号, 1979. 3)岡部・芦田: 流れの遷移を伴う一次元河床変動の数値解法, 土木学会論文集, NO. 434, II-16, 1991.

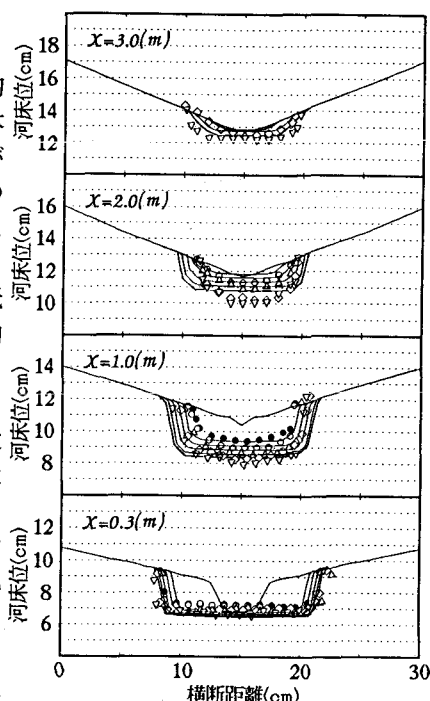


図-2 代表的断面の横断面図

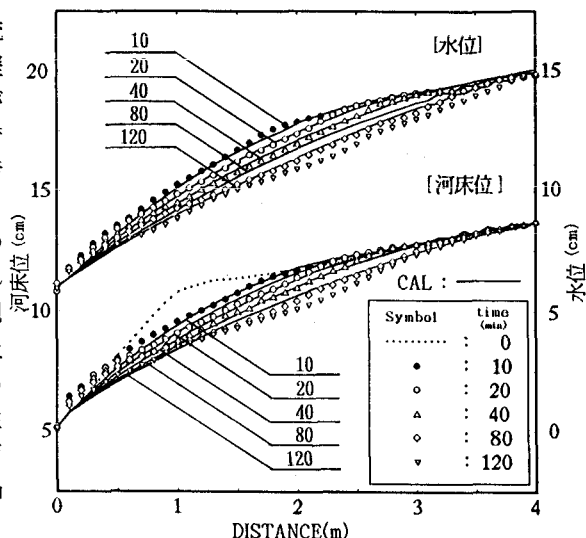


図-3 水位と河床位の縦断面図