

II-6

河岸侵食の数値計算に関する研究

北海道大学工学部 学生員 鷲尾 亨

北海道大学工学部 正 員 黒木 幹男

北海道大学工学部 正 員 板倉 忠興

1. はじめに

自然状態の河川では、流水の作用により、河岸の侵食とこれに伴う堆積から、流路の変動を繰り返してきた。わが国の河川で、堤防や護岸の建設によりこのような流路変動を極力抑える努力が続けられているが、今だに自然河岸のまま放置されている所も少なくない。また、最近は自然に近い河川改修が指向され、出水時の河岸近傍のせん断力、河岸侵食の評価の必要性が増大している。

本研究では、砂を河岸材料とする侵食のモデルを確立させるために、MacCormac法を用い侵食過程の解析に試みた。そして、流路実験を行い侵食過程を明らかにし、その解析解との適合性を比較、検討し河岸侵食のメカニズムを明らかにしたものである。

2. 河岸侵食の数値計算について

1) 河岸侵食の評価式

縦断方向に一樣な場である横断面形状を有する水路を考える。横断面形状の時間的变化は次の流砂の連続式を用いて評価される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_{py}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

ここに、 z : 河床高、 q_{py} : 横断方向流砂量で水路中央方向を正とする、 λ : 砂の空隙率。

横断方向せん断力分布は、水深平均流を対象した評価法として澤井らの式を用いて次式で与えられる。¹⁾

$$\tau = \rho g h S_0 \cos \theta \left[1 + \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} h \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right]$$

ここに、 h : 水深、 θ : 境界面の横断勾配角、 S_0 : エネルギー勾配。

ここでは、簡単のため非粘着材料で、単粒径の場合を対象にする。安藤ら²⁾によれば、側岸部における横断方向流砂量 q_{py} は次式のように与えられる。

$$q_{py}^* = \frac{q_{py}}{\sqrt{sgd^3}} = q_b^* \tan \gamma \quad (2)$$

$$\text{ここに、} q_b^* = \frac{q_b}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau_* - \tau_{cs}^*)^{1.5} \quad (3)$$

$$\tan \gamma = \frac{\tan \theta}{\mu_s} \sqrt{\frac{\mu_s \tau_{cs}^*}{\mu_k \tau_*}} \quad (4)$$

Study on Numerical Analysis of Bank Erosion

by Tohru WASHIO, Mikio KUROKI and Tadaoki ITAKURA

$$\tau_{cs}^* = \tau_{ch}^* \cos \theta \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\mu_s} \right)^2}, \quad (5)$$

ここに、 θ ：境界面の横断勾配角、 $s = (\rho_s - \rho) / \rho$ ：砂粒子の水中比重、 d ：砂粒子径、 γ ：実際の流砂の動きと縦断方向の交わる角、 μ_s ：静止摩擦係数、 μ_k ：動摩擦係数、 τ_{cs}^* ：側岸部の無次元掃流力、 τ_{ch}^* ：水平床の無次元掃流力。

2) 数値計算のモデル化

1) で示した式らを用い、式(1)から河岸侵食の横断面形状の時間的変化を数値計算で求める。ところで、ある横断面に対して q_{xy} は横断方向に極大値をもつ性質であるため、式(1)は単純に前進、後退差分をとっても、安定した解が得られない。そこで、基礎式の離散化は保存型の解法として、MacCormac法を用いて計算を行う。ただし、いわゆる数値粘性は導入していない。MacCormac法による差分のスキームは、次のとおりである。

$$\text{予測子段階} \quad \widetilde{z}_i = z_i^k + \frac{\Delta t}{\Delta y} (q_i - q_{i-1})^k$$

$$\text{修正子段階} \quad \widehat{z}_i = \widetilde{z}_i + \frac{\Delta t}{\Delta y} (\widetilde{q}_{i+1} - \widetilde{q}_i)$$

$$z_i^{k+1} = \frac{1}{2} (z_i^k + \widehat{z}_i)$$

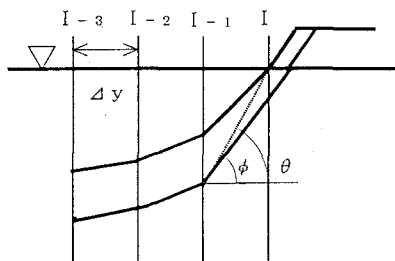


図-1

式(2)の微分項や、式(2)，(3)，(4)，(5)の横断勾配は微分表現になおして、予測子段階に前進差分，修正子段階に後退差分を用いた。図-1のように水位から天端までの空中部の側岸を水中安息角にもつ河岸を仮定する。また、側岸では水位から天端まで水中安息角をもって後退するものとする。まず水位を一定に保ち計算点(I)を固定して、計算を始める。そこで水際の局所勾配角 θ が、水中安息角 ϕ を越えるまで計算が進むと、計算点(I-1)の点から水中安息角をとるように人為的に直線を引き水際の横断形状を決定する。このとき水位は、流量一定とする条件から与えられる。次のステップでは水際で水中安息角をとるため、計算点は一つ減り計算点(I-1)までの計算となる。以下水際の局所勾配角 θ が水中安息角を越えるときに同様な操作を行い拡幅計算を進める。

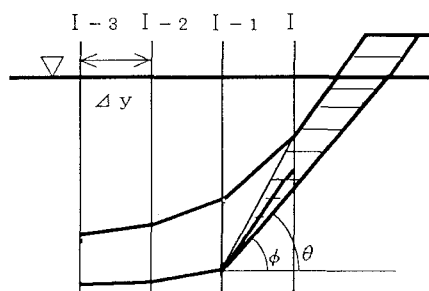


図-2

ところで、このような侵食流路の拡幅過程で、水際付近の横断形状を水中安息角に人為的に決定したため、取り出された土砂を考慮しなければならない。また、拡幅のため天端からの土砂とあわせて、それらを崩落量と称する。本研究では、その崩落量を考慮し横断方向流砂量に付加した。

まず、図-2のように水際の局所勾配角 θ が水中安息角を越えるとき、 θ が水中安息角をとるように人為的に定めたため、崩落量は、図-2で示される斜線面

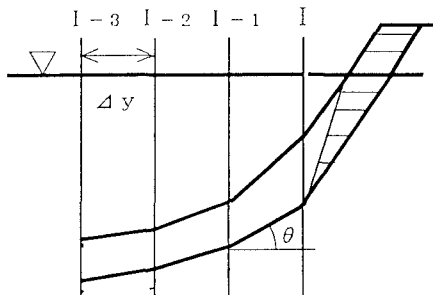


図-3

積となる。一方、図-3のように局所勾配角 θ が水中安息角を越えないようなときは、図-3で示される斜線面積となる。これらの崩落量は、予測子、修正子段階の計算点(1)の横断方向流砂量として、それぞれ等分して計算の中に取り入れている。

なお流量の算定では、マンニングの式を用い粗度係数を一定値として与えた。

3. 実験の方法および結果

数値計算の解析結果の妥当性を、チェックするために侵食過程の水路実験を行った。

1) 実験の概要

実験は、長さ2.7m、幅1mの直線矩形断面を持つ可傾斜水路を用いて、この水路の中に平均粒径0.

0.72cmをもつ砂を敷き詰めて、水路中央に底面幅10cm、のり勾配0.5の台形断面流路を設けた。実験を行った水理条件は、流量2.49(1/sec)河床勾配が1/200で等流条件を保っている。また縦断方向に流砂は動的平衡とすために、通水中は上流端より常時給砂を行なった。この場合の給砂量は下流端でふるいにかかった流砂量を示標とした。そこで上流から1.4mの位置において横断面形状の河床高の測定を行った。測定装置は、先に5mm四方の薄い鉄紙の付いたピアノ線の高さを方眼紙の目盛りから読み取って、河床高を測定しようというものである。なお本実験では通水中に測定をおこなったが、河床への影響はないものと思われる。

2) 実験の考察

図-5は実験結果を示す。実験中は、流路全域にわたって明瞭な交互砂州が形成されなかったため、左右岸の拡幅量がほぼ同じであった。通水後、5分程度で河岸侵食と中央の河床高の増加が著しく見られた。その後は、360分で図-4に示すように水面幅が定常に達した。また、中央河床の上昇も通水後240分程度で、ほとんど変動が止まったと思われる。その変化もあわせて図-4に示す。

実験では、側岸の砂が水中安息角 ϕ に達したのち、崩落がおこり中央の方向に給砂されているのが、確認された。また、すべての時刻において側岸が水中安息角となって侵食が進んでいるのがわかる。

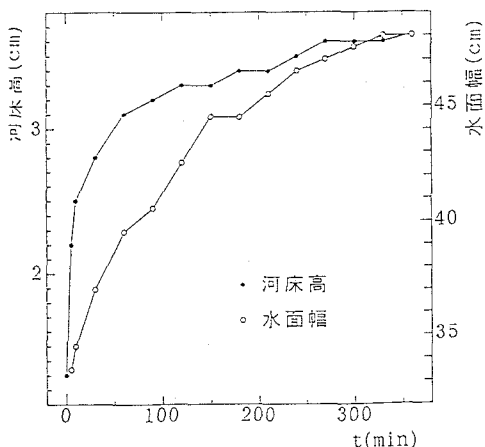


図-4 河床高と水面幅の時間的变化

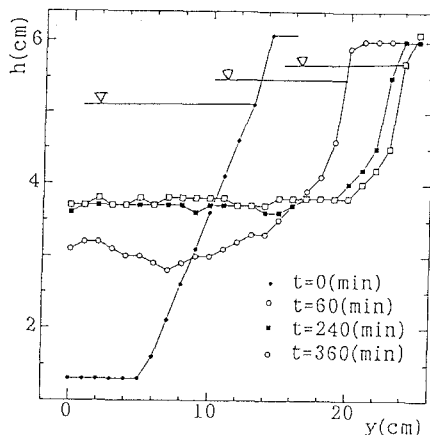


図-5 実験結果

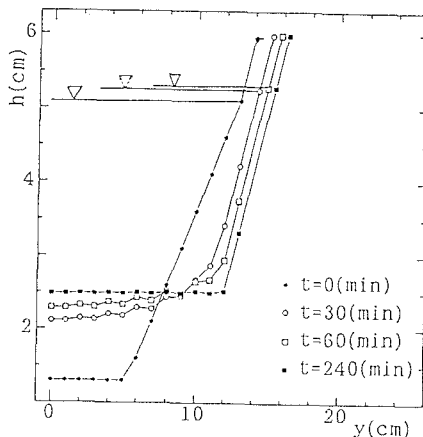


図-6 計算結果

5. 解析結果と実験結果の比較・検討

実験の初期横断形状に適用して解析を行った。横断

面形状の時間的变化の解析結果を図-6に示す。計算は、砂の粗度係数 $n = 0.022$ 、空隙率 $\lambda = 0.5$ 、水中安息角 $\phi = 43^\circ$ 、 $\Delta y = 1\text{ cm}$ の条件のもとで行われた。

図-6によると、初期形状から水路中央で時間とともに河床の上昇がみられる。河岸部では侵食が進み、計算がうまく拡幅過程を再現している。また、経過時間が120分程度で横断面が、平衡状態に達した。

ここで両者の比較を行えば、計算結果では、拡幅量が全体的に実験結果に比べ小さく、また中央河床高の変動も小さかった。また、解析では120分程度で平衡形状に達しているのに対し、実験では360分で平衡に達し大きな開きがある。この原因として、まず考えられるのは流量の算定に用いられる粗度係数を一定値としているため、抵抗則が実験とうまく適合していないと考えられる。そのため、流砂量式やせん断力の評価式にも影響が、現れたと思われる。

6. おわりに

本研究では、水際の局所勾配と水中安息角の関係によって決まる崩落量に着目し、河岸侵食の構造を解析した。そして、河岸侵食をMacCormac法を用いて数値計算を行った。

今後は、より実験結果との適合のために、抵抗則の問題や流砂量式などの検討を行いたいと思う。

(参考文献)

- 1) 澤井・芦田：粘着性流路の侵食と横断形状に関する研究，土木学会論文集，1977
- 2) 安藤・黒木・板倉：混合粒径からなる粘着性河岸の侵食，土木学会北海道支部論文集，1992