

急勾配移動床水路における侵食速度に関する研究

九州大学大学院工学府 学生員 高岡広樹
 九州大学大学院工学府 正員 橋本晴行
 九州大学大学院工学府 正員 池松伸也
 九州大学工学部 非会員 遠藤伸一

1. はじめに

黄河中流域の黄土高原や雲仙普賢岳噴火活動時の山腹斜面などにおいては降雨の度に激しい土砂流出が発生し、下流域においては河床上昇による氾濫を発生させてきた。このような問題に対しては、まず大小様々なスケールの流路について侵食速度と流路変動および土砂流出機構を解明することが重要である。

従来、河床侵食速度については、礫や砂、粘土を対象とした研究があるが^{1), 2)}、細砂を対象とした研究はほとんどなく、評価式も定まっていない。側岸侵食速度については多くの研究が緩勾配流路を対象として行われてきたが³⁾、山腹斜面のような急勾配流路を対象とした研究はほとんどない。

著者らは、急勾配移動床水路において河床材料として細砂を用いた場合の侵食実験を行ってきた³⁾。細砂はその間隙に水を含有すると、乾燥砂の安息角以上の斜面を形成し、時にはオーバーハングの状態を呈することもある。ある条件下ではこれが流路内に崩落することもある。このような状況は実際斜面における流路変動を模擬しているものと考えられる。

本研究は、まず、急勾配移動床水路において細砂を用いた実験で得られた侵食速度を基礎式に代入し、河床変動計算を行うことにより、実験では測定できない水理量を推測する。次いで、その結果を基に侵食速度の評価式を求めたものである。

2. 実験方法

実験に使用した水路は全長 $L=700\text{cm}$ 、 1200cm 、幅 $B_f=30\text{cm}$ のアクリル製の変勾配水路である。水路勾配は $\theta_0=6^\circ, 10^\circ, 14^\circ, 18^\circ$ 、移動床部の長さは $L=700\text{cm}$ の水路の場合 $L_0=570\text{cm}$ 、 $L=1200\text{cm}$ の水路の場合 $L_0=1100\text{cm}$ とした。実験はそれぞれの勾配に対し、初期横断面の異なる Case A, B, C の3種類を行った。まず、Case Aの実験においては、河床侵食のみを生起させた。Case Bの実験においては、側岸侵食のみを生起させる実験を行った。Case Cの実験においては、河床侵食と側岸侵食を同時に生起させる実験を行った。図-1に各ケースにおける初期横断面を示す。河床材料にはほぼ均一な粒度分布を持つ平均粒径 $d=0.17\text{mm}$ 、比重 $\sigma/\rho=2.62$ の細砂を用いた。この細砂の最密充填濃度 C_c は $C_c=0.51$ 、側岸土砂の初期含水比 w は $w=30\%$ であった。実験条件を表-1に示す。

実験は上流より一定流量 $Q_0=400\text{cm}^3/\text{s}$ の水を所定の時間通水して行った。水と土砂を合わせた全流量 Q_t 、流砂濃度 C_f は下流端で流れを採取することにより測定した。また、通水停止後ポイントゲージを用いて河床高、流路幅を測定した。

3. 実験結果

図-2, 3 はそれぞれ河床、側岸侵食速度の縦断方向変化を示している。ここに、河床および側岸侵食速度は、河床高や流路幅の縦断図の実験結果より各地点において河床低下量 ($-\Delta z$)、水面幅変化量 (ΔB) を求め、通水時間 Δt で除することにより求めた。

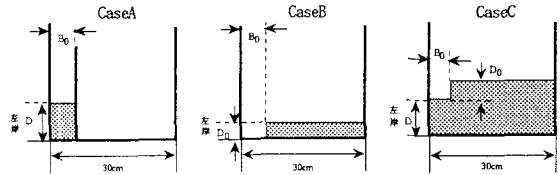


図-1 初期横断面

表-1 実験条件

	$\theta_0(^{\circ})$	$d(\text{mm})$	$D(\text{cm})$	$D_0(\text{cm})$	$B_0(\text{cm})$	$B_f(\text{cm})$	侵食の形態
CaseA	6, 10, 14, 18	0.17	10		30	5, 10	河床侵食
CaseB	6, 10, 14	0.17		2.5, 5, 7.5	30	5	側岸侵食
CaseC	6, 10, 14	0.17	10	2.5	30	5	河床・側岸侵食

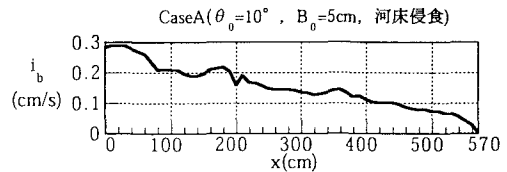


図-2 河床侵食速度の縦断方向変化

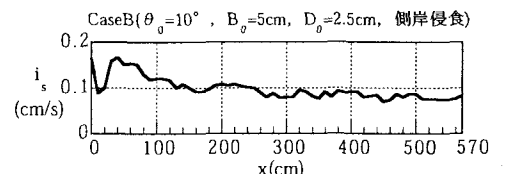


図-3 側岸侵食速度の縦断方向変化

4. 侵食速度式の考察

図-2, 3 の結果を用いて河床変動計算を行うことにより, 実験では測定することができない任意の地点における断面平均流速 v や流砂濃度 C_T を推測することができる。その結果を基に侵食速度の評価式について考察する。

基礎式は流路断面を長方形とすると次のようになる。

(運動方程式)

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} \right) = \sin\theta_0 - \frac{\partial(h+z)}{\partial x} \cos\theta_0 - \frac{B+2h}{gBh\phi^2} v^2 \quad (1)$$

(全相連続式)

$$\frac{\partial(Bh)}{\partial t} + \frac{\partial(Q_i)}{\partial x} = Bi_b + C_* \left(1 + \frac{\sigma}{\rho} w \right) hi_s \quad (2)$$

(土砂連続式)

$$\frac{\partial(CBh)}{\partial t} + \frac{\partial(C_T Q_i)}{\partial x} = C_* (hi_s + Bi_b) \quad (3)$$

(河床侵食速度式)

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (4)$$

(側岸侵食速度式)

$$\frac{\partial B}{\partial t} - i_s = 0 \quad (5)$$

ここに, Q_i : 全流量, h : 水深, z : 河床高,

B : 流路幅, C_T : 流砂濃度, C_* : 最密充填濃度, v : 流れの x 方向流速, w : 側岸土砂の含水比, i_b : 河床侵食速度, i_s : 側岸侵食速度である。また, 初期河床に沿って流れ方向に x 軸を設定した。

初期条件としてはドライベッドとした。上流端 $x=0$ での境界条件は次のようである。

$$Q_i = Q_{*0} = 400 \text{ cm}^3/\text{s} \quad (6) \quad h = \left(\frac{Q_i}{\phi B \sqrt{g \sin\theta_0}} \right)^{2/3} \quad (7) \quad C_T = 0 \quad (8)$$

ここに, Q_{*0} は上流端からの供給水量である。下流端では境界条件は $z=0$ である。

さて, 平衡流砂濃度を $C_{T\infty}$ とすると, 実際の流砂濃度 C_T が $C_{T\infty}$ より小さければ侵食傾向にあり, C_T と $C_{T\infty}$ の差が大きいくほど侵食傾向は増大すると考えられる¹⁾。また, 侵食速度は断面平均流速 v にも関係していると考えられる。

図-4 は任意の地点 x における河床侵食速度の無次元量 i_b/v と, 平衡流砂濃度 $C_{T\infty}$ と流砂濃度 C_T との差 $(C_{T\infty} - C_T)$ を, 図-5 は, 側岸侵食速度の無次元量 i_s/v と流砂濃度の差をそれぞれプロットしたものである。ここに, 平衡流砂濃度 $C_{T\infty}$ は下流端 ($x=570\text{cm}$) における流砂濃度 C_{T0} で近似した。また, x としては水路中央付近の $x=200\text{cm}, 250\text{cm}, 300\text{cm}, 325\text{cm}$ の 4 点を選んだ。図中には最小自乗法によりもめた回帰曲線を実線で示している。この回帰曲線から, 侵食速度の評価式としてそれぞれ次式を得る。

$$i_b = 0.01 (C_{T\infty} - C_T)^{0.6} v \quad (9) \quad i_s = 0.002 (C_{T\infty} - C_T)^{0.2} v \quad (10)$$

5. おわりに

本研究では, 急勾配移動床水路において河床材料として細砂を用いて行われた侵食実験を基に河床高や流路幅の実験結果から任意の地点の平均侵食速度を求め, この実験値を用いて河床変動の数値計算を行うことにより, 実験では測定することができない任意の地点での水理量を推測することができた。その結果, 河床侵食速度式として式(9)を, 側岸侵食速度式として式(10)を得た。今後は本研究の成果を基に得られた侵食速度式を用いて 1 次元流路変動計算を行う予定である。

参考文献

- 1) 高橋保・中川一・里深好文・奥村裕史・安本大地: 混合砂礫床の侵食過程に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 41 号, B-2, 1998.
- 2) 関根正人・飯塚暢明・藤尾健太: 粘着性土の侵食速度予測に向けた実験的研究, 水工学論文集, 第 45 巻, 2001.
- 3) 芦田和男・江頭漁治・加本実: 山地流域における侵食と流路変動に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, 第 26 号, B-2, 1983.
- 4) 橋本晴行・Kichan Park・池松伸也・高岡広樹: 侵食性側岸を有する急勾配水路における流出流量の特性, 水工学論文集, 第 46 巻, 2002.

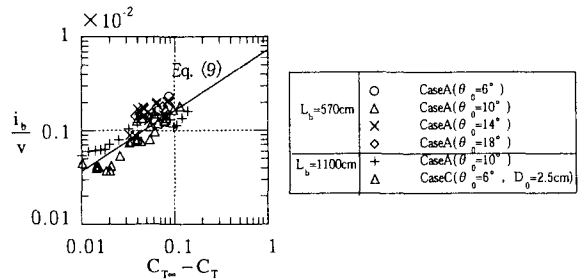


図-4 河床侵食速度の無次元量と流砂濃度の差との関係

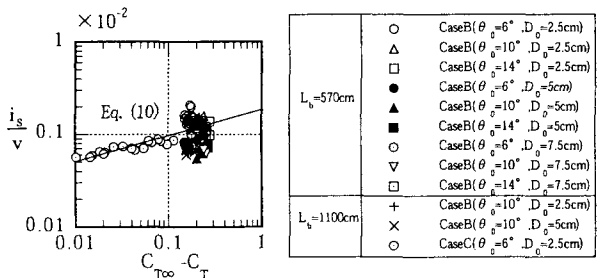


図-5 側岸侵食速度の無次元量と流砂濃度の差との関係