

九州大学大学院工学府
九州大学大学院工学研究院
八千代エンジニアリング株
九州大学大学院工学府

○高岡広樹
橋本晴行, 朴崎稜
城戸正一郎
久岡夏樹

1. はじめに

山腹斜面では豪雨により斜面崩壊がしばしば発生している。その内のいくつかは土石流となって急勾配河道を侵食しながら流下し、その規模を増加させる。下流に流出した土石流は、土砂堆積により氾濫し、集落を襲ったりする。このような災害に対しては、土石流の流出規模の評価が重要である。そのためには山地河道における侵食速度について知る必要がある。

山腹斜面の流路侵食について、流砂形態として土石流や掃流状集合流動を対象として定量的な研究を行ったのは江頭ら¹⁾、高橋ら^{2),3)}であった。しかしながら、側岸侵食速度式については実験による検証が十分ではない。

本研究では、水路実験により侵食速度の評価式を求め、現地へ適用を行う。まず、急勾配移動床水路において、河床材料として細砂～粗砂を用いて侵食速度について実験を行う。次いで、実験結果から河床、側岸侵食速度の評価式について考察する。最後に、2003年7月水俣市集川で発生した土石流の流路変動計算を行い、土石流の流出規模について調べる。

2. 侵食速度

急勾配水路において河床侵食あるいは、側岸侵食のみを生起させる実験をそれぞれ行い、河床と側岸の侵食速度を調べる。

(1) 実験方法

実験に用いる水路は全長 $L=7,12\text{m}$ 、幅 $B_f=30\text{cm}$ のアクリルライト製可変勾配水路である。移動床部の長さ L_b は、 $L=7\text{m}$ の水路の場合、 $L_b=5.7\text{m}$ 、 $L=12\text{m}$ の水路の場合、 $L_b=9, 11\text{m}$ とし、水路勾配は $\theta=6^\circ \sim 14^\circ$ とする。実験はそれぞれの勾配に対し、Case A, B の2種類について行う。まず、Case Aの実験においては、河床侵食のみを生起させる実験を行う。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う。各ケースにおける流路の初期横断面を図-1に示す。河床材料としてCase Aの実験では平均粒径 $d=0.17, 0.29, 0.71\text{mm}$ を用い、Case Bの実験では $d=0.17\text{mm}$ を用いる。実験条件を表-1に示す。

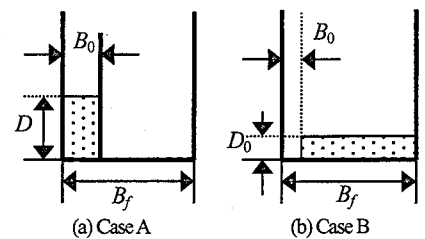


図-1 初期横断面

表-1 実験条件

	$d(\text{mm})$	$L_b(\text{m})$	$\theta(^{\circ})$	$Q_{w0}(\text{cm}^3/\text{s})$	$D(\text{cm})$	$D_0(\text{cm})$	$B_0(\text{cm})$
Case A	0.17	5.7, 11	6, 10, 14	400, 1600	10	-	5, 10
	0.29	9, 11	6, 10, 12				
	0.71	9, 11	6, 10, 12				
Case B	0.17	5.7, 11	6, 10, 14	400	-	2.5, 5, 7.5	5

実験は上流より一定流量 $Q_{w0}=400, 1600\text{cm}^3/\text{s}$ の水を所定の時間通水して行う。水と土砂を合わせた全流量 Q_t 、流砂濃度 C_T は下流端で流れを採取することにより測定する。通水停止後ポイントゲージを用いて河床高、流路幅の縦断方向変化を測定する。

(2) 実験結果

侵食速度は任意の地点において測定することが可能であるが、全流量 Q_t や流砂濃度 C_T は下流端でしか測定できない。そのため、侵食速度の評価式を得るのは困難である。従って、河床高や流路幅の変化の測定から各地点の平均侵食速度の実験値を求め、これを用いて流路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各地点の断面平均流速 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と水量との関係式について考察する。図-2にそのフローチャートを示す。

a) 基礎式

流れの断面を長方形とすると基礎式は次のようになる。

(運動方程式)

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

(全相連続式)

$$\frac{\partial(Bh)}{\partial t} + \frac{\partial Q_t}{\partial x} = B i_b + C_* \left(1 + \frac{\sigma}{\rho}\right) h i_s \quad (2)$$

(土砂連続式)

$$\frac{\partial(CBh)}{\partial t} + \frac{\partial(C_T Q_t)}{\partial x} = C_* (h i_s + B i_b) \quad (3)$$

(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_t : 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、 i_b : 河床侵食速度、 i_s : 側岸侵食速度である。

初期条件はドライベッドとし、境界条件は上流端で $Q=Q_{w0}$ 、 h は等流水深、 $C_T=0$ 、下流端で $z=0$ とする。

さて、実際の流砂濃度 C_T が流れの平衡流砂濃度 $C_{T\infty}$ より小さければ侵食傾向にあると考えられる^{2),3)}。また、侵食速度は断面平均流速にも関係していると考えられ、次元的考察から侵食速度は次式のように表される。

$$i/v = F(C_{T\infty} - C_T) \quad (6)$$

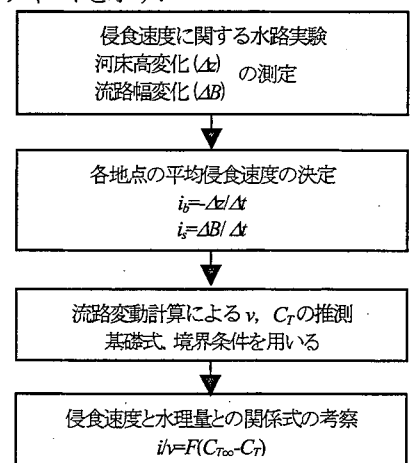


図-2 侵食速度式評価のフローチャート

b) 侵食速度の評価式

図-3, 4 は、それぞれ河床侵食速度、側岸侵食速度について式(6)の関係をプロットしたものである。ここに、 $C_{T\infty}$ は $C_{T\infty} = Q_s / Q_t$ で表され、流砂量 Q_s として、従来より提案されている平衡流砂量式⁴⁾を用いる。

広範な条件下で行われた実験データは、式(6)によってうまく整理されているのがわかる。図中には回帰曲線をそれぞれ実線で示している。この曲線より河床、側岸侵食速度の評価式として次式を得る。

$$i_b = k_b (C_{T\infty} - C_T)^p v \quad (7) \quad i_s = k_s v \quad (8)$$

ここに、 $k_b = 0.01$; $p = 0.7$, $k_s = 0.001$ である。

3. 水俣市集川で発生した土石流への適用

(1) 計算方法

2003年7月水俣市集川で発生した土石流について前節で得られた侵食速度式(7), (8)を用いて流路変動計算を行い、土石流の流出規模について考察する。計算対象区間は崩壊発生場所Oから治山ダムCまでである(図-5)。

基礎式は式(1)~(5)、河床侵食速度式として式(7)、側岸侵食速度式として式(8)を用いる。また、 $C_T > C_{T\infty}$ の場合、堆積が発生するものとし、河床堆積速度式として次式を用いる。

$$i_b = -k_b (C_T - C_{T\infty})^p v \quad (9)$$

計算対象時間は崩壊が発生したとされる20日4時20分から180秒である。崩壊発生前にはかなりの降雨が観測されているので、初期条件として崩壊発生時刻における流量、水深を流出解析により求める。初期流路幅は5mとする。

崩壊地点($x=0$)における境界条件は次のようである。

$$0 < T < T \text{ のとき} \quad Q_t = Q_0, \quad h = h_0, \quad C_T = C_0 \quad (10)$$

$$T < t \text{ のとき} \quad Q_t = Q_{w0}, \quad h = h_0, \quad C_T = 0 \quad (11)$$

ここに、 Q_0 , h_0 , C_0 はそれぞれ崩壊の流量、流動深、流砂濃度、 T は崩壊継続時間、 Q_{w0} は崩壊地より上流域の流出解析によって得られた流量である。 h_0 は等流水深である。崩壊土砂の流出量を Q_{s0} とすると、崩壊土量 V_s は次式のように表される。

$$\int_0^T Q_{s0} dt = V_s \quad (12)$$

両辺を V_s で割り、 $\delta(t) = Q_{s0} / V_s$ とすると、式(12)は

$$\int_0^T \delta(t) dt = 1 \quad (13)$$

と書き換えることができる。 T が0に近い場合 $\delta(t)$ はデルタ関数に、 T が有限値ならば $\delta(t)$ は瞬間単位関に相当する。 T や $\delta(t)$ は崩壊毎に異なり、それらの決定は困難である。ここでは、簡単に、

$$\delta(t) = \frac{Q_{s0}}{V_s} = \frac{1}{T} \quad (14)$$

とし、さらに $T=30$ 秒と仮定する。また、 Q_{s0} は $Q_{s0} = C_0 Q_0$ と表され、 $C_0=0.5$ とする。

(2) 計算結果

図-6に治山ダムにおける流量、流砂量の計算結果を示す。土石流は河床や側岸を侵食しながら発達し、治山ダムにおいて60秒後にピークとなり、ピーク流量 $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ となった。また、総流出土砂量は $43,000 \text{ m}^3$ と計算され、調査結果と概ね一致している。

4. おわりに

本研究では急勾配移動床水路において河床、側岸侵食速度式について調べた。その結果、まず、侵食速度の実験結果を用いて流路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各地点の水理量を推測した。その結果を基に侵食速度の評価式を求めた。さらに、得られた侵食速度式を用いて水俣市集川で発生した土石流の流出規模について調べた。その結果、推測された土石流のピーク流量、総流出土砂量は現地調査結果と概ね一致した。

参考文献

1) 江頭・芦田・矢島, 京都大学防災研究所年報, 第31号, B-2, 1988. 2) 高橋・中川, 新砂防, Vol. 44, No. 3, 1991. 3) Takahashi, HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE, Volume 2, 1993. 4) 橋本・朴・池松・田崎, 水工学論文集, 第47巻, 2003.

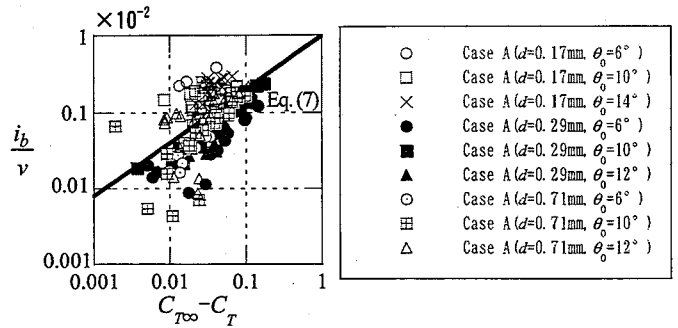


図-3 河床侵食速度の無次元量と流砂濃度の差との関係

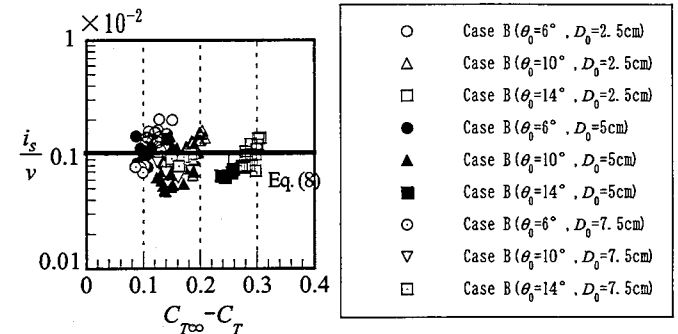


図-4 側岸侵食速度の無次元量と流砂濃度の差との関係

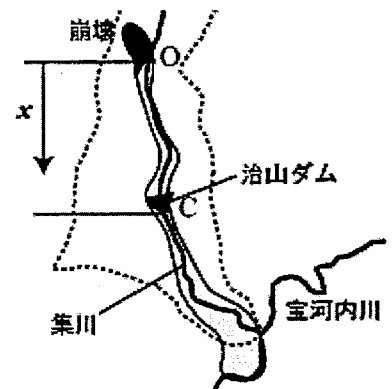


図-5 計算対象区間

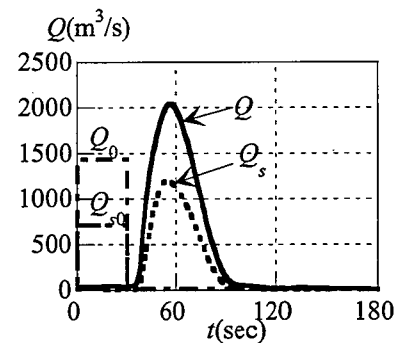


図-6 治山ダムにおける流量、流砂量ハイドログラフの計算結果