

山地流域における侵食と流路変動に関する研究(2)

—流路の側岸侵食機構—

芦田 和男・江頭 進治・加本 実

STUDY ON THE EROSION AND VARIATION OF MOUNTAIN STREAMS

—On the Mechanism of Bank Erosion—

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA and Minoru KAMOTO

Synopsis

The mechanism of bank erosion is discussed for erodible channels composed of cohesive and non-cohesive materials.

An equation is derived for critical shear stress of a sand particle on side slopes composed of cohesive materials by introducing the cohesive force due to the existence of clay particles into the dynamic balance equation for a sand particle.

It is supposed that the rate of particle deposition onto side slope are negligible so long as the shape of side slope is kept constant in a widening process of stream channel. A formula is obtained for the erosion rate, by integrating the pick up rate of sand particles from side slopes and by taking the sand volume sliding down from the regions above water surface into consideration. The equation is tested by its application to several experiments for bank erosion. The erosion rate is predicted well by this equation for both non-cohesive and cohesive materials.

1. 緒 言

山地河道は、それ自体の流路の侵食を通して土砂の生産場となるばかりでなく、崩壊や土石流によって供給された土砂を輸送したり、これらを一時的に貯留したりする機能を有するところの、いわば遷移的な場である。さらに、流量の変化が大きいことと相まって、アーモアコートの形成・破壊、流路の変動と形態の変化も活発であって、流砂は量的にも質的にも大きく変化している。山地河道のこういった現象は、一つには場を構成する材料ならびに上流域から供給される材料が、粘土粒子のように微細なものから土石流堆積物に含まれるような大粒径のものまで、広範な粒径から構成されていることに起因している。

著者らは、上述のような山地河道の流砂と流路変動を明らかにするため、種々の面より研究を進めているが、本報は、その一つとして場を構成する材料の条件、とくに粘土粒子による粘着力に着目して、これが流路の侵食に対してどのような役割を担っているかを議論しようとするものである。著者らは、前報において、砂と粘土からなる混合物河床における砂粒子の移動限界ならびに流砂機構について考察を行い、砂粒子の移動限界と、流砂量分布の予測式を提案した¹⁾。ここでは、その次の段階として、流路変動予測の基礎となる側岸侵食の問題について検討する。まず、平坦河床上における砂粒子の移動限界に関する議論と同様の方法を用いて側岸上における砂粒子の移動限界の推定法について考察する。ついで、その成果ならびに新たな知見を導入して側岸侵食機構について考察し、侵食量式を誘導する。さらに、ここで提案した侵食量式を実験的に検討する。なお、ここでも前報と同様、材料は砂と粘土の混合物を対象にするが、本研究によって得られた成果は、非粘着性材料に対しても直接拡張できるものである。

2. 側岸侵食機構

2.1 側岸における砂粒子の移動限界

側岸上における砂粒子の移動限界については、側岸の安定形状や側岸侵食の問題に関連していくつかの研究がある。

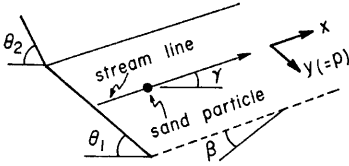


Fig. 1 Schematics of side slope and symbols.

ここでは、砂粒子の離脱に対する粘着力の効果がどのように現われるかについて、非粘着性材料を対象とした平野²⁾の力学モデルに対して粘土による粘着抵抗力の概念を導入して考察してみよう。後述の Fig. 2 に示す側岸部分を拡大して示すと Fig. 1 のようである。ここに、 x : 流路に沿う座標、 y : 斜面に沿って x に直交する座標、 β : 水路床の傾斜角、 θ_1 : 側岸の傾斜角、 γ : 移動限界状態における砂粒子に働く外力と x 軸のなす角である。まず、等流かつ静水圧分布を仮定する。砂粒子に働く抗力 F_D の向きは流線の向きに一致し、揚力 F_L は側岸斜面に垂直に働き、浮力 F_B は水面に垂直に働くことに留意し、さらに重力を F_g 、摩擦抵抗力を F_f およ

び粘着抵抗力を F_c とし、これらの力の x, y 成分を示すと次のように書ける。

x 成分;

$$\left. \begin{aligned} F_{Dx} &= 1/2 \cdot C_D u_a^2 k_2 d^2 \\ F_{Lx} &= 0 \\ F_{Bx} &= 0 \\ F_{gx} &= \rho_s g k_3 d^3 \sin \beta \\ F_{fx} &= -F_f \cos \gamma \\ F_{cx} &= -k_1' d^2 f_c \cos \gamma \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

y 成分;

$$\left. \begin{aligned} F_{Dy} &= 0 \\ F_{Ly} &= 0 \\ F_{By} &= -\rho g k_3 d^3 \cos \beta \sin \theta_1 \\ F_{gy} &= \rho_s g k_3 d^3 \cos \beta \sin \theta_1 \\ F_{fy} &= -F_f \sin \gamma \\ F_{cy} &= -k_2' d^2 f_c \sin \gamma \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

F_f および F_L は次のようである。

$$F_f = \{(\rho_s - \rho) g k_3 d^3 \cos \beta \cos \theta_1 - F_L\} \mu \dots \dots \dots (3)$$

$$F_L = 1/2 \cdot \rho C_D u_a^2 k_2 d^2 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 ρ_s : 砂の密度、 ϵ : 遮断係数、 u_a : 砂粒子に働く代表流速、 g : 重力加速度、 d : 砂粒子径、 k_2, k_3 : 砂粒子の形状係数で $k_2 = \pi/4, k_3 = \pi/6, f_c$: 粘土の粘着抵抗力、 $k_1' d^2$: 粘着抵抗面積¹⁾、 μ : 砂粒子の内部摩擦係数である。上式において、砂粒子の移動速度の効果が考慮されていないのは、以下の議論に必要なからである。さて、移動限界状態においては、それぞれ次式が成り立つ。

$$F_{Dx} + F_{Lx} + F_{Bx} + F_{gx} + F_{fx} + F_{cx} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

$$F_{Dy} + F_{Ly} + F_{By} + F_{gy} + F_{fy} + F_{cy} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

砂粒子の移動限界に対する粘着力の効果を推定するのが目的であるので、 $F_L = 0$ としても本質的な問題は変わらない。そこで、 $F = 0$ とし、さらに、 $\sin \beta = 0, \cos \beta = 1, u_a^2 = \psi u_{*c}^2$ とおいて、式(5)を変形すると次式を得る。

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd} = \frac{2k_3\mu}{\epsilon C_D k_1 \psi} \left\{ \cos \theta_1 + \frac{k_2' d^2 f_c}{(\rho_s - \rho) g k_3 d^3} \right\} \cos \gamma \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $s = \rho_s / \rho - 1$ である。ところで、 $2k_3\mu / \epsilon C_D k_1 \psi$ は平坦床上の shields パラメータ τ_{*c} に対応する。

$\cos \gamma$ を式(6)より求め、これを式(7)に代入すると、側岸斜面における砂粒子の無次元限界掃流力 τ_{*sc} が次のように求まる。

$$\tau_{*sc} = (\tau_{*c} \cos \theta_1 + \Delta \tau_{*c}) \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta_1}{\mu} \right)^2 \left(\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \Delta \tau_{*c} / \tau_{*c}} \right)^2} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $d\tau_{*c}$ は、粘着力による無次元限界掃流力の増分であって、次式のように定義されている^{1),3)}。

$$d\tau_{*c} = \frac{k'_2 d^2 f_c}{(\rho_s - \rho) g k_3 d^3} \frac{\tau_{*c}}{\mu} \dots\dots\dots (9)$$

式(8)は、 $d\tau_{*c} = 0$ あるいは $f_c = 0$ となる非粘着性材料の場合には Lane & Corlson の式に一致する。

2.2 側岸侵食量式の誘導

非粘着性材料を対象とした側岸侵食量式には次元解析的考察に基づく経験式^{2),4),5)} や理論的に導かれたものがある。後者には、流路の横断形状の効果を考慮し、斜面上における砂粒子の移動速度とその軌跡ならびに移動層厚などに関する土砂水理的知見に基づく長谷川⁶⁾ の研究、さらに、拡幅過程を河岸の崩落とその土砂の流送サイクルよりなるとしてこれを扱った藤田⁷⁾ の研究がある。経験式にはあいまいな係数が含まれており一般性に欠けている。一方、長谷川のものは、流砂の非平衡性を考慮した上で、かなり、精度の高い議論がなされているが、水面上方の河岸部の取り扱いに問題が残されている。藤田のものは、河岸崩壊土砂の堆積分布を考慮して、河岸傾斜角が約 15° になる領域の水量と流砂の挙動を考察することによって導かれたものであるが、直接的に推定しにくいパラメータを含んでいる。これらの侵食量式は、いずれも側岸と河床を構成する材料特性が同じであることを念頭において導かれたものであって、非粘着性材料であっても、側岸と河床の粒度分布に大きな違いがある場合には、これらの適用に際しては注意を要する。

ここでは、以上のような反省のもとに、側岸が粘着性材料からなっている場合も含めてこれまでとは少し異なった観点より側岸侵食の問題を検討する。藤田⁷⁾ の指摘や後述の Fig. 5 にも示されるように、側岸近傍の横断形状は、特別な場合を除き相似性を保持することが知られている。このことは、側岸上における砂粒子の移動方向あるいは潤辺方向の流砂量の増加率が一定であることに対応するものと考えられる。

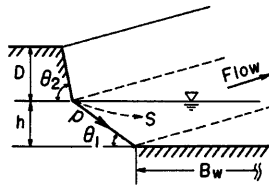


Fig. 2 Simplified model of cross section.

水際以深の横断形を Fig. 2 のようにモデル化し、潤辺に沿って p 軸、砂粒子の運動軌跡を s 軸とすれば、これらの軸上における流砂の連続式は、それぞれ次のように書ける。

$$dq_p/dp = E_1(p) + E_2(p) - D(p) \dots\dots\dots (10)$$

$$dq_s/ds = E_1(s) + E_2(s) - D(s) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 q_p, q_s : p 軸、 s 軸上における粘土分を除外した単位幅流砂量であって、 $\int q_p dp = \int q_s \sin \gamma ds$ なる関係がある。 E_1, E_2 : それぞれ剝離経験のない砂粒子および剝離経験のある砂粒子の単位時間・単位面積当たりの侵食量であって、側岸に粘土分が含まれている場合、 E_1 には粘土による粘着力の影響が考慮される。 D : 単位時間・単位面積当たりの堆積量である。なお、横断形状については、流路変動解析を念頭に置いているため、なるべく事実と反しないもので、しかも単純な形状へのモデル化が意図されている。

ところで、上述したように、側岸領域が相似形を保持するためには、式(10)あるいは(11)において、 $dq_p/dp = \text{const}$ 、あるいは、 $dq_s/ds = \text{const}$ となる必要がある。このことにより、

$$E_1 + E_2 - D = \text{const} \dots\dots\dots (12)$$

となる。水路実験や実際の河道において、断面を Fig. 2 のようにモデル化した場合、側岸から輸送された土砂の堆積・侵食が活発であるような領域は河床領域に含めて考えることができる。換言すれば、側岸部の堆積率 D は無視できるほど小さいと考えることに対応する。したがって、一旦剝離した砂粒子の側岸部への堆積量が無視できるとすれば、剝離経験のある砂粒子の側岸部における侵食量 E_2 は 0 となる。これらのごとより、式(10)は次のように近似できる。

$$\frac{dq_p}{dp} = E_1(p) \dots\dots\dots (13)$$

式(11)から得る結果も同様であるので、以下上式に基づいて展開する。また、式(13)が成り立つ範囲については後述する。

いま、中川・述本⁸⁾の pick up rate を $E_1(p)$ に適用できるものとする、次式を得る。

$$E_1(p) = \frac{k_3}{k_2} d p_{s1} = \frac{k_3}{k_2} F_0 \sqrt{(\sigma-1)gd} \tau_{*s} \left(1 - \frac{\tau_{*sc}}{\tau_{*s}}\right)^3 \dots\dots\dots (14)$$

ここで、側岸が非粘着性材料からなっている場合には、 τ_{*sc} に関する式(8)において、 $d\tau_{*sc}=0$ とすればよい。水際より上部の河岸は、側岸の侵食に伴って層状に崩落し、これが河床領域まで輸送されるものとする、単位河道長さ当たりの側岸侵食量 q_p は、左右両岸を考慮して次式のように書ける。

$$q_p = 2 \int_0^{p_B} E_1(p) dp + 2 \int_0^{p_0} E_1(p) \cos(\theta_2 - \theta_1) dp \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 $p_B, -p_0$ は、それぞれ側岸と河床の交点および河岸頂部の座標である。現時点においては、掃流力の分布を考慮する利点はさほどない。そこで、 τ_{*s} には側岸全域の平均値を用いることにし、河床の無次元掃流力 τ_{*c} を用いて $\tau_{*s} = \varepsilon^2 \tau_{*c}$ と置く。(9)式を積分した後若干の変形を行うと次式を得る。

$$q_{p*} = q_p / u_* \cdot d = F_{0*} \tau_{*c}^{1/2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\tau_{*sc}}{\tau_{*c}}\right)^3 \left[\left(\frac{h}{d}\right) \left\{ \frac{1}{\sin \theta_1} + \frac{D}{h} \frac{\cos(\theta_2 - \theta_1)}{\sin \theta_2} \right\} \right] \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 $F_{0*} = 2(k_3/k_2)\varepsilon^2 F_0$ 、 h : 水深、 D : 水際より河岸頂部までの高さである。また(16)式の両辺を [] で除すと次のように変形される。

$$q'_{p*} = F_{0*} \tau_{*c}^{1/2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\tau_{*sc}}{\tau_{*c}}\right)^3 \dots\dots\dots (17)$$

なお、 τ_{*s} を側岸潤辺における平均値とすると、 $\varepsilon^2 \div 0.5$ 程度に推定される。 F_0 は実験定数で、 $F_0 = 0.03 \sim 0.035$ 、 $k_2 = \pi/4$ 、 $k_3 = \pi/6$ である。したがって、 $F_{0*} = 0.03$ とすれば、 $F_{0*} = 0.02$ を得る。

式(17)は左右岸の掃流力が等しい場合、すなわち一様幅の場合の側岸侵食量式である。一般には、こういった流路は希であって、流路変動解析や溪岸侵食の問題を扱う場合には左右岸別々に侵食量式を与える必要がある。この場合、流路中央部の無次元掃流力を τ_{*c} とし、左右岸の掃流力をそれぞれ $\tau_{*s1} = \varepsilon_1^2 \tau_{*c}$ 、 $\tau_{*s2} = \varepsilon_2^2 \tau_{*c}$ として推定できるものとするれば、式(16)より左右岸における単位長さ当たりの侵食量式が求められる。これらのうち、左岸に関する無次元侵食量 q_{p*1} を示すとつぎのようである。

$$q_{p*1} = \frac{q_p}{u_* d} = F_{0*1} \tau_{*c}^{1/2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_1^2} \frac{\tau_{*sc}}{\tau_{*c}}\right)^3 \left[\left(\frac{h}{d}\right) \left\{ \frac{1}{\sin \theta_1} + \frac{D}{h} \frac{\cos(\theta_2 - \theta_1)}{\sin \theta_2} \right\} \right]_1 \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 u_{*1} : 流路中央部の摩擦速度、 $F_{0*1} = (k_3/k_2)\varepsilon_1^2 F_0$ である。側岸侵食量式が上述のように導かれたが、これは式(13)すなわち、側岸領域では堆積が殆んど起こらない、換言すれば、一旦剥離した砂粒子は堆積することなく河床領域まで輸送されるという条件のもとでの議論であった。

側岸の潤辺が長くなれば、一旦剥離した砂粒子は河床まで到達するまでに堆積するであろうから、式(13)の仮定が成り立たなくなる。この目安を得るため、つぎのような考察を行っておく。いま、 s 軸上の平衡流砂量を q_{se} とし、かりに $q_s/q_{se} \leq 0.5$ ならば、堆積の影響は無視できるものと考えられる。目安を得ることが目的であるから、 s 軸上の流砂量分布の推定は、次式で示される平坦河床上の流砂量分布式¹⁾を適用すれば十分であろう。

$$q_s(x)/q_{se} = 1 - \exp \left[- \frac{1}{\lambda_s} \left(\frac{\tau_{*c}/\tau_{*sc} - \tau_{*sc}/\tau_{*c}}{\tau_{*c}/\tau_{*sc} - 1} \right)^3 \frac{x}{d} \right] \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 q_{se} : 河床における平衡流砂量、 τ_{*c} 、 τ_{*sc} : それぞれ剥離経験のある粒子およびない粒子の限界掃流力である。そこで、上式の τ_{*s} 、 τ_{*c} 、 τ_{*sc} を側岸領域の諸量に置き替えて、同式を適用し、 $q_s/q_{se} \leq 0.5$ の条件を求めると、これは次のように示される。

$$1 - \exp \left[- \frac{1}{\lambda_s} \left(\frac{\tau_{*s}/\tau_{*sc} - \tau_{*sc}/\tau_{*s}}{\tau_{*s}/\tau_{*sc} - 1} \right)^3 \frac{S_B}{d} \right] \leq 1/2 \dots\dots\dots (20)$$

ここに、 λ_s : 砂粒子跳躍距離に関するパラメータ、 τ_{*s} : 側岸の無次元掃流力、 τ_{*sc} 、 τ_{*s} : それぞれ、剥離経験のある粒子とないものの側岸における無次元限界掃流力、 S_B : 水際より河床までの砂粒子運動の軌跡長で

ある。一方、砂粒子の運動方向と流線との偏角を γ とすると、 S_B と水深 h との間には、次の関係が成り立つ。

$$S_B = (\sin \theta_1 \sin \gamma)^{-1} h \dots\dots\dots (21)$$

式 (20), (21) より、 $q_s/q_{sc} \leq 0.5$ となる、水深の条件が次のように示される。

$$h/d \leq |\ln 1/2| \lambda_s \sin \gamma \left(\frac{\tau_{*s}/\tau_{*sco} - 1}{\tau_{*s}/\tau_{*sco} - \tau_{*sc}/\tau_{*sco}} \right) \dots\dots\dots (22)$$

Fig. 3 は偏角 γ に関し長谷川⁶⁾の成果を適用して求めた結果を示したものである。なお、計算において、 $\lambda_s = 100$, $\mu_s = 0.765$, $\mu_k = \mu_s/2$ (μ_k : 動摩擦係数) としている。また、 τ_{*sco} は、式 (18) において、 $d\tau_{*c} = 0$ としたものである。図において、 $\tau_{*sc}/\tau_{*sco} = 1$ の曲線は、側岸が非粘着性材料のみで構成されている場合のもので、 $\theta_1 = 30^\circ$ の場合には、たとえ非粘着性材料であっても、かなり広い水深の範囲で上述の条件が満たされているのがわかる。このことより、式 (13) 以下の議論は、かなり一般的であることが期待される。

3. 側岸侵食量式の実験的検討

水路実験について簡単に述べた後、流路の横断形状、および式 (13) の仮定に関するいくつかの情報を提示するとともに、側岸侵食量式の適用性について若干の検討を行う。

実験は、全長 8 m, 幅 40 cm, 深さ 20 cm のアクリル製可変勾配の循環式水路を用いて行われた。実験には、非粘着性材料および粘着性材料が用いられたが、前者では、中央粒径 0.048~0.049 cm のほぼ一様な砂が、後者ではその砂と粘土 (バークレイ) の混合物が用いられている。実験条件は、Table 1 のとおりで、 Q : 通水流量, I_{s0} : 初期河床勾配, L : 流路長, θ_0 : 側岸の初期傾斜角, B_w : 初期低水路幅, T : 水温, p_f : 混合物材料中の粘土含有率, w : 粘土の含水比である。

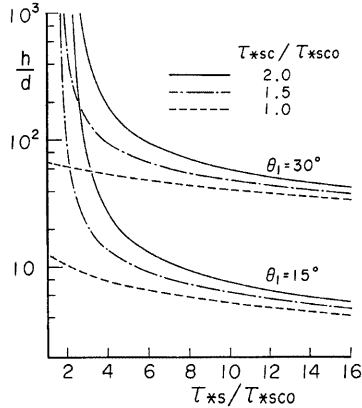
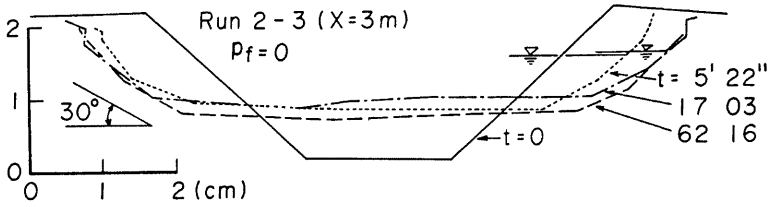


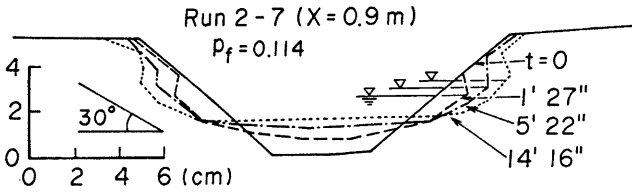
Fig. 3 Critical curves obtained with eq. (22) for dominated region of eroding process.

Table 1 Conditions for flume experiments.

Run No.	Q (l/s)	I_{s0}	L (m)	θ_0 (°)	B_w (cm)	T (°C)	P_f	w (%)
2-1	0.0376	0.01	4	45	2	19.2	0	—
2-2	0.0780	0.01	4	45	2	23.1	0	—
2-3	0.122	0.01	4	45	2	22.1	0	—
2-4	1.00	0.01	4	45	4	23.0	0	—
2-5	2.00	0.01	3.2	45	4	23.0	0	—
2-6	1.00	0.02	3.4	45	4	18.0	0	—
2-7	1.00	0.01	3.3	45	4	23.0	0.114	63.0
2-8	2.00	0.01	3.9	45	4	22.5	0.110	38.0
2-9	2.00	0.02	4.2	45	4	20.0	0.117	41.8
2-10	1.00	0.02	4.1	45	4	18.0	0.113	39.6
2-11	2.00	0.02	3.9	45	4	21.5	0.215	42.0

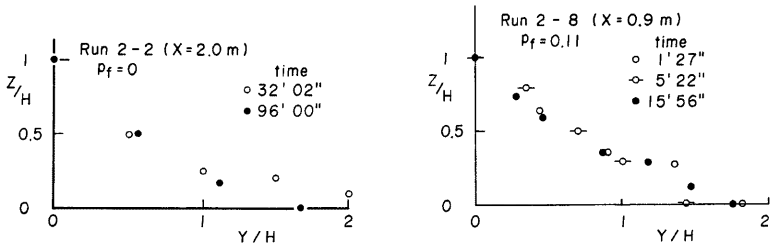


(a) An example for non-cohesive material ($p_f=0$).



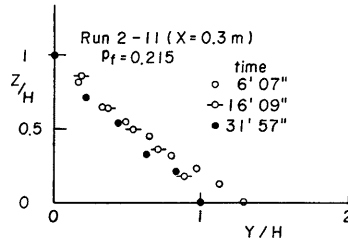
(b) An example for cohesive materials ($p_f=0.114$).

Fig. 4 Changes of cross-sectional shapes obtained by flume experiments.



(a) Experiments for non-cohesive material ($p_f=0$)

(b) Experiments for cohesive materials ($p_f=0.11$)



(c) Experiments for cohesive materials ($p_f=0.215$)

Fig. 5 Tests for similarity in shapes of side regions.

Fig. 4 (a), (b) はそれぞれ、非粘性材料 ($p_f=0$) を用いた場合と粘性材料 ($p_f=0.114$) の場合の流路横断面の時間変化を示したものである。図中の x の値は、水路下流端から測った断面の位置である。どんな水理条件下においても流路が Fig. 2 のような台形で近似されるかどうかは今後の検討を有する問題でもあるが、同図における結果は、実験材料に関係なくこのようなモデル化が可能であることを示唆するものである。

Fig. 5 (a), (b), (c) は、それぞれ $p_f=0, 0.11, 0.215$ に関する実験の側岸領域に着目して形状の相似性をみたもので、図中のデータは、水際を $y=0$ とし、流路中央部の河床を $z=0$ とし、水深 h で無次元化されている。これらの図より、側岸近傍の形状は時間的にもほぼ相似形が保持されていることがわかる。また、(a), (b), (c) 図を同じ図面上に写してみても、材料の違いにかかわらずほぼ相似形であることがわかる。しかも、側岸近傍の形状を直線で近似しても、それによる大きな形状誤差は生じないことがわかる。このことは、水際の横断面形状のモデル化に関し、Fig. 2 に示すような台形近似が可能であることを意味するものである。

Fig. 6 は、流路の水際以深の断面形を Fig. 2 のような台形で近似した場合、 θ_1 がどの程度の値になるかをみたもので、データは粘土の含有率ごとに分類され、傾斜角 θ_1 と無次元掃流力 τ_{*} の平面上に示されている。同図より、 τ_{*} の小さい範囲では、非粘性材料の傾斜角が若干小さいようにも見えるが、一般的な傾向は見出しにくく、ほとんどのデータは $\theta_1=15\sim35^\circ$ の範囲にあるようである。

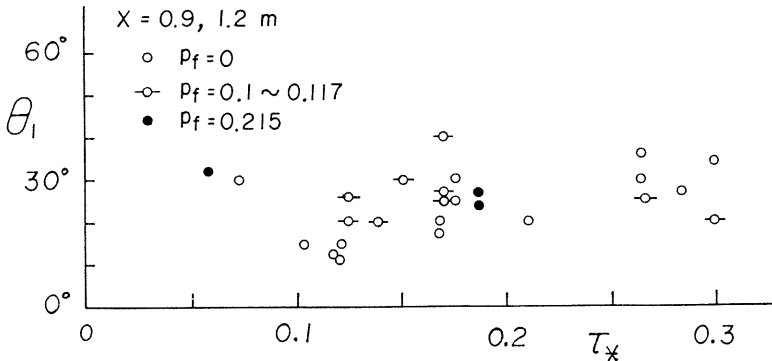


Fig. 6 Inclination angles θ_1 of side slope versus nodimensional shear stress τ_{*} .

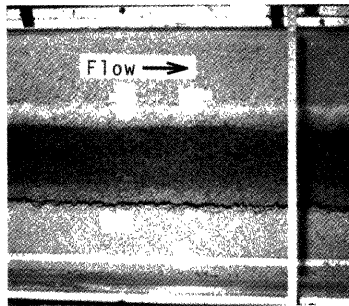


Photo. 1 Surface feature photographed at $t=14'16''$. The portion looked white is covered by non-detached sand particles and on the other hand, dark portion is covered by detached particles.

Photo. 1 は, Fig. 4 (b) に示す実験における $t=14'16''$ のときの流路表面を示したものである。白くみえる部分は剥離経験のない粒子に覆われており, 黒い部分は流送過程にある粒子に覆われていることを示すものであって, 側岸近傍には流送過程にある砂粒子は殆んど見当たらない。このことより, 式 (13) すなわち, 側岸侵食現象は砂粒子の侵食過程が卓越した現象であるという仮定の妥当性が伺える。

以上, 側岸侵食量式を導く際に用いられたいくつかの仮定や侵食量式に含まれる未知量について若干の考察を行ったところ, 導入された仮定の不適切さや未知量の困難さは見当たらない。したがって, 側岸侵食量式はかなり一般性をもっていることが期待される。そこで, 式 (17) と実験値とを比較検討してみよう。Fig. 7 は, その結果を示したものである。図中の三本の理論曲線は, $\Delta\tau_{*c}=0, 0.025, 0.05$ に関するもので, $F_{*0}=0.02, \varepsilon^2=0.5$ として求められている。また, τ_{*sc} に関する式 (8) において, $\theta_1=30^\circ, \mu=0.765$ とされている。さらに, データのプロットに必要な θ_2 には, $\theta_2=90^\circ$ を採用している。なお, θ_1, θ_2 に関しては, 非現実的な値を採用しない限り, それによって結果が大きく左右されることはない。ここで, 図に目を移し, 侵食量式とデータとを比較すると, データは推定曲線の上下数倍の範囲に点在しているのがわかる。これは, この種の実験につきまとう精度, とくに掃流力の推定精度や側岸侵食量に関する評価時間などに起因するものと思われる。こうした点を考慮すれば, 両者の傾向はかなりよく一致しているとの見方もでき, 粘着性, 非粘着性材料にかかわらず, 側岸侵食量は式 (16) あるいは (17) でほぼ推定できるものと思われる。

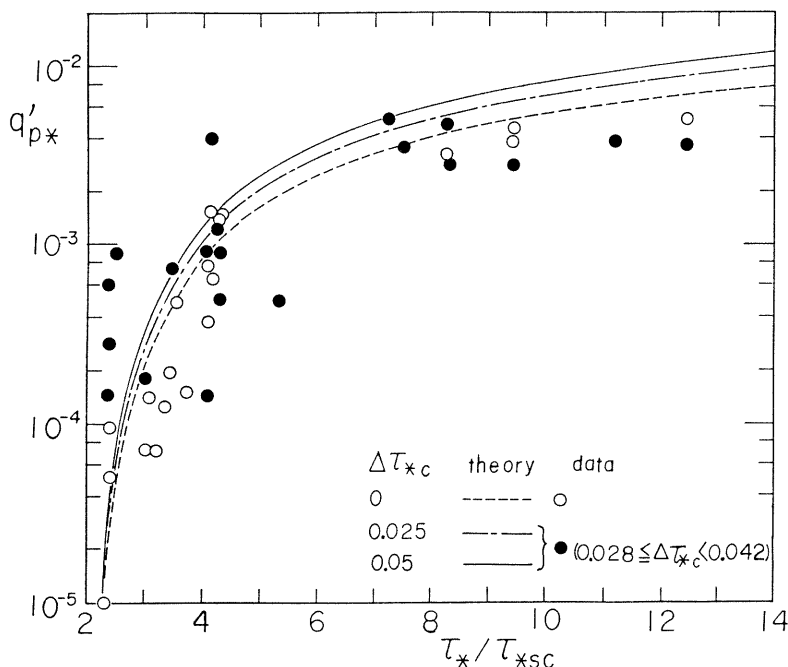


Fig. 7 Comparison between experiments and predicted curves for side erosion rate (bank erosion rate).

4. 結 語

山地河道の側岸部には、母岩が露出している部分もあって侵食を受けない領域もあるが、受食性材料からなっている部分には少なからず粘土分が含まれている。そのため、受食性領域の側岸の侵食特性は非粘性材料のそれとはかなり異なったものになっている。山地河道の流路変動現象を扱う場合には、このようなことに留意する必要があるが、ここでは、とくに粘性材料からなる流路の側岸侵食現象に着目して理論、実験の両面よりその機構を検討した。

まず、粘着力を受ける側岸斜面上の砂粒子の移動限界について理論的考察を行った。すなわち、粘土の粘着応力と粘着抵抗面積の概念を用いて砂粒子の粘着抵抗力を評価し、さらに、これを非粘性材料に関するこの方面の理論的手法に対して適用することによって移動限界の推定式が導かれた。

ついで、同様の材料からなる流路の側岸侵食機構について検討した。側岸領域の横断形状の相似性に着目すれば、相似性が保持されるような条件では側岸部の侵食速度はほぼ一定で、しかも、側岸部で一旦離脱した砂粒子の側岸部への堆積は無視できるものとして側岸侵食量式が導かれた。もちろん、この侵食量式は、非粘性材料に関しても適用されるものである。

側岸侵食量式には、横断形状の相似性などの仮定や予め推定する必要のあるパラメータが含まれているが、これらについて実験的検討を加え、形状に関する相似性の妥当性を確認するとともに、側岸の傾斜角は $\theta_1 = 30^\circ$ 程度に見積もればよいことを示した。ついで、側岸侵食量式と粘性および非粘性材料に関する実験値との比較を行い、侵食量式はほぼ妥当なものであることが確認された。

以上、本研究によって興味ある知見が得られたが、実験データによる側岸侵食量式の検討が十分でない。さらに、砂粒子の移動限界の推定式に含まれる dr_* の評価法について検討を深める必要がある。今後、こういう問題とともに、山地河道の流路変動の問題について考察を深めたい。

本研究は、一部、文部省科研費一般 B (代表者 芦田和男) の補助を受けた。実験や図表作成等で京大防災研究所吉田義則技官に御協力いただいた。以上、ここに記して感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 加本 実: 山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1), 京都大学防災研究所年報, 25号 B-2, 1982, pp. 349-360.
- 2) 平野宗夫: 拡幅を伴う流路変動について, 土木学会論文集, 210号, 1973, pp. 13-20.
- 3) 江頭進治・芦田和男・加本 実: 山地河道の侵食機構に関する研究, 水理講演会論文集, 1983年, 2月, pp. 727-732.
- 4) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二: 河道の変動に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, 第14号 B, 1971, pp. 275-297.
- 5) 村本嘉雄・田中修市・藤田裕一郎: 河道の変動に関する研究(3), 京都大学防災研究所年報, 第15号 B, 1972, pp. 385-404.
- 6) 長谷川和義: 非平衡を考慮した側岸侵食量式に関する研究, 土木学会論文集, 316号, 1981, pp. 37-50.
- 7) 藤田裕一郎: 直線流路の側岸侵食機構, 京都大学防災研究所年報, 20号 B-2, 1979, pp. 537-552.
- 8) 中川博次・辻本哲郎: 水流による砂礫の移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 244号, 1975, pp. 71-80.