

京都大学工学部 正 員 村上 正吾

京都大学工学部 正 員 中川 博次

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

1. まえがき

斜面における土砂移動機構の解明は河岸側岸部の侵食、河道の拡幅、流路変動を明らかにする上で重要であり、その力学的モデルに立脚した流砂量式も提案されているが、掃流力の場所的分布が非一様な場でのその非平衡流砂状況の特徴を、ここでは pick-up rate と step length より構成される stochastic model によって記述しようと試みるものである。一般に、側岸材料では粘着性が問題となるが、ここでは非粘着性球状粒子として取扱う。

2. 側岸土砂の pick-up rate¹⁾

平坦河床上でのそれは中川ら²⁾が砂粒の転動離脱に要する時間を流体力の変動を考慮し求め、その逆数として与えている。離脱に滑動形式を仮定すると、その運動方程式は、 $M \cdot \dot{v}_s = F$ で表わされる。ここに $M = \rho (\sigma / \rho + C_M) \cdot A_3 \cdot d^3$ (C_M : 付加質量係数)、 v_s : 初期加速度、 F は側岸上の砂粒 (図-1 参照) に作用する重力 $W (= (\sigma - \rho) g A_3 d^3)$ 、抗力 $D (= C_D \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 A_2 d^2)$ 、揚力 $L (= C_L \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 A_2 d^2)$ の合力であり、その大きさは式(1)で、またその抜け出しの方向角 β は式(2)で与えられる。ここに、 σ, ρ : 砂と水の密度、 C_D, C_L : 抗力・揚力係数、 A_2, A_3 : 砂の 1・2 次元形状係数、 d : 砂の粒径、 θ : 側岸の傾斜角、 λ : 水流の方向、 μ_f : 砂の摩擦係数である。いわゆる限界掃流力は $F = 0$ により与えられる。式(3)で定義される粒子の運動の特性時間 T_0 内に離脱に必要な流体力が平均的に作用した状態での pick-up rate p_s は式(1)を解いて得られる平均離脱速度 $\bar{v}_s$ (式(4))を用いると、 $p_s = \bar{v}_s / k_1 d$ となり無次元表示することにより式(5)、(6)が得られる。なお式中 $\sim$ は変動を考慮していない一定値の作用によることを意味している。式(5)、(6)中の実験定数は中川らの近似式(7)との比較より定められ、結局、流体力の変動を含まない pick-up rate の推定式は式(8)で与えられる。次に、流体力の変動による効果、すなわち見かけの限界掃流力の減少と関数形の変化を式(7)の式形 $p_{s*} = 0.03 \tau_* (1 - k_0 \tau_{*c} / \tau_*)^3$ (τ_{*c} : 限界掃流力、 k_0 : 見掛けの限界掃流力の減少を示す定数)を利用してとり入れることによって、側岸上の pick-up rate 式として式(9)が得られ、中川らと同様の定数を用いて計算された理論曲線と実験値との対応は図-2(a)、(b)に示される様に良好である。また図-3(a)、(b)には $\tau_* \sim \beta$ の理論曲線と実験値がプロットしてあり、実際のビデオの画像による角度の読み取りでは、初期位置とある時間後の位置との2点より定めたため、その間の水流の影響より、計算値より大きめの結果となっているが、後述の砂粒の運動方程式を利用した式(10)にもとづき較正した結果との対応は良好である。 $\Delta X, \Delta t$: 実測変位、時間間隔、 $A_* = 7.62$, $\mu = 1.0$ としている。

なお、実験装置、方法、解析については、文献 1) を参照されたい。

3. 側岸土砂の流送過程

側岸より離脱した砂粒は図-4に示される様に空間的にも不規則に変動するが、平均的な挙動は砂粒の運動方程式(11)、(12)に支配されると考えられる。すなわち、ある点 $P(x_0, y_0)$ を出発した砂粒の $Q(x_A, y_A)$ への流砂量の寄与は step length を介して行われ、step length ξ が床面との関係により決められることにより運動軌跡長 S が step length の分布に従うと考えると、step length が運動方程式(11)、(12)を解くことによって得られる $s(P, Q)$ より大きいという確率で、 P より離脱砂粒の Q への寄与分が与えられることより、 $Q(x_A, y_A)$ における x 方向、 y 方向の流砂量 q_{Bx}, q_{By} はそれぞれ式(13)、(14)で与えられる。ここに、 $\gamma = \tan^{-1} [(v_x/v_y)_{x=x_A, y=y_A}]$ 、 $F_s(s) : \text{Prob.}(s > \xi)$ である。式中、step length の分布がわかれば p_s は初期位置での底面せん断応力、 s および γ は運動方程式より求められ各点での流砂量は計算されるが、実際には、運動方程式が非線形であること、 Q に入ってくる砂粒の初期位置を定めることが難しいため

に、初期位置を与え、数値解析によって式(11),(12)を解き運動軌跡を求め、step lengthに従って、Pよりの離脱砂粒を配分していくというLagrange的なモデルによる数値模擬が適切と考えられる。

4. あとがき

側岸上の非平衡流砂状況の記述のために、stochastic modelとしてのフレーム・ワークの組み立てを試みたが、側岸上での砂粒の流送過程と側岸の侵食過程についての数値模擬、実験的な検討を加え、さらに現象にあったモデルに改良していくとともに、粘着性、浸透流の効果等もとりにいれて適用の範囲を広げていきたいと考えている。

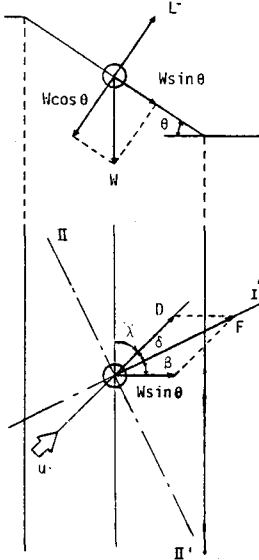


図-1

$$\begin{aligned}
 F &= D \cos \theta + W \sin \theta \cos \beta - (W \cos \theta - L) \mu f \\
 \tan \beta &= D \cos \lambda / (W \sin \theta + D \sin \lambda) \\
 T_g &= F_t d / \sqrt{(\sigma - \rho) g d} \\
 \bar{V}_s &= \bar{F}_t \cdot \bar{B}_* \cdot f(\bar{\tau}_* / \theta) \cdot \sqrt{(\sigma - \rho) g d} \\
 \bar{B}_* &= c_0 / (\sigma / \rho + C_M) \cdot (A_w / A_0)^2 \cdot \{k_L \mu f + \sin(\lambda + \beta)\} \\
 \bar{\rho}_{s_*} &= (\bar{F}_t / k) \cdot \bar{B}_* \cdot f(\bar{\tau}_* / \theta) \\
 f(\bar{\tau}_* / \theta) &= \bar{\tau}_* - \tau_* c d(\bar{\tau}_*) \\
 \tau_* c g &= (1 / \varepsilon_0) \cdot (A_w / A_0)^2 \cdot \{W f \cos \theta - \sin \theta \cos \beta\} / (k_L \mu f + \sin(\lambda + \beta)) \\
 \rho_{s_*} &= 0.03 \tau_* (1 - \tau_* c / \tau_*)^3 \\
 \bar{\rho}_{s_*} &= 0.03 \bar{\tau}_* (1 - \tau_* c / \bar{\tau}_*)^3 \\
 \rho_{s_*} &= 0.03 \phi(\tau_*) \cdot \tau_* (1 - k_0 \tau_* c \theta(\bar{\tau}_*) / \tau_*)^3 \\
 \phi(\tau_*) &= (\mu_f \cos \theta - \sin \theta \cos \beta) / (1 + k_L \mu_f) \\
 \sin \beta &= \tau_* / (\mu \cos \theta) \{ (C_0 A_2 / 2 A_3) A_*^2 - (d / u_*^2) \Delta x / \Delta t^2 (\sigma / \rho + C_M) \} \\
 M(dv_x / dt) &= D \cos \psi - \mu W \cos \phi \\
 M(dv_y / dt) &= -D \sin \psi - W(\mu \sin \phi - \sin \theta) \\
 \tan \psi &= v_y / (u_d - v_x) \\
 \tan \phi &= v_y / v_x \\
 Q_{Bx}(x_A, y_A) &= (A_3 d / A_2) \int p_s(x_0, y_0) F_s(s(P, Q)) \cos \psi dy_0 \\
 Q_{By}(x_A, y_A) &= (A_3 d / A_2) \int p_s(x_0, y_0) F_s(s(P, Q)) \sin \psi dy_0
 \end{aligned}$$

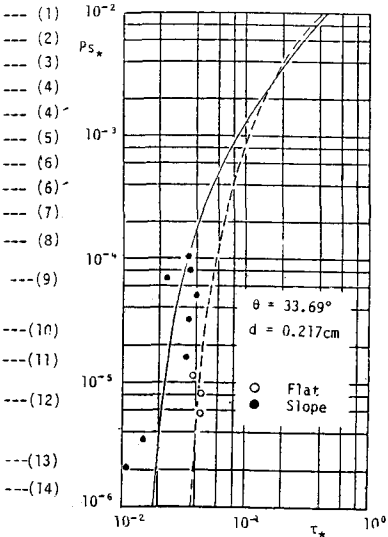


図-2 (a)

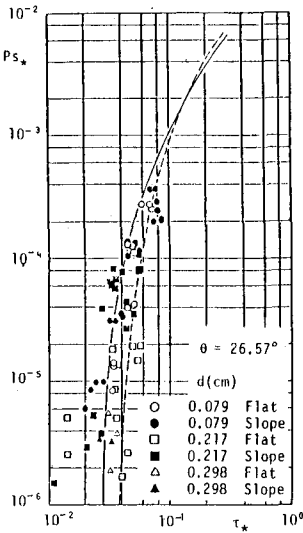


図-2 (b)

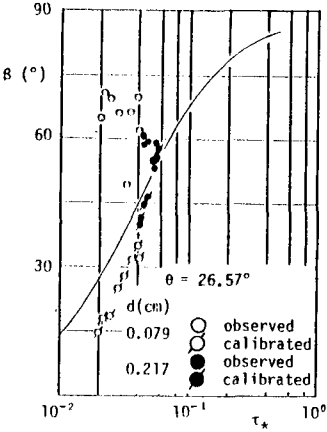


図-3 (a)

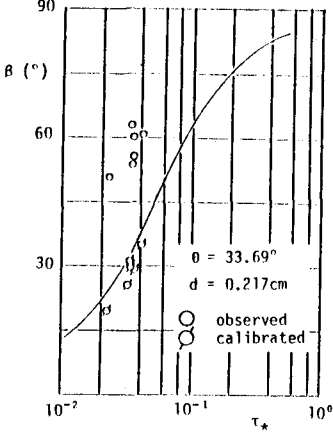
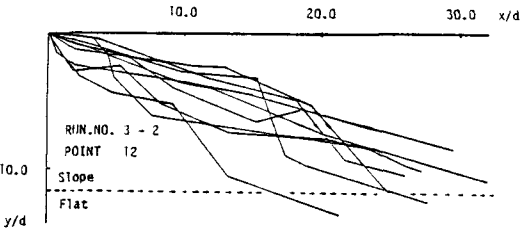


図-3 (b)

図-4



1) 中川・辻本他：59年度関西支部年講

2) 中川・辻本：土木学会論文報告集 244 号, 1973, pp71-80