

急勾配で相対水流が小さい場での流砂量

立命館大学理工学部 大同淳之

1. はしがき 急勾配河道では 粒径 d の 2, 3 倍程度の水深 h で流砂が注している。このように相対水深 (h/d) が小さい領域での流砂量は、相対水深の大きい場でのそれとは、流れの流速分布、抵抗則が異なるために、相対水深の大きい場で得られたものとは違う。本文は相似則より流砂量は原型と模型との比を r とするとき、 $(h/d)_r = 1$ が必要であるととし、 h/d が 1.0 以下では、 h/d が 1.0 以上の場の流砂量より小さくなることおよびその計算法を示した。次に流れの強さが河床の代表径の限界掃流力程度で、河床が安定なときに、その上に乗る代表径以上の大きさの石が移動する範囲について述べる。

2. 砂の移動の相似律を支配するパラメータ

砂が河床を移動するとき、砂の運動式より相似律として

$$(C_D - u_s C_L)_r = 1, \left(\frac{gd \tan \theta}{u_*^2} \right)_r = 1, S_r = 1 \quad (1)$$

を満たす必要がある。第1項は抗力係数、第2項は相対水深 h/d と勾配、第3項は砂の比重の相似を規定するものである。流れの運動方程式および連続式から、 α を運動エネルギーの補正係数として

$$\tau_{or} / \rho_r = R_r \cdot h_r \cdot X_r^{-1} \quad (2) \quad \alpha_r = 1 \quad (3)$$

(2) 式は抵抗則、(3) 式は流速分布の相似である。この2つの規定として $(h/d)_r = 1$ を満たしている必要がある。実験水路の中で得た結果を、原型に適用するとき、上述の相似の条件を満たしている範囲のものではないといけないと考える。

3 相対水深が小さい領域の流砂量

3.1 相対水深が小さい場での流砂量の測定

相対水深の小さい領域での流砂量の測定例が少ないので、水路で実験を行った。実験の範囲は表1のとおりである。実験は幅 0.35 m、長さ 1.3 m の水路を用いて流砂量、飛出し確率 step length および砂の平均移動速度を測定した。測定された流砂量を図1に示す。従来流砂量は $(\tau_* - \tau_{*c})$ のべき乗に比例するとされている。例えば $h/d > 10$ では、実験値は土屋、河田式¹⁾ に3を掛けた

$$\frac{q_B}{u_* d} = 3 \frac{e \tan \beta}{1-e} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\sigma} \right) \frac{u}{u_*} \times \left[(1+e) - \sqrt{(1-e)^2 + \frac{2(1-e)}{\frac{3}{4} \lambda C_D \left(\frac{u}{u_*} \right)^2}} \right] (\tau_* - \tau_{*c})$$

と一致する。ここに、 e は砂の反発係数、 β は砂の飛び出し角度、 $\lambda = 4H_m / L_m$ 、 H_m 、 L_m はそれぞれ砂の平均跳躍高さ、

表1 流砂量の測定範囲

d (cm)	l	h/d	τ_*
1.67	0.032~0.038	2.96~3.84	0.064~0.110
1.35	0.050~0.045	2.15~2.67	0.065~0.078
0.85	0.050~0.022	2.02~6.59	0.052~0.123
0.60	0.041~0.032	3.50~5.42	0.083~0.129

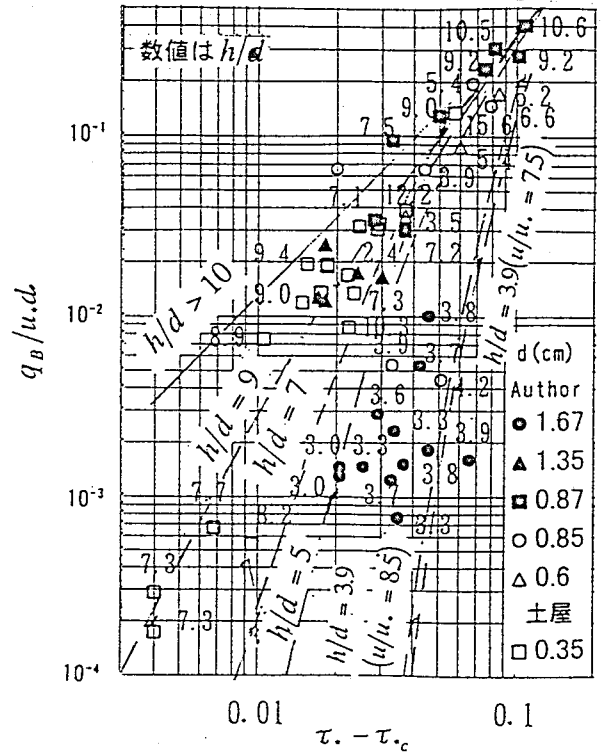


図1 h/d による流砂量の減少

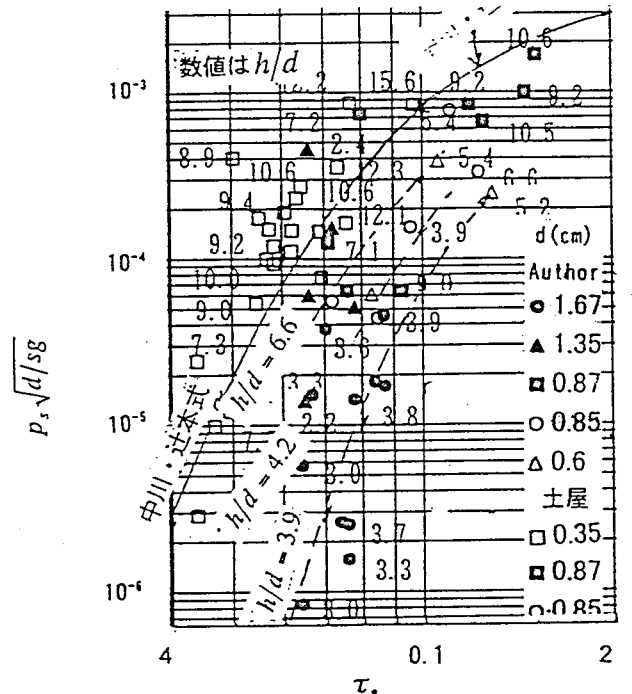


図2 pickup rateの h/d による減少

および平均跳躍距離である。しかし、図1は h/d が10以下では $(\tau_* - \tau_{*c})$ が同じでも h/d が小さくなるほど流量が小さくなり、従来の式では説明できないことを示している。

3.2 h/d が小さい領域での流砂量の予測

砂の移動が滑動、転動および跳躍によって生じているとき、その動きは砂の飛び出し確率 pick up rate と step length によって表現される。 h/d が10以下では同じ τ_* でも pick up rate が図2のように減少して、流砂量の減少の主因であることを示した。 h/d が10以下の流砂量を求めるためには次の方法を用いる。 h/d が10以上のときは、中川、辻本の式²⁾

$p_s \sqrt{d/sg} = 0.03\tau_* (1 - 0.035/\tau_*)$ が実験値と合っているで、 h/d が10以下では同じ τ_* に対して図2から得た比率図3をかける。このようにして決めたい線を図1の鎖線を示された。

4 一様粒径 d_s の砂床におかれた $d > d_s$ の粒径 d の掃流力 τ_0 が $\tau_0/\tau_{cs} \approx 1$ のときの流動域

4.1 $d > d_s$ の砂の移動可能条件

砂面上に $d > d_s$ の砂が乗る条件は別に扱うとして、流れの強さが d_s の砂が動かない範囲で、 d_s より大きい砂 d の動く条件を求める。図4に示す球状の直径 d の砂の移動限界は、図中のA点を支点として転動で動くとして図中に示す記号を用いて、

$$\left\{ (\alpha - \rho) K_v d^3 g \cos \theta - \frac{\rho}{2} C_L k_a d^2 \bar{u}^2 \right\} \left(\frac{d}{2} \sin \phi \right) + \frac{\rho}{2} C_o A d^2 \bar{u}^2 \left(\frac{d}{2} \cos \phi + a \right) = 0 \quad (5)$$

K_v, K_a は、石の体積係数および面積係数、 \bar{u} は石に作用する流速の平均値、 a は石の重心と流速の作用点との距離である。

5) 式で決まる限界流速 \bar{u} を $\bar{u}^2 = \beta \bar{u}_{*c}^2$ とし流れの規模が d_s の限界掃流力に等しいとき $d > d_s$ の右の移動可能領域は、

$$\frac{d}{d_s} < K_c \frac{\beta K_a}{K_v} \left\{ \frac{C_D}{2} \left(1 + \frac{a}{(d/2) \cos \phi} \right) + \frac{C_L}{2} \tan \phi \right\} \cos \theta \tan \phi \quad (6)$$

摩擦角 ϕ は d/d_s の関数である。砂面は流びによってみかけ上平坦にならされているとしても凹凸をもつ不均一な場である。固定した d_s の面の上に d の石をおき、砂面を傾けて石の動きはじめる角を摩擦角 ϕ として測定した結果を、図5に示す。

この値を6) 式に用いる。 K_c は凹凸が緩いときには岩垣式³⁾、凹凸が急なときは芦田らの式⁴⁾ $C_D = C_L = 0.4$, K_a/K_v は石が球状として $3/2$ として計算すると、砂面を形成する粒径 d_s より大きい粒径 d の移動可能な範囲は、図6に示すように摩擦

表2 $d > d_s$ の流量可能測定範囲

d_s	d	d/d_s	h/d	I_6
1.67cm	1.67 cm	1.0		0.038
"	2.64	1.58	2.1~3.0	"
"	2.92	1.74	2.1~3.0	"

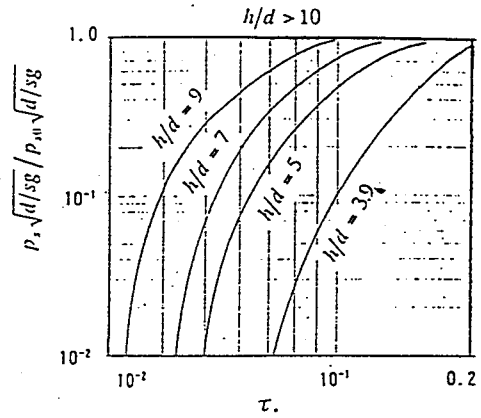


図3 $h/d < 10$ に対する pickup rate の減少率

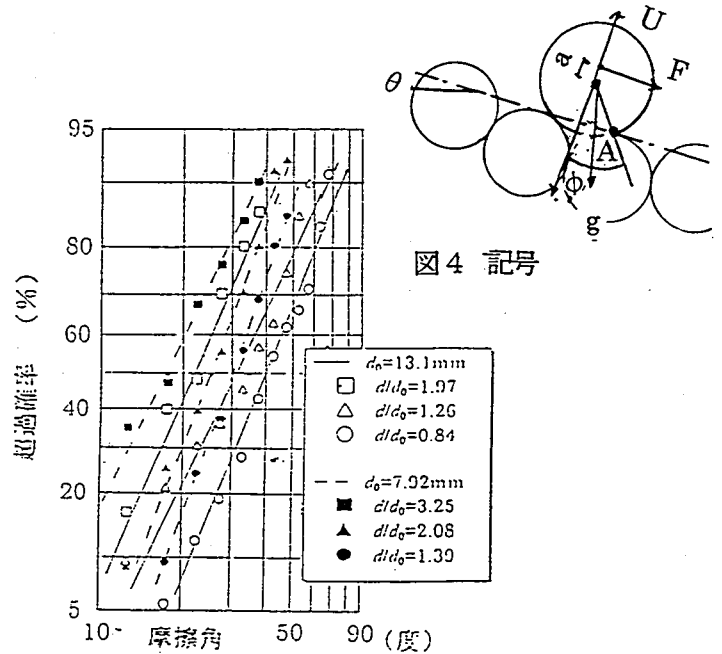


図5 河床の摩擦角の分布

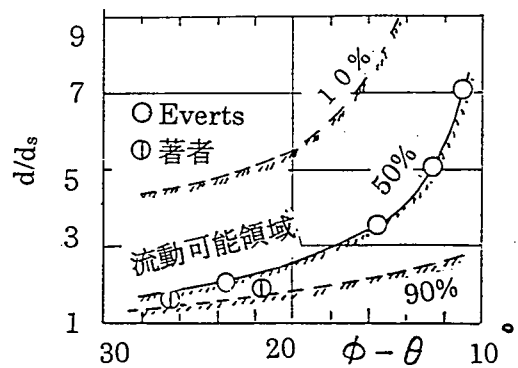


図6 $\tau_* = \tau_{*c}$ のときに d/d_s の砂の移動可能領域

角は50%相当値を用い6) 式に0.9を掛けた値と Everts⁵⁾の実験結果と一致する。著者の実験は活発に移動した粒径を示し、最大径ではない。もちろん摩擦角は図5のように分布をもつので、境界線は図6のように幅をもつ。

4.2 流砂量 紙面の都合で発表時に述べる。

1) 土屋 河田; 土木関西講演集 27, 1973

2) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T. Proc. ASCE, Vol. 106, HY. 12, 1980

3) 岩垣; 土木学会論文集 41, 1956

4) 芦田ら; 京大防災研年報 16, B, 昭48

5) Everts; C.H. ASCE, WW, 4, Nov, 73'