

礫床河川の限界掃流力と掃流砂量

日本道路公団 正員 ○細川 迭男
 榑松村組 勝見 直人
 金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎

1. まえがき 一般に礫床河川は小さい相対水深と急勾配によって特徴づけられ、そこでの流れや流砂特性は、良く知られた沖積河川のそれらとは異なっている可能性がある。たとえば急勾配の流れにおける無次元限界掃流力 τ_{*0} の値はもはや一定でなく路床勾配とともに増加している。路床勾配が増加すると重力の作用で砂礫は動きやすくなるにもかかわらず、こうした傾向を示すのは相対水深の小さい場合に流れの構造が変化しているものと思われ、本報では相対水深による流れの構造の変化に着目して無次元限界掃流力と路床勾配との関係を検討し、それをもとに、抵抗則、掃流砂量を斉合性のとれた形で評価することを試みた。

2. 急勾配水路の限界掃流力に関する考察 急勾配河床上の砂礫に作用する力のつりあいを考え、 $\theta \rightarrow 0$ のケースの τ_{*0} の値を τ_{*00} とすると、 $\tau_{*0}/\tau_{*00} = (Br_0/Br)^2 \cdot \psi_1(\theta) \dots (1)$ となり $\psi_1(\theta)$ は次式で与えられる。

$$\psi_1(\theta) = \left[\left\{ (\sigma/\rho) \cdot \cos\theta - 1 \right\} \cdot \mu_r - (\sigma/\rho) \sin\theta \right] / \left[(\sigma/\rho - 1) \cdot \mu_r \right] \dots (2)$$
 ここにおいて、 μ_r は静止摩擦係数、 $\tan\theta = I$ 、 Br は粗面対数則の定数項で、 $Br_0 = 8.5$ である。また、上式においては底面近傍流速は近似的に $Br \cdot u_*$ (u_* : 摩擦速度)で表されるものとした。

実験は、幅40cm、長さ12mの変可勾配矩形断面水路に、中央粒径 $d_{50} = 0.729, 0.95, 1.20, 1.95$ cmの礫を3層に敷き詰めて行った。勾配は $I = 0.001$ から 0.010 まで変え、相対水深 (h/d)を $1 \sim 15$ の範囲の等流に対し、直径3mmの小型プロベラ流速計を用いて流速分布等を測定した。図1に示す Br と h/d の関係(但し、 Ca_0 らのデータと共に示す)は相当なばらつきを呈しているが、その特徴が次式で代表されるものと考えた。

$$Br = Br_{min.} + (Br_0 - Br_{min.}) \cdot \left[1 - \exp \left\{ -(1/\alpha) (h/d) \right\} \right]^{1/\beta} \dots (3)$$
 ここにおいて、 Br_0 は相対水深の十分大きい ($h/d \geq 20$) 場合の Br 値 (=8.5), $Br_{min.}$ は $h/d \rightarrow 0$ の Br 値(ここでは実験結果より3と定める), α は $h/d = 20$ で $(Br - Br_{min.}) / (Br_0 - Br_{min.}) = 0.99$ となるよう β に関係づけた。 β は実験結果より決めるものであるが、 $\beta = 0.5 \sim 3.0$ 程度に変えることで、 $Br \sim h/d$ 関係を概ね代表的に定式化できる。この程度の β 値を用いた式(3)の定式化により抵抗則が $h/d < 20$ でKeuleganの関係より系統的にずれることも説明できる(図2参照)。ところで $\tau_{*0} = I \cdot (h/d) \cdot (\sigma/\rho - 1) \dots (4)$ の関係があり、式(1)~(3)より τ_{*0} と勾配 $I = \tan\theta$ との関係を求めた。計算結果は図3に示すように $\beta = 1.0, 2.0$ 程度に選ぶことでよく実験データを説明する。なお、相対水深の小さい流れでは、水深データの信頼性の小さいことから限界流量の無次元量 ($q_{*0} = q/\sqrt{g \cdot d^3}$; q : 単位幅流量)と勾配の関係が, Bettes, Buthurstらによって実験的に

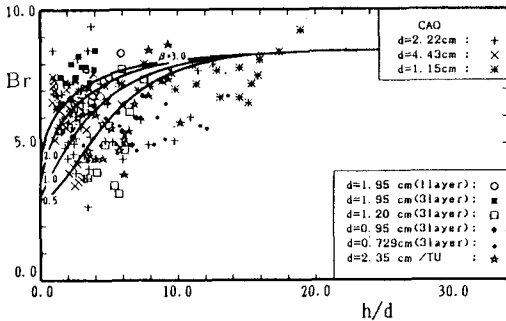


図1 Brとh/dの関係

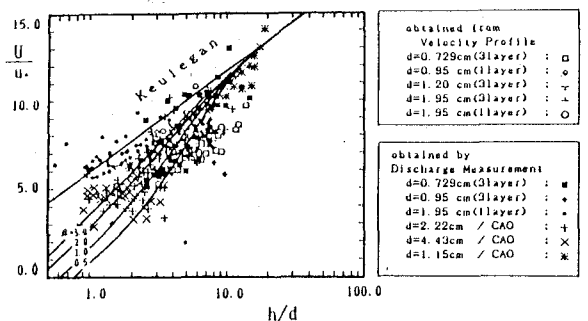


図2 U/u_* とh/dの関係

検討されているが、今回のモデルにもとづく結果は、これらの経験式を充分説明する(図4参照)。

3. 急勾配水路の掃流砂量に関する考察 これまでに提案されている多くの掃流砂量式は次式で表される。 $q_B = A \tau_*^{3/2} (1 - \tau_* / \tau_{*c})^m (1 - \sqrt{\tau_* / \tau_{*c}})^n \dots (5)$ ここに、 q_B は無次元流砂量(Einstein型)である。本研究では代表的な3種類の流砂量式(表1参照)について先の $\beta = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ の4種類の無次元限界掃流力 τ_{*c} と勾配Iの関係を使って考察を行う。なお重力の効果は駆動力である τ_* についても入ってくるため、急勾配水路では式(5)を次式のように修正することが合理的である。

$q_B = A \cdot \Xi(I) \dots (6)$ ここに、 $\Xi(I) = \{\tau_* / \psi_1(\theta)\}^{3/2} \cdot \{1 - \tau_{*c}(I) / \tau_*\}^m \cdot \{1 - \sqrt{\tau_{*c}(I) / \tau_*}\}^n \dots (7)$ ここでは系統的に実験がなされたGraf-Suszka(1987)とCao(1985)のデータを用いて検討した。まず、それぞれの β についての $\Xi(I)$ に対する q_B の検討を各流砂量式に対して行った結果、 $\beta=1$ の場合が3種類の流砂量式ともよく評価されていることが確認できた(図5参照)。また、それぞれの β による各流砂量式を用いて無次元掃流力 τ_* と無次元流砂量 q_B の関係を検討した結果、 $\beta=1$ の場合の τ_{*c} とIの関係を用いて修正された芦田・道上式が実験データをよく説明できるものと判断された(図6参照)。

表1 各流砂量式の係数比較

	A	m	n
スイス公式	8.00	1.5	0
Bagnold式	4.25	1.0	0
芦田・道上式	17.00	1.0	1.0

4. あとがき 本研究では相対水深の小さい時、対数則の定数項Brがh/dの関数になっていることに着目し、これを1パラメータ(β)経験式で近似し、これにもとづいて勾配に影響された限界掃流力、流砂量を検討した。Br~h/d関係は測定の難しさに関連して β の値に幅を持つが、諸量評価の精度の斉合性を考慮すると $\beta=1$ 程度と考えるとよいだろう。

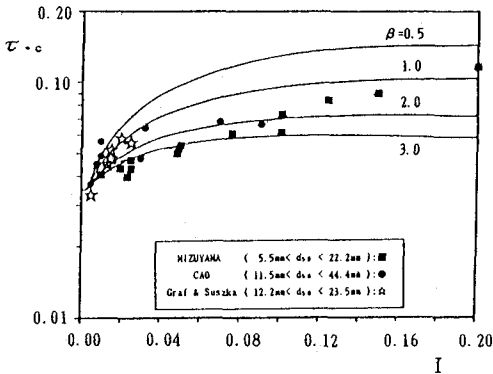


図3 τ_* とIの関係

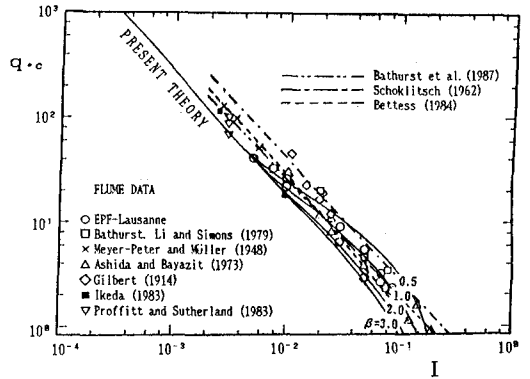


図4 q_B とIの関係

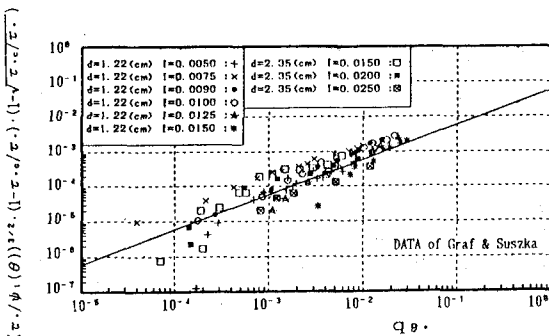


図5 m, nの検討(芦田・道上式・ $\beta=1.0$)

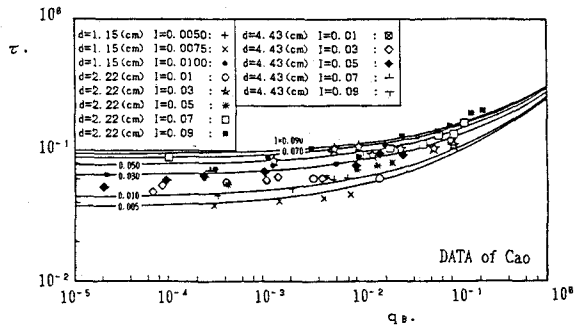


図6 τ_* と q_B の関係(芦田・道上式・ $\beta=1.0$)