

九州大学 工学部 正員 平野 京夫

" " 正員 〇岩元 賢

建設技研 K.K 正員 中野 義一

I まえかき

流水の抵抗に関する研究は、古来数多く実験的、理論的になされてきたが、粗度要素の幾何学的特性とこれに起因する流水の乱れ機構等の影響が複雑に関係するため、いまだ普遍的な式が確立されていない。著者らは、粗度要素の形状抵抗と河床の剪断抵抗の関係から混合砂礫床の抵抗則を誘導し、実際の混合砂礫床水路実験や3次元乱数モデルによる数値モデル河床によって検討したので報告する。

II 抵抗則式の誘導

図-1 に示すような混合砂礫床モデルにおいて、任意の粒径 d_i の礫頂面に作用する代表流速を U_{ki} とし、このような混合砂礫が河床の単位面積内にランダムに存在する場合、河床面に作用する抵抗は、揚力、浮力、造波抵抗等の効果が抗力、摩擦抵抗に比べて小さいものとして一般に次式で定義される。

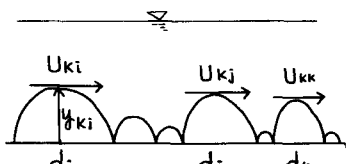


図-1 混合砂礫床モデル

$$\tau_0 = \tau_k + \tau_s = \frac{\rho}{2} \int_0^{\infty} C_0 \varepsilon A_i U_{ki}^2 \varphi(D) dD + \tau_s \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 τ_0 : 河床の剪断応力 τ_k : 粗度要素の形状抵抗 τ_s : 河床の摩擦抵抗 ρ : 水の密度 C_0 : 抗力係数
 ε : 遮へい係数 A_i : 粒径 d_i の礫の流水方向の投影面積 g : 重力加速度 h : 水深 I : 河床勾配
 また、 $\varphi(D)$ は混合砂礫粗度要素の確率密度関数で、一般に任意の河床面積 S 内に混合砂礫が m 個存在する場合の投影面積の総和を $F = \sum_{i=1}^m A_i$ とすると次式のような関係が成り立つ。

$$\int_0^{\infty} A_i \varphi(D) dD = F/S \quad \text{----- (2)} \quad \gamma/\gamma_s: \text{相対粗度密度}$$

ここで、(1)に平均流速 U_m およびある代表粒径 d_0 に対する代表流速 U_{k0} を導入し、また、混合砂礫床では形状抵抗が摩擦抵抗に比べて卓越するので、摩擦抵抗の効果を無視すると、結局、混合砂礫床の抵抗則は次式のように与えられる。

$$\frac{U_m}{U_*} = \frac{U_m}{U_{k0}} \sqrt{2 / \int_0^{\infty} C_0 \varepsilon A_i \left(\frac{U_{ki}}{U_{k0}} \right)^2 \varphi(D) dD} \quad \text{----- (3)} \quad (\tau_k/\tau_0 \ll 1)$$

上式は流水の流速分布形が既知であれば、粗度条件から U_m/U_{k0} の値が求められることを示している。流速分布が対数則に従う場合には、任意の粒径 d_i および d_0 に対する代表流速 U_{ki} , U_{k0} の生ずる位置をそれぞれ y_{ki} , y_{k0} とすると

$$\frac{U_{ki}}{U_*} = 8.5 + 5.75 \log \frac{y_{ki}}{K_s} \quad \text{---- (4)} \quad \frac{U_{k0}}{U_*} = 8.5 + 5.75 \log \frac{y_{k0}}{K_s} \quad \text{---- (5)} \quad \frac{U_m}{U_*} = 6.25 + 5.75 \log \frac{h}{K_s} \quad \text{---- (6)}$$

となるので、結局、(3)は(4)~(6)から次式のように変形できる。

K_s : 相当粗度

$$\frac{U_m}{U_*} = \frac{U_{k0}}{U_*} + 5.75 \log \frac{h}{2.46 y_{k0}} \quad \text{---- (7)} \quad \text{ここに、} \frac{U_{k0}}{U_*} = \sqrt{2 / \int_0^{\infty} C_0 \varepsilon A_i \left(1 + 5.75 \frac{U_{ki}}{U_{k0}} \log \frac{y_{ki}}{y_{k0}} \right)^2 \varphi(D) dD} \quad \text{---- (8)}$$

式中、右辺第1項は粗度要素の粒度分布のみに関する項、第2項は相対水深に関する項である。なお、本式は粗度要素の幾何学的形状が一定でかつ、等密度に配置されているような人工粗度（イボ型、機型）に対しては(2)または $\int_0^{\infty} A_i \varphi(D) dD = K_s/l$ ---- (9) なる関係をそれぞれ(7)に代入すれば、所定の抵抗則が次式のように与えられる。

$$\text{イボ型粗度: } \frac{U_m}{U_*} = \sqrt{\frac{2}{C_0 \varepsilon F}} + 5.75 \log \frac{h}{2.46 K} \quad \text{---- (10)} \quad \text{機型粗度: } \frac{U_m}{U_*} = \sqrt{\frac{2}{C_0 \varepsilon K}} + 5.75 \log \frac{h}{2.46 K} \quad \text{---- (11)}$$

ここに、 K : 粗度高 l : 粗度間隔 $y_{k0} = K$

また、(10)(11)によって人工粗度の K_s の物理的性質を表わしたものが次式

$$K_s/K = \alpha \times P \left[K \left(8.5 - \sqrt{\frac{2}{C_0} \frac{S}{\rho F}} \right) \right] \dots (12) \quad K_s/K = \alpha \times P \left[K \left(8.5 - \sqrt{\frac{2}{C_0} \frac{S}{\rho F}} \right) \right] \dots (13) \quad K_0 = 0.4$$

で、この式による計算値と実験値の結果を示したものが図-2で、よく実験値を説明している。なお、粗度近傍では流速分布が対数則からはずれる事は周知の事実で、これに関して例えば、足立、渡辺、芦田らはいずれも粗度層内の流れを一樣粒徑河床の粗度層厚に近似的に結びつけて論議しているが、河床の粒度特性に対する検討がさうに課題になると思われる。

III 実験およびシミュレーション法

(3)より混合砂礫床の抵抗は、粗度要素の粒度分布や流速分布が与えられれば一義的に決定できるので、ここでは(7)を用い、さらに混合砂礫の粒度分布として、体積分布が対数正規分布する場合の抵抗特性を実際に作製した混合砂礫床による水路実験および3次元乱数モデルによる数値モデル河床のシミュレーションによって検討した。その諸元は表-1、図-3に示すとおりである。

図中、 $X_i = \log d_i$ d_i : 礫の粒徑 X_i : 正規乱数

$e = d_i \left(\frac{1}{2} - R_i \right)$ e : x 軸からの距離 R_i : 一樣乱数 ($0 \leq R_i \leq 1$)

$\theta_i = \theta_i / 2\pi$ θ_i : x 軸に対する礫の球心 O_i の回転角

IV 実験結果および考察

θ_i : 一樣乱数 ($0 \leq \theta_i \leq 1$)

(1) 礫の抗力係数

角張った礫が静水中を落下する際の限界沈降速度 v_f より求められる C_D の結果は図-4に示すとおりで、従来の球の結果 ($C_D \approx 0.5$) に比べて落下時の抵抗が全体的に大きいため、本実験においては平均的に $C_D \approx 0.6$ と考えられる。

(2) 遮へい係数

枝型人工粗度による Wake の reattachment point までの距離 λ の測定結果 ($\lambda \approx 8K$) から、Wake の干渉効果を図-3(c)に示すように直線的に表わし、この際の遮へい効果を $\varepsilon = (K - f(x))/K \dots (14)$ $f(x)$: Wake による遮へい高なる式で定義し、所定の粗度配列に対する ε 値を逐次、数値計算で決定した。

(3) 抵抗特性値 U_{*c}/U_{*k} および U_m/U_{*k} の実験値と計算値の比較

混合砂礫床の実験値と3次元乱数モデルによるシミュレーション結果における U_{*c}/U_{*k} と $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ の関係を図-5に示す。図より、任意の代表粒徑 $d_0 = d_{50}, d_m, d_{16}, d_{84}$ における結果はよく一致している。そこで、 $d_0 = d_{65}$ とした場合の混合砂礫床の抵抗則は次式で表わすことができる。

$$\frac{U_m}{U_{*k}} = 5.8 - 0.25 \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} + 5.75 \log \frac{h}{2.46 d_{65}} \dots (15) \quad (1 \leq \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \leq 10)$$

本式による計算値と実験値の結果を図-6に示す。

(1) 足立: 才田水理講演会

1970 (P.63 ~ 69)

(2) 渡辺: 土木面卸支部 1970

(3) 芦田: 京大防災研年報 No.16

1973 (1.481 ~ 494)

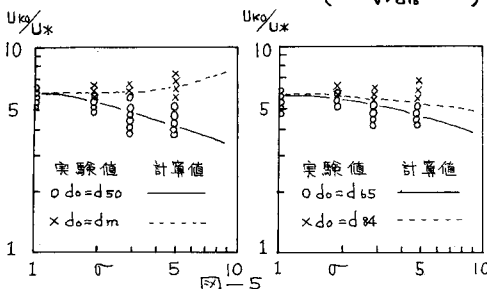


図-5

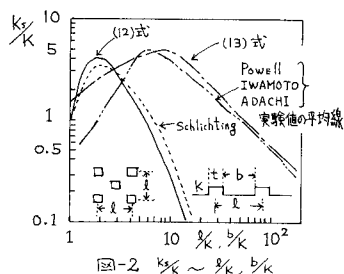


図-2 $K_s/K \sim K/k, b/k$

表-1 混合砂礫の諸元

σ	d_{50} cm	d_m cm
1.0	0.44	0.44
1.3	1.35	1.35
1.1	2.23	2.23
1.2	3.10	3.10
2.1	0.24	0.32
3.1	0.24	0.49
5.1	0.24	0.61

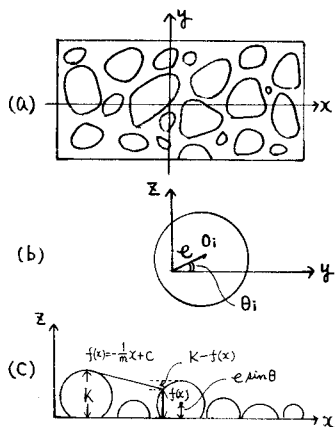


図-3 数値モデル河床

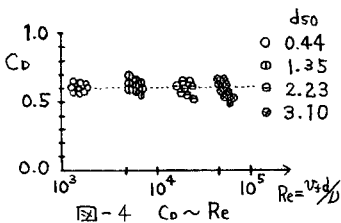


図-4 $C_D \sim Re$

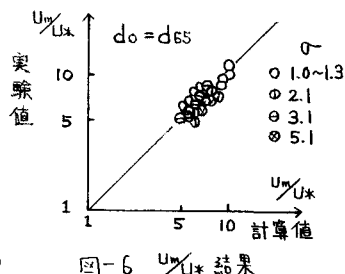


図-6 U_m/U_{*k} 結果