

急こう配流れの抵抗と限界掃流力について

京都大学防災研究所 正員 芦田和男
 京都大学防災研究所 正員 高橋 保
 京都大学 大学院 学 ○ 水山高久

1. 緒言 山地の溪流のように急こう配で、水深が河床砂礫の粒径程度の流れについての抵抗や限界掃流力についての研究はまだ十分ではない。著者らは最近急こう配流れに着目し、砂粒レイノルズ数が大きい範囲で限界掃流力が相対粗度の関数となることを実験的に見い出している⁽¹⁾。本報告は、急こう配流れの抵抗則を実験的に調べ、先の研究では不十分であった限界掃流力の変化特性について若干の考察を加えたものである。

2. 急こう配流れの抵抗

2.1 抵抗係数 密に敷きならべた砂粒による抵抗係数 f は、 U_* , g , d , μ , ρ の関数と考えられ、次元解析によって次のように表わされる。

$$f = \Phi \left(\frac{U_* d}{\nu}, \frac{U_*^2}{g d}, \frac{d}{h} \right) \quad \cdots \cdots (1)$$

完全粗面乱流では、 $\frac{U_*^2}{g d}$ は顕著な影響を与えないものと考えられ、例えば Moody 図では、管路について $d/h = 0.2$ 程度までの実験値が示されている。ここでは、 $d/h > 0.2$ での抵抗を人工粗度による実験で調べることにする。実験は、直径 24.5mm と 12.6mm の二種のがラス玉を、それぞれ幅 36.5cm 長さ 196cm の箱に敷きならべこれを水路内にはめ込み、急こう配 (0.02~0.17) と流量を変えて水深を測定した。結果を図 1 に示すが、相対粗度が

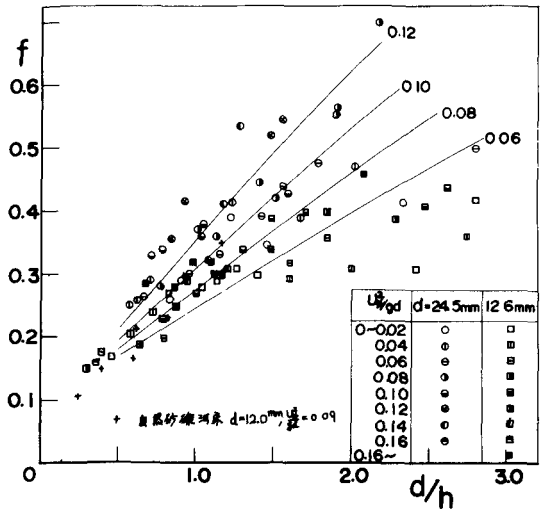


図-1 抵抗係数の d/h と $U_*^2 / (g d)$ による変化

大きくなると抵抗係数が急激に増加し、また $U_*^2 / (g d)$ が大きいほど f 値は大きくなることを示している。図 1 では、2 種の粒径の間に抵抗の差が認められるが、絶対水深が小さいために水深測定上の 1mm 程度の誤差が d/h で 5~10% の差となるのでかなりの誤差を含んでいることを念頭に置く必要がある。しかし、粒径の小さい方が抵抗が小さくなるようなほぼ一方向的な傾向も認められるので、さらに河床面高さの決定法や水面波の影響あるいは乱れの効果についての研究が必要であろう。なおここでは理論河床面は、礫頂より 0.15d 下位にとっている。

2.2 流速分布 ここで対象としているような粒径が大きい場合の底面付近の流速分布については、混合距離の適当な仮定のもとに議論をすすめている例が 2, 3 あるが、確定的なものではない。図 2 は、先の研究⁽¹⁾において測定した、自然砂礫床において U_* がほぼ一定な場合の流速分布形の一例である。分布形は $y = 0.8d$ 付近に変曲点をもっており、変曲点より上層と下層がそれぞれ急こう配の異なった対数分布をしているように見える。そこで、変曲点より下層に対して

$$\frac{U}{U_*} = A + \psi \ln \frac{y}{\delta} \quad \cdots \cdots (2)$$

上層に対して、

$$\frac{U}{U_*} = A + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\delta} \quad \text{----- (3)}$$

のように書き、 $y = \delta$ で $U = U_\delta$ として式(2)(3)を積分して断面平均流速 U_0 を求めると、

$$h \geq \delta \text{ では, } \frac{U_0}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{\delta} - \frac{h-\delta}{h} \frac{1}{\kappa} - \frac{\delta}{h} \psi + \frac{U_\delta}{U_*} \quad \text{----- (4)}$$

$$h < \delta \text{ では, } \frac{U_0}{U_*} = \frac{U_\delta}{U_*} + \psi \left(\ln \frac{h}{\delta} - 1 \right) \quad \text{----- (5)}$$

のようになる。また礫頂での流速 U_x を式(2)より求めると、

$$\frac{U_x}{U_*} = \frac{U_\delta}{U_*} + \psi \ln \frac{0.15d}{\delta} \quad \text{----- (6)}$$

図2の結果より $\kappa = 0.4$, $\delta = 0.8d$, $\psi = 0.87$ として図1の関係をを用いて式(4)(5)および(6)より d/h に対する $\frac{U_x}{U_*}$ を計算した結果を図3に示す。 $\frac{U_x}{U_*}$ の実験値のばらつきが大きく断定的なことは言えないが、少し計算値が実験値より小さい傾向があり、 ψ の変化特性や流速分布形に対するさらに詳細な検討を要するが、 $\frac{U_x}{U_*}$ の d/h による変化の傾向は、説明している。以上より d/h と $\frac{U_x}{U_{*c}}$ に対する ψ 値を与えて、その時の礫近傍での流速を求めることができる。

3. 限界掃流力 Shieldsのパラメーターを急こう配に対して修正したものを S_{sc} と書くと、球について、

$$S_{sc} = \frac{U_{*c}^2}{(\rho/\rho_0)gd} \cdot \frac{1}{(\tan \varphi \cos \theta - \frac{\sigma}{\sigma_0} \sin \theta)} = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{C_0}{C_0} \tan \varphi)} \cdot \frac{1}{C^2} \quad \text{----- (7)}$$

となる⁽¹⁾ $d = 22.5 \text{ mm}$, 12.0 mm , 6.4 mm の3種類の礫を用いた実験の結果は図4で、 d/h の増加とともに S_{sc} は急激に増加する。ここに、 $C = \frac{U_{*c}}{U_{*c}}$ で、 U_{*c} は限界時の礫近傍流速である。種々の d/h と $\frac{U_x}{U_{*c}}$ について左辺(Yと書く)を計算し、図3で求めた U_x を用いて右辺(Xと書く)を計算した曲線群が図4に示されている。同じ $\frac{U_x}{U_{*c}}$ に対する2つの曲線の交点が、 S_{sc} を与えることになるが、交点を連ねた曲線は、実験値と比較的よくあっている。なお $\tan \varphi = 1.0$, $C_0 = 0.5$, $\rho/\rho_0 = 2.65$, $C_0/C_0 = 1.0$ としている。

4. 結語 1) 以上急こう配流れに関する実験によって、相対粗度の大きい範囲で、抵抗係数が相対粗度の増加とともに急激に増加すること、また $\frac{U_x}{U_{*c}}$ が大きいほど抵抗係数が大きくなることが示され、 ψ とそれらのパラメーターの関係を明らかにした。

2) 相対粗度の大きい流れの流速分布形の特性を明らかにして、礫近傍の流速を求め、図4で示されるような限界掃流力の d/h による変化特性を、よく説明することができた。

参考文献

(1) 芦田, 大同, 高橋, 水山「急こう配流れの限界掃流力に関する研究」第17回水理講演会講演集, 1973年2月

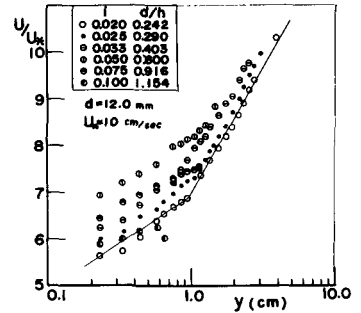


図-2 流速分布

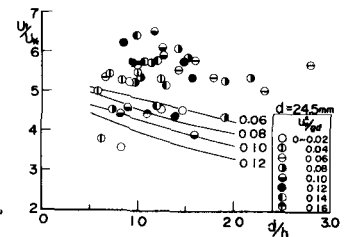


図-3 U_x/U_* の実験値と計算値

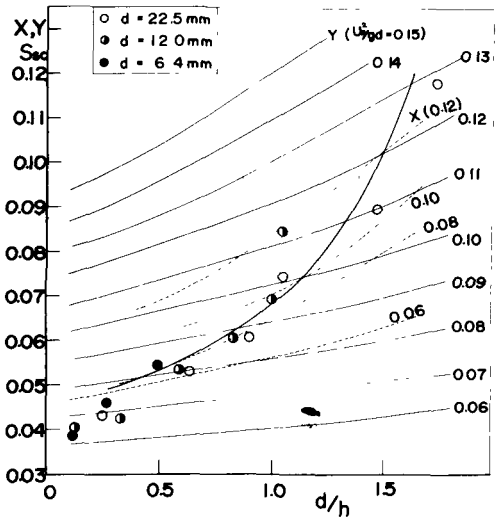


図-4 限界掃流力の d/h による変化