

九州大学 工学部 正員 平野 宗夫
正員 〇岩元 賢

I. まえがき

荒流溪流における不規則な河床粗度の幾何学的特性と流体抵抗を定量的に結びつけ、より普遍的な粗度の概念を確立するために、これまで各種の人工粗度において個々の形状、寸法、配置等による流阻の抵抗を調べてきた。

今回は既往の結果をふまえて、さらにこれら各種の人工粗度の抵抗を統一して一つの式で表わして検討を行ったので報告する。

II. 流阻の抵抗

図-1に示すように、一般に流水の中に障害物(粗度)が存在する時、その河床に働くせん断力 T としては、形状抵抗とマサツ抵抗が考えられる。

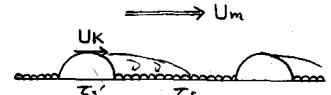


図-1 河床の粗度モデル

ここで形状抵抗とは粗度の抗力 D のことであり、マサツ抵抗とは粗度表面のマサツ力 z_s' と河床面のマサツ力 z_s のことであるが、全体的にみて z_s' 値の割合は他の抵抗に比べて、かなり小さいと思われるのでここでは省略することにした。

以上より、粗度1個当りの抗力 D は粗度上の流速を U_k とすると次式で表わせる。

$$D = C_D A_1 \frac{U_k^2}{2} = C_D \varepsilon A \frac{U_k^2}{2} \quad (1)$$

C_D : 抗力係数 ε : 遮へい係数
 A_1 : 粗度の流水を受ける面の単位面積
 $A_1 = \varepsilon A$

したがって、河床に種々の粗度が単位面積中に n 個存在する時の全抗力

$$Z_k = \frac{\rho}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (C_D A_1 U_k^2) n = \frac{\rho}{2} \int_0^{\infty} (C_D \varepsilon A U_k^2) \varphi(D) dD \quad (2)$$

となる。

1) 棧型粗度の場合

水路幅 B 粗度高 K 粗度の間隔 l における抵抗のつり合いを考えると、(2)の $\varphi(D)$ は $\varphi(D) = K/l$ となり、次のような関係が成立する。

$$T = \sum D + \sum z_s = D \cdot B + z_s \cdot B \cdot l \quad (3)$$

$$\text{また、} T = \tau l B \quad (\tau = \rho U_*^2 = \rho g h i) \quad (4) \quad \therefore \tau = \frac{D}{l} + z_s \quad (5)$$

(1)(5)より求めた式に、平均流速 U_m を導入して(4)の関係をまとめると 棧型粗度の抵抗式が次のように得られた。

$$\frac{U_m}{U_*} = \frac{U_m}{U_k} \sqrt{\frac{2}{C_D} \frac{l}{\varepsilon K} (1 - z_s/\tau)} \quad (6)$$

2) イボ型粗度の場合

三次元の粗度要素を有するイボ型粗度の抵抗も同じような考え方で導くことができる。すなわち、水路の任意の長さ l 内に平均粒径 r の粗度が n 個存在する時、(2)の $\varphi(D)$ は $\varphi(D) = (\frac{\pi r^2}{4}) n / B l = F/S$ で表わせる。以上より、イボ型粗度の抵抗は

$$T = D \cdot n + z_s B l, \quad D = \frac{\pi}{4} C_D \varepsilon r^2 U_k^2 \quad (7)$$

を前述と同様にしてまとめると、次のように得られた。

F : 粗度の流水方向の投影面積
 S : 粗度1個の受け面 $\times$ 水路壁面々々積

$$\frac{U_m}{U_*} = \frac{U_m}{U_k} \sqrt{\frac{2}{C_D} \frac{S}{\varepsilon F} (1 - z_s/\tau)} \quad (8)$$

Ⅲ. 実験

1) 棧型粗度

鋼製可傾水路 ($0.5 \times 0.6 \times 18.8 \text{ m}$, $I \div 0.01 \sim 0.1$) の水路床に図-2に示すように、高さ K 幅 t とともに等しい正方形断面の木製粗度 ($K=1.2, 2.5, 4.3 \text{ cm}$) と半径 $r=2.0 \text{ cm}$ の半円柱粗度を流水の横方向に等間隔 l に配列した。その相対粗度間隔は $l/K=2 \sim 128, \infty$ である。

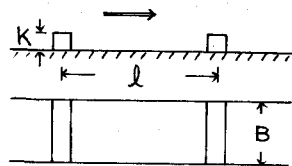
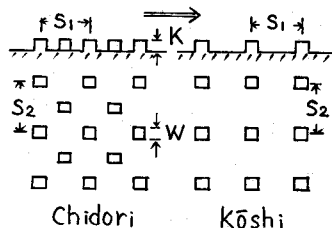


図-2 棧型粗度の配置

2) イボ型粗度

高さ K 幅 t 長さ W とともに等しい2種類の木製立方体 ($K=2.5, 4.3 \text{ cm}$) と、モルタル製半球 ($r=1.6, 2.2, 2.7 \text{ cm}$) を図-3のように所定の間隔 S_1, S_2 で千鳥状および格子状に配列した。その相対粗度密度は $S/F=2.6 \sim 652.2$ である。



$$S = S_1 S_2 / 2 \quad F = KW \quad S = S_1 S_2$$

図-3 イボ型粗度の配置

3) 礫粗度

自然河川で採取し、フルイ分けた丸味を有する4種類の礫 ($d_{50} = 0.44, 1.35, 2.23, 3.10 \text{ cm}$) をランダムにモルタル床面に張り付けた。その $S/F = 2.4 \sim 3.5$ であった。

Ⅳ. 結果と考察

1) 棧型粗度

前報⁽¹⁾の流水の形態や抗力測定より、後流の範囲は $l/K < 8$, C_D は l/K に関係なく一定値 (角柱: 1.0, 半円柱: 0.6) を有し、かつ ε は $l/K=1$ で 0.0, $l/K=8$ で 1.0 なる直線的関係を有するものと思われた。以上の条件を(6)式に代入して得られた計算値と実測値の関係を図-4に示した。図より $K=2.5, 4.3$ の $l/K=8$ を除くと、全ての結果の精度は良好で、誤差は $\pm 10\%$ にすぎなかった。また、(6)における $\varepsilon/\varepsilon_0$ は全抵抗におけるマサツ効果の割合を表すもので図-6のようになり、 $l/K < 8$ で 0, l/K が增大するにつれてその効果を発揮するようである。次に、 $K=2.5, 4.3$ の $l/K=8$ の精度が悪いのは $l/K=8$ が流水の形態において完全干渉流から不完全干渉流への遷移領域に相当するため、かなりの表面波が発生するので、その際の造波抵抗の効果を無視できなため、このような誤差が生ずるものと思われる。

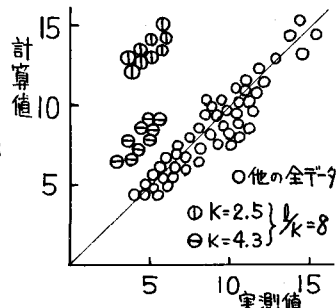


図-4 棧型粗度の結果

2) イボ型粗度

1) と同様にして C_D を決め、 ε は実験より $S/F < 5$ で $\varepsilon = \frac{1}{10} \frac{S}{F}$, $5 < S/F < 40$ で $\varepsilon = 0.015 \frac{S}{F} + 0.40$ として用いた。これを(8)に代入して得られた計算値と実測値の関係を図-5に示した。図より S/F による抵抗値の精度は良好で、その誤差は $\pm 5 \sim 10\%$ であった。

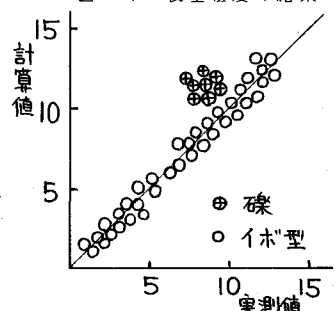


図-5 イボ型粗度の結果

しかし、不均一な形状を有し、ランダムに配置した礫の精度はそれ程よいものとは思われなかった。また、この $\varepsilon/\varepsilon_0$ 値を図-6に示した。

Ⅴ. あとがき

上記の式は規則的な形状、寸法、配置を有する人工粗度にはよく適合すること加判った。しかし、流水の形態の遷移領域や自然河川の礫のように不規則な形状を有する粗度における成果に問題があるので、今後は造波抵抗や混合砂礫の形状特性をも表わしたより合理的な式について検討を加えたい。

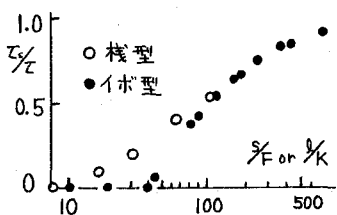


図-6 $\varepsilon/\varepsilon_0$ 値

急勾配水流に関する実験的研究, 日林九枝 No.26~29, 土会函文 S.49 岩元 賢