

相対粗度の大きな急勾配流れの抵抗に関する一検討

日本大学工学部 正 員 ○高橋 迪夫
日本大学工学部 正 員 木村 喜代治

1. はしがき : 山地河川における流れは、一般的にフルード数が大きく、また河床が粗砂礫によって構成され、そのために水深が河床粒子径とはほぼ同一オーダーの相対水深の小さい流れとして特徴づけられる。本報は、このような山地河川の水利特性を明らかにする基礎的研究として、ほぼ均一な砂礫床を有する急勾配開水路流れに対する、現在工学上広く用いられているManningの平均流速式の適合性ならびに粗度係数に関して、実験結果より二、三の検討を加えたものである。さて、大きな粗度を有する相対水深の小さい流れを取り扱う場合には、まず路床面のどの位置を基準として水深を定義するかという問題が生じ、この水深基準面の位置により、その結果の水利特性量にかなり大きな影響を与える。基準面を考慮した報告は幾つか^{(1), (2), (3), (4)}なされているが、その多くは、対象としている水利条件、とくに河床勾配がそれ程大きく変化しないということもあり、固定した基準面によって取り扱われている。一方、太田は、急勾配、砂礫床流れに対して対数則を適用し、基準面を勾配の関数と考える興味ある報告をしている。著者らもすでにこれと類似の取り扱いにより基準面を決定する方法を提案したが、本報では、Manning式の検討ということで、実測値がManning式を満足するような面を水深の基準面に選ぶという方法⁽⁵⁾が用いられている。なお、側壁の影響評価は、木村がすでに提案した方法もあるが、本報は平均流としての取り扱いであるので、Einsteinの方法⁽⁶⁾によって行われた。

2. 実験装置および方法 : 実験に用いた水路は、長さ6.5m、幅b=15.0cmのアクリライト製勾配可変のものであり、その全路床面に粗度要素として、Table 1に示すほぼ均一な粒径をもつようにフルイ分けされた自然砂礫が一層密にはり付けられている。なお、本報の粗度粒径としては、体積等価球径(nominal diameter) d_N の値が用いられている。実験は、水路勾配を $\sin i = 0.0349 \sim 0.208$ の範囲の8種類、流量Qを2.4~7.1ℓ/sの範囲で変化させた。水深の計測は、水路断面中央部における水面から d_N 頂面までの水深Rを水路上流端から1.5mの地点より1m間隔で5点、ポイントゲージを用いて行った。

3. 実験結果および考察 : 流れは水面の変動がかなり激しく、また、粗度粒径、水路勾配の増加と共に増大する傾向が観察されたが、平均的な水面をとらえることは可能であり、従って、本報におけるような平均水量の取り扱いにおいては、流れを等流とみなしても差し支えないように思われる。

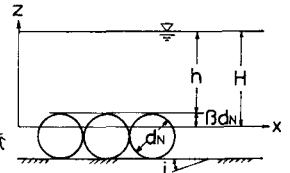


Fig. 1

3.1 水深基準面の決定方法およびManning式の適合性; 求める水深の基準面がFig. 1のように粗度粒子頂面から βd_N 下方にあるとすると、水深は $H = (R + \beta d_N)$, 有効断面積は $A_e = b(R + \beta d_N)$ となる。さらに、予備実験の結果より得られた側壁の粗度係数を0.0083としてEinsteinの側壁補正法⁽⁸⁾を用いて求められた底面に属する径深を R_b とすると、Manning式⁽¹⁾は次のように表わせる。

$$Q = \frac{1}{n_b} A_e R_b^{2/3} S_e^{1/2} \quad \cdots (1) \quad \text{ここに、} n_b: \text{底面の粗度係数, } S_e = \sin i, (i: \text{水路勾配}).$$

この式(1)を用いて実測値Qを満足するような β の値を求めればHが定まり、他の水量量はすべて定まることになる。即ち、実測値Qと仮定した β より求まる $A_e R_b^{2/3} S_e^{1/2}$ との関係が原点を通る直線上に分布すれば、これが β の最適値となる。 $\beta = 0.00$ に対するQと $A_e R_b^{2/3} S_e^{1/2}$ との関係の一例を示したのがFig. 2である。この図より、いずれの水路勾配に対してもQと $A_e R_b^{2/3} S_e^{1/2}$ とはほぼ直線関係にあり、本報で対象としているような相対水深の小さい急勾配流れに対してもManning式が適用され得ることが認められる。しかしながら、いずれの直線も原点を通らず、 $\beta = 0.00$ の位置を基準面と考えると水深が過小評価されていることになる。また、水路勾配の増加に伴い β の値

も大きくなることが予測される。ただし、図中の直線は最小二乗法によって決定されている。これより、各粗度粒径に対して β を試算的に変化させて求めた最適な β 値と Se および水路横断方向における粗度粒径の影響を表現する dn/b との関係で近似してみると、

$$\beta = 30 Se^{0.55} (dn/b)^{1.5} \quad \dots (2)$$

となる。式(2)の実測値に対する適合性をみたのがFig. 3である。かなりのばらつきが認められるが、本実験範囲内においては、水深基準面の位置はほぼ式(2)で近似し得るように思われる。式(2)より理解されるように、水深基準面は水路勾配、粗度粒径の増大に伴って頂

面下方に移動することになるが、これは芦田らも指摘しているように、粗度要素間を流れるいわゆる間隙流量の影響に主に起因すると解釈される。 dn 頂面下方の間隙流量 Q_{ON} の全流量に対する比率 Q_{ON}/Q_{min} (ただし、 $Q_{min} = 2.4 \times 10^{-3} m^3/s$)と β_{cal} との関係を示したのがFig. 4である。かなりのばらつきがあり、また、計測精度の問題もあるが、 β と Q_{ON} との相関が認められる。なお、 Q_{ON} の計測はSimons⁹⁾らの用いた方法を参考にした。

3.2 流れの抵抗：無次元粗度係数 $\pi b \sqrt{g}/R_b^{1/6}$ が、 $U_{kb} (\sqrt{g R_b} Se)$ 、 g 、 d_g (代表粒径)、 R_b 、 M 、および γ の関数であるとして次元解析を行うと、

$$\pi b \sqrt{g}/R_b^{1/6} = U_{kb}/U = \phi(U_{kb}^2/d_g, R_b/d_g, U_{kb} d_g/\nu) \quad \dots (3)$$

となる。ここで、 d_g として水深基準面から粗度頂面までの高さ βdn を考え、さらに本報の流れにおいても対数速度分布則との結び付けが可能とすれば、 $U_{kb} d_g/\nu$ の影響を省略され得るとして、次の抵抗式が期待される。

$$\pi b \sqrt{g}/R_b^{1/6} = U_{kb}/U = 1/[C + 5.75 \log(R_b/\beta dn)], \quad C = \phi(U_{kb}^2/g \beta dn) \quad \dots (4)$$

$\pi b \sqrt{g}/R_b^{1/6}$ と $R_b/\beta dn$ との関係を示したのがFig. 5、また、 C の関数形を、

$$C = 3.6 - 2.1 \log(U_{kb}^2/g \beta dn) + 1.8 [\log(U_{kb}^2/g \beta dn)]^2 \quad \dots (5)$$

によって近似し、式(4)、(5)と実測値とを比較したのがFig. 6である。これらの図より、 $R_b/\beta dn > 20$ 程度で抵抗は一定値に漸近する傾向がみられるために、 $\pi b \sqrt{g}/R_b^{1/6} \approx 0.09$ においては実測値からはずれてくる傾向が認められるが、巨視的には、本報の対象とする流れの抵抗は式(4)、(5)によって近似し得ると思われる。

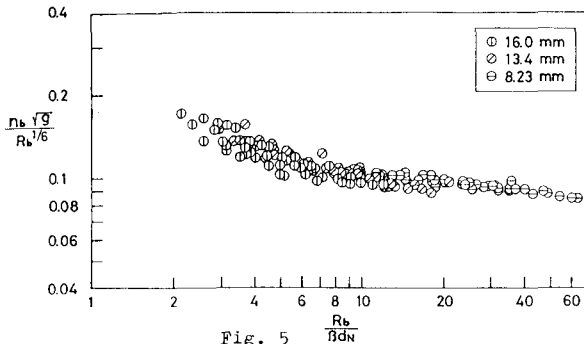


Fig. 5

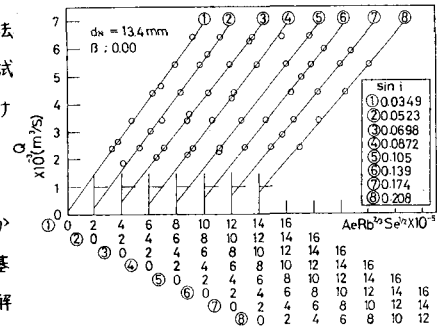


Fig. 2

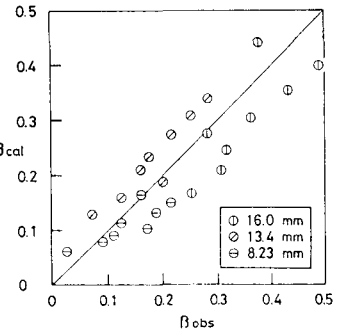


Fig. 3

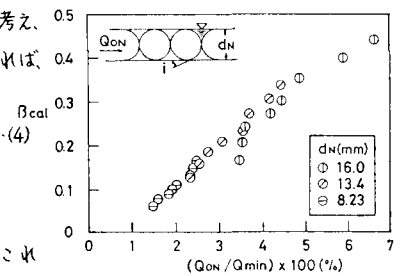


Fig. 4

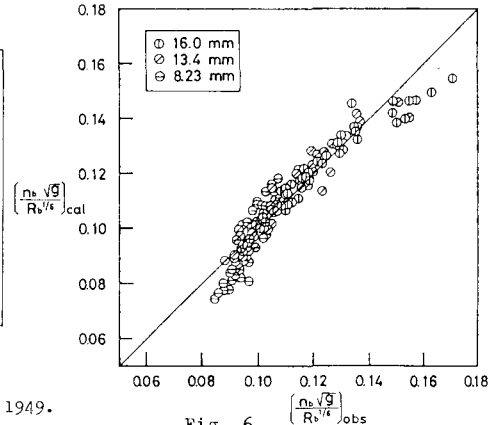


Fig. 6

1) Einstein, H.A., et al, Rev. of Modern Physics, Vol. 21, 1949.

2) Roberson, J.A., Ph. D. thesis, State Univ. of Iowa, 1961.

3) Cheng, E.D.H., Ph. D. thesis, Utah State Univ., 1970.

4) 芦田知男, 他, 京大防災研究所年報, 第16号B, 1973.

5) 太田猛男, 新砂防, Vol. 32, No. 3, 1980.

6) 高橋進夫, 他, 日工学会紀要, 第20巻, 1979.

7) 木村喜代治, 土木学会論文報告集, No. 251, 1976.7.

8) Einstein, H.A., Trans. of ASCE, Vol. 107, 1942.

9) Simons, D.B., et al, Proc. of ASCE, Vol. 105, 1979.5.