礫床水路の浸透流量と流水抵抗について

大阪産業大学工学部　正員　　重光　世洋
大阪産業大学工学部　正員　○宮島　昌弘

1．はじめに

浸透層を有する粗面水路における流水抵抗の研究は、これまで多くの研究者により、報告され成果を上げている。しかし、自然河川の砂礫材料を用いて検討したものは、筆者らの知る限り少ないようである。本文は、この自然砂礫を用いて実験を行ない、浸透流量を測定して平均的な浸透流速を求め、これが流水抵抗にいかにかかわっているかを、礫床材料および条件の幾何学な見地から水理実験手法を用いて検討したものである。

2．実験条件および方法

実験は、砂礫の移動がなく、比較的平坦な河床を対象に、粒度特性の若干異なったものおよび浸透層厚を数種類変化させて行なった。実験条件の概要はTable-1 に、粒度特性は Table-2に示す。また使用した水路は、幅50cm、高さ50cm、長さ15m の長方形断面を有する勾配可変の鋼製水路で、水路下流端に、浸透流量測定用の長さ2m程度のボックス型集水桝を設置し、主流と浸透流が分離されて測定できるようにした。集水桝ボックス内には、実験対象とする礫床材料と同じものを充填した。礫床の作成にあたっては、水路を水平にし、所定の層厚に注水して、水面上に露出する礫の面積を床面積の50% 程度になるよう整正した。実験は、等流状態になるよう下流端で調整し、水位は、ポイントゲージで水路中心線に沿って25cm間隔で測定した。

3．実験結果の整理方法

実験結果の整理方法については、粗面乱流域における流水抵抗をDarcy-Weisbachの抵抗係数としてとらえ、(1) 式に示すColebrook-White の公式を利用し、浸透層の存在による抵抗の様態が、浸透流を規定する関数で表現できると仮定し、Ks=di として(2) 式で表わす。

$$1/\sqrt{f} = 2.03\ \log(ah/Ks) \quad \text{----------}(1)$$

$$1/\sqrt{f} = 2.03\ \log(ah/di) + \mathrm{func.}(Up/U*) \quad \text{----------}(2)$$

ここに、f:抵抗係数，a:係数，h:水深，di: 代表粒径，Up: 平均浸透流速，U*: 摩擦速度，Ks: 相当粗度である。

一方本実験結果より、Up/U* がほぼ(3) 式で表現できることから、(2) 式より(4) 式が、導かれる。

$$Up/U* = \log\ ((h/\Delta)^{\alpha}\cdot(Ie)^{\beta}\cdot\gamma) \quad \text{----------}(3)$$

$$1/\sqrt{fb} = 2.03\ \log(ah/di) + \log\ ((h/\Delta)^{\eta}\cdot(Ie)^{\xi}\cdot\zeta) \quad \text{--}(4)$$

ここに、Δ: 礫層厚，Ie: エネルギー勾配，fb: 河床面の抵抗係数，指数 α,β,η,ξ、定数 γ,ζ は礫層厚、礫床材料の特性に関する値である。さて今回の実験では、層厚Δが2cm の値をベースとして(5) 式で得られた係数 a の値を使用した。a=6.04である。

$$1/\sqrt{fb} = 2.03\ \log(ah/di) \quad \text{----------}(5)$$

Seiyo SHIGEMITSU , Masahiro MIYAJIMA

4．実験結果と考察

Table－1

項　　目		実験条件・範囲
全流量	Q(l/sec)	5, 8, 14, 20, 26, 32
水路こう配	I_b	1/500, 1/250, 1/100, 1/50
平均粒径	d_m (mm)	9.20, 12.03, 11.77
礫層厚	Δ (cm)	2, 4, 8, 17
水　深	h (cm)	2.1 ～ 14.7
フルード数	F_r	0.2 ～ 1.20
レイノルズ数	R_e	27000 ～ 300000

Table－2

項目＼礫床材料		A	B	C
平均粒径	d_m (mm)	9.20	12.03	11.77
中央粒径	d_{50} (mm)	8.70	11.40	10.70
有効径	d_{10} (mm)	6.40	8.90	7.20
標準偏差	σ	1.239	1.150	1.297
比　重	r_s	2.62	2.62	2.62
空げき率	(%)	40.2	40.2	40.2
球状率		0.708	0.699	0.705
ふるい分け係数	S_0	1.143	1.118	1.197

Fig.1 は、浸透流の実験結果を式(3) で整理したものである。横軸には相対有効径 d_{10}/Δ とふるい分け係数 So の積をとり、（これをいま相対代表粒径 dsoとしておく。）縦軸に α,β,γ をとっている。それぞれの指数および定数の傾向は、データの数が少ないため明確にはできないが、指数 α については dsoの増加に伴って、ゆるやかなカーブを描いて増加の傾向を示し、指数 β および定数 γ については、ほぼ一定あるいは漸減傾向にあるように思われる。また α,β,γ すべて、それぞれ dsoの増加に伴い、ある一定値に漸近するように思われる。Fig.1 の各線は適当な条件を設定して指数関数であてはめたものである。Fig.2 にはこれらの曲線と β の値を使用して得られた$(Up/U^*)cal$と観測値$(Up/U^*)obs$の比較を示した。平均自乗誤差率 $Eu=\sqrt{(1/N)(((Up/U^*)obs-(Up/U^*)cal)/(Up/U^*)obs)^2}$ で18% 程度となっている。

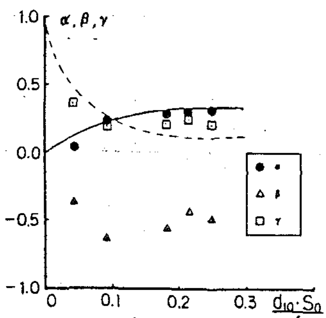

Fig. 1

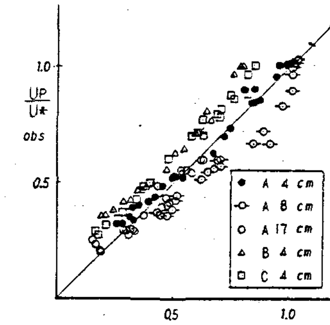

Fig. 2　Up/U* cal

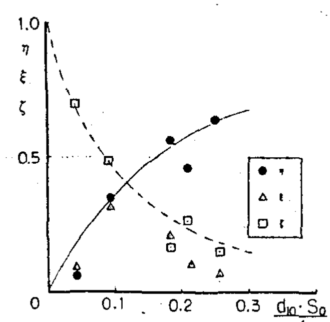

Fig. 3

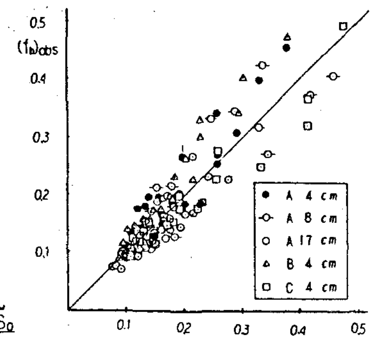

Fig. 4　$(f_b)cal$

次に、式(4) より求めた η,ξ,ζ について示したのが、Fig.3 である。これも横軸に dso をとっている。η は dsoの増加に伴い、増加し、ξ はばらつきはあるが、ある値に漸近しているようである。定数 ζ は、dso の増大に伴って減少傾向が認められる。また個々の値は、それぞれ一定値に漸近するようである。図中の曲線は、上述と同様適当な指数関数をあてはめたものである。Fig.4 にこれを用いて計算した(fb)cal と(fb)obs の対比を示してある。Ef=17%程度となっている。Fig.1 およびFig.3 より、α,η と β,ξ および γ,ζ の傾向を見ると、α,η と γ,ζ については、ほぼ同様の傾向を示しているが、β と ξ の値は、大きくその傾向を異にしている。このことは、礫床浸透層の存在による流水抵抗の挙動に勾配の因子が、大きくかかわっていることを示しており、重力と慣性力が大きく関与するものと考えられる。

今後さらに式形も含めて実験を進め、一般的な形式で表現できるよう検討していきたいと考えている。なお、本実験の遂行に当たり、大阪産業大学学生（当時）樋口克巳、西川都之君の協力を頂いた。ここに記して謝意を表わす。