

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

山地急流河川の河床は、一般に粒径の大きい混合砂礫により構成されているため、河床材料の幾何学特性のほかに浸透層の存在による複雑多様な抵抗様態を示しており、これらの抵抗を普遍的に表現できる式は現在の所まだ確立されていないのが実状であろう。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。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾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、工学的見地から、基礎研究の一環として、砂礫の移動がなく比較的平坦な河床を対象に、粒度分布の異なった数種類の自然河川の砂礫を用いて実験的に検討し、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、浸透層の流水抵抗に及ぼす効果を量的に表現できる簡易式について、考察した二、三の結果を報告するものである。

2 抵抗係数の表現式

一般に、粗い砂礫で構成されている自然河川の河床は、ルーズな粗面で、河床面下には主流と平行な浸透流を伴い、また河床面を通して水流の出入りがある。このため主流と浸透流との間に動的な相互作用が生じ、同じ水理条件であっても浸透層の存在による流れは、層内での乱流により運動量の交換・輸送が活発となり、これにより付加的な応力が発生し、抵抗係数はNikuradseによる粗面乱流での値に比べてかなり大きくなる。⁴⁾このような浸透層上の乱流場において、主流から浸透流へとその境界面を通じて乱れを誘起しかつ乱れを与えるのは、まず第一次的には境界面の圧力変動であり、浸透流内への圧力エネルギーの拡散であると考えられる。²⁾この動的な作用を理論的及び実験的に解明していくことは容易ではない。ここでは、主流と浸透流との間の動的作用の結果による誘導応力を、次式に示すColebrook-Whiteの公式中の係数 a と相当粗度 k_s の浸透層の存在による複合された結果の値として検討することにする。

$$1/\sqrt{f} = c \log(aR/k_s) \text{ --- (1) } \quad \text{ここに、} a = \text{antilog}(E\kappa/2.30) ; c = 2.30/(\kappa\sqrt{8}) ; f = 8U_*^2/U^2$$

R = 径深 ; E = 係数で、水路の幾何学的形状に従属する。Keuleganによれば、非浸透層上の粗面乱流における a の値は広矩形水路にあっては 11.09 であり、 $c = 2.03$ 一定である。定常状態の2次元流れで、浸透層の存在による相当粗度 k_s と代表粒径 d_{10} との関係と同じ礫床材料の場合について考えると、本実験結果から

$$U_p/U_* = \log[(h/\Delta)^a (I_e)^b (d_{10}/\Delta)^c] \text{ --- (2) } \quad \text{の関係があることを利用して、}$$

$$k_s/d_{10} = (h/\Delta)^{-\eta} (I_e)^{-\xi} (d_{10}/\Delta)^{-\zeta} \text{ --- (3) } \quad \text{と仮定し、これを式(1)に代入すると、}$$

$$1/\sqrt{f_b} = 2.03 [\log 11.09h/d_{10} + \log\{(h/\Delta)^\eta (I_e)^\xi (d_{10}/\Delta)^\zeta\}] \text{ --- (4) } \quad \text{となる。}$$

ここに、 f_b は Vanoni-Brooks の方法を用いて側壁の影響を除去した河床面に対する抵抗係数 ; U_p は浸透層内の平均浸透流速 ; h = 水深 ; Δ = 浸透層厚 ; I_e = エネルギーこう配 ; η, ξ 及び ζ は実験係数で、浸透性礫床材料の特性を表わすものである。なお d_{10} は礫の有効径である。

3 実験装置・方法及び条件

実験は、幅50cm、高さ50cm、長さ15mの長方形断面を有する可変の鋼製水路で行った。礫床内の浸透流量は、礫床層厚に対応して長さ2m程度のボックス型長方形集水柵を水路下流端に設置し、主流と浸透流が分離されて測定できるようにした。集水柵のボックス内には、礫床接合部より約1m程度の区間に実験対象とする礫床材料と同じものを充てんした。礫床の作成にあたっては、まず水路を水平にし、礫床材料を所定の層厚になるように均一に敷き、ついでその層厚に対応する水深になるよう注水した。このとき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、礫床面が平坦になることに留意して整正した。次に、水路を所定のこう配にセットした後、上流端より所定の流量を導水し、等流状態になるよう下流端の主流流量測定用の導水壁の角度により微調整した。水位は水路と平行に設置してあるルール上の測定台より、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。実験条件は Table-1 に、礫床

材料は Table-2 及び Fig. 1 に示す。礫床材料 A,B はほぼ均一径に近いもので、B,C,D の中央径はほぼ同じものである。なお A 材料は礫層厚 4,8,12cm の 3 種類、その他は 4cm 層厚のみについて実験を行った。

4 実験結果と考察

浸透層の効果を含めた礫床の抵抗係数 f_b と h/d_{50} の関係は Fig. 2 に示すようにColebrook-Whiteの式で表わされる。また同一礫床に対して層厚が大きい程抵抗も大きくなる (Fig. 3)。これは浸透層厚の増大に伴い、浸透層内へのエネルギー拡散も増大することを示している。Fig. 4 は礫床Bの d_{50} を用いて求められた a の値をC,Dの d_i による抵抗係数 f_b の計算値の、観測値に対する自乗平均誤差率 E_s の関係について示したものである。 E_s の最小となる d_i はほぼ中央径とふるい分け係数との積に相当している。すなわち、粒径の分布範囲が広い程大きい粒径で代表され、均一粒径により求めた係数 a で f_b の推定が可能となる。Fig. 5 は各ケースに対して式(4)中の指数を求め、これを同式中に代入して算定した f_b (oa_1) と観測値 f_b (obs) との対比を示したものである。各ケースの f_b (cal) の f_b (obs) に対する自乗平均誤差率は10数%程度であり、式(4)による表現は妥当であることが知れよう。Fig. 6 は各ケースに対して指数と相対代表粒径 $d_{50} \cdot S_0 / \Delta$ の関係を示したものである。ここに S_0 はふるい分け係数。この図から $d_{50} \cdot S_0 / \Delta \approx 2$, すなわち浸透層が存在しない場合には、 η, ξ, ζ は0に漸近することが予想されることから、式(4)は固定床の場合のColebrook-White の式に帰着することになる。

以上により、浸透層を有する2次元水路の抵抗係数は、実用的な見地から式(4)の形で表現しうることが判った。

今後定式化を行うにあたっては、なお多くの資料を収集・検討する必要がある。

参考文献

1) Zippe,H.J・Graf,W.H:Turbulent Boundary Flow over Permeable and Non-permeable Rough Surfaces,Journal of Hydraulic Research,Vol.21,No.1,1983
2) 中川・称津:透水性開水路乱流場における主流と浸透流との相互作用,土木学会論報集,第244号,1975
3) 山田・川端:浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究,同実験的研究,土木学会論報集,第325号,1982
4) 日野・山田・川端・太田:滑面・粗面および浸透層上の流れの抵抗則と乱れの構造,第24回水理講演会論集,1980

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, 13.00, 11.77
礫層厚 Δ (cm)	4, 8, 12
水深 h (cm)	2.6 ~ 14.7
フルード数 F_r	0.2 ~ 1.08
レイノルズ数 R_s	27000 ~ 231000

Table-2

項目	礫床材料	A	B	C	D
平均粒径 d_m (mm)		9.20	12.03	13.00	11.77
中央粒径 d_{50} (mm)		8.70	11.40	10.80	10.70
有効係 d_{10} (mm)		6.40	8.90	5.60	7.20
標準偏差 σ		1.239	1.150	1.672	1.297
比重 r_s		2.62	2.62	2.62	2.62
空けき率 (%)		40.2	40.2	40.2	40.2
球状率		0.708	0.699	0.714	0.705
ふるい分け係数		1.143	1.118	1.410	1.197

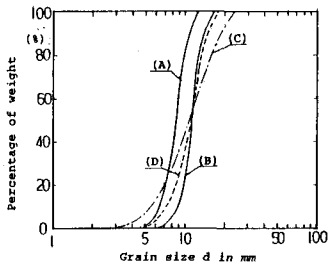


Fig. 1

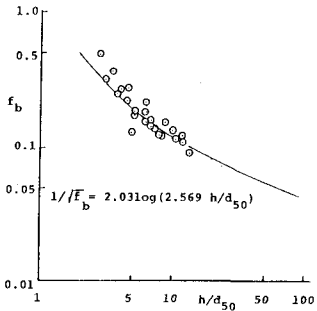


Fig. 2

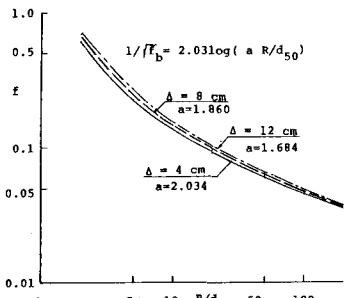


Fig. 3

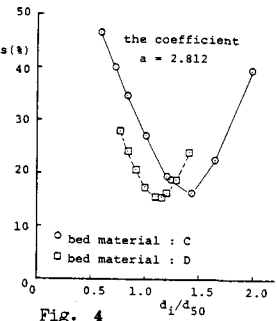


Fig. 4

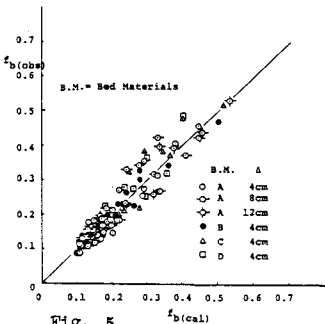


Fig. 5

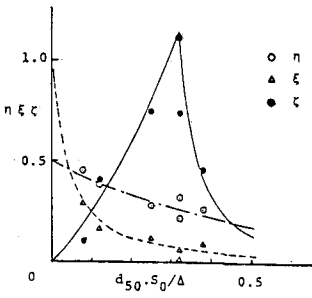


Fig. 6