

急勾配礫層河床における 流水抵抗に関する研究

STUDY ON FLOW RESISTANCE OVER STEEP-SLOPE GRAVEL-BED

門田章宏¹・鈴木幸一²・森一庸³

Akihiro KADOTA, Koichi SUZUKI, and Kazunobu MORI

¹正会員 博(工) 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

²正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

³学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科土木海洋工学専攻

In mountain streams, water flows through the gravel layer in normal discharge, because mountain river has a bed with steep slope and relatively large gravels. And, the water surface goes up over the gravel layer when the flood flow occurs or the flow discharge increases. These two flow characteristics are quite different from each other. The flow through the gravel layer seems to be similar to the flow through the porous media, whereas the flow over the gravel layer follows the law of flow resistance with the roughness of bed material. In this study, flume experiments were carried out in a steep slope channel with gravel layer and flow discharge and depth were measured. Also, Manning coefficient and Darcy-Weisbach friction factor were examined for the flow over the gravel layer.

Key Words : Manning Coefficient, Darcy-Weisbach Friction Factor, Gravel Layer, Steep-Slope Bed

1. はじめに

山地河道では、河床が混合砂礫などの広範な粒度分布で構成されており、リブやステップなど様々な河床形状が存在する¹⁾。また河床が急勾配であるために、河床構成礫と水深との比である相対水深が小さくなっているのが特徴である。通常流量が少ない時、水面は礫間に存在し流れを確認することができず、一方流量が多い洪水時には礫層上に水面が出現し、礫層上の流水抵抗は高く、礫による跳水、波と渦の発生によりエネルギー損失が増加する。一般的に表面流の流速分布は、開水路では水面が礫の周りで局所的に変化するため、対数分布則は成立しない。すなわち、山地河道の土砂流出量の推定には、礫河床の流水抵抗や流速分布を考慮することが必要である。

本研究では、急勾配礫層河床上の流水抵抗を検討するため、実験水路に礫層を敷き詰め、勾配・流量および礫の粒径などを様々に変化させた条件の下で、流量と水深を詳細に同時計測することにより、流量・水深間の流水抵抗の関係を検討した。水面が礫間にある場合には、

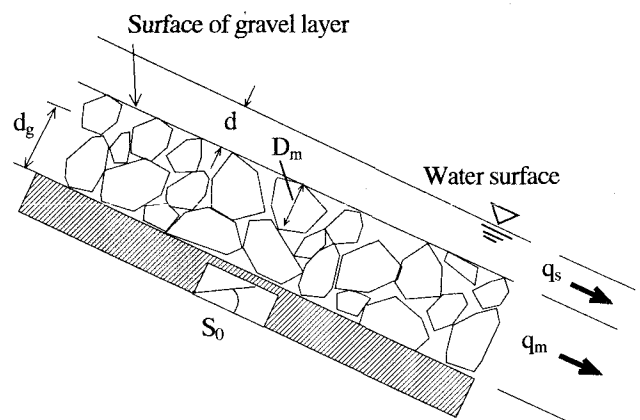


図-1 礫間流量と表面流量

水深と勾配と礫の浸透性の関数であるStephensonの式を用いて流量と水深との比較を行った。また、図-1に示すように礫層上に水面がある時はManningの粗度係数 n とDarcy-Weisbachの摩擦係数 $\sqrt{8/f}$ について従来の提案式との比較を行い、どのような水理条件の下で用いるべきかを議論した。

2. 礫層上の流水抵抗に関する従来の研究

2.1 礫間流の流水抵抗

Stephenson(1979)²⁾は礫間に水面がある時の断面平均流速 V について経験的に次のように表した。

$$V = n_p \left(\frac{S_0 g D}{K'} \right)^{1/2}, \quad q_m = V \times d_g \quad (1)$$

ここで、 n_p :空隙率、 S_0 :河床勾配、 g :重力加速度、 K' :無次元摩擦係数、 D :平均粒径で代表される礫直径、 q_m :単位幅流量、 d_g :水路床からの水深である。急勾配礫護床の時、Abtら(1987)³⁾は n_p の値を0.44~0.46とし、Stephensonは0.45と仮定した。またStephensonは河床材料による係数 K を次式で与えた。

$$K' = K + 800/R \quad (2)$$

ここで、 K は礫の形状によって変化するパラメータであり、碎石の場合 $K=4$ 、玉石の場合 $K=1$ である。また、 $R = dV/n_p v$ で定義されるレイノルズ数、 v :動粘性係数である。通常 $800/R$ の値は0.01より小さく、一般に $K' \approx K$ と仮定される。

2.2 礫層上の流水抵抗

礫層上に水面が存在する時の流水抵抗に関する従来の提案式について議論するため、次式に示すManningの粗度係数を実測値として用いる。

$$n = R^{2/3} S^{1/2} / V \quad (3)$$

ここで、 R :径深(礫床面からの水深)、 S :エネルギー勾配である。また、水深 d および表面流量 q_s を用いてManningの粗度係数 n は次式のように表される。

$$n = d^{5/3} S^{1/2} / q_s \quad (4)$$

ここで、表面流量 q_s は $q_s = q_t - q_m$ (ここでの q_m は水面が礫層表面と一致したときの礫間流量とする)と定義され、 q_t :全流量である。

一方、Andersonら(1970)⁴⁾は0.015~30cmの粒径で構成されている河床をもつ実験水路と自然河川からのデータを用いてManningの粗度係数を以下のように表した。

$$n = 0.0395(D_{50})^{1/6} \quad (5)$$

ここで、 D_{50} :50%砂礫粒径(ft)であり、この式は水深と、河床勾配に依存していないことが分かる。Jarret(1984)⁵⁾は河床勾配が0.002~0.039、河床構成代表粒径 D_{84} が9.1~80cmの実河川の現地観測のデータから以下の n の関係を導き出した。

$$n = 0.39 S_f^{0.38} R^{-0.16} \quad (6)$$

ここで、 S_f :河床の摩擦損失によって表される摩擦勾配、 R :径深(ft)である。Abtら(1987,1988)^{3,6)}はCodellら(1990)⁷⁾のデータを用いて、急勾配かつ $D_{50} = 26, 56, 104, 130, 157$ mmの粒径のManningの粗度係数を次式で表した。

$$n = 0.0456(D_{50} S)^{0.159} \quad (7)$$

ここで、 D_{50} :50%砂礫粒径(in)である。

また、UgarteとMadrid(1994)⁸⁾はBathurst(1985)⁹⁾とJarret(1984)⁵⁾のデータを用いて $R/D_{84} > 1$ の条件で n を次式のように表した。

$$n = \{0.183 + \ln(1.7462 S_f^{0.1581} / F_d^{0.2631})\} \times (D_{84}^{1/6} / g^{1/2}) \quad (8)$$

最近では、Abtら(1987)³⁾は中間粒径と河床勾配からManningの粗度係数の以下の関係式を導き出している。

$$n = 0.0273(D_{50} S_0)^{0.159} \quad (9)$$

ここで、 D_{50} :50%砂礫粒径(mm)である。

Riceら(1998)¹⁰⁾は上式(9)とManningの粗度係数の比較を行い、河床勾配の範囲が0.1~0.4では次式(10)による値とよく一致したことを示した。

$$n = 0.029(D_{50} S_0)^{0.147} \quad (10)$$

上式(6),(7)より、Manningの粗度係数に関するこれらの提案式には粒径のみならず、勾配の影響も取り入れられていることが分かる。

一方、Darcy-Weisbachの摩擦係数 f については、次の実験式(11)および(12)が提案されている。Hey(1979)¹¹⁾は均一な材料で構成された固定粗度境界をもつ直線水路上での乱流に対する抵抗を次式のように示した。

$$\sqrt{8/f} = 5.74 \log(aR/D) \quad (11)$$

ここで、 a は横断面形状の影響による係数で11.1~13.46をとり、 R :径深(m)、 D は3.5 D_{84} である(D_{84} :84%砂礫粒径(mm))。また、Bathurst(1985)⁹⁾は次式を提案し、河床勾配が0.0004~0.04となる場合の摩擦係数 $\sqrt{8/f}$ を以下のように推定した。

$$\sqrt{8/f} = 5.62 \log(d/D_{84}) + 4 \quad (12)$$

Riceら(1998)¹⁰⁾も摩擦係数 $\sqrt{8/f}$ についての式で上式(12)とほぼ同形のもを導出している。上述のように n 、 f に対しての式はいくつかあるが、これらの式は対象とした河道の河床材料の広範囲な粒径分布や河床勾配などの山地河道の流れの特徴がそれぞれの独自の状態であるため普遍的とはいえない。多くの場合で解析するためには十分な実験データを得、必要に応じて適切な条件、適切な流水抵抗の経験式を与える必要がある。

本研究では、多様な実験条件の下で礫間あるいは礫層

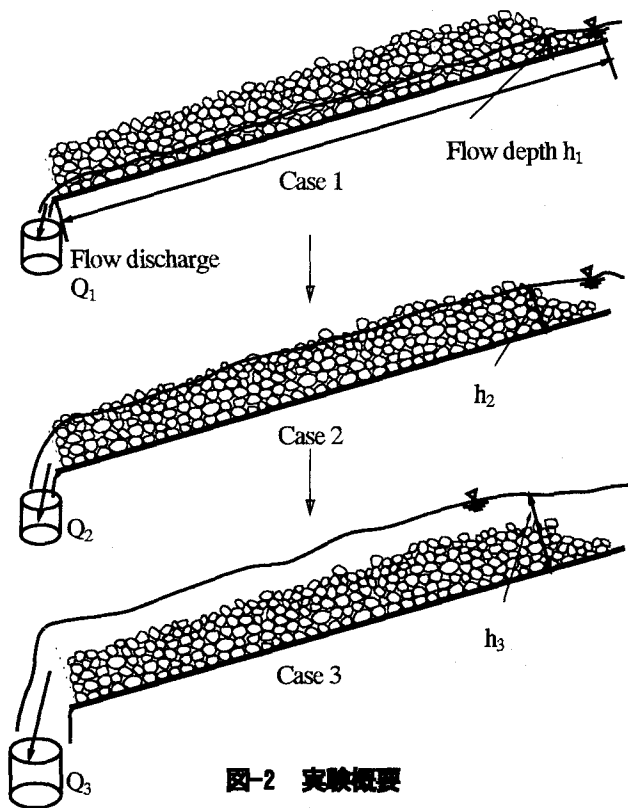


図-2 実験概要

上を流れる流量と水深の関係について議論を行った。礫間を流れる流水抵抗に関しては、Stephensonの式(1)を、礫層上を流れる流水抵抗に関してはManningの粗度係数 n とDarcy-Weisbachの摩擦係数についての式(4)と式(8),(11)および(12)を用いて実験的検証を行った。

3. 礫層河床の流水抵抗に関する実験

3.1 実験の概要

実験は長さ10m、水路幅15cm、深さ30cmの循環式可変勾配型直線水路を用いて行われた。側壁が透明ガラスでできており、実験中の水深や流砂の動きを見ることが可能である。また、通水流量は、パソコンで制御することにより最大40ℓ/sまで任意の流量を設定可能であり、本実験では約0.1ℓ/s～18ℓ/sの範囲で随時変化させた。

本研究では平均粒径 $D_m = 2.5, 3.5, 4.5\text{cm}$ の3種類の礫を使用し、礫は下流端から上流の長さ6mにわたって河道が平坦になるように、15cmの層で均一に敷き詰め、礫の粒径、勾配に応じてそれぞれ実験が行われた。実験はそれぞれの礫層に対して、勾配1/20～1/200までの10種類の勾配を設定し合計30ケースの詳細な実験を行った。実験方法としては、図-2のCase1に示すように1.0ℓ/s以下の流量の時は、精度を保つため流出する流水を水路下流端で取水することで測定し、またCase2, Case3のような比較的大きな流量時には流量制御パソコンで流量を測定し、それぞれの水位を同時測定した。水位については上流端から流下方向に10cm間隔で50ポイント測定し、水路に

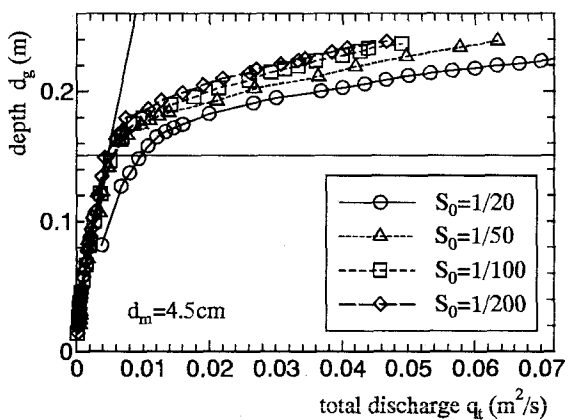
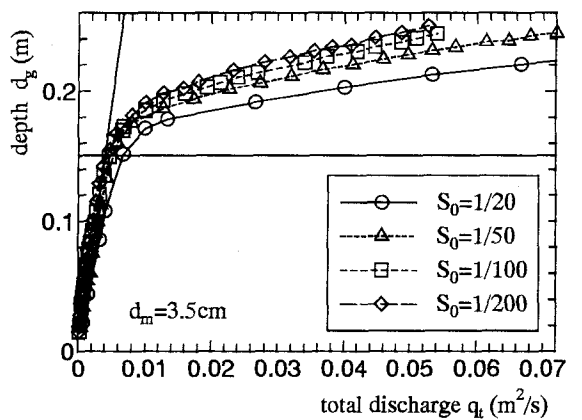
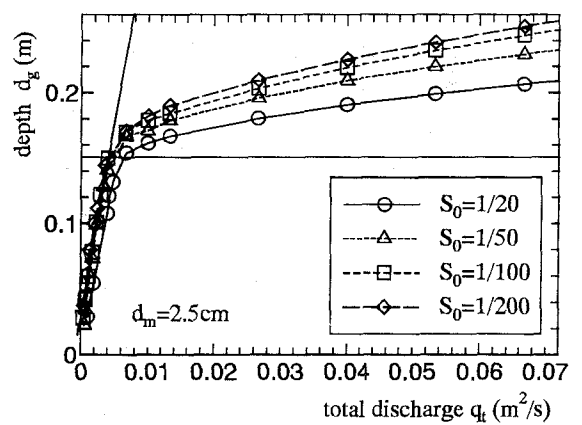


図-3 水深と流量の関係

よる影響を比較的受けない上流端から100cmの地点と390cmの地点の区間である290cmの平均化した値を平均水深とした。

3.2 実験結果および考察

水面が礫間にある場合、礫間を流れる場合の流量と水深の関係を議論するために、図-3に全流量 $q_t = q_s + q_m$ の単位幅流量と礫層下面からの高さを示す河床 d_g との関係を示す。図の近似斜線から、礫層を通る流量はそれぞれの勾配に対して、水深が増加するにつれて僅かに増加し、流量の増加は礫の直径にほぼ比例していることが

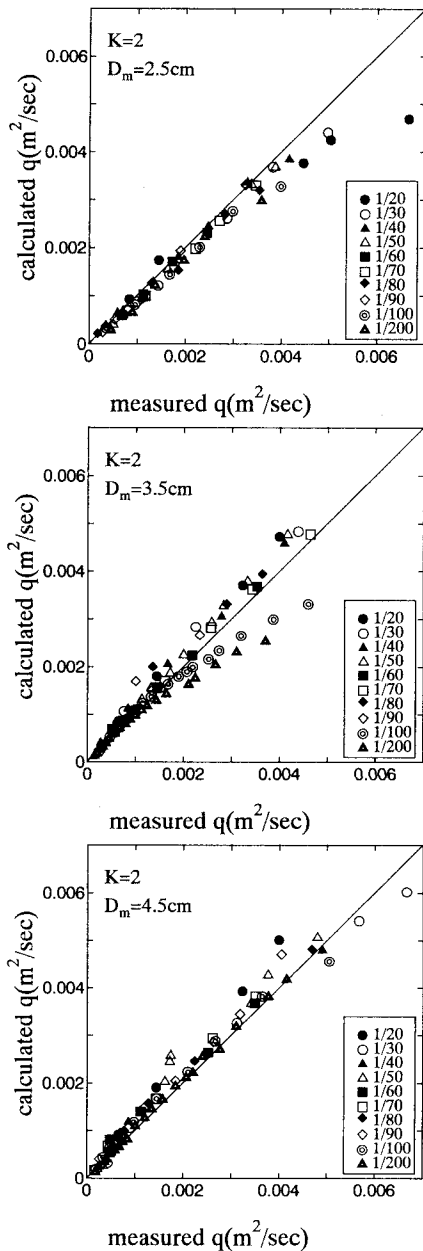


図-4 礫間流量の計算値と実測値の比較

分かる。これらの実験では、3種類の礫の間隙率を、1ℓビーカーに礫を敷き詰め、間隙部分に水を注ぎ、その間隙部分に貯まった水の体積を測定し、間隙部分の体積からビーカーの体積を除することで測定し、 $D_m = 2.5, 3.5, 4.5\text{cm}$ でそれぞれ $n_p = 0.44, 0.45, 0.42$ でほぼ一定であった。つまり、礫層を通る流量は空隙率に支配されず、水が実際に通る流路の隙間の大きさに支配されることが考えられる。また、同じ流量でも勾配が緩くなるに従って水深が高くなるのが確認された。Stephensonの式(1)によると、礫間平均流速は河床を構成している平均粒径の1/2乗に比例するために、礫が小さくなるにつれて流量が減少することが分かる。以上のことから、水面が礫間にある時は大きい礫の方が小さいものに比べ礫間流量が急速に増加することが分かる。また、各粒径とも水面が礫層表面を上回る時、流量の急激な増加が確認された。

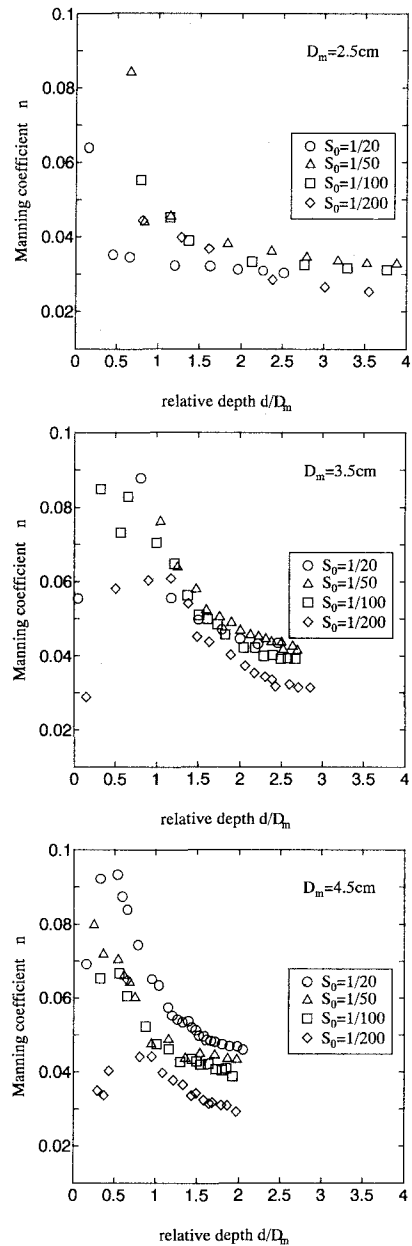


図-5 相対水深と粗度係数の関係

図-4は礫間を流れる流量の実測値とStephensonの式(1)を使った計算値との比較を示したものである。式(1)の河床材料の形状によるパラメータ K は、玉石を用いる場合 $K=1$ 、碎石を用いる場合 $K=4$ と定義されている²⁾。本実験では、河床材料として用いた礫は重信川中流域から上流域の河川敷より採取したものであるため $K=2,3$ で適合すると考えられる。その結果、計算値は $K=2$ の方が実験値との一致が見られた。したがって、パラメータ K が河床材料に対して適切に与えられるならば、水面が礫間にある時はStephensonの式を使って正確に流量の予測を計算できることが分かる。また、空隙率 n_p とレイノルズ数 R はより正確に流量を予測するために重要であると考えられる。

図-5に礫層上の相対水深 d/D_m と式(4)から計算されるManningの粗度係数 n の関係を示す。ここで、前述したように、礫間を通る流量 q_m は、水面が礫層の表面に

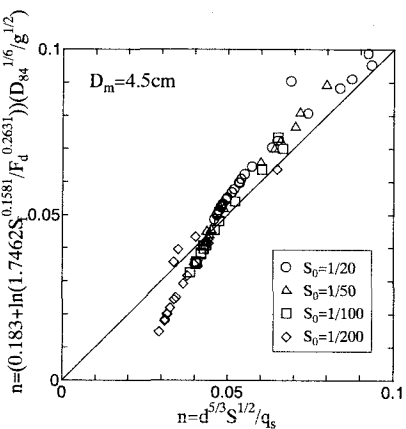
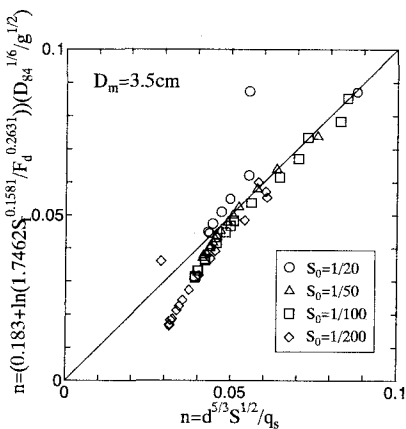
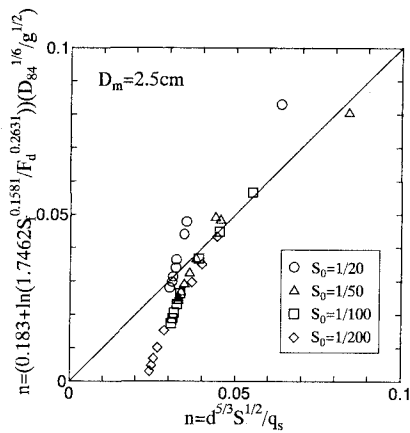


図-6 粗度係数の実測値と計算値の比較

等しい時の満間流量として定義し、実測値で得られた全流量 q_t から差し引いたものを表面流量 q_s としている。図より各粒径ともに、相対水深 d/D_m が小さくなるにつれ河床の粗度の影響を直接に受けるため、粗度係数 n は大きな値をとることが確認される。また、粗度の影響が小さくなる相対水深が1.5以上の時、粗度係数 n はほぼ一定になる傾向があることが分かる。さらに、水路勾配が急勾配になるほど同じ相対水深でも n の値は大きくなる傾向が見られる。

図-6は式(4)の実測値 n と式(8)の計算値 n との比較を示したものである。図より各粒径とも粗度係数が0.05以下に対しては計算値の方が小さくなる傾向にあるが、0.05以上に対しては実測値とよく一致し、式(8)による n

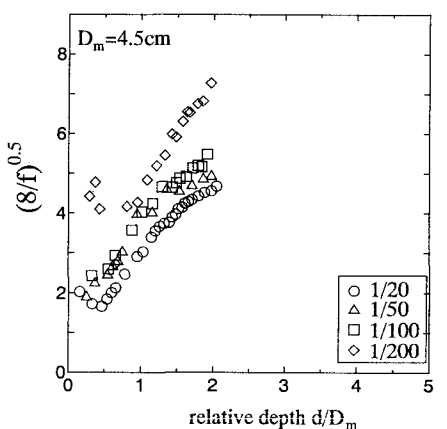
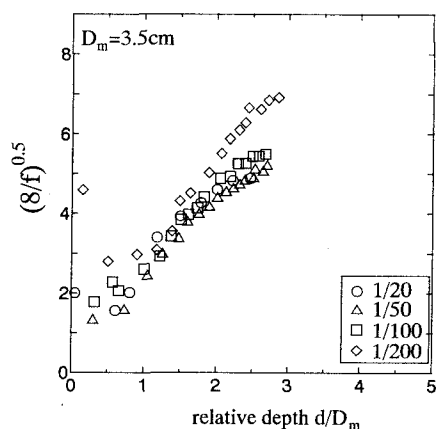
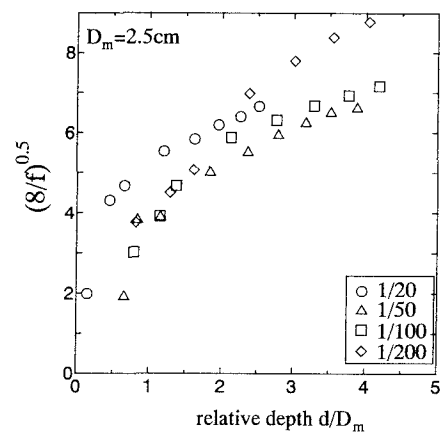


図-7 相対水深と摩擦係数の関係

の評価が有効であることが確認される。

図-7は相対水深 d/D_m と Darcy-Weisbach の摩擦係数 $\sqrt{8/f}$ の関係を示したものである。どの粒径でも摩擦係数は相対水深とともに増加するが、急勾配($>1/100$)では相対水深が2程度で摩擦係数の変化が緩くなる傾向があるのに対し、緩勾配($1/200$)では相対水深が低いと摩擦係数が一定にならないといった違いが見られる。図-8は図-7の相対水深を対数で表し、HeyとButhurstによる提案式と対数分布則による値を比較し表したものである。なお、図(a)は $D_m = 2.5\text{cm}$ に対しての急勾配水路、図(b)は $D_m = 3.5\text{cm}$ と 4.5cm に対しての急勾配水路($>1/100$)、図(c)は緩勾配水路に対して3種類の全ての粒径を併せて示している。急勾配水路では、実測値はHeyの式(11)の

$\alpha=11.08$ と 13.46 の間に存在し、特に、 $D_m=4.5\text{cm}$ と 2.5cm に対しては、実測値はBathurstの式(12)との良好な一致が見られる。これらの結果から急勾配では式(11),(12)によって摩擦係数 $\sqrt{8/f}$ が予測できることが確認された。一方緩勾配(1/200)の場合、礫護床であっても、式(11),(12)から大きくはずれ、対数分布則に近づく傾向にあることが確認される。以上のことから急勾配礫床河川における流水抵抗を議論する場合には式(11),(12)が、本研究の多くの実験条件から有効であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、礫層河床上の流れに関して、勾配、流量および粒径などを多様に変化させた実験を行い、流水抵抗に関する検討を行い、礫間の流れに関してはStephensonの式を、礫層上の流れに関してはManningの粗度係数 n とDarcy-Weisbachの摩擦係数 $\sqrt{8/f}$ を従来から提案されている経験式に基づいて実験的に考察した。

結果より、Stephensonの式は自然河川から採取して作られた礫層に対しては係数 K ($=2$)の適した値を使用することによって礫間を流れる流量を正しく推定できることが確認された。また、HeyとBathurstの摩擦係数を表す式は1/100以上の勾配を持った急勾配河床での礫層の流れに対して適用でき、緩勾配($S_0=1/200$)の時、流水抵抗は従来の対数分布則で表すことができるものと考えられる。

参考文献

- 1) 竜澤宏昌, 林日出喜, 長谷川和義, 溪流の小規模河床形態に関する研究, 土木学会論文集, 第52巻, pp.83-101, 2000
- 2) Stephenson, D., (1979). Rockfill in hydraulic engineering. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- 3) Abt, S. R. et al., (1987). Development of riprap design criteria by riprap testing in flumes, Phase 1, NUREG/CR-4651, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- 4) Anderson, A. G., Paintal, A. S. and Davenport, J. T., (1970). Tentative design procedure for riprap lined channels, NCHRP Rep. 108, Hwy. Res. Board, Nat. Acad. Of Sci.-Nat. Acad. Of Engrg. Washington, D.C.
- 5) Jarret, R. D., (1984). Hydraulics of high gradient streams, J. Hydr. Engrg., ASCE, 110(11): 1519-1539.
- 6) Abt, S. R., Wittler, R. J., Ruff, J. F., and Khattak, M. S. (1988). Resistance to flow over riprap in steep channels. Water Resour. Bull., 24(6), 1193-1200.
- 7) Codell, R. B., Abt, S. R., Johnson, T., and Ruff, J. (1990). Estimation of flow through and over armored slopes. J. Hydr. Engrg., ASCE, 116(10), 1252-1269.

- 8) Ugarte, A. and Madrid, M., (1994). Roughness coefficient in mountain rivers, Proc. Hydr. Engrg., '94 ASCE Reston, Va. : 652-656.
- 9) Bathurst, J. C., (1985). Flow resistance estimation in mountain rivers, J. Hydr. Engrg., ASCE, 111(4): 625-643.
- 10) Rice, C. E., Kadavy, K. C. and Robinson, K. M., (1988). Roughness of loose rock riprap on steep slopes, J. Hydr. Engrg., ASCE, 124(2): 179-185.
- 11) Hey, R. D., (1979). Flow resistance in gravel-bed rivers, J. Hydr. Engrg., ASCE, 105(4): 365-379.

(2000. 10. 2受付)

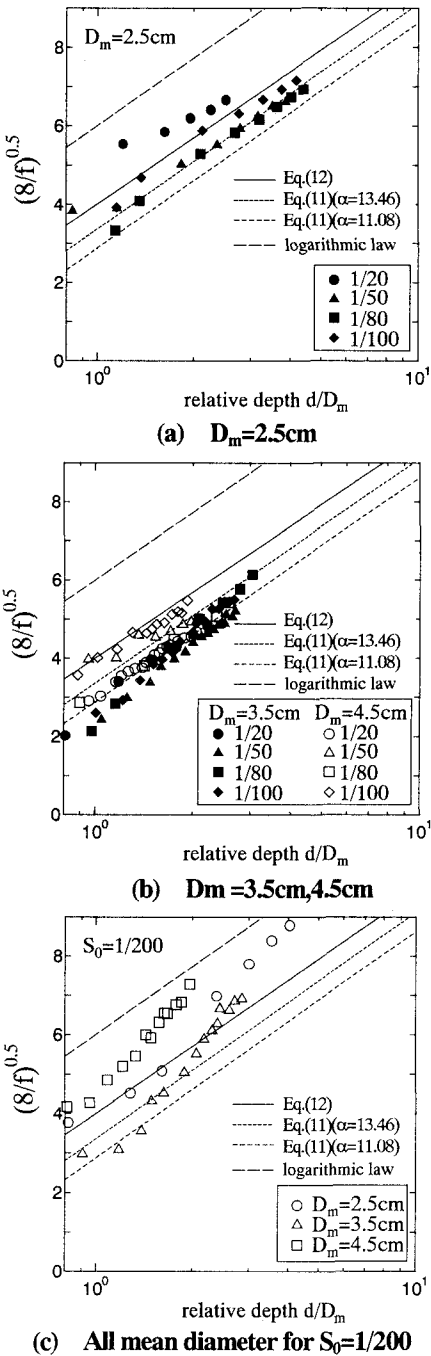


図-8 相対水深と摩擦係数、提案式の関係