

徳島大学 工 員 岡 邦 健 士
徳島大学 学生員 O 速 水 正 樹

1. まえがき: 山地河道の大きい特徴の1つに、河床に大径の石礫が突起して散在している点がある。これら大径石礫は、大出水時を除いてほとんど移動することがなく、流水に対しては、いわゆる large-scale roughness として作用する。また、粒径が比較的小さい範囲に限られる流送土砂に対しては、遮へい効果や移動経路の蛇行化などに代表される著しい影響を及ぼし、その流砂量特性中・下流の冲積部におけるものとはかなり異なってくると思われる。しかしながら、前者のような形態の流砂に関する知見は十分ではないのが現状である。

本文は、大径石礫をもつ河床を細砂と粗大な銑鉄球からなる二粒径混合床でモデル化して行、た基礎的実験の結果を報告するとともに、この種の移動床における有効掃流力の評価法について若干の考察を行、たものである。

2. 二粒径混合床による実験: 幅 0.4m、長さ 14.6m の勾配可変水路上に 表-1. モデル河床の諸元

まず直径 6.0mm の銑鉄球を所定の様式で配置し、ついでそれらの露出高さが所定の値となるよう、粒径範囲 1.0~1.4mm (平均粒径 1.2mm)、比重 2.6 の珪砂を一様厚で敷き詰めたものをモデル河床とした。表-1 にその諸元を示している。ここに、配置密度: 全銑鉄球の水平投影面積と河床面積との比であり、支配面積率: 銑鉄球を砂面に一致する平面で切るときの全断面積と河床面積との比である。また、詳細は講演時に述べるが、球の配置にはある程度のランダム性をもたせた。以上のような河床について珪砂の掃流砂量特性を調べる実験を行、たが、比較資料を得るために、珪砂だけの河床についても同様な実験を実施した(以下においては後者を一様砂床と呼んでいる)。

つぎに、実験結果を述べる。一様砂床と二粒径混合床の実験資料を(重 $\sim$ Γ_{*})関係図上で整理したのが図-1 である。ここに、 $\Phi \equiv g_0 / \sqrt{Sg d^3}$ 、 $\Gamma_{*} \equiv U_*^2 / Sg d$ であり、 g_0 : 単位幅、単位時間当りの掃流砂量、 U_* : 摩擦速度、 S : 珪砂の水中比重、 d : 珪砂の平均粒径、 g : 重力の加速度。なお、 U_* は、一様砂床の場合には河床がほぼ平坦であったので $U_* = \sqrt{g h_0}$ (h_0 : 水深、 h_0 : 河床勾配)により算定し、一方、二粒径混合床の場合には、露出した銑鉄球の存在を考慮して(3)式のオ1式により算定した。図中の曲線は、無次元限界掃流力 Γ_{*c} を 0.06 とする場合の芦田道上⁷⁾の流砂量曲線である。

さて、一様砂床の描点群は芦田道上式による曲線とよく一致しており、本式の適合性が裏付けられている。一方、二粒径混合床の場合には、一様砂床に比して、同一の Γ_{*} に対する Φ の値が著しく小さくなっているとともに、描点群の分散もまた著しい。さらに、この分散の傾向と河床条件の関係

を調べると、流砂量特性に一次的な影響を及ぼすものは露出高さである。これが大きいほど同一の Γ_{*} に対する Φ の値が著しく小さくなっているが、本実験の範囲内では球の配置密度の変化による流砂量特性の相違はさほど顕著に現れていない。以上のように二粒径混合床の(重 $\sim$ Γ_{*})関係はかなり複雑に変化するが、河床砂をもつ流れの場合と同様に、流砂に有効な摩擦速度 U_{*e} を何らかの方法で評価すれば各モデル河床の描点群がよいまとまりをもつとともに、一様砂床のそれに一致させることも可能になるかも知れない。そこで、次節においては、この点について理論的考察を行、てみよう。

路床名	配置密度	露出高さ (cm)	支配面積率
A-1	0.780	1	0.430
A-2	0.780	2	0.690
B-1	0.461	1	0.261
B-2	0.461	2	0.418
B-3	0.461	3	0.461
B-4	0.461	4	0.418
C-1	0.351	1	0.194
C-2	0.351	2	0.311
C-3	0.351	3	0.351
C-4	0.351	4	0.311

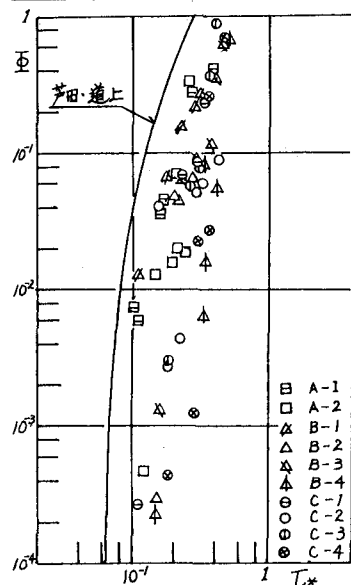
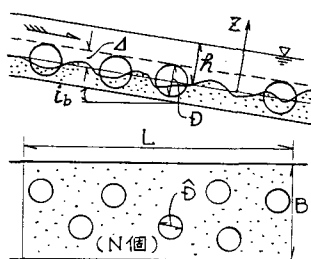


図-1. 実験結果(重 $\sim$ Γ_{*} 関係)

3. 有効摩擦速度の算定式: 分配 l_b , 幅 B , 長さ L の河床が N 個の球状粗大礫(直径 $\hat{D}$)と粒径 d の均一砂で構成され, 礫の頂点は平均砂面位から一様に Δ だけ露出しているとする。この河床上に水深 h の等流があるとき, これに作用する力の釣合式は, (1)式ようになる。ここに, P : 水の密度, τ_e : 砂面上の剪断応力, A_s : τ_e が作用する面積, $\bar{A}_p$: 粗大礫1個あたりの形状抵抗に有効な面積, C_D : 抗力係数, U_b : 平均砂面位からの高さ $z=\Delta$ での流速, V : 粗大礫の露出部の容積であって, $V=\pi\hat{D}^3\{6\Delta/\hat{D}-(1-2\Delta/\hat{D})^3-1\}/24$ と書ける。(1)式を少し変形後, $U_{b0}=\sqrt{gRl_b}$, $U_{be}=\sqrt{\tau_e/\rho}$, $R_N=N/B\bar{L}$ とおけば(2)式となる。次に, (2)式



の $U_b, \bar{A}_p$ および A_s/BL の評価法を考える。

$$\rho g(BLh - NV)l_b = \tau_e A_s + N P C_D \bar{A}_p U_b^2 / 2 \quad (1)$$

i) U_b について: large-scale roughnessをもつ流れの流速

$$U_b^2 = U_{b0}^2 (1 - R_N V / R) = U_{b0}^2 (A_s / BL) + R_N C_D \bar{A}_p U_b^2 / 2 \quad (2)$$

の鉛直分布は割線位置周辺の粗度配置によって大きく変化

$$U_{mz} / U_{be} = (1/\phi) \ln[\Delta/d(1 + \gamma \tau_e^*)] + 6.0 \quad (3)$$

するため, 代表となし得るものがなく, U_b の定式化は困難

$$U_b / U_{be} = (1/\phi) \ln[\Delta/d(1 + \gamma \tau_e^*)] + 6.0 + 1/\phi \quad (4)$$

だが, 便宜的に $z \leq \Delta$ の領域の平均流速 U_{mz} と U_{be} の関係が

$$\phi = 0.6 + 0.2 \sin(4\theta - \pi/2) \quad (5)$$

(3)式のように表わせると仮定し(2.2~4程度の係数), これに基づき U_b を(3)式のように表示してみよう。ここに ϕ は流速勾配に関する係数であって, 粗大礫の支配面積率 θ がかなり小さい場合には $\phi \approx k$ (Kármán定数)となり, θ が最大($\theta_{max} \approx \pi/4$)のとき $\phi \approx 0.8$ となることを参考にすると(4)式のような近似式が与えられる。なお, 以上のような取り扱いにはまさに便宜的なものであって, 多くの問題を含んでいることは言うまでもない。

ii) $\bar{A}_p$ について: 個々の粗大礫の形状抵抗に有効な面積 A_p は, その上流側にある粗大礫との位置関係により異なる。すなわち, $\bar{A}_p$ の算定においては遮蔽効果を考慮せねばならない。さて, 取り扱いを容易にするために, N 個の粗大礫は図3に示した一辺 $\sqrt{BL/N}$ の正方形内に1個づつ配分され, その中では一様な存在確率でランダムな位置をとるとする。このとき, 図3に示された2個の礫の流れ方向の中心間隔 X および河幅方向の中心間隔 Y の確率密度関数 $f_x(x), f_y(y)$ は(6)~(8)式ようになる。さらに, 遮蔽がない場合の有効面積(礫の露出部の流れ方向への投影面積そのもの)を A_Δ と

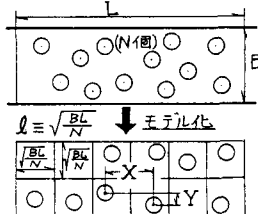


図-3. 粗大礫の配置

A_p に対し(9), (10)式を与えてみる。ここに, α : wake長

$$0 \leq x \leq l: f_x(x) = x/l^2 \quad (6)$$

に関する係数, $\hat{D}$: 礫を平均砂面で切った断面の直径。

$$l \leq x \leq 2l: f_x(x) = 2/l - x/l^2 \quad (7)$$

最後に, (6)~(10)式を用い, (11)式に従って $\bar{A}_p$ を求めると,

$$0 \leq y \leq l: f_y(y) = 2/l - 2y/l^2 \quad (8)$$

$$X \geq \alpha \Delta, \text{ all } Y \text{ おび } Y \geq \hat{D}, \text{ all } X:$$

その結果は l と $\alpha \Delta$ の関係に応じて(12)~(14)式となる。

$$A_p = A_\Delta \quad (9)$$

ただし, $P = \hat{D}/l$, $Q = \alpha \Delta/l$, $R = \hat{D}/\alpha \Delta$ である。

$$0 \leq x \leq \alpha \Delta, \quad 0 \leq y \leq \hat{D}: A_p = A_\Delta \{X/\alpha \Delta + (1 - X/\alpha \Delta)Y/\hat{D}\} \quad (10)$$

iii) A_s/BL について: $\bar{A}_p$ と同様な(6)~(8)の密度関数に

$$\bar{A}_p = \int_x \int_y f_x(x) f_y(y) A_p dy dx \quad (11)$$

基づく評価法もあるが, 実

$$\alpha \Delta \leq l: \bar{A}_p = A_\Delta (1 - PQ^2/2 - 4PQ + QP^2 + 2Q^2P - Q^2 + 2Q) \quad (12)$$

際の砂面状況を見ると, $A_s/$

$$l \leq \alpha \Delta \leq 2l: \bar{A}_p = A_\Delta (1 - PQ^2/8 - PQ + QP^2/8 - Q^2/3 - Q^2/3 + Q - QR/4 - M/3) \quad (13)$$

BL は, 1に近い係数を用

$$\alpha \Delta \geq 2l: \bar{A}_p = A_\Delta (5R/9 - RP/3 + P - 2P^2/3) \quad (14)$$

いて $A_s/BL = 1 - 5\theta$ とするのが

$$U_{be}^2 = \frac{U_{b0}^2 (1 - R_N V / R)}{(1 - 5\theta) + \frac{1}{2} R_N C_D \bar{A}_p \{ (1/\phi) \ln \frac{\Delta}{\alpha(1 + \gamma \tau_e^*)} + 6 + 1/\phi \}^2} \quad (15)$$

適当のように思われる。

$$U_{be}^2 = \frac{U_{b0}^2 (1 - R_N V / R)}{(1 - 5\theta) + \frac{1}{2} R_N C_D \bar{A}_p \{ (1/\phi) \ln \frac{\Delta}{\alpha(1 + \gamma \tau_e^*)} + 6 + 1/\phi \}^2} \quad (15)$$

ii)~iii)の議論の結果と(5)式より有効摩擦速度 U_{be} を表示すると(15)式ようである。

$$U_{be}^2 = \frac{U_{b0}^2 (1 - R_N V / R)}{(1 - 5\theta) + \frac{1}{2} R_N C_D \bar{A}_p \{ (1/\phi) \ln \frac{\Delta}{\alpha(1 + \gamma \tau_e^*)} + 6 + 1/\phi \}^2} \quad (15)$$

そして, $\alpha=2$, $\gamma=2$, $\zeta=1$, $C_D=0.5$ として図-1の実験結果を整理し直したのが

$$U_{be}^2 = \frac{U_{b0}^2 (1 - R_N V / R)}{(1 - 5\theta) + \frac{1}{2} R_N C_D \bar{A}_p \{ (1/\phi) \ln \frac{\Delta}{\alpha(1 + \gamma \tau_e^*)} + 6 + 1/\phi \}^2} \quad (15)$$

図-4である。本節の議論によっても当初の目的はある程度達し得ると思われる。

$$U_{be}^2 = \frac{U_{b0}^2 (1 - R_N V / R)}{(1 - 5\theta) + \frac{1}{2} R_N C_D \bar{A}_p \{ (1/\phi) \ln \frac{\Delta}{\alpha(1 + \gamma \tau_e^*)} + 6 + 1/\phi \}^2} \quad (15)$$

【参考文献】 1) 芦田道正: 土木学会論文集, 206号, 1972. 2) 水山: 京大工学部論文, 1977.

$$U_{be}^2 = \frac{U_{b0}^2 (1 - R_N V / R)}{(1 - 5\theta) + \frac{1}{2} R_N C_D \bar{A}_p \{ (1/\phi) \ln \frac{\Delta}{\alpha(1 + \gamma \tau_e^*)} + 6 + 1/\phi \}^2} \quad (15)$$

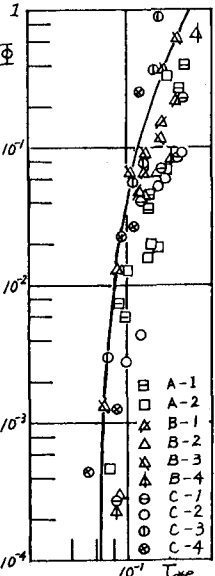


図-4. (15)式の検討