

混合砂礫の掃流砂量に関する研究
STUDY ON THE BED LOAD TRANSPORT OF SEDIMENT MIXTURE

中央大学理工学部 正員 林 泰造
(財)電力中央研究所 正員 ○尾崎 幸男
(財)電力中央研究所 正員 石橋 毅

1. はじめに

混合砂礫河床における粒径別の掃流砂量を予測する場合、最も重要な点は限界掃流力の評価にある。また、広い粒径範囲の砂礫河床では粒度分布の形状が掃流砂量に与える影響も解明しなければならない。

本報告は、掃流砂に関する揚力理論の立場から粒径別の限界掃流力を定式化し、前報の¹⁾一様粒径に対する掃流砂量式を混合粒径の粒径別掃流砂量式に拡張したものである。さらに、河床砂礫の粒度分布の特性を明らかにするとともに、²⁾実用的見地からの掃流砂量および有効摩擦速度の算定式を提案し、実際河川における現地実験結果との適合性を検討したものである。

2. 粒径別の限界掃流力

(1) 記号の定義

本研究で用いる基本的な記号を以下のように定義する。

$i_B q_B$: 容積単位単位幅当りの粒径別掃流砂量、 i_B, i_b : それぞれある粒径あるいは粒径範囲の砂粒が流水中および河床砂礫中に占める割合、 d_i : ある粒径あるいは粒径範囲の砂粒の平均粒径、 τ_{*i}, τ'_{*i} : 粒径別の無次元掃流力および有効掃流力、 τ_{*ci}, τ_{*cm} : 粒径別および河床砂礫の平均粒径 d_m の無次元限界掃流力、 u_*, u'_* : 摩擦速度および有効摩擦速度、 u_{*ci}, u_{*cm} : 粒径別および河床砂礫の平均粒径 d_m の限界摩擦速度。

また、次の関係がある。

$$\tau_{*i} = \frac{u_*^2}{(s-1)gd_i}, \quad \tau'_{*i} = \frac{u'^2_*}{(s-1)gd_i} \dots\dots(1) \quad \tau_{*ci} = \frac{u_{*ci}^2}{(s-1)gd_i}, \quad \tau_{*cm} = \frac{u_{*cm}^2}{(s-1)gd_m} \dots\dots(2)$$

(2) Einstein の遮蔽係数 ξ の物理的意味

Einstein (1950)³⁾ が混合砂礫河床の流砂量を表示する際に導入した遮蔽係数 ξ は、従来からその物理的意味が不明瞭であり、混合粒径の場合の流砂量を表わす係数としては不適當であると見なされてきたようである。ここで、Einstein 公式を上げると次式となる。

$$\phi_{*i} = \frac{1}{A_*} \frac{P_i}{1-P_i}, \dots\dots(3)$$

ここに、

$$\phi_{*i} \equiv \frac{i_B}{i_b} \phi \equiv \frac{i_B q_B}{i_b \sqrt{(s-1)gd_i^3}} \dots\dots(3a) \quad P_i = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-B_*\phi_* - (1/\eta_0)}^{B_*\phi_* - (1/\eta_0)} e^{-t^2} dt, \dots\dots(3b)$$

$$\phi_* = \xi Y (\beta^2/\beta_x^2) \phi = \xi Y (\beta^2/\beta_x^2) / \tau'_{*i}, \dots\dots(3c)$$

また、 ξ : 遮蔽係数、 $Y \beta^2/\beta_x^2$: 揚力の補正係数。

上式の遮蔽係数は、混合粒径の掃流砂量を表わすために実験的に導入されたものである。しかし、従来、河川における実測値や実験結果から、 ξ の影響が過大に現われることが指摘されている。

ところで、Einstein の遮蔽係数の物理的意味の不明確さの原因としては、式(3c)にみられるように、Einstein は遮蔽係数 ξ を次のように導入したためであろうと考えられる。すなわち、一様粒径に対して、

$$\phi_* = \phi (=1/\tau'_*), \dots\dots(4)$$

とおいたとき、混合粒径に対して、

$$\phi_* = \xi Y(\beta^2/\beta_x^2) \phi, \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表示した点にある。式(5)をみると、遮蔽係数 ξ は ϕ ($=1/\tau_{*i}$) の補正係数に見うけられるわけで、 ξ の性格がいまいである。しかし、前報¹⁾で示したように実験定数 B_* が限界掃流力と同格のもので、

$$B_* = 4 \beta_* \tau_{*c}, \quad \beta_* = 0.714, \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表わせることから、Einsteinの ξ は式(5)ではなく、 B_* から出てきたものと考えることができる。

いま、混合粒径の場合の B_* を B_{*i} と表わせば、式(6)と式(2)から、

$$B_{*i} = 4 \beta_* \tau_{*ci} = 4 \beta_* \tau_{*cm} \xi, \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、したがって、式(5)は、

$$\phi_* = Y(\beta^2/\beta_x^2) \phi, \quad \dots\dots\dots (8)$$

と表示すべきものであったことがわかる。ここで、式(7)の $4 \beta_* \tau_{*cm}$ が $d = d_m$ の一樣粒径のときの B_* に等しいから、式(7)は、

$$B_{*i} = B_* \xi, \quad \dots\dots\dots (9)$$

と書き直され、式(8)と式(9)を掛け合わせると、

$$B_{*i} \phi_* = B_* \xi Y(\beta^2/\beta_x^2) \phi, \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。この式は、結果的にはEinsteinの表示と一致することになるが、式(7)から次の重要な関係式を得る。

$$\xi = \tau_{*ci} / \tau_{*cm}. \quad \dots\dots\dots (11)$$

上式から、Einsteinの ξ は、式(5)のような無次元有効掃流力(あるいは揚力)の補正としてではなく、むしろ式(11)で表わされる粒径別の限界掃流力として厳然たる物理的意味を持っていたことがわかる。ところが、以前からEinsteinの補正は過大であることが示されており、最近ではEgiazaroffの式やその修正式が用いられている。

(3) 揚力理論に基づく新たな遮蔽係数 ξ_i ($=\tau_{*ci}/\tau_{*cm}$) の誘導

Einsteinは粒径 d_i に対する揚力を次のように表わした。

$$L_i = (1 + \eta) C_L (1/2) \rho u_y^2 A_2 d_i^2, \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 C_L : 揚力係数、 A_2 : 定数、 u_y : 理論河床面から $y = 0.35X$ の高さで測った流速。

いま、混合砂礫の河床面は完全粗面の状態にあり、 $k_s = d_{65} = d_m$ と置けるものとする、 u_y は、 $y = 0.35X = 0.27 d_m$ の位置での流速となり、粒径 d_i の砂粒に働く揚力と水中重量比は次式のようになる。

$$\frac{L_i}{W_i} = (1 + \eta) \frac{R' I_e}{(s-1) d_i} \frac{C_L A_2 (5.75)^2 (\log_{10} 8)^2}{2 A_1} = \left(\eta_* + \frac{1}{\eta_0} \right) \frac{1}{B_*} \frac{R' I_e}{(s-1) d_i} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $W_i = A_1 (s-1) \rho g d_i^3$ 、 R' : 有効径深、 I_e : エネルギー勾配、 A_1 : 定数。

まず、平均粒径 d_m に対する限界状態は次式で表わされる。

$$\frac{L_{cm}}{W_m} = 4 \frac{1}{B_*} \left[\frac{R' I_e}{(s-1) d_m} \right]_{cr.} = 4 \frac{1}{B_*} \beta_* \tau_{*cm} = 1. \quad \dots\dots\dots (14)$$

次に、 $d_i \leq d_m$ の粒径 d_i の砂粒については、遮蔽係数 $\xi_i = \tau_{*ci} / \tau_{*cm}$ を導入して、

$$\frac{L_{ci}}{W_i} = 4 \frac{1}{B_* \xi_i} \left[\frac{R' I_e}{(s-1) d_i} \right]_{cr.} = 1, \quad \dots\dots\dots (15)$$

と表わす。ここで、式(14)の近似を行うと、式(15)と(14)から式(17)が得られる。

$$\left[\frac{R' I_e}{(s-1) d_i} \right]_{cr.} \simeq \left[\frac{R' I_e}{(s-1) d_m} \right]_{cr.} \left(\frac{d_m}{d_i} \right), \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{L_{ci}}{W_i} = 4 \frac{1}{B_*} \beta_* \tau_{*cm} \frac{1}{\xi_i} \frac{d_m}{d_i} = 1. \quad \dots\dots\dots (17)$$

したがって、式(17)と式(14)から次式を得る。

$$\xi_i = 1 / (d_i / d_m), \text{ for } d_i / d_m \leq 1.0. \quad (18)$$

一方、 $d_i \geq d_m$ の粒径 d_i の砂粒に対しては、揚力係数 C_L の定義からいって、 $y = 0.27 d_m$ の流速よりもむしろ $y = 0.27 d_i$ の位置での流速を用いるべきと考えて、揚力を式(12)に代えて次式に改める。

$$L_i = (1 + \eta) C_L (1/2) \rho u_y^2 A_2 d_i^2, \quad y = 0.27 d_i. \quad (19)$$

式(19)を用いると、粒径 d_i ($\geq d_m$) の砂粒に働く揚力と水中重量比は、

$$\frac{L_i}{W_i} = \left(\eta_* + \frac{1}{\eta_0} \right) \frac{1}{B_*} \left[\frac{\log_{10} (8 d_i / d_m)}{\log_{10} 8} \right]^2 \frac{R' I_e}{(s-1) d_i}, \quad (20)$$

となる。上式において、限界状態を次のように表わす。

$$\frac{L_{ci}}{W_i} = 4 \frac{1}{B_* \xi_i} \left[\frac{R' I_e}{(s-1) d_i} \right]_{cr.} = 4 \frac{1}{B_*} \left[\frac{\log_{10} (8 d_i / d_m)}{\log_{10} 8} \right]^2 \left[\frac{R' I_e}{(s-1) d_i} \right]_{cr.} = 1. \quad (21)$$

したがって、式(21)より次式が得られる。

$$\xi_i = (\log_{10} 8 / \log_{10} (8 d_i / d_m))^2, \text{ for } d_i / d_m \geq 1.0. \quad (22)$$

故に、本研究による遮蔽係数 ξ_i は以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \xi_i \left(\equiv \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} \right) &= \frac{1}{d_i / d_m}, & \text{for } d_i / d_m \leq 1.0, \\ \xi_i &= \left[\frac{\log_{10} 8}{\log_{10} (8 d_i / d_m)} \right]^2, & \text{for } d_i / d_m \geq 1.0. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

図-1に、Einstein (1950)⁵⁾、Egiazaroff (1965)⁴⁾、浅田・石川 (1972)⁵⁾、芦田・道上 (1972)⁶⁾、および本研究による式(23)の遮蔽係数の比較を示した。また、図-2は、式(23)と実験値^{4) 6) 7)}との比較である。これらの図から、 $d_i / d_m \leq 1.0$ の小さい粒径の砂粒は動きにくく ($\tau_{*ci} \geq \tau_{*cm}$)、 $d_i / d_m \geq 1.0$ の大きい粒径の砂粒は動きやすい ($\tau_{*ci} \leq \tau_{*cm}$) ということがわかる。

また、図-2をみると、本研究の式(23)は、 $d_i / d_m \leq 1$ ではかなり良い結果を与えているが、 $d_i / d_m \geq 1$ ではやや小さめの値を示している。

3. 混合砂礫の掃流砂量式

(1) 一様粒径の掃流砂量式

筆者らは前報¹⁾において一様粒径に対する掃流砂量式として次式を導いた。

$$\Phi = 6.0 Pa I \tau_*^{3/2}, \quad (24)$$

$$\text{ここに, } \Phi \equiv q_B / \sqrt{(s-1) g d^3}, \quad (24a)$$

Pa : 1つの砂粒を同様な砂粒で置き換えるのに要する時間中に砂粒が動き出す確率、 I : 砂粒の跳び出し初速度およびステップ長に関する関数、でそれぞれ以下のように表わされる。

$$Pa = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\eta_*2}^{\eta_*1} e^{-t^2} dt, \quad (24b)$$

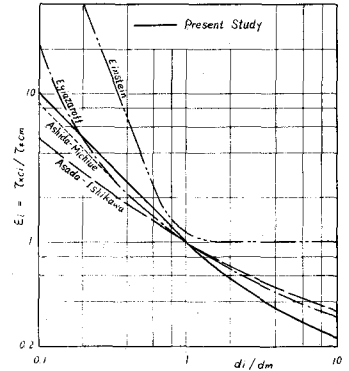


図-1 遮蔽係数の比較

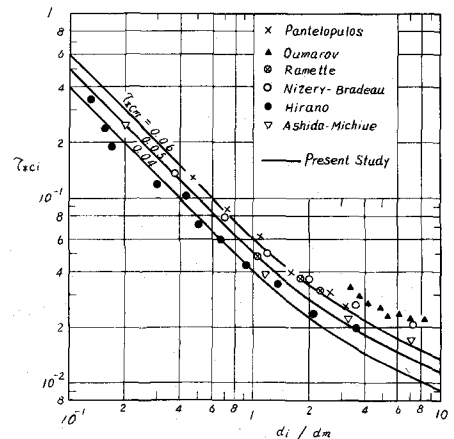


図-2 式(23)と実験値との比較

$$I = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{1}{2} e^{-\eta_{*1}^2} + \frac{1}{2} e^{-\eta_{*2}^2} - \eta_{*1} \int_{\eta_{*1}}^{\infty} e^{-t^2} dt + \eta_{*2} \int_{-\infty}^{\eta_{*2}} e^{-t^2} dt \right\}, \dots\dots\dots (24c)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_{*1} &= 4 \beta_* \tau_{*c} / \tau_{*i}' - 1 / \eta_0, \quad \eta_{*2} = -4 \beta_* \tau_{*c} / \tau_{*i}' - 1 / \eta_0, \\ \beta_* &= 0.714, \quad \eta_0 = 1/2. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24d)$$

いま、式24の定数6.0は混合砂礫河床においても変わらないものと仮定する。この仮定は、混合砂礫の全掃流砂量は平均粒径を用いて式24から算出することができる、ということの意味する。

(2) 粒径別の掃流砂量式

混合砂礫河床における混合効果を式23の遮蔽係数（すなわち、粒径別の限界掃流力）のみで表わすことにして、一様粒径の掃流砂量式24を混合砂礫河床の粒径別掃流砂量式に拡張すると次式が得られる。

$$Q_{*i} = 6.0 P_{ai} I_i \tau_{*i}'^{\frac{3}{2}}, \dots\dots\dots (25)$$

ここに、
$$P_{ai} \equiv i_B q_B / [i_b \sqrt{(s-1) g d_i^3}], \dots\dots\dots (25a)$$

$$P_{ai} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\eta_{*2i}}^{\eta_{*1i}} e^{-t^2} dt, \dots\dots\dots (25b)$$

$$I_i = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{1}{2} e^{-\eta_{*1i}^2} + \frac{1}{2} e^{-\eta_{*2i}^2} - \eta_{*1i} \int_{\eta_{*1i}}^{\infty} e^{-t^2} dt + \eta_{*2i} \int_{-\infty}^{\eta_{*2i}} e^{-t^2} dt \right\}, \dots\dots\dots (25c)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_{*1i} &= 4 \beta_* \tau_{*cm} \xi_i / \tau_{*i}' - 1 / \eta_0, \\ \eta_{*2i} &= -4 \beta_* \tau_{*cm} \xi_i / \tau_{*i}' - 1 / \eta_0, \\ \beta_* &= 0.714, \quad \eta_0 = 1/2, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25d)$$

ただし、 $\xi_i (= \tau_{*ci} / \tau_{*cm})$ は式23より計算されるものとする。

また、式25は次式のように書き直される。

$$q_{B* i} = 6.0 P_{ai} I_i \tau_{*i}', \dots\dots\dots (26)$$

ここに、

$$q_{B* i} \equiv i_B q_B / [i_b u_*' d_i], \dots\dots\dots (26a)$$

上式において、 $\tau_{*i}' > \tau_{*ci}$ のとき、

$$P_{ai} \approx 1.0, \quad I_i \approx 2.0, \dots\dots\dots (27)$$

となるから、

$$q_{B* i} \approx 12 \tau_{*i}', \dots\dots\dots (28)$$

を得る。この式は、混合砂礫河床の粒径別掃流砂量の特徴である $\tau_{*i}' > \tau_{*ci}$ のときの収れん線を表わしている。したがって、本研究の式25あるいは式26は十分に混合粒径の場合の掃流砂量の特徴を反映しているといえよう。

さて、式26と実験値（平野⁷⁾、芦田・道上⁶⁾、浅田・石川⁸⁾）との比較を示すと、図-3および図-4のようになる。

図-3および図-4の比較から、本研究の理論結果は、粒径のかなりの範囲にわたって実験値と良い一致をみせているものと考えられる。ただし、 $\tau_{*i}' = \tau_{*ci}$ とした。

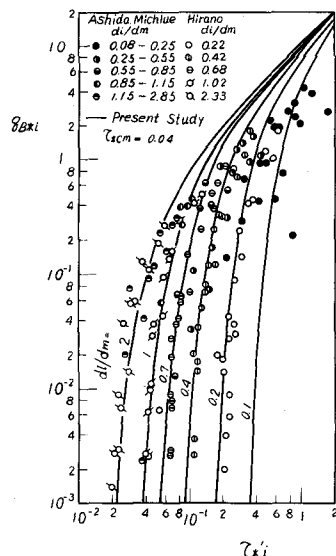


図-3 式26と実験値との比較

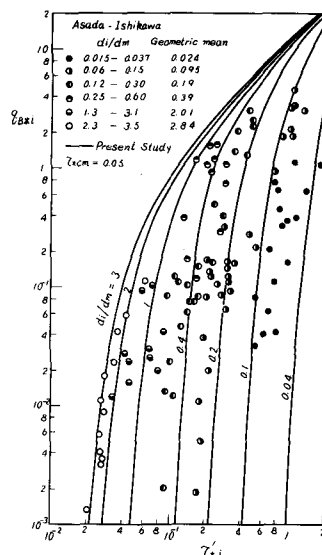


図-4 式26と実験値との比較

4. 現地実験と河床砂礫の粒度分布の特性

(1) 現地実験の概要

実験はT川第4調整池付近の河床を開削し、幅1.5 m、長さ8.5 m、高さ1.5 mの矩形断面水路と、水路終端には幅4 m、長さ1.5 m、高さ1.5 mの沈砂池を作り、昭和43年8月および11月の2回にわたって行ったものである。

実験流量は1～6 m³/sの範囲で第4調整池の水を使用した。また、用いた砂礫は水路付近の砂州に堆積している砂礫のうち最大粒径50 cm程度の混合砂礫である。

実験は非定常状態で2ケース(8月と11月)行い、ケース1(Run 1～27)は河床勾配1/50前後、ケース2(Run 1～18)は河床勾配1/70前後で行われた。ただし、上流端からの給砂は無い。

流砂量は沈砂池に沈殿した砂礫を計量することにより求めた。

なお、実験時間は沈砂池の容量および流砂量の計量等の制約から、10～20分程度とした。その他実験の詳細については文献2)を参照されたい。

(2) 河床砂礫の粒度分布の特性

粒度分布の一般的な特性を明確にするため、ここで図-5に示すように粒度分布形状を単純化して考察する。

これまで粒度の分布の程度を表わす要素として種々の提案⁹⁾がなされているが、このうち本研究では次式で定義されるKramerの均等比Mを取り上げる。

$$M = \frac{\sum_{p=0}^{p=50} d_p}{\sum_{p=50}^{p=100} d_p} \quad \dots\dots\dots (29)$$

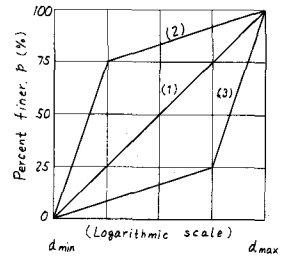


図-5 粒度分布

さて、図-5に示した粒度分布(1), (2), (3)のそれぞれの均等比Mと標準偏差 $\sigma (= \sqrt{d_{84}/d_{16}})$ を(M_1, σ_1), (M_2, σ_2), (M_3, σ_3)とおくと、次のように求められる。ただし、 d_{min} と d_{max} の決定には主観が入りやすいということからその代りとして d_5 と d_{95} を用いた。

$$\sigma_1 = \left(\frac{d_{95}}{d_5}\right)^{\frac{17}{45}}, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \left(\frac{d_{95}}{d_5}\right)^{\frac{7}{25}} \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \sigma_1^{-\frac{25}{17}} \\ M_2 &= \frac{9(\sigma_2^{\frac{5}{7}} - 1)}{\frac{30}{\sigma_2^{\frac{7}{14}}} + 8\sigma_2^{\frac{15}{14}} - 9\sigma_2^{\frac{5}{7}}} \\ M_3 &= \frac{9\sigma_3^{\frac{25}{7}} - 8\sigma_3^{\frac{45}{14}} - 1}{9(\sigma_3^{\frac{30}{7}} - \sigma_3^{\frac{25}{7}})} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式(30)の標準偏差 σ と d_{95}/d_5 との関係を図示すると図-6となる。標準偏差に対する粒度分布の形状効果としては形状(1)(図-5)からの分布のずれは若干現われるものの、式(30)において $\sigma_2 = \sigma_3$ ということから考えて標準偏差には形状効果がほとんど反映されないと言える。

次に、均等比Mと d_{95}/d_5 との関係を示したのが図-7である。この図からわかるように、形状(1)と(3)との違いはかなり明瞭に現われるが、形状(1)と(2)との違いは室内実験規模($d_{95}/d_5 = 0(10)$)においてはあまり明確ではなく、

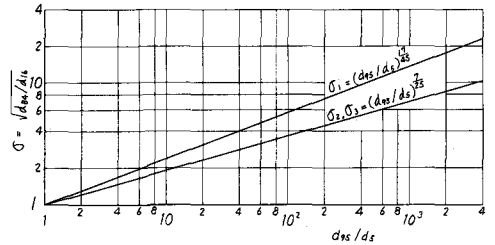


図-6 標準偏差 σ と d_{95}/d_5 との関係

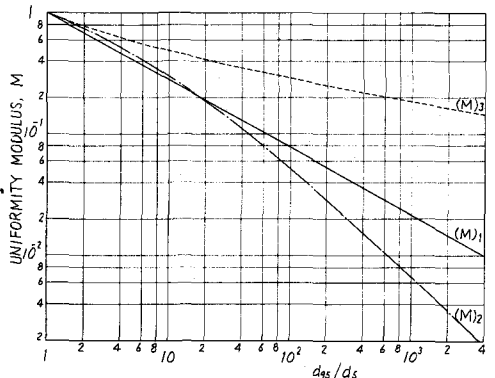


図-7 均等比Mと d_{95}/d_5 との関係

実際河川の規模〔 $d_{95}/d_5 = 0(10^2) \sim 0(10^4)$ 〕になってはじめて顕著に現われる。

したがって、混合砂礫河床の混合効果を明らかにするためには粒径範囲の広い実際規模の実験あるいは実測が重要となる。

ここで、均等比 M と標準偏差 σ との関係を示すと図-8のようになる。図中には現地実験のデータ(実験前後の平均値)と土屋¹⁰⁾の使用したデータ(太い実線)も併わせて示した。

この図から、均等比と標準偏差の関係は標準偏差が大きくなるにしたがい、粒度分布の形状によりかなり異なっていることがわかる。また、現地実験はほとんど分布形状(1)と(3)の間にあり、土屋の用いたデータは分布形状(2)と(1)の間にあることがわかる。

以上のことから、均等比 M と標準偏差 σ の両者を用いることによって粒径範囲と粒度分布形状をかなりの程度まで把握することができるものと考えられる。

5. 有効摩擦速度と相当粗度

(1) 有効摩擦速度の実用算定式

掃流砂量を予測する場合には、限界摩擦速度の他に有効摩擦速度の算定も重要となる。本研究ではEinsteinの考え方にに基づき実用的な立場から、有効摩擦速度の実用算定式を提案する。

いま、河床は完全粗面の状況にあるとし、Einsteinの用いた d_{65} に代えて d_m (河床の平均粒径)を用いると、有効摩擦速度 u_* は次式から求めることができる(Einsteinの方法)。

$$\frac{v}{u_*} = 5.75 \log_{10} \left(12.27 \frac{R'}{d_m} \right), \dots\dots\dots (32)$$

ここに、 v : 断面平均流速、 R' : 有効径深。

ここで、実用的見地から式(32)を指数近似すると表-1のようになる。一般式として、

$$\frac{v}{u_*} = C \left(\frac{R'}{d_m} \right)^{\frac{1}{n}}, \dots\dots\dots (33)$$

式(33)からまず有効径深を求めると、

$$\frac{R'}{d_m} = \left(\frac{v}{C \sqrt{g d_m I_e}} \right)^{\frac{2n}{n+2}}, \dots\dots\dots (34)$$

となり、有効径深は表-2の式で計算できる。この場合、 R'/d_m の第一近似として R/d_m を用いればよい。

したがって、有効摩擦速度は次式で計算できる。

$$u_* = \sqrt{g R' I_e}, \dots\dots\dots (35)$$

(2) 相当粗度について

一般に、相当粗度 k_s は次式で定義される。

$$\frac{v}{u_*} = 5.75 \log_{10} \left(12.27 \frac{R}{k_s} \right) = 2.5 \ln \left(12.27 \frac{R}{k_s} \right), \dots\dots\dots (36)$$

上式より相当粗度 k_s を求めると、

$$k_s/d_m = 12.27 \left(R/d_m \right) \exp \left(-0.4 v/u_* \right), \dots\dots\dots (37)$$

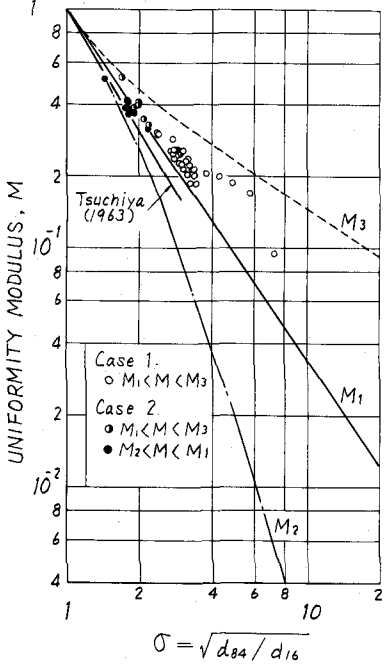


図-8 均等比と標準偏差との関係

表-1 log law の近似式

R'/d_m	$v/u_* =$	log lawとの相対誤差 $ \epsilon $
2 ~ 10	$6.8 (R'/d_m)^{\frac{1}{4}}$	$ \epsilon \leq 0.013$
10 ~ 10 ²	$8.3 (R'/d_m)^{\frac{1}{6}}$	$ \epsilon \leq 0.014$
10 ² ~ 10 ³	$10.0 (R'/d_m)^{\frac{1}{8}}$	$ \epsilon \leq 0.009$
10 ³ ~ 10 ⁴	$11.8 (R'/d_m)^{\frac{1}{10}}$	$ \epsilon \leq 0.013$

表-2 有効径深の計算式

R'/d_m	$R'/d_m =$
2 ~ 10	$[v / (6.8 \sqrt{g d_m I_e})]^{\frac{4}{3}}$
10 ~ 10 ²	$[v / (8.3 \sqrt{g d_m I_e})]^{\frac{6}{5}}$
10 ² ~ 10 ³	$[v / (10.0 \sqrt{g d_m I_e})]^{\frac{8}{7}}$
10 ³ ~ 10 ⁴	$[v / (11.8 \sqrt{g d_m I_e})]^{\frac{10}{9}}$
v, d_m, I_e : 実測値あるいは推定値	

式(37)において、 $d_m \cdot R \cdot v \cdot u_*$ に実測値あるいは推定値を用いることにより k_s を見積ることができる。

いま、式(36)の近似式として式(33)と同様の

$$\frac{v}{u_*} = C \left(\frac{R}{k_s} \right)^{\frac{1}{n}}, \dots\dots\dots (38)$$

を取り上げると、 u_*'/u_* と R'/R は k_s/d_m のみの関数として次式で表わされる。

$$\frac{u_*'}{u_*} = \left(\frac{k_s}{d_m} \right)^{-\frac{1}{n+2}}, \quad \frac{R'}{R} = \left(\frac{k_s}{d_m} \right)^{-\frac{2}{n+2}}, \dots\dots\dots (39)$$

この式から、

$$k_s/d_m \geq 1 \text{ のときは } u_*'/u_* \leq 1, \quad R'/R \leq 1, \dots\dots\dots (40)$$

となり妥当な結果をもたらすが、

$$k_s/d_m \leq 1 \text{ のときは } u_*'/u_* \geq 1, \quad R'/R \geq 1, \dots\dots\dots (41)$$

として評価される場合もあることがわかる。

式(41)の結果は、式(37)における摩擦速度 u_* に帰因すると考えられ、実測データには多々見受けられることである。このようなことから考えても掃流砂量の予測には有効摩擦速度 u_*' を用いた方がよいものと考えられる。実用的には、式(40)、(41)の結果にとらわれず、式(37)から k_s/d_m を知り、表-3の式から u_*' あるいは R' を求めればよい。

以上述べたように、相当粗度の評価はかなり重要な課題である。今後は実測データと矛盾しない相当粗度の算定式の確立が望まれる。

表-3 k_s/d_m と u_*'/u_* , R'/R

R'/dm	$u_*'/u_* =$	$R'/R =$
2 ~ 10	$(k_s/dm)^{-\frac{1}{6}}$	$(k_s/dm)^{-\frac{1}{3}}$
10 ~ 10 ²	$(k_s/dm)^{-\frac{1}{8}}$	$(k_s/dm)^{-\frac{1}{4}}$
10 ² ~ 10 ³	$(k_s/dm)^{-\frac{1}{10}}$	$(k_s/dm)^{-\frac{1}{5}}$
10 ³ ~ 10 ⁴	$(k_s/dm)^{-\frac{1}{12}}$	$(k_s/dm)^{-\frac{1}{6}}$
u_*, R : 実測値あるいは推定値, k_s/d_m : 式(37)から算出		

6. 現地実験の限界掃流力

(1) 平均粒径の限界掃流力に対する河床砂礫の粒度分布の影響

第2節で述べたように、混合砂礫河床における粒径別の限界掃流力は Egiazaroff 型の式により精度よく計算することができるが、ここで残された問題は、平均粒径の限界掃流力は一様粒径の限界掃流力に比して大きいかな否かということである。限界掃流力の判定は非常に難しく研究者によって種々の判定基準があるが、ここでは掃流砂量式から逆算する方法によって限界掃流力を求めることにする。

さて、一様粒径の掃流砂量式(24)に河床の平均粒径を用いることにより混合砂礫河床の全掃流砂量を計算しうるものと仮定する。

$$\Phi = 6.0 P_a I \tau_{*cm}^{\frac{3}{2}}, \dots\dots\dots (42)$$

ここで、実用上、関数 P_a および I を近似すると、式(42)は、

$$\Phi = 12 \left(1 - \frac{\tau_{*cm}}{\tau_{*m}'} \right)^{\frac{3}{2}} \tau_{*m}^{\frac{3}{2}}, \dots\dots\dots (43)$$

と表わすことができる。

いま、 Φ と τ_{*m}' に実測値を代入すると、平均粒径の限界掃流力 τ_{*cm} は次式より求められる。

$$\tau_{*cm} = (\tau_{*m}')_{OBS} - \left[(\Phi)_{OBS} / 12 \right]^{\frac{2}{3}}, \dots\dots\dots (44)$$

上式から得られた結果と河床砂礫の標準偏差 σ および均等比 M との関係を示すと図-9および図-10となる。ここに、 $[\tau_{*cm}]_{I.F.}$: 一様粒径の限界掃流力公式として岩垣公式を用いたときの値。

図中の実線は土屋によって得られた結果である。両図から、現地実験の

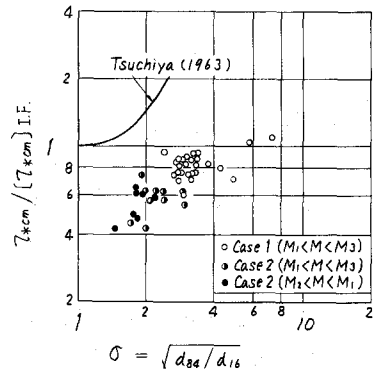


図-9 $\tau_{*cm} / [\tau_{*cm}]_{I.F.}$ と σ

平均粒径の限界掃流力は岩垣公式のそれに比べて小さくなり、高山(1965)¹¹⁾や村本ら(1977)¹²⁾と同様の傾向にあるが、土屋の結果とは逆の傾向を示していることがわかる。

結局、混合砂礫河床における平均粒径の限界掃流力は、

$$\tau_{*cm}/(\tau_{*cm})_{I.F.} = \text{func.}(\sigma, M, \dots) \geq 1, \dots\dots\dots (45)$$

と表わされるものと考えられるが、右辺の関数形の決定については今後の研究課題としたい。

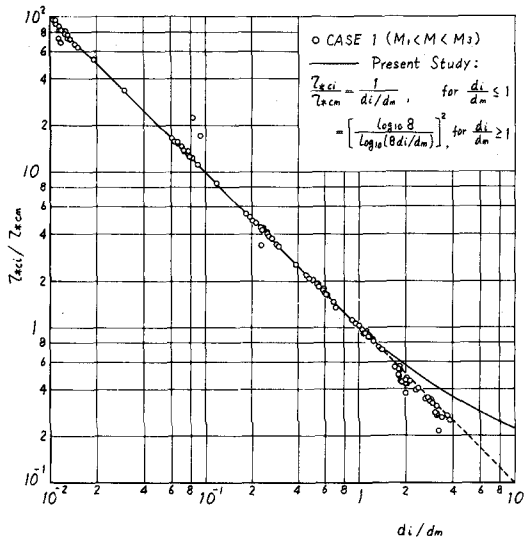
(2) 粒径別の限界掃流力

混合砂礫河床における粒径別掃流砂量の実用算定式として式(25)の P_{ai} と I_i を近似した次式を提案する。

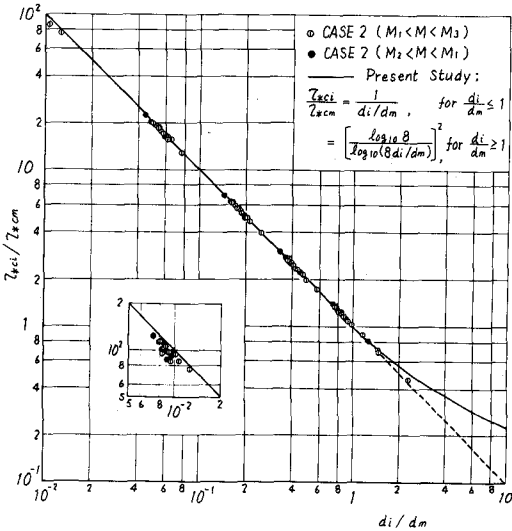
$$\phi_{*i} = 12 \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right)^{\frac{3}{2}} \tau_{*i}^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (46)$$

さて、式(46)を書き直した式(47)から現地実験の粒径別の限界掃流力 τ_{*ci} を求めると図-11のようになる。ただし、 τ_{*cm} には式(44)で得た値を使った。

$$\tau_{*ci} = (\tau_{*i}')_{OBS.} - \left((\phi_{*i})_{OBS.} / 12 \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (47)$$



(a) Case 1



(b) Case 2

図-11 現地実験の粒径別限界掃流力

図中の実線は本研究による式(23)を示したものであるが、実測データとは $d_i/d_m \leq 1$ の範囲では良く一致しているが、 $d_i/d_m \geq 1$ の範囲では実験結果(図-2)とは逆の方向にはずれている。むしろ、実測データは粒径の全範囲にわたって次式と良く一致する。

$$\tau_{*ci} / \tau_{*cm} = 1 / (d_i / d_m) \dots\dots\dots (48)$$

7. 実用算定式と現地実験との比較

粒径別の掃流砂量式として実用算定式(46)と実測データとの比較を行うと図-12のようである。ただし、 τ_{*ci} の計算には式(23)を用いたが、 τ_{*cm} の計算では式(45)の関係が未だ確立できていないことから式(44)

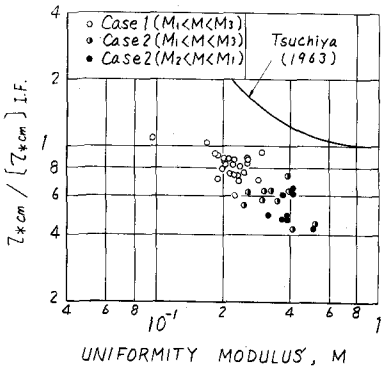


図-10 $\tau_{*cm} / (\tau_{*cm})_{I.F.}$ と M

を用いた。

図-12(a)では、計算値と実測値の関係は、

$$(\phi_{*i})_{CAL.} = \left(\frac{1}{2} \sim 4\right) (\phi_{*i})_{OBS.} \dots (49)$$

となり一致の度合は比較的良好だが、図-12(b)をみると実測値の方が相当上回っている。この原因としては、図-12(b)のデータにはかなりの程度浮遊砂が含まれていることが考えられる。

なお、式(44)を用いた(掃流砂量の総量を計算と実測で一致させた)にもかかわらず、粒径別掃流砂量の計算値と実測値との関係が式(49)で表わされるということは混合砂礫河床の掃流現象の複雑さを物語っている。

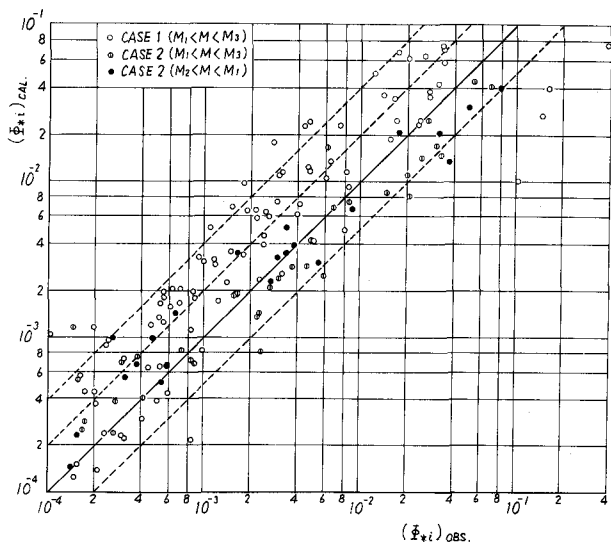


図-12(a) 粒径別掃流砂量式(46)と実測値との比較

8. むすび

本研究により混合砂礫の掃流砂量に関して色々な知見を得ることができた。残された問題としては平均粒径の限界掃流力に対する混合効果、すなわち式(45)の関係を明らかにすることである。この点については今後さらに研究を進める所存である。

付 記

本報告は著者の一人(尾崎)が中央大学大学院後期博士課程在学時に行った研究と、(財)電力中央研究所において行った研究をまとめたものである。ここで、本研究をとりまとめるに当たって便宜を図って頂いた(財)電力中央研究所河川環境研究室・白砂孝夫室長に対して深く感謝の意を表するとともに、本研究の過程で熱心に協力された中央大学大学院後期博士課程大西光陽君と前期博士課程矢内栄二君に対して謝意を表する。

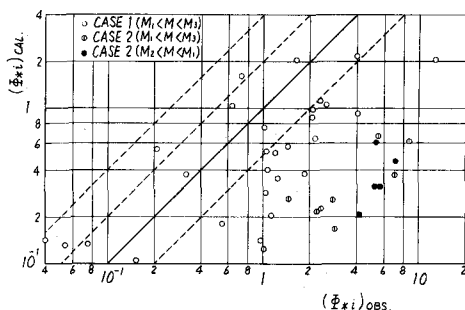


図-12(b) 式(46)と実測値との比較

引用文献

- 1) 林 泰造・尾崎幸男：第23回水講，1979，pp.157-167.
- 2) 石橋 毅・磯部明久：電研報告 70521，1970.
- 3) Einstein, H. A. : Technical Bulletin, No. 1026, U. S. Dept. of Agric. Washington, D. C. 1950.
- 4) Egiazaroff, I. V. : Proc. ASCE, vol. 91, HY 4, 1965, pp. 225-247.
- 5) 浅田 宏・石川晴雄：電研報告 71015，1972.
- 6) 芦田和男・道上正規：土木学会論文報告集第206号，1972，pp. 59-69.
- 7) 平野宗夫：土木学会論文報告集第195号，1971，pp. 55-65.
- 8) 浅田 宏・石川晴雄：電研報告 68045，1968.
- 9) 石原藤次郎・本間 仁，編：応用水理学中I，1968，pp. 10-12.
- 10) 土屋義人：京大防災研年報第6号，1963，pp. 228-253.
- 11) 高山茂美：地理学評論，1965，pp. 29-41.
- 12) 村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦：京大防災研年報第20号B-2，1977，pp. 451-474.