

徳島大学工学部 正員 ○杉尾 捨三郎

同 正員 岡部 健士

コンピューター サービス K K 三橋 賢一

1 概 説 : 河川の流出土砂の研究は、戦後わが国では建設省を中心に熱心に行なわれ、特に昭和 36 年から直技研究の指定課題「河床変動に関する研究」として採りあげられ全国的な現地観測がなされ、従来の理論の検証が続けられてきた。その結果によると、掃流砂量公式では土研式、アインシュタイン公式などは実測値の十数倍、または百倍以上の過大値を示す。また粒径別の流砂量については、理論で得られた掃流砂の粒径は、野外測定から得られたものよりかなり大である(図-1)。結局河床材料粒径の変動幅のきわめて大きいわが国諸河川に適合する有力な理論的方法は未だ発見されていないと申して過言でない。本研究は、わが国の諸河川の河状に適する掃流砂量公式の開発を目標とし、従来の諸研究を再検討し、適合度を若干なりとも高めようと企図したものである。本研究では土木研究所資料の提供を受けたことに対し深く謝意を表する。

2 理論式の誘導 : 現在理論的にも最も信頼度が高いと考えられているのは、最近 芦田道⁹⁾上らが発表した次式である。両氏は混合砂れきに對しては次式を提案している。

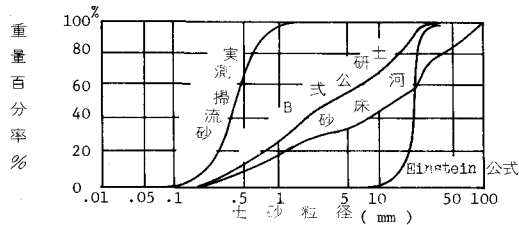


図-1 河床砂と掃流土砂の粒度構成(吉野川中央橋)

$$\frac{q_{bi}}{f_o(d_i) u_{*e} d_i} = 17 \tau_{*ei} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*ei}}\right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_*}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q_{bi} = 粒径 d_i の砂れきの流砂量、 $f_o(d_i)$ = 粒径 d_i の砂れきが河床に占める割合、 $\tau_* = \frac{u_*^2}{(g/\rho - 1)gd}$ 、 u_{*e} は有効摩擦速度で、河床面状態が平滑か ANTI DUNE のときには次式から推算できる量である。 V = 平均速度、 R = 径深 とするとき

$$\frac{V}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{d(1+2\tau_*)} \dots\dots\dots (2)$$

さて本研究は上述の (1) 式を出発点とし、以下の検討の下に新たな無次元量 ξ , S , η を参加させることにより、掃流砂の粒度範囲をより明確にし、かつ流砂量に関しても若干の改善を企図したものである。

(1) 砂れきの浮遊限界 : 河床上の混合砂れきのうち特に小粒径のものは、与えられた掃流力の下では浮遊するはずであるから、掃流砂として河床上に留まるものの最小粒径 d_2 が存在するはずである。従来の諸研究ではこれを一切無視してきている。ここではカリンスクの理論的研究から得られた無次元量 P_* を利用することにする。ここでは $w_s =$ 砂粒の沈降速度である。

$$P_* = \frac{1}{2} \frac{u_{*e}}{w_s} e^{-\left(\frac{w_s}{u_{*e}}\right)^2} \dots\dots\dots (3)$$

ロールセンの実験的研究によれば、 u_{*e}/w_s の値が 1.0 ~ 2.0 程度以上になると砂は水中に浮遊すると考えてよい。ここでは仮に

$$\xi = 1 - P_* = 1 - \frac{1}{2} \frac{u_{*e}}{w_s} e^{-\left(\frac{w_s}{u_{*e}}\right)^2} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる無次元関数 ξ を考え、(1) 式の右辺に積の形で参加させることにし、 $\xi = 0$ のとき掃流砂の最小粒径 d_2 を与えるものとする。さらに (1) 式では $u_* = u_{*ci}$ のときに掃流砂の最大粒径 d_1 を与えるから、結局 掃流砂の最大、最小粒径を決定することが可能となる。一方、関数 ξ は砂粒径が大になると急速に 1.0 に接近するから、 ξ の存在は影響しなくなり、従来の (1) 式そのままが成立することになる。

(2) 河床付近の流速分布 : (2) 式が成立するような河床をもつ流れの各点の流速 u は

$$\frac{u}{u_{*e}} = 8.5 + 5.75 \log \frac{z}{k_s} \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。ここに $k_s = d(1+2\tau_*) =$ 相当粗度、 $z =$ 河床からの深さである。しかし (5) 式の対数則では、 z がきわめて小さい範囲において u の値が負となり、河床上の小粒径の砂移動を問題としているときは一障害となる。そこでいま $1/7$ 乗則

$$\frac{u}{8.5 u_{*e}} = \left(\frac{z}{k_s}\right)^{1/7} = \eta \dots\dots\dots (6)$$

が全流水断面に対して成立するものと仮定することにし、無次元関数 η をやはり積の形で (1) 式の右辺に参加させることにする。

結局、 $2 < k_B$ の範囲においてはつねに $\zeta < 1.0$ である。

(3) 砂粒の移動し易さ：自然河川の河床表面の混合砂れきは、互いに大小粒のものがかみ合っているので、単に実験水路上にしき並べられた状態とは異なるはずである。砂粒の移動し易さを厳密に解析した例は余りみられないが、自然河川の実測流砂量が予想外に少ないのは、実はこれが重要な一原因であるかもしれない。しかしここでは簡単に n をべき数とし

$$\zeta = \left(\frac{d_2}{d}\right)^n \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる無次元量 ζ を導入し、やはり (1) 式に積の形で含めることにしよう。

(4) 流砂量公式の提案：前述の3種の無次元量 ξ, η, ζ を芦田・道上の(1)式に導入して結局次式が得られた。

$$\frac{q_{Bi}}{f_0(d_i) u_{*e} d_i} = 17 \xi \cdot \eta \cdot \zeta \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*ci}}\right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_{*ci}}\right) \tau_{*ci} \dots\dots\dots (8)$$

粒径が均一である場合には $\xi = 0, \zeta = 1.0, \eta \approx 1.0$ となるから、上式は芦田・道上式と同一になり、両氏がすでに検照しているように、均一粒径の砂を用いて実施した多くの実験結果にもほぼ適合するものと考えられる。

3 自然河川への適用：S.43.8.29の吉野川洪水資料をもとにして、掃流砂の最大、最小粒径、および掃流砂量の試算を行った。河床材料の粒度および実測掃流砂の粒度分布が与えられ、かつ水深 $h = 5.31$ m、平均流速 $V = 2.80$ m/s エネルギーこう配 $S = 8 \times 10^{-4}$ 、掃流砂量 $G = 8.3 \times 10^{-3}$ kg/s/m、が報告されている。

(1) 掃流砂の粒度範囲：(2)式が吉野川の洪水時に適切かどうかはやや不安があるが、一応(2)式より有効摩擦速度 u_{*e} を算定し、 $u_{*e} = 14.62$ cm/sを得た。ここに $d = d_{65} = 2.23$ cmとしている。さて掃流砂の最大粒径 d_1 は(8)式から明らかなように

$$u_{*c}^2 = u_{*e}^2 \dots\dots\dots (9)$$

を満たすから、岩垣公式を利用して $d_1 = 2.64$ cm となる。掃流砂の最小粒径 d_2 は $\xi = 0$ すなわち $u_{*s}/u_{*e} = 0.42$ となり、Rubey 式より $d_2 = 0.41$ mm が得られる。結局、掃流砂の粒度は $0.41 \sim 2.64$ mm の範囲内にあることになり、実測資料と比較してはほぼ満足すべき値となった。

(2) 掃流砂量の推算：河床材料の粒度曲線を利用して全粒度を10グループに分類し、それぞれ(8)式を用いて q_{Bi} を求め、最後に合計した。図-2は計算された流砂量の各粒度別分布を、実測の粒度分布と比較したものである。図中の①は、 $\xi = 1 - P_*$ 、かつ $\zeta = \sqrt{d_2/d}$ として計算したもので、分布の概形は実測のそれに近い。②は $\xi = 1 - \frac{1}{2} P_*$ かつ $\zeta = d_2/d$ において描かれたもので、実測結果と比べると、やや細粒の方に粒度が集中しすぎているようである。最後に流砂量についてみると、計算された単位幅当り流砂

量は $q_B = 1.687$ cm²/s となり、実測値の約50倍程となった。試みに平均粒径を用いてEinstein公式で計算すれば、計算値は実測値の約260倍位となった。

4 結 言

掃流砂の粒度範囲の決定に関しては、本研究の方法を用いることにより、大体満足すべき結果が得られたが遺憾ながら流砂量そのものの推定には好結果が得られていない。今後さらに、河

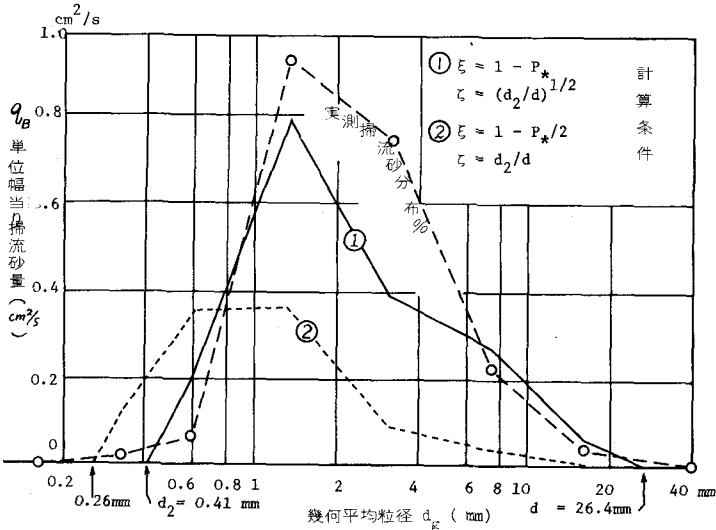


図-2 掃流土砂の粒度範囲と流砂量分布の計算値
床面形状の影響、河床上の砂れきの移動し易さ、しやへい係数、流れの不均一性の効果などに関し、研究を重ねる必要がある。

参考文献⁽¹⁾：芦田・道上：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，1972。

⁽²⁾建設省土木研究所：建設省流砂観測資料集，第625号，昭和36年3月，