

掃流・砂量の研究

北大工 正員 岸 力
 北大工 正員 ○黒木幹男
 北大工 学生員 今泉正次

1 序 論

河道には高水流量を安全に流下させることと成る河績を保持せ、河道を安定させることと必要である。沖積地河道では河床を構成する土砂の流水によ、て下流に輸送されるいわゆる流砂現象は生ずる。流砂に局部的又は河道全体にわたる不均衡が生ずると、河床変動は起こることは良く知られている。河床変動は流水の疏通能力を減少させるだけでなく、河川構造物に障害を与え、河口閉塞を生ずるに至る。この様に河川工学上の諸問題には直接、間接に流砂の関与しており、問題の正しい解決のためには流砂現象に対する正確な知見を欠いてはならない。沖積地河川の流砂量と水理量の間の関係を明らかにしようとする試みはこれまでにも多くの研究者や技術者によって行われてきており、その結果は幾多の流砂量式の提案となつて現われている。これまでの研究によ、て流砂現象に關与するパラメーターはほぼ明らかになっていると考えるも差支えないが、広い水理量の範囲にわたつて現象と適合する様な実用的な流砂量式はまだない様である。流砂現象を複雑にし問題の解決を妨げているものの一つは河床に発生する河床波の存在が揚げられる。流砂量、水理量および河床形態で閉じたシステムを構成しており、強い相互作用を働いてゐる。問題解決のためにはこの閉じた鎖をとき放つことと必要である。

著者はここに諸水理量の関係を整備された実験水路の資料を用いて、直線流の場合について各河床形態ごとの水理量の特性を明らかにした〔1, 2〕。本報告では同一の実験資料に基いて、流砂量と水理量の関係、河床形態にそれぞれに及ぼす効果について調べた結果を報告する。

2 従来の流砂量式の検討

全流砂量と算定する主要な方法の一つとして、全流砂量と掃流砂量と浮遊流砂量に分ける考え方がある。掃流砂と浮遊砂を区別して取扱う理由の一つは、矢々の輸送形態の相違にある。掃流砂は掃流層と呼ばれる河床近くの薄い層の中での砂の移動現象であり粒子は転動、滑動、小跳躍をくり返しながら流下する。これに対して浮遊砂は掃流層の上方、水面までの流体中に浮遊して輸送される。しかし両者の間では粒子の交換が早に行われており、明確に両者を区別する様な線が存在するわけではない。異なる二つの物理モデルに依つて粒子の輸送を説明しようとする両者の区別は重要な意味を持つことになる。

全流砂量を二つの部分に区別する他の理由は、両者の測定方法の違いによる。掃流砂は適当なトラップで、浮遊砂は砂を含んだ水のサンプルから測定される。

この様に全流砂量を二つに区別する方法に対して、両者を統一的に取扱おうとする試みもある。これは河床材料を輸送する流体力は同一のものであるとの立場にたつ。

前者には Einstein〔3, 4〕, Bagnold〔5〕, Toffaletti〔6〕など、後者には Laursen〔7〕, Graf〔8〕などの方法がある。どちらの方法も流砂の運動機構を解明し、実用的な流砂量式を得るための近道であるのは現段階では判断が難い。ここでは河床波の効果をもどの様に評価式の中に取り入れるかについて、上に揚げた研究の幾つかについて調べてみる。

Graf は無次元掃流砂量 Q_{bs} を次式の様に表わしている。

$$\Phi = \frac{\bar{C} \bar{u} \cdot R}{\sqrt{s g d^3}} \quad (1)$$

多くの実験資料を整理して開水路・管水路の両方を包含する実験式として

$$\Phi = 10.39 \tau_*^{2.52} \quad (2)$$

を得ている。但し、 $\bar{C}$ は体積で表わした流砂濃度、 $\bar{u}$ は平均流速、 R は径深、 $s = (\rho_s - \rho) / \rho$ と砂粒の水
中比重、 d は河床材料の平均粒径、 τ_* は無次元剪断力で次式で表わされる。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{s g d} = \frac{R I}{s d} \quad (3)$$

Guy et. al [9], Gilbert [10], 佐藤・吉川・芦田 [11] の実験資料を用いて Φ と τ_* の関係を調べた。
図-1 に示すように Graf の実験式は資料の傾向とはよく一致しているが、刻度のまとまりは必ずしも良好
はない。同一の τ_* の値に対して Φ の実験値は $\pm 100\%$ 以上のばらつきを示す。

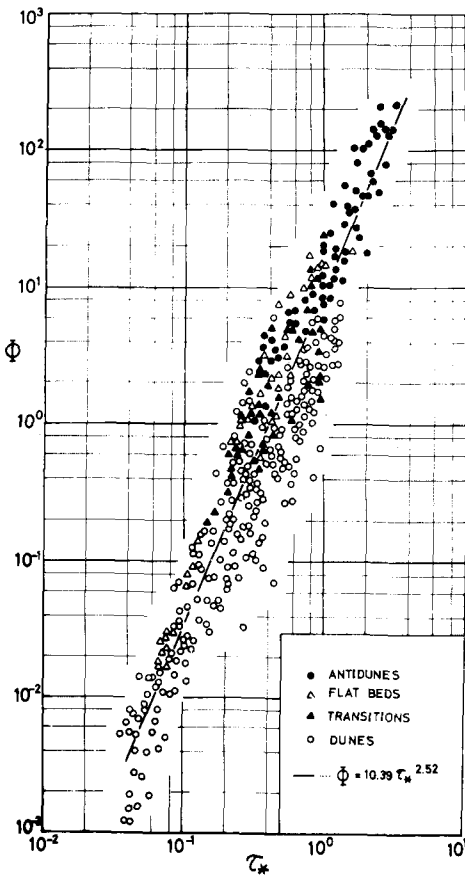


図-1 全剪断応力と流砂量の関係 (Graf)

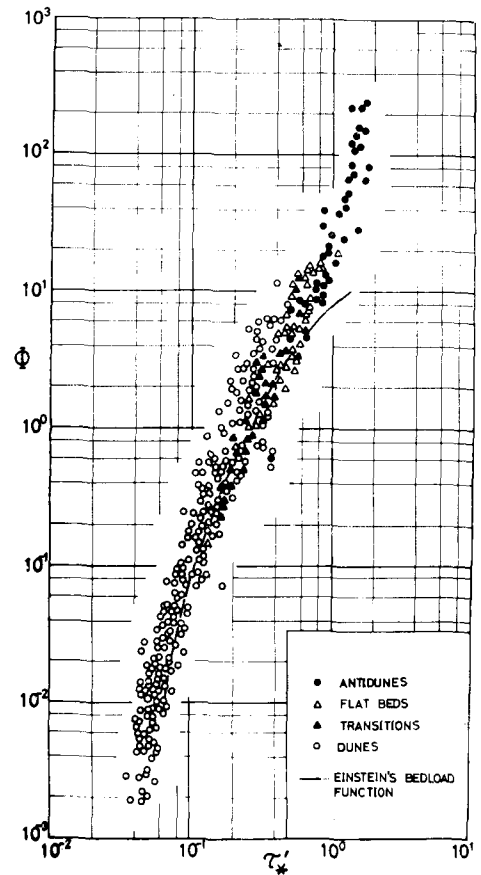


図-2 有効剪断応力と流砂量の関係 (Einstein)

Einstein は径深 R を砂粒粗度による部分 R' と、河床波の形状抵抗による部分 R'' に分割し、河床材料の輸送に寄与するのは $Eg. (4)$ で定義される有効剪断応力であるとしている。

$$\frac{\bar{u}}{\sqrt{gRI}} = 5.75 \log_{10} \left(\frac{12.27 R' X}{d_{65}} \right) \quad (4)$$

この有効剪断応力は考え方は、その後各種の形で多く用いられており、その示唆するところは大きい。図-2 に Einstein の方法で整理した流砂量との関係を示す。

Bagnold は単位面積、単位時間当りの流体のポテンシャルエネルギーの損失分 E_p を流砂を輸送されるのに用いられると考えて

$$E_p = \tau_w I \int_0^h u dy = \tau_w h I \bar{u} = \tau_0 \bar{u} \quad (5)$$

$$q_{sb} \tan \alpha = e_b E_p \quad (6)$$

$$q_{ss} \frac{w}{u_s} = e_s (1 - e_b) E_p \quad (7)$$

と表わした。 q_{sb} , q_{ss} は夫々掃流砂量、浮遊流砂量で水中重量で表わしている。 e_b , e_s は各輸送形態における流砂の輸送効率、 w は砂粒の沈降速度、 u_s は河床材料の移動速度、 $\tan \alpha$ は掃流砂と河床の摩擦係数である。

$u_s \simeq \bar{u}$ と仮定して実用的流砂量式を

$$q_s = q_{sb} + q_{ss} = \left[\frac{e_b}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{\bar{u}}{w} \right] \tau_0 \bar{u} \quad (8)$$

と与えている。上式の誘導に際して Bagnold は河床波の影響について言及していないが、 $\bar{u}$ を通じて粗度係数の形で表現していると考えることが出来る。図-3 に実験値との比較の一例を示す。

以上の結果から (1) 河床剪断力だけで流砂量を表現することは困難であり、(2) 河床波の効果を考慮する必要がある、これには有効剪断力、粗度係数、導入などは与えられる。現段階の流砂量研究の主たる興味の一つは、測定のばらつきの少ない流砂量式の表現を工夫することにある。

3 沖積地河川の流砂量

3.1 河床の領域区分 本報告で取扱っている河床形態は、小規模河床形態に属するものの中での砂堆 (Dune)、遷移 (Transition)、平坦 (flat bed)、反砂堆 (Antidune) の4つである。著者等は Garde-Raju の領域区分図を Guy et. al, Gilbert などの実験資料で両対数に対し図-4 に示す区分図を得た。図中の曲線 1, 2 は夫々遷移、反砂堆の発生限界である。

$$I/s = 0.02 \left(\frac{R}{d} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{for curve 1} \quad (9)$$

$$I/s = 0.07 \left(\frac{R}{d} \right)^{-\frac{3}{2}} \quad \text{for curve 2} \quad (10)$$

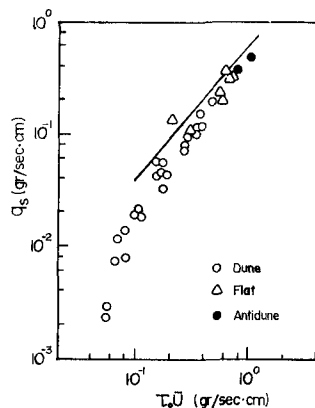


図-3 流砂のエネルギーと流砂量の関係 (Bagnold)

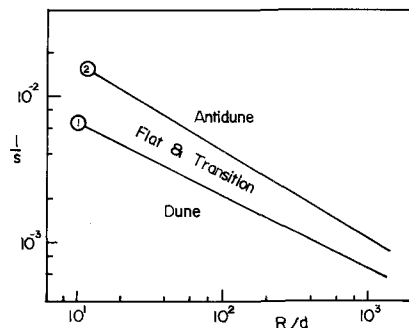


図-4 河床形態の領域区分図

3.2 河床形態と流体抵抗

移動床流れでは河床に生起する河床形態により、流れの抵抗特性は顕著な変化を示す。河床波による抵抗特性の変化は Eq. (4) を指数型で近似して次の様な変形すれば

$$\varphi_0 = \frac{\bar{u}}{u_*} = 7.66 \left(\frac{R}{2d} \right) \left(\frac{\tau'_*}{\tau_*} \right)^{2/3} \quad (11)$$

となり、右辺の $(\tau'_*/\tau_*)^{2/3}$ がこれを表わすこととなる。著者は Guy 等, Gilbert, 佐藤・吉川・芦田の実験資料を整理し、 R/d の値ごとに図-5 に示す様な τ'_* と τ_* の関係を得た。この図から砂堆・遷移河床は抵抗特性の異なる2領域に細分されることになった。各河床形態について τ'_* と τ_* の関係を定式化する

$$\left. \begin{aligned} \text{Dune I} \quad \tau'_* &= 0.21 \tau_*^{1/2} \\ \text{Dune II} \quad \tau'_* &= 1.49 (R/d)^{-1/4} \tau_* \\ \text{Flat} \quad \tau'_* &= (K_0/\mu)^{3/4} \tau_* \\ \text{Transition I} \quad \tau'_* &= 6.5 \times 10^7 (R/d)^{5/2} \tau_*^{11/2} \\ \text{Transition II} \quad \tau'_* &\text{は } \tau_* \text{ に独立に変化する} \\ \text{Antidune} \quad \tau'_* &= 0.264 (R/d)^{1/5} \tau_*^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

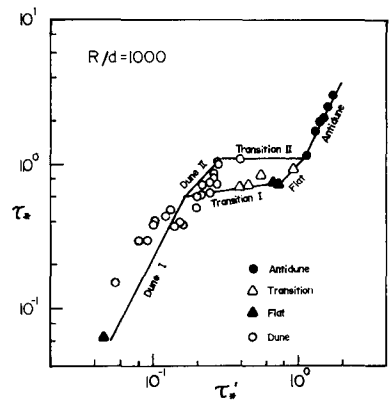


図-5 有効剪断応力 τ'_* と全剪断応力 τ_* の関係

3.3 実用的流砂量式

前述の様な Bagnold はエネルギー的立場から流砂現象を取扱、興味ある結果を得た。原式では $q_b = 0$ として計算すると $\bar{u} < 0$ となるなど表現に若干の問題はあるが砂粒の移動限界付近を除けば実験値とよく一致している。Yalin [13] は $\varphi_0 = \bar{u}/u_*$ を用いて Bagnold の式を変形して

$$\frac{q_b}{\rho u_*^3} = \varphi_0 \left[\frac{e_b}{\tan \alpha} + 0.01 \varphi_0 \frac{u_*}{w} \right] \quad (13)$$

を得ている。上式は更に τ_* が大きくなると

$$q_b \rightarrow 0.01 \varphi_0^2 \rho \frac{u_*^4}{w} = 0.01 \varphi_0^2 \frac{\tau_0^2}{\rho w} \quad (14)$$

となり、この関係は浮遊砂を多く含む実際の川の資料とよく一致すると述べている。

この表現は河床波の効果を直接 φ_0 を用いて表わしたもので興味深い。Eq. (14) を変形し

$$F f \Phi = 0.08 \tau_*^2 \quad (15)$$

を得る。但し $f = 8/\varphi_0^2$, $F = w/\sqrt{sgd}$ 。

F は無次元沈降速度で Rubey [14] によれば次式で表わされる。

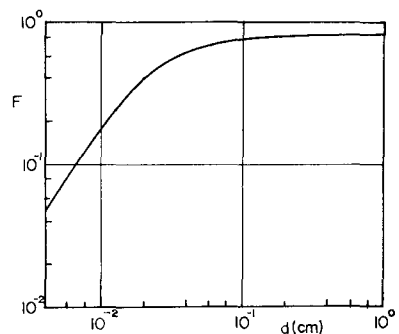


図-6 砂粒の沈降速度 (Rubey)

$$F = \frac{W}{\sqrt{sgd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36V^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36V^2}{sgd^3}} \quad (16)$$

水中にある砂の場合にはFの値は粒径によって図-6に示す様に变化する。図から $d < 0.05$ cmの砂では流速速度を粒径に応じて補正する必要があることとなる。

Guy et. al, Gilbert, 佐藤・吉川・芦田の実験資料を用いて、Eq. (15)を検討し図-7を得た。図では各河床形態ごとに記号を変えてプロットした。河床形態による相違はほとんど認められない。プロットは非常にまとまっており定数値のちがいを除けばEq. (15)とよく傾向が似ている。実験結果と一致するよう定数値を改めると次の様な実験式を得る。

$$Ff\Phi = 0.35(\tau_* - \tau_{*c})^2 \quad (17)$$

但し、 τ_{*c} は限界剪断応力で図では $\tau_{*c} = 0.040$ としたときの値を実線で示した。

Engelund [15]は抵抗の相似仮説から類似の関係

$$f\Phi = f_{ct}(\tau_*)$$

を予測し、Guy et. alの実験資料からEq. (18)に示す様な実験式を得た。

$$f\Phi = 0.1 \tau_*^{\frac{5}{2}}$$

Engelundの仮定した抵抗の相似仮説の成立は証明されないが、Eq. (17)とEq. (18)は非常に似た関係を与えている。

以上の考察を総合して、沖積地河川における流砂量の推定を、流れの水深、勾配、河床材料の諸特性のみを知らずに行うこととできる。その手順を略記すると

- (1) 与えられた水理量が発生する河床形態を図-1より推定する。
- (2) 推定した河床形態に対応する抵抗則を図-2、又はEq. (12)から求める。
- (3) 更にEq. (11)より $f\alpha$ 値を計算する。
- (4) Eq. (17)から Φ 値が計算できる

以上の様な手順に従えば直接平均流速 $\bar{u}$ を規定することの困難な場合などに精度よく流砂量を推定することが可能である。

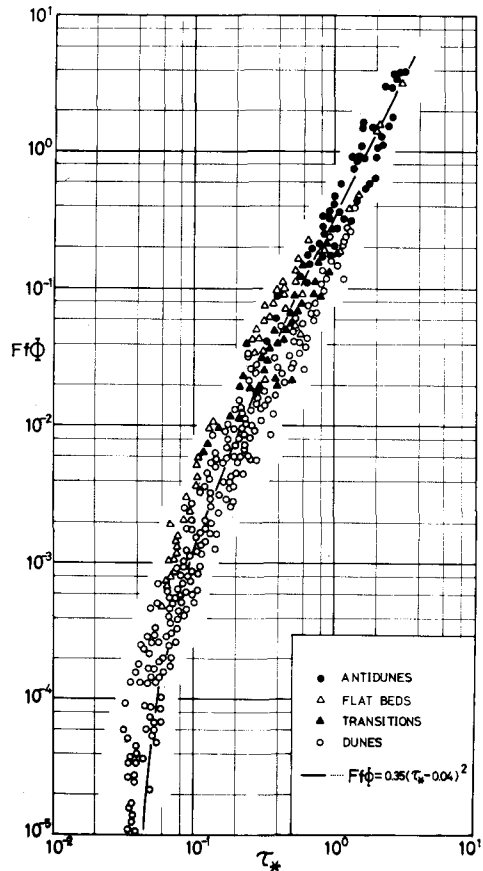


図-7 $Ff\Phi$ と τ_* の関係

4 まとめ

沖積地河川の流砂量について水理量との関係、河床形態の効果などを水路実験の資料によつて調べた。得られた結論を以下に列記する。

- (1) 流砂量を流体抵抗 f 、無次元沈降速度 F の2つの補正量を用いて

$$Ff\Phi = 0.35(T_* - T_{*c})^2$$

と表わし、実験値との良好な一致を確認した。

- (2) 粒径によつて沈降速度の効果は異なり、 $d < 0.05 \text{ cm}$ の砂とは補正が必要である。この補正量を F とする。
(3) 流砂の抵抗予測を E_b (12) を用いて行なう。流砂量式として E_q (17) を用いると、水深、勾配、河床材料の特性のみを知らず、流砂量を算定できる。

流砂量を河床形態ごとに整理した結果では、有効剪断力又は粗度係数を用いて補正を行えば、形態によつて顕著な違いはなくなること became 明らかになった。しかし細かく見れば、Einsteinの方法によるカットでは Dune に属する測点は Antidune より上側に集まる傾向が認められ、着者の整理ではこの関係が逆転している。

このように河床形態による相違は観測資料のばらつきの中にかくれてしまう程度のものであるから、今後は精度の高い実験資料の収集と共に、個々の測点のちがいの原因に対する考察が必要になる。

参考文献

- (1) 岸力、黒木幹男、今泉正次「沖積地河川における水位-流量関係の予測」土木学会北海道支部研究発表論文集 第29号 1973. 2月
- (2) 岸力、黒木幹男「移動床流における河床形状と流体抵抗(I)」北海道大学工学部研究報告 第67号
- (3) Einstein, H.A. "Formulas for the transportation of bed load" Trans. ASCE 107, 1942
- (4) Einstein, H.A. "The Bed-load Function for Sediment transportation in open channel flows" U.S. Dept. Agriculture, Soil Conservation Ser., Tech Bull. 1026, 1950
- (5) Bagnold, R.A. 文献[13]中に紹介
- (6) Toffaletti, F.B. "Definit Computations of Sand Discharge in Rivers" Jour. ASCE. HY1 1969
- (7) Laursen, M. "The total Sediment load of Streams" Proc. ASCE. HY1. 1958
- (8) Graf, W.H. "Hydraulics of Sediment Transport" McGraw-Hill, 1971
- (9) Guy, H.P., Simons, D.B., Richardson E.V. "Summary of Alluvial channelled Data From Flume Experiments, 1956-61" U.S. Geol. Survey Profes. Paper 462-I, 1966
- (10) Gilbert, G.K. "The Transportation of Debris by Running water" U.S. G.S. Profes. Paper 86 1964
- (11) 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男「河床砂礫の掃流速度に関する研究(1)」土木研究所報告 98号 1956
- (12) Garde R.J. - Raju K. G. R. "Regime Criteria for alluvial Streams" Jour. ASCE HY.6 1963
- (13) Yalin, M.S. "Mechanics of Sediment Transport" Pergamon p. Ltd.
- (14) Rubbey, W.W. "Settling velocities of Gravel, Sand and Silt" American Jour. of Science, 25-148, 1923
- (15) Engelund F. Closure for "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams" Proc. ASCE HY4, 1967