

建設省土木研究所 正会員 須賀 慶之

1. はじめに

河川工学上、流砂関数の重要性は広く認識されているところであり、浮遊流砂関数に関しても数多くの研究が行われてきた。特に最近の傾向として、浸透箇所、河口部、あるいは貯水池の埋没の問題や河床変動などに関連して、浮遊流砂関数への依存度はきわめて大きくはなっているように思われる。

しかし、現在の浮遊流砂公式は定性的にはともかくも、定量的に実界面からの要請を満足するにはほど遠い。従来の研究の多くは、均一粒径がそれに近い混合度の河床材料に基づく実験または実測によるものであり、日本の河川のように一般に比較的混合度の大きい河床材料の河川では、その適合性は十分でない。このことは多くの河川技術者により痛感されているところであり、これを打開するために建設省においては全国的規模で河川の实測が開始された。ここでは、あてに発表された資料⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾に基づき、特に実界面に主眼を置いて混合粒径特性の影響を考慮し、次の諸点の検討を行う。

- (1) 浮遊流砂関数として従来提案されている代表的な Lane-Kalinski 公式および Einstein 公式について、実測値に基づいて検討し、一般的の問題点として考察する。
- (2) 浮遊流砂関数の理論式、および理論式の適用上の問題と挙げて、理論追求の限界について考察する。
- (3) 実用算定公式の関数形、およびその係数については実測値および実験値に基づいて検討する。

2. 実測資料に基づく浮遊流砂量公式の適合性

浮遊流砂の観測は全国約10河川において開始されている。まだ緒についてはおぼろげで、資料数も十分ではなく、観測時の流量範囲もひろくはないが、その結果は流砂関数を河川工学的に実界面から評価ある点において興味深い。自然量は河床材料粒径の混合度⁽⁴⁾をれ、および同じ掃流力に対して水浮と勾配が実験値と大きく異なる。図-1は浮遊流砂と河床材料の粒度分布の関係の例で、浮遊砂の粒径が非常に小さいことを示している。大きい流量時の資料は少ないが、この傾向はこれらの河川の資料についてもいえることであって、平均粒径が非常に大きい河川でも例外ではない。Einsteinは実用的見地から河床材料中の10%以下に存在する粒径範囲を Wash load としている。しかし、この定義にしたがうと浮遊砂の90~100%が Wash load ということになる。濃度分布式にしたがうものは Wash load ではないのであり、ここでは浮遊砂量の中から特に Wash load を区別しないとある利便性の例と同様の立場をとり、Wash load を含んだままの資料が解析に用いられた。

各種の流量時の浮遊砂量の実測値と Lane-Kalinski 公

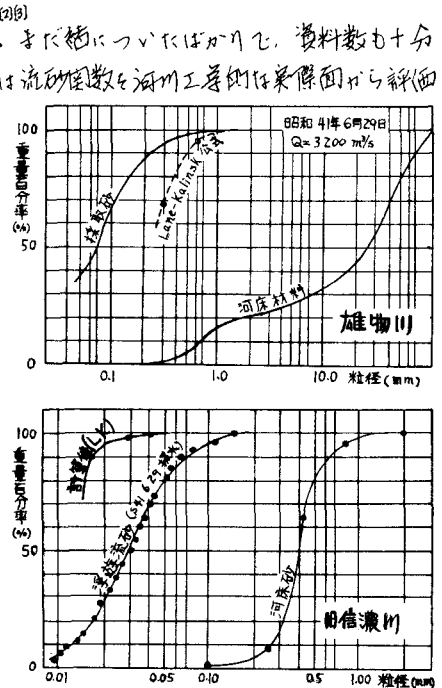


図-1 浮遊砂と河床材料の粒度分布

式あるいは Einstein 公式による計算値とが、総浮遊砂量 Q_s と流量 Q との関係において、実測の行われた河川毎に検討され報告が行われた。なかでは、長良川、矢作川および旧信濃川が実測時の流量の範囲も大きく、測定の数多く行われた。これらの河川の例として Lane-Kalinslee 公式による計算値との比較を見ると、長良川の例では数倍程度の誤差をだいたいの値を示しているが、矢作川の例では実測値に比べて計算値はかなり小さく、反対に旧信濃川の例ではかなり大きくなっている。全実測資料を通じて、流砂量だけについておととほす次のことが言えそうである。

(1) Lane-Kalinslee 公式はなかでは実測値に近い傾向を示しているが、10倍から100倍近い誤差をおとさなくてはならない。

(2) Einstein 公式は粒径が少し大きく低くと遮蔽係数が大きくなり、浮遊砂量がゼロとなる。平均粒径が1ミリ以上の河川への適用は困難とせねばならないであろう。

(3) 修正 Einstein 公式は粒径の大きい河川では Einstein 公式以上に適合度がある。

次に、流砂量の物理的内容として総流砂量のほかに粒径別の流砂量が重大な意義を有する。

四-1の例は表-1の流砂量測定の例であるが、

横断面平均の浮遊砂の粒度分布を示すが、浮遊砂量公式の粒径別流砂量の精度は一層不確かであるといわなければならぬ。旧信濃川の場合、0.073%以下の砂は全体の1.5%であるが、これをさらに4つに分けて、70~200 μ mまでの10種の流量について Lane-Kalinslee 公式によって計算が行われた。その結果表-2のようであるが、いずれのケースにおいても90%くらいの流砂量が一番小さい0.015 μ mの砂で占められ、一番大きい0.073%の砂に比べては0.1%余りにしかならない。計算値は粒径の区分の仕方によっても、その結果が大きく左右されるようである。

Einstein 公式は遮蔽係数、Lane-Kalinslee 公式は粒度の取扱いに欠点があることが、芦田道⁽⁵⁾によって実験的に指摘されているが、後者の場合には混合粒径の取り扱い方も十分ではない。このように、これらの公式は定量的にはおととほす、定性的にも疑問があり、信頼性は十分とはいえない。

3. 浮遊流砂関数とその理論追求の限界

河床材料の混合度の大きい日本の河川では、非常に細かい浮遊砂が観測され、河床材料と浮遊砂の粒度分布は一般に大いに異なる。浮遊砂関数では特に混合粒径の影響が検討されなければならない。

浮遊流砂関数は濃度分布と速度分布の積として与えられる。両分布式をそれぞれ

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-y}{h-a} \right) \left(\frac{a}{y} \right)^{\frac{w}{K u_*}} \quad (1) \quad \frac{U}{U_*} = A + \frac{1}{K} \log_e \frac{y}{K_s} \therefore \frac{U}{U_*} = 1 + \frac{U_*}{K U_*} (1 + \log_e \frac{y}{K_s}) \quad (2)$$

とすれば、浮遊流砂量 $q_s = \int_a^h C u dy$ である。ここに、 C は濃度(岩種)、 C_a は河床から $y=a$ の点の濃度、 $U_* = \sqrt{g h I}$ 、 h は水深、 I はエネルギー勾配、 K はカルマン定数、 w は沈降速度、 U は y の点の流速、および U_m は平均流速である。Einstein⁽⁶⁾あるいは吾川⁽⁷⁾によれば、浮遊流砂量 q_s は、

$$q_s = C_a \frac{a U_*}{0.216 K} \left\{ \left(\frac{U_m}{U_*} K + 1 \right) I_1 + I_2 \right\} \quad (3)$$

ここに $I_1 = 0.216 \frac{q_s}{a} \left(\frac{a}{K - a} \right) \frac{W}{K U_*} \int_{a/K}^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^{\frac{W}{K U_*}} dy$, $I_2 = 0.216 \frac{q_s}{a} \left(\frac{a}{K - a} \right) \frac{W}{K U_*} \int_{a/K}^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^{\frac{W}{K U_*}} \log y dy$

である。 I_1 および I_2 は $\frac{a}{K}$ および $\frac{W}{K U_*}$ の関数としてEinsteinにより図表が与えられている。浮遊砂の濃度分布式(1)は粒径ごとに成り立ち、重ね合わせることによって実験的にも明らかにされている。また、芦田・道上は基底濃度 C_a に対して、浮遊砂の濃度は粒径毎に河床付近で掃流砂のそれに接続しているとして、掃流量公式に佐藤吉川・芦田公式($q_s = \varphi F U_*^3 / \{(B/\varphi) - 1\} g$)を用いて、 $C_a = \frac{q_s}{U_* a}$ 、ここに a は掃流層厚($a = \alpha d$)、 U_* は掃流層内の平均流速($U_* = \beta U_m$)を提案した。佐藤吉川・芦田公式では掃流力と限界掃流力の比 Z_0/Z_c が大きいときより大きく取りと粒径の影響が小さく取りに依っている。したがって、掃流力が小さい範囲では遮蔽効果も大きいから、十分大きい掃流力($Z_0 \gg Z_c$)の状態では河床砂と掃流砂の粒度分布を近似的にはほぼ等しいと仮定することができるとであろう。その場合、各粒径毎の基底濃度は I_1 および I_2 をそれぞれ与えられた粒径範囲の砂が河床砂および基底濃度において占める割合として、 $C_a = \sum C_{aib} = K F U_*^3 I_1 / \{(B/\varphi) - 1\} g a$, $K = \varphi/\beta$ (4)

となる。したがって、粒径別掃流量を現れる関数形として式(4)を式(3)に代入すれば、

$$q_s = \sum q_{sib} = \frac{K F U_*^3 I_1}{0.216 \{(B/\varphi) - 1\} g} \left\{ \left(\frac{U_m}{U_*} K + 1 \right) I_1 + I_2 \right\} \quad (5)$$

を得る。しかし、この式には不確定要素が多く含まれている。しかもその影響あるところが多い。実用的見地からすれば、 a のとり方で流砂量が大きく変化するから、および河床中に占める割合は小さくても小粒径の浮遊流砂量が非常に大きく取りながら、wash loadとの境界をどこで定めるかが重大な問題となる。また、 q_s が指数あるように K の変化的影響も無視することはできず、式(5)に K の式を代入することは複雑にあるばかりであるから、繰り直し計算により計算値を修正することも必要である。現象的な問題としては、河床付近の砂の動き、砂運の収成および水の流れ方に関連したものが依然として不明確でいる。 a は河床材料の粒径 d に比例させる仮定が多いが(Einsteinでは $a = 2d$)、砂運や水運にも関係がありそうである。もし、 $a = \alpha d$ とすれば、粒径毎に掃流層厚が変化する、それに伴って U_* も変化するからである。掃流層は拡散による流砂以外の流砂がまじっている層のこと、必要なのは a に代わる C_a 値の定めから、掃流砂の濃度分布についても検討されなければならない。また、遮蔽係数の検討のほか、河床付近の流速分布やそれの様子に砂運と摩擦関係も関係するものがあり、Bailap⁽¹⁾らの実験でも明らかに砂運の影響も無視することはできない。このように、浮遊流砂問題は不明瞭な河床付近の水と砂の流れの影響を大きく受け、実用的には都合の悪い形となっている。そして数多くの精度のよい実験と実河川の資料に期待あるところが多いのであるが、当面の技術的要求を満たすために、他の工夫に対する要請は大きい。

4. 採用算定公式

流砂濃度と流速分布式から理論式は河床付近の不明確な現象の影響が大きい、現状では多くは期待されたい。当面の問題として採用算定公式が注目されるゆえである。採用算定公式としては、 $Q_s \propto Q$, $q_s \propto I$ あるいは $Q_s \propto Q^2/A$ の形のものが多くにより、また $Q_s \propto (I/A) Q$ の形のものがLane⁽¹⁾により提案されている。後者の案測では全川の河川において $Q_s \propto Q^2$ の関係を認められ、(図-2参照)、

$$Q_s = (10^6 \sim 10^7) Q^2 \text{ (m}^3\text{/sec 単位)}$$

が暫定的に提案されている。ただし、河床砂は非常に細い、その粒径別流量は考慮してゐる。

ここでは、流れの保有する河床砂の量からの考察を進める。実際の河床の砂は上流の地理的及び氷理条件により異なるものがあり、流れの保有能力の検討は一つの必要条件の検討にあらずないが、実用計算公式の理論的根拠を試みる。現象を平均値で単純に扱い、近似的に $q_s = C_m q$ とする。これは d が小さく濃度の鉛直分布が均一に近いときに成り立つ。ところで平衡状態では河床あるいは掃流界に落下する河床砂と同じ粒度構成で同量の砂が流れの中にまきあげられているから、落下砂のエネルギーを無視すれば、近似的に一定速度で重力により落下する砂粒のエネルギー $(\rho_s - \rho) g h C_m u$ に等しいエネルギーが、掃流界あるいは河床から砂を河床に送るために流れから与えられているわけである。このエネルギーは流れの失うエネルギーの一部であるから、その割合を ψ ($\ll 1$) とし $\psi q_s g h$ とすれば、

$$C_m = \frac{\psi I g}{\left\{ (\rho_s / \rho) - 1 \right\} h u}$$

$$\therefore q_s = \frac{\psi}{(\rho_s / \rho) - 1} \cdot \frac{I}{u h} q^2 \quad (7)$$

$$\therefore Q_s = \frac{\psi}{(\rho_s / \rho) - 1} \cdot \frac{I}{w A} Q^2 \quad (8)$$

とする。式(8)は長方形またはそれに近い断面に適用される。これらの式は吾々の式及び Lane の式と比較すると興味深い。 ψ は流量によってあまり変化した量である。図-2 では各河川毎に Q が Q^2 の直線のまわりにはばらついていることも興味深い。 ψ は広い範囲の観測及び実験資料により検討されなければならないが、仮に定数として、河床砂の平均粒径 0.1mm の 15 の実験資料(土研異田研究所提供)から、ばらついている値の平均として求めると、 $\psi = 0.05$ である。一方、実験値から計算された推定値を試みると、 ψ の値はオーダー的にほぼ実験値と一致する。これは予想されたことであるが、むしろ小さい値を示している。

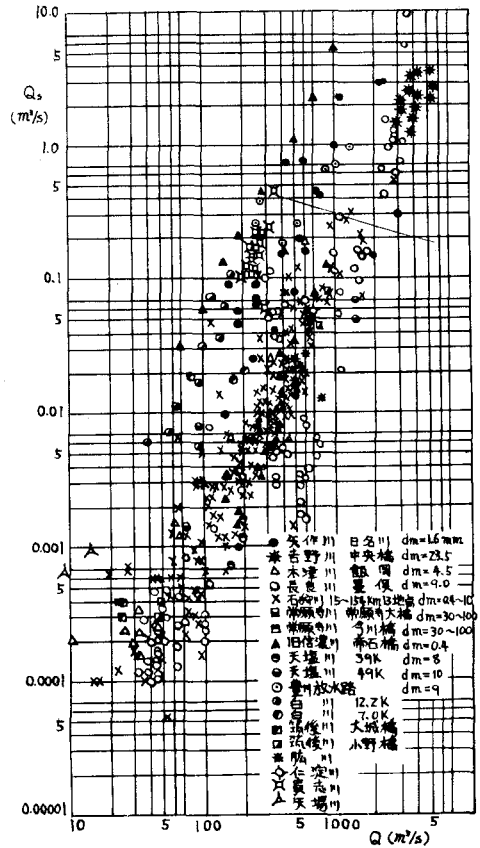


図-2 実験河床砂量と流量の関係

- (参考文献) (1) 建設省土木研究所: 河床変動に関する研究, 第19回土木建設技術研究発表会, S40.11, S.41.11
 (2) 建設省中部地方建設局木曽川下流工事事務所: 長良川河床変動調査
 (3) 長良川河床変動調査: 河川の土砂流送に関する研究, 土木研究所報告 101号, S.33.8
 (4) 伊藤 吾郎, 河床: 河床の土砂流送に関する研究, 土木研究所報告 101号, S.33.8
 (5) 伊藤 吾郎: 河床の土砂流送に関する研究, 土木研究所報告 101号, S.33.8
 (6) H.A. Einstein: The Bed Load Function for Sediment Transport in Open Channel Flow, United States Department of Agriculture Soil Conservation Service, Tech. Bul. No. 1026, 1950
 (7) 吾川 寿夫: 河床砂の量と流速との関係, 土木研究所報告 101号, S.33.8
 (8) 橋本 一郎: 河床砂, 水工要綱 研究 3, 41.8
 (9) Bishop, Simon, and Richardson: Total Bed Material Transport, A.S.C.E. H/2, 1965
 (10) E.W. Lane: The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering, Proc. A.S.C.E. vol 87, 1955