

九州大学 工学部 正員 〇平野京夫

〃 〃 〃 礎 謙三

〃 〃 学生員 亀島海人

まえがき

混合砂礫河床に関する研究としては、掃流砂量に関する Einstein¹⁾の研究、限界掃流力に関する工屋おふ心 Egiagaroff²⁾の理論的研究、浮流砂の濃度分布に関する Huns³⁾、岩垣ら⁴⁾、芦田⁵⁾、吉川ら⁶⁾の研究など、基礎的な問題をあつかったものが多い。また、均一砂礫河床の河床変動については従来から多くの研究がなされており、計算例も豊富である。しかし、河川の多くの粒度範囲の広い混合砂礫河床河川であるにもかかわらず、混合砂礫河床の変動現象を対象にしたものは意外に少なく、貯水池下流の armouring に関する Hasan⁷⁾や河村⁸⁾の実験的研究などがある程度である。その他にも混合砂を用いて河床変動の実験を行った例はあるが、はっきりした結論がえられていないものが多い。これは、筆者ら¹⁰⁾が先に指摘したように、掃流力が限界掃流力に比しかなり大きい場合には混合砂礫河床の変動と均一砂礫河床のとの間に顕著な差が認められにくいことによるものと思われる。しかし、掃流力が限界掃流に近づくと河床の粒度構成が変化し、貯水池下流や狭さく部における河床砂礫の粒径が他の場所と比べ粗いという実際の河川においてよく見受けられる現象を呈するようになるが、河床の粒度が変化すると限界掃流力や流砂量が変化するので、将来の河床砂礫の粒度を予測することは、河川工学上重要な課題の一つである。

本文においては、河床の表層に流砂の発生する“交擾層”の存在を想定することにより河床と粒度の変動計算式が導かれており、実験値と計算値との比較が示されている。

1. 実験およびその結果

前報に引き続き河床低下の実験が行われている。実験に用いられた水路は幅 60 cm のコンクリート製水路で、下流端に床止めが設置されている。実験 No I および II は一様幅水路、No III は下流端から 5~8 m の区間が幅 40 cm の狭さく部になっており、その前後に 1.5 m の有り付部がある。河床砂は A 砂 ($d_{50} = 0.98 \text{ mm}$, 標準偏差 $\sigma = 2.31$)、B 砂 ($d_{50} = 1.20 \text{ mm}$, $\sigma = 2.66$) の 2 種で、その粒度曲線は図-1 のようである。実験中は流量は一定に保ち、適当な時間間隔で水面形状、河床形状を測定させ、河床砂と水路下流端における流砂を採取される。実験の要目は表-1 のようである。

実験結果の 1 例が図-2, 3 に示されている。ここで注目すべきことは、この実験において河床低下のはげしい通水初期には粒度はあまり変化せず、河床が低下して $U_*^2 / Sg d_{50} = 0.08 \sim 0.1$

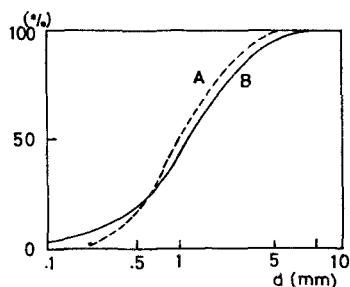


図-1 粒度曲線

表-1 実験の要目

実験番号	河床砂	単位幅流量 (cm ² /s)	初期河床勾配 I ₀	通水時間 (分)
No I	A 砂	127	0.0154	3000
No II	A 砂	243	0.0141	720
No III	B 砂	167	0.0075	3000

になると急に平均粒径が増大しはじめることである。これは、掃流力が大さく間は粗い砂も細かい砂も一様に流送されるので分級作用が起りにくいから、掃流力が小さくなると粗い砂粒が動さにくくなると河床に残るためと考えられる。

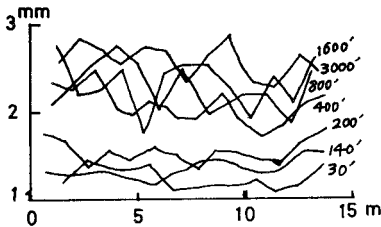


図-2 中央粒径の変化

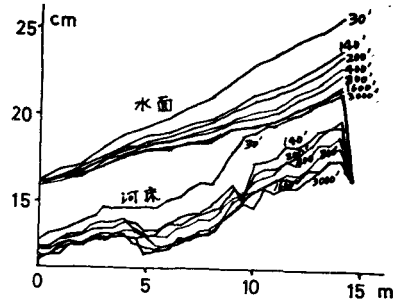


図-3 水面と河床の時間変化

2. 河床および粒度の連続の式

実験結果によると、河床が低下するにつれて河床の粒度は次第に粗くなり、粒度が変化するのは河床表面近くのごく薄い層だけで、それより下の河床砂の粒度は変化していない。従って、流砂はこの薄い層のみに起因し、この層からとれた砂粒が流砂となって移動した後、再びこの層に帰着するという場合には、この層とその直上の掃流砂層との間で砂粒を交換しながら河床と粒度の変動が進行すると考えられる。そこで、この薄い層(以下、この層を仮りに交換層とよぶことにする)中において深さ方向に粒度と空隙率が一定であると仮定して連続の式を導くことにより、河床上昇の場合と低下の場合で若干異なる式がえらる。

1) 河床上昇の場合

時刻 t における河床高を z 、交換層の厚さを a 、交換層における空隙率を λ 、単位幅流砂量を q_s 、ある粒径範囲の砂の流砂量を q_{si} 、その砂が交換層中に占める割合を p_i 、河床幅を B とすれば、図-4 のモデルより河床と粒度の連続の式は

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial(q_s B)}{\partial x} + \frac{a}{1-\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} = -\frac{1}{aB(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial(q_{si} B)}{\partial x} - p_i \frac{\partial(q_s B)}{\partial x} \right\} \quad (2)$$

図-4 河床モデル

2) 河床低下の場合

交換層の下の河床における空隙率が λ_0 である粒径範囲の砂の占める割合をそれぞれ λ_0 および p_{i0} とすると、河床上昇の場合と同様にして

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda_0)B} \frac{\partial(q_s B)}{\partial x} + \frac{a}{1-\lambda_0} \frac{\partial \lambda}{\partial t} - \frac{\lambda_0 - \lambda}{1-\lambda_0} \frac{\partial a}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} = -\frac{1}{aB(1-\lambda_0)} \left\{ \frac{\partial(q_{si} B)}{\partial x} - p_{i0} \frac{\partial(q_s B)}{\partial x} \right\} + (p_i - p_{i0}) \left(\frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} - \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial t} \right) \quad (4)$$

河床低下の場合の河床の連続式(3)において $\lambda = \lambda_0$ とすれば $\frac{\partial \lambda}{\partial t} = 0$ とおけば河床上昇の場合の式(1)に一致し、さらに $\frac{\partial a}{\partial t} = 0$ とすれば通常の河床の連続の式に一致する。

3. 混合砂礫河床の掃流砂量と限界掃流力

混合砂の掃流砂量式としては Einstein 公式が有名であるが、この式による掃流力の補正は細い粒径に対して過大であることが指摘されている。よって、ここでは従来の式を仮定して考察することとする。

$$\frac{q_{bl}}{u_* d_i} = P_i K \frac{u_{*ci}^m}{u_*^m} f(\frac{u_{*ci}}{u_*}) \quad (5)$$

こゝに、 d_i : ある粒径範囲の砂の平均粒径、 q_{bl} : 粒径 d_i の砂の単位幅流砂量、 u_* : 摩擦速度、 $u_* = u_*^2 / sg d_i$ 、 $u_{*ci} = u_{*ci}^2 / sg d_i$ 、 S : 砂の水中比重、 u_{*ci} : 粒径 d_i の砂の限界摩擦速度、 K および m : 定数である。式(5)の係数を検討するためには実測値より $q_{bl}/u_* d_i$ と u_{*ci} を求めて plot すると図-5 のようになる。図によると描点は u_{*ci} が大きい所ではほぼ 1 本の直線上にまとまっているが、 u_{*ci} の小さい所では式(5)の $f(u_{*ci}/u_*)$ は 1 に収めらるから、 $m=1$ 、 $K=4$ としてよいであろう。土研公式においては $m=1$ 、 $K=3.3$ (粗度係数 $m=0.055$ として計算) とするので実測値とほぼ等しくなる。また、 u_{*ci} が小さくなると描点が粒径ごとに分れており、限界掃流力の無次元表示 u_{*ci} が粒径により異なることを示している。これらのことより、粒径別流量及び限界掃流力を与えてやれば、粒径別流量は既存の公式により計算できると考えられる。

次に図-5 より粒径別 u_{*ci} を求めて 平均粒径 d_m と粒径 d_i との比 d_i/d_m に対して plot すると図-6 のようになる。図は Egin-zarovskii の式³⁾

$$u_{*ci} = 0.1 / (\log_{10} \frac{d_i}{d_m})^2 \quad (6)$$

において、河床の代表粒径 d_m として d_m を用いた計算曲線も記入されている。測定値はほぼ式(6)の傾向と一致しているが、値はやや小さく、式(6)右辺の定数 0.1 を 0.055 としてもなお一致する。しかし、式(6)は流速分布として対数分布を用いて導かれたものであるで d_i/d_m の小さい範囲に対して問題があり、過小な u_{*ci} を与えると考えられる。

4. 計算値と実測値の比較

一様水路における実験 No I, II は¹¹⁾ 前報で用いたと同じ簡略化を行って計算することとする。すなわち、式(3)、(4)を $x=0$ から $x=L$ まで積分し、流れ方向については平均値を考

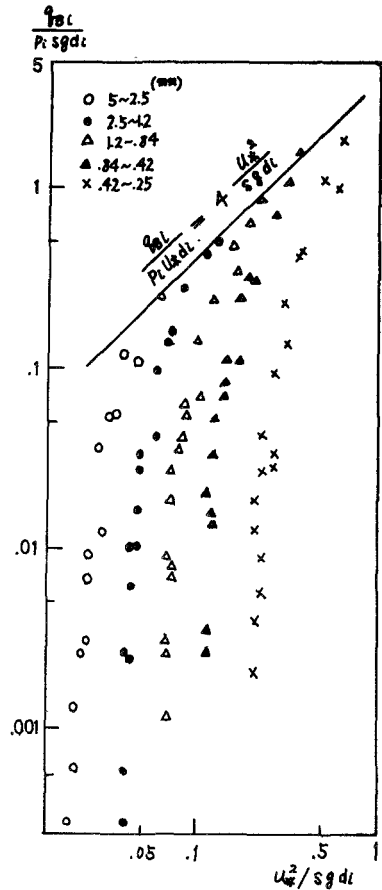


図-5 流砂量図

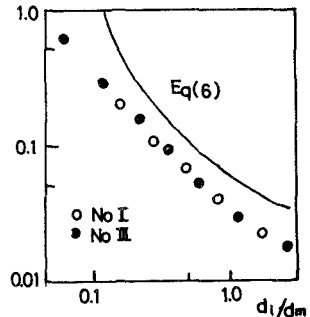


図-6 限界掃流力

2. $a = \text{const}$ とすると式(3), (4)は次のようになる。

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{2}{(1-\lambda)l} \left(\frac{g_0}{l} - a \frac{d\lambda}{dt} \right), \quad \frac{dP_i}{dt} = \frac{1}{(1-\lambda)al} (P_{i0} g_0 - g_{0i} a) + \frac{P_{i0} - P_{i0}}{1-\lambda} \frac{d\lambda}{dt} \dots \dots \dots (7)$$

こゝに、 I は河床勾配である。上式と式(5)および式(6)の係数 0.1 を 0.055 に修正し元々のを用い、 $a = 0.7 \text{ cm}$ とし計算した値と実測値の比較は図-7 のようであり、両者はかなり一致を示している。

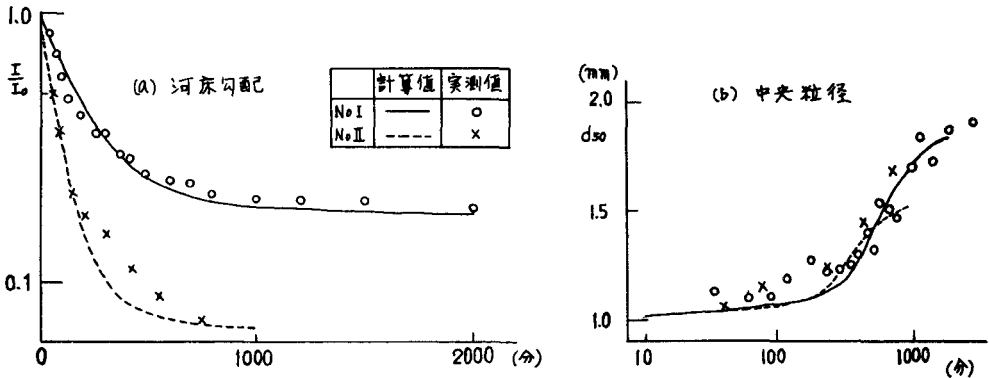


図-7 計算値と実測値の比較

なお、幅の変化する No II については、式(1)~(4)と不等流計算を組合せた逐次計算を現在実施中であり、結果については講演時に述べたい。

参考文献

- 1) Einstein: Bed-load function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulltine, (1950)
- 2) 土屋: 混合砂礫の限界掃流力について, 土木学会論文集, 98号 (昭38)
- 3) Eginaroff: Culculation of Non-uniform Sediment Concentrations, proc. of ASCE, HY4, (1965)
- 4) Hunt: On the Turbulent Transport of a Heterogeneous Sediment, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol 22, (1969)
- 5) 岩垣, 土屋, 矢野: 浮流現象に及ぼす粒度組成の影響に関する実験, 京大防災研年報, 8号, (昭40)
- 6) 芦田, 道上: 浮流砂量に関する実験的研究, 京大防災研年報, 10号B, (昭42)
- 7) 吉川, 福岡: Hydraulic Roles of Wash load, 土木学会論文集, No 155 (1968)
- 8) Haean, Garde: Discussion of "River-Bed Degradation Below Dams", proc. of ASCE, Vol 93, HY3, (1968)
- 9) 河村: ダム下流流域における河床変動の研究, (1969)
- 10) 平野, 碓, 小山: 貯水池下流の河床低下について, 第24回年次学術講演会概要, (1969)
- 11) 平野, 小山, 上浜: 貯水池下流の河床低下について, 土木学会西部支部研究発表論文集, (1969)