

貯水池下流の河床低下について

♂ ♀ ♂ 上 派 暉 男

流砂のある河川にダムが建設されると、上流から流入してきた土砂は貯水池内に堆積する。

従って、ダムの下流では上流からの土砂の供給がなくなり、河床が次第に低下する。その際、河床を構成する土砂のうち、細いものは粗いものに較べて移動しやすいからはいやく流出し、河床は低下とともに次第に粗い砂礫でおおわれるようになり、いわゆる *armouring* 現象を呈する。

このようにして河床は最終平衡形状に漸近するのであるが、その最終形状は河床の各点で掃流力が限界掃流力に等しい静的平衡状態であると考えられる。この河床低下は、基本的には、流砂量の式、河床連続の式および水流の運動方程式を連立して解けばよいわけであるが、河床の変動に伴う粗度の変化および *armouring* 効果をどう評価するかという点に問題が残されている。特に後者が貯水池下流の河床変動と一般の河床変動の異なる点である。

本報告では均一砂を用いた（すなわち *armouring* 効果のない場合）河床低下についての実験結果を述べ、それをもとにして考察し、河床低下の簡略計算式を提案する。

armouring効果については、現在、混合砂を用いた実験を行なっているので、実験の終了した範囲で結果を報告する。

実験に用いた水路は、巾 60 cm 、長さ 15 m のコンクリート製固定水路で、上流 5 m を固定床、下流 10 m を移動床とし、下流端には底止めを設置した。移動に用いた砂は、均一砂 ($d_{50} = 0.83\text{ mm}$) と混合砂 ($d_{50} = 0.98\text{ mm}$) で、それらの粒度分布を図-1に示す。

実験は流量を一定にして行ない、適当な時間間隔で水面形状と河床形状を測定した。また、流砂量を測定するために、水路下流端で流砂を採取した。実験の要因は次のとおりである。

実験結果を列挙すると次のようである。

- (1) 河床、水面とも通水をはじめると急激に低下をはじめ、時間がたつにつれて低下の割合は次第に減少する。

- (2) 各時間とも水面形状および河床形状は
- | | | | |
|----|-------|--------|----|
| IV | 122.5 | 9.9/51 | 混合 |
|----|-------|--------|----|
- 直線状になっている。(図-2参照)河床は、いく分上に凸の傾向を示している。

- (3) 混合砂の実験では、通水初期の河床低下は均一砂の場合とはほぼ同様であったが、河床砂の粒径が上流から次第に粗くなり、河床低下の割合が急減して、顕著な armouring 現象を呈した。

№	流量 q (cm ³ /s)	初期河床 勾配 I。	粒度	d_{50} (mm)	通水時間 (分)
I	116.5	0.0154	均一	0.83	1700
II	93.3	0.0150	"	"	1450
III	243.3	0.0143	"	"	1520
IV	122.5	0.0151	混合	0.98	900

4 考察

4-1 流砂量の式

流砂量の式としては次式のタイプを用いる。

$$\frac{q_B}{\sqrt{s}gd^3} = K \left(\frac{U_x^2}{sgd} \right)^m \left(1 - \frac{U_{xc}^2}{U_x^2} \right) \dots (1)$$

ここに、 q_B ：単位巾当り流砂量

S ：砂の水中比重

d ：砂の粒径， U_x ：摩擦

速度， U_{xc} ：限界摩擦

速度， K および m は

定数で Brown 公式では $K=10$

$m=2.5$ 、佐藤、吉川、芦田

公式では $K=0.623(40\eta)^{3.5}$

$(\eta \leq 0.25)$ $m=1.5$ である

本実験で測定した流砂量を、式(1)を

$U_x/\sqrt{s}gd$ で割った次式

$$\frac{q_B}{U_x d} = K \left(\frac{U_x^2}{sgd} \right)^{m-1/2} \left(1 - \frac{U_{xc}^2}{U_x^2} \right) \dots (2)$$

で Plot すると図-3 のようとなる。限界摩

擦速度として岩垣公式より求めた

$U_{xc}=0.035gd$ を用いると、実験値は $K=2.7$

$m=1.5$ とした線のまわりにちよびる。指

数 m は、佐藤、吉川、芦田公式と同じで

K の値は同公式で、 $\eta=0.0164$ の場合に相

当するが、この η の値は実験の範囲では

$\eta=11$ 程度 ($R=2.5 \sim 6 \text{ cm}$) になる。

4-2 河床変動の式

一様断面の河床の連続の式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_B}{\partial x} = 0 \dots (3)$$

ここに Z ：河床高， λ ：砂の空けキ率である。式(3)を $x=0$ から $x=l$ まで積分すると

$$\int_0^l \frac{\partial Z}{\partial t} dx = -\frac{1}{1-\lambda} (q_{Bl} - q_{B0}) \dots (4)$$

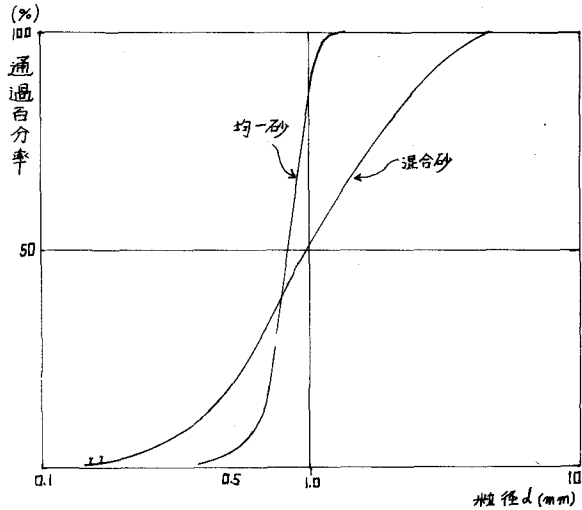


図-1 実験砂の粒度分布

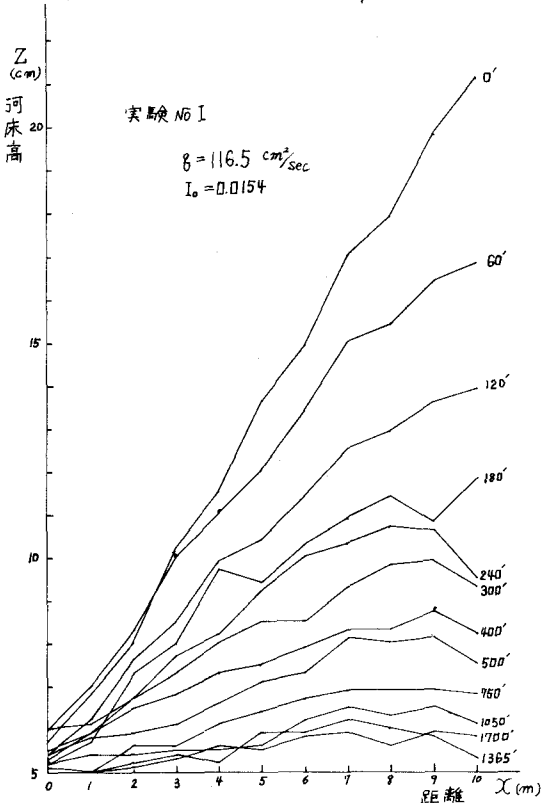


図-2 河床の時間的変化

ここに g_{00} , g_{02} はそれぞれ考えている区間の上流端および下流端における単位巾当りの流砂量である。ダム下流端では上流からの土砂の供給がないから $g_{00}=0$ であるから $\partial Z/\partial t$ の x 方向の平均値を $(\partial Z/\partial t)_m$ とすると 式(4)より

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)_m l = - \frac{g_{02}}{(1-\lambda)} \quad (5)$$

実験によると、河床はほぼ直線状になっているので、その平均勾配を I とすると、近似的に

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)_m = \frac{1}{2} \frac{\partial(Il)}{\partial t} = \frac{l}{2} \frac{dI}{dt} \quad (6)$$

となる。式(5) 式(6)より次式をうる。

$$\frac{dI}{dt} = - \frac{2g_{02}}{(1-\lambda)l^2} \quad (7)$$

次にエオルギー勾配の式

$$I_e = I - \frac{dI}{dx}(1-F^2) \quad (8)$$

ここに、 I_e はエオルギー勾配、 h は水深、 F はフルード数

において、ダムの築造されるような山間部では、河床勾配 I が大きいのかぶつうであるから、式(8)の右辺第2項を無視できる場合が多い。従って、

$$I_e = I \quad (9)$$

とすることができる。

流砂量の式として、式(1)を用い、 $I_e = I$ と (7式)に代入すると

$$\frac{dI}{dt} = - \frac{2K}{l^2(1-\lambda)} \frac{\sqrt{sgd^3}}{(sgd)^m} \left(\frac{g_b}{\varphi}\right)^{\frac{2}{3}m} I^{\frac{2}{3}m} \left\{1 - \left(\frac{I_k}{I}\right)^{\frac{2}{3}}\right\} \quad (10)$$

ここに、 g_b は単位巾流量、 $\varphi = g_b/u_{*k}$ 、 I_k は限界摩擦速度のときの勾配

となる。上式が河床低下の基本式である。 $m=1.5$ の場合は

$$\frac{dI}{dt} = - \frac{2K}{l^2(1-\lambda)} \frac{g_b}{sg\varphi} I^{\frac{2}{3}} \left(I^{\frac{2}{3}} - I_k^{\frac{2}{3}}\right) \quad (11)$$

となる。

4-3 河床低下の検討

g_b および φ が一定の場合、(11)式を積分すると

$$\left. \begin{aligned} \frac{I^{\frac{2}{3}} - I_k^{\frac{2}{3}}}{I_0^{\frac{2}{3}} - I_k^{\frac{2}{3}}} &= \exp\left[-\frac{2}{3}At\right] \\ A &= \frac{2K}{l^2(1-\lambda)} \frac{g_b}{sg\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

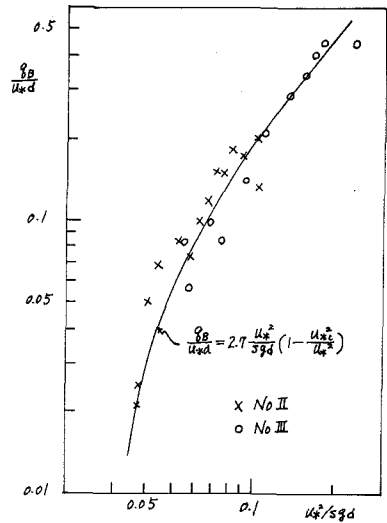


図-3 流砂量図

ここに、 I_0 :初期河床勾配である。

しかし、 ϕ は河床の粗度に關係するが、粗度は u_b^2/sgd と斥によって変化するので、 ϕ も u_b^2/sgd 斥によって変化する。移動床の粗度については多くの研究が行なわれているが普遍的な關係式は得られていない。そこで本実験の結果より ϕ と u_b^2/sgd を plot してみると図-4 のようになり、かなりよく実験値がまとまるので、それより求めた実験式

$$\phi = 7.2 / (u_b^2/sgd)^{0.25} \quad \text{----- (13)}$$

を用いることにする。式(11)に上式を代入すると、

$$\frac{dI}{dt} = - \frac{2K}{I^{1-\lambda}} \frac{\sqrt{sgd^3}}{(sgd)^{\frac{3}{2}m}} \left(\frac{gg}{\phi_0 u_c^{0.25}} \right)^{\frac{3}{2}m} \quad \text{----- (14)}$$

$$\text{ここに、} u_c = u_{bc}^2/sgd$$

$m=1.5$ として積分すると

$$\frac{5}{4} \frac{1}{I_x^{\frac{1}{2}}} \left\{ \log \left(\frac{(1/I_x)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1/I_x)^{\frac{1}{2}} + 1} \right) + 2 \arctan \left(\frac{1}{I_x} \right)^{\frac{1}{2}} - 2 \arctan \left(\frac{1}{I_x} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{g_0}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} = Bt \quad \text{----- (15)}$$

$$\text{ここに } B = K \sqrt{sgd^3} \left(\frac{1}{sgd} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{gg_0}{7.2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

g_0 : 基準単位中流量

$d=0.083$, $S=1.65$, $g_0=5.63 \text{ l/s}$, $K=2.7$, とすると、 $B=1.18 \times 10^{-4}$ となる。実験値より式(15)の左辺を計算し、時間 t に対して plot すると図-5 のようになる。かなり簡単な仮定を用いたにもかかわらず、計算値と実験値はよく合っている。

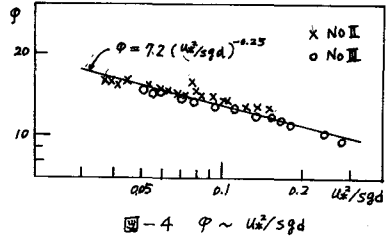


図-4 $\phi \sim u_b^2/sgd$

5 結論

均一砂についての結果を要約すると下記のようなものである。

i) 流砂量の式の係数および指数は 佐藤 吉リ 芦田 公式のそれとはほぼ一致した。

ii) 河床低下の式をもとめ実験値と比較してかなりよい一致をえた。

今後は混合砂の *armouring* 効果について研究をすすめていきたい。

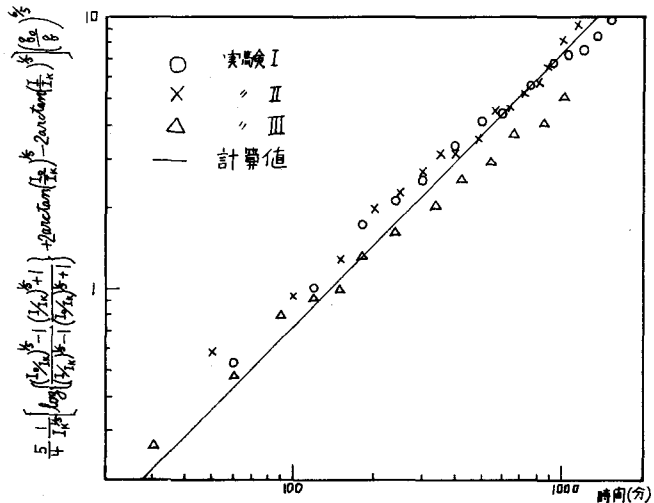


図-5 計算値と実験値の比較