

II-31 大容量貯水池の下流流域における河床低下の研究

岐阜大学工学部 正員 ○河村三郎

K. K. 水野組

加藤皓久

中部電力 K. K.

頼尾二郎

緒言 大容量貯水池が流砂河川に築造されるとダムの下流は流砂を遮断されるため低下する。河床が完全に低下した時の平衡状態は河川の静的平衡の状態になると考えられる。ダム下流の河床低下に関する最も重要な特徴はダム下流部の粒度分布が大きく変化することである。例えば、ダム築造前の d_{50} がダム築造後は築造前の粒度分布における $d_{80} \sim d_{70}$ の粒度となることである。このような現象は米国のHoover Damの下流部で実測されている¹⁾。しかしながら、この実測はダム付近に限られているから粒度分布の変化はダム地奥から下流に行くにしたがって減少して行くであろうことが推定される。この粒度変化を生ずる大きな原因はダム築造により土砂が供給されなくなるため、細い粒子の砂は洪水時の放流水により、流出してしまうためであり、このため年を経るとともに大きな粒径ののみが残ることになる。そして、この現象が順次下流へ伝わりて行くと考えられる。近年、大容量貯水池の築造による河床低下の被害が各国で大きな問題となり、この研究の必要性が大々々強調されている²⁾。しかしながら、これまでに行なわれた研究はほとんど問題点を提起し、その研究の方向を示唆しただけであった^{2), 3)}。河床低下量があるかどうかが推定できずならば河川の改修計画、設計、施工等に大きな自信を与えないことになり、また将来の河川維持計画も立てにくくなるであらう。

1. 河床低下量の推定方法 前述の河川縦断方向における粒径変化の範囲とその粒度分布が推定できれば、静的平衡勾配の理論⁴⁾により河床高が計算されるからダム築造前の河床高とダム築造後の粒径変化についてこの理論を使用し計算して河床高の差が河床低下量と考えられる。静的平衡勾配の理論でこの研究に必要な部分の概要はつぎのごとくである⁴⁾。

(i) 分割法による河床高と平衡勾配の計算式

(a) 河床高の計算式 この方法は河道を微小区間に分割しその区間の河床高の差から河床高を求める方法である。計算しようとしている区域を n 個の区間に分割した場合、この分割1区、ある一つの Δx_i 区間における河床高の差 Δz_i はつぎのごとく表示しよう。

$$\Delta z_i = -I_0 \left(\frac{a_c}{a_{c0}} \right)^\mu \left(\frac{B}{B_0} \right)^\nu \left(\frac{d_s}{d_{s0}} \right)^\lambda \Delta x_i + h_0 \left(\frac{a_c}{a_{c0}} \right)^\mu \left(\frac{B}{B_0} \right)^\nu \left(\frac{d_s}{d_{s0}} \right)^\lambda \left\{ \varphi \left(\frac{a_c}{a_{c0}} \right) \left(\frac{\partial a_c}{\partial x} \right) + r \left(\frac{B}{B_0} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) + \lambda \left(\frac{d_{s0}}{d_{s0}} \right) \left(\frac{\partial d_s}{\partial x} \right) \right\} - \frac{h_{cm}^3}{\rho g} \left(\frac{a_c}{a_{c0}} \right)^\mu \left(\frac{B}{B_0} \right)^\nu \left(\frac{d_s}{d_{s0}} \right)^\lambda \left\{ \varphi \left(\frac{a_c}{a_{c0}} \right) \left(\frac{\partial a_c}{\partial x} \right) + (r-1) \left(\frac{B}{B_0} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) + \lambda \left(\frac{d_{s0}}{d_{s0}} \right) \left(\frac{\partial d_s}{\partial x} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\text{そして } \varphi \text{ の値と } a_c \text{ による河床高 } z_i \text{ は、 } z_i = z_0 + \sum_{j=0}^n \Delta z_j \quad (2)$$

ここで、 I_0 ：基準点における水面勾配、添字0は基準点を示している。 B ：河川巾、 d_s ：河床土砂の平均粒径、 h ：水深、 x ：流れ方向にとつた距離、 z ：河床高、 μ, ν, λ, ρ の値は近似値として $\mu=6/7, \nu=9/7, \lambda=2/7, \rho=1/7$ である。 $h_{cm}^3 = Q^2 / g B_m^2$ と与えられる、 Q ：流量。 a_c の値は図-1により決定される。限界掃流力に関する岩垣公式⁵⁾は一般につぎのごとく示している。 $a_c = U_{*c}^2 / (10/P) - 1/3 d_s$ ----- (3) 中 U_{*c} は図-1から $U_{*c}^2 / (10/P) - 1/3 d_s$ の値

を求めればその値が a_c の値である。 d_c が $d \geq 3 \text{ mm}$ であるば図-1からわかるように $\kappa \left(\frac{a_c}{a_{c0}} \right)_m$ であり $\left(\frac{a_c}{a_{c0}} \right) = 0$ である。(1)式により、添字 m は ΔX_y 区画における平均値を示し、 Δa_c , Δd_s , ΔB は ΔX_y 区画の両端の断面における a_c , d_s , B のそれぞれの変化である。 $d_c \leq 3$

mm ときは、 $X > 0$ に行くときは a_c が減少する場合 $\Delta a_c < 0$, 増加する場合は $\Delta a_c > 0$ である。 Δd_s は $X > 0$ に行くときは d_s が減少する場合は $\Delta d_s < 0$, 増加する場合は $\Delta d_s > 0$ である。 ΔB は、 $X > 0$ に行くときは B が減少する場合は $\Delta B < 0$, 増加する場合は $\Delta B > 0$ である。

(b) 平衡勾配の計算式 各地点の平衡勾配は(1)式から得られ ΔZ_y と分割した区画 ΔX_y の値を使用して次式により求めらる。 $\Delta Z_y = -\Delta Z_y / \Delta X_y$ ----- (2)

(ii) 基準点における水面勾配 I_0 の決定方法 基準点とする場所は、基準点付近の河川巾がほぼ一様であり、河床滑らかで、算流状態となるような場所とする。 I_0 は次式により計算される。 $I_0 = (h_{c0}/L_0)^3 [6.0 + 5.75 \log_{10} (h_{c0}/d_{s0})]^{-2}$ ----- (3) $I_0 = \kappa h_{c0}^3 = Q^2 / g B^2$

2. 実験装置および実験方法 実験水路は図-2に示すような $0.4 \times 0.5 \times 7.7 \text{ m}$ のものであり、この水路の中に図-3のゴチック粒度分布をもつ砂を約 20 cm の深さに入れ、河床勾配を $1/500$ 、水平等所定の勾配を与えての一定流量を通水し、通水初期の各地点の水深、水面勾配、河床高をポイントゲージで測定し、静的平衡の状態となるまで通水して実験を行なう。静的平衡の状態となつとき、

水深、水面勾配、河床高を測定して断面し。断面したとき、模型床表面から深さ 1 cm 、巾約 20 cm 程度より表面の砂を各地点 ($0.5, 1.0,$

$1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 \text{ m}$) から通水後の粒度変化を求めるために試料を採取し。

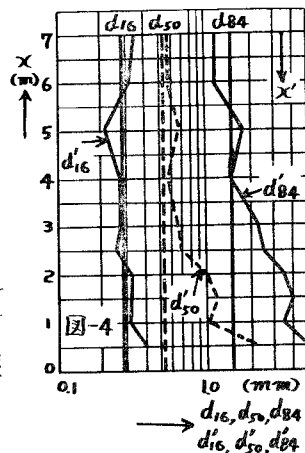
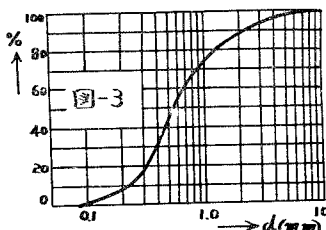
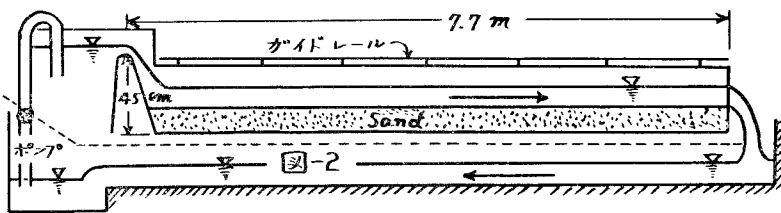
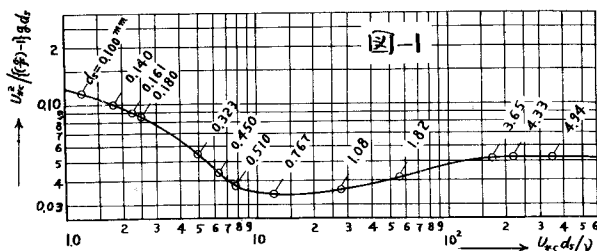
3. 実験結果と静的平衡勾配の理論による計算結果との比較

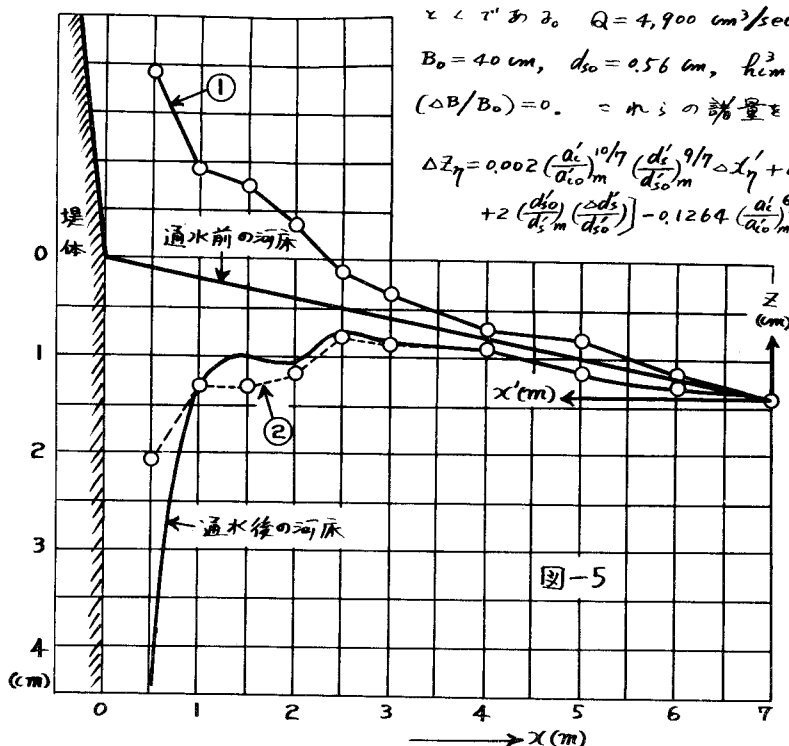
(a) 実験結果 実験結果の一例として、

通水前の河床勾配 $1/500$, 通水時間4時間30分、流量 $4.900 \text{ cm}^3/\text{sec}$ の場合を示す。 d_{16} , d_{50} , d_{84} と距離 X との関係で示した粒度変化は図-4のゴチックである。またそのときの河床高と距離との関係は図-5のゴチックである。

(b) 静的平衡勾配の理論による計算結果と実験結果の比較 ゴムか

下流 7 m の位置を原点として上流 X' 軸として計算する。計算に必要な諸量はつぎのゴ





$x < x'$ あり。 $Q = 4,900 \text{ cm}^3/\text{sec}$, $I_0 = 0.002$, $h_0 = 4.16 \text{ cm}$,
 $B_0 = 40 \text{ cm}$, $d_{s0} = 0.56 \text{ cm}$, $h_{cm}^3 = 15.3125 \text{ cm}^3$, $(B/B_0)_m = 1$,
 $(\Delta B/B_0) = 0$. これらの諸量を (1) 式に代入して次式をうる。

$$\Delta Z_\gamma = 0.002 \left(\frac{a'_c}{a_{c0}} \right)_m^{10/7} \left(\frac{d'_s}{d_{s0}} \right)_m^{9/7} \Delta x'_\gamma + 0.5943 \left(\frac{a'_c}{a_{c0}} \right)_m^{-3/7} \left(\frac{d'_s}{d_{s0}} \right)_m^{2/7} \left\{ 3 \left(\frac{a_{c0}}{a'_c} \right)_m \left(\frac{\Delta a'_c}{a_{c0}} \right)_m \right. \\
\left. + 2 \left(\frac{d_{s0}}{d'_s} \right)_m \left(\frac{\Delta d'_s}{d_{s0}} \right)_m \right\} - 0.1264 \left(\frac{a'_c}{a_{c0}} \right)_m^{6/7} \left(\frac{d'_s}{d_{s0}} \right)_m^{4/7} \left\{ 3 \left(\frac{a_{c0}}{a'_c} \right)_m \left(\frac{\Delta a'_c}{a_{c0}} \right)_m + 2 \left(\frac{d_{s0}}{d'_s} \right)_m \left(\frac{\Delta d'_s}{d_{s0}} \right)_m \right\}$$

各地点の河床高は

$$Z_\gamma = \sum_{\gamma=0}^{10} \Delta Z_\gamma \text{ ----- (9)}$$

 (6), (7) 式から得る結果は図
 5の曲線①の如くである。
 ゆえに河床低下量は (6), (7)
 式から得る河床高から通水
 前の河床高を差引く量で
 ある。これを示すに図-5の
 曲線②で表わされる。実験
 結果と計算結果を比較する
 とダム付近の河床高はダム
 からの落下水のため両者

は一致しているがダムから2.5mより下流は比較的よく一致しており実際河川にこの方
 法が適用しうることを示している。ダム下流2.0mまでの両者の不一致は通水をはじめた
 時のダム直下の砂がその下流1~2mの範囲に移動し、堆積して生じたものと見られる。
 ゆえに実験の際に、除々少なる流量から所定の流量まで増加させて行けばこの不一致は
 比較的少なく、ダム直下付近に限定されるであろうと推察される。

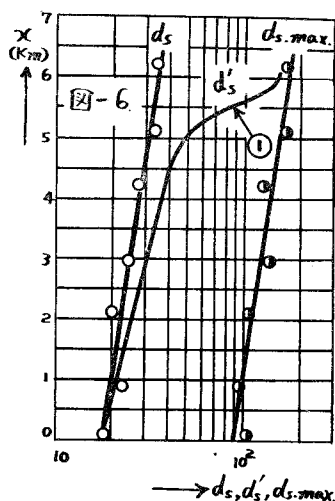
4. 実際河川における計算例 計算例として牧田川(揖斐川支流)

のNo.142の地点にダムが築造されたと仮定して河床低下量を計
 算してみよう。ダム築造前の d_s , $d_{s,max}$ と距離 x との関係は図
 6の如くである。No.142 ($x = 5.926 \text{ Km}$) の地点にダムが築造
 された場合、河床が静的平衡の状態になつたときの粒度変化を図
 6の d'_s の曲線①の如くにとり仮定する。

(a) ダム築造前の静的平衡河床高 計算に必要な諸量は文献6)

より、 $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{sec}$, $h_0 = 2.76 \text{ m}$, $B_0 = 137 \text{ m}$, $z = 4.22 \text{ m}$,
 $(\sigma/\rho) = 2.585$, $d_{s0} = 0.018 \text{ m}$, $d_{sfo} = 0.02 \text{ m}$, I_0 は基準点付近数
 点について、(5)式を用いて $I_0 = 0.0015$ を得た。 $d_s > 3 \text{ mm}$ で
 あるから $(a_c/a_{c0})_m = 1$, $(\Delta a_c/a_{c0}) = 0$ である。これらの諸量を (1),
 (2) 式に代入し図-6の d_s について計算して得る結果を図-7の曲線
 ①を示す。

(b) ダム築造後の静的平衡河床高 ダム築造後の河床高は図-6の d'_s について計算する。河床



高の計算式は、 $\Delta Z_{ay} = 0.0015 \left(\frac{B}{B_0} \right)^{6/7} \left(\frac{d_s'}{d_{s0}'} \right)^{9/7} \Delta x_y + 0.3943 \left(\frac{B}{B_0} \right)^{6/7} \left(\frac{d_s'}{d_{s0}'} \right)^{-2/7} \left[6 \left(\frac{B_0}{B} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) + 2 \left(\frac{d_{s0}'}{d_s'} \right) \left(\frac{\partial d_s'}{\partial x} \right) \right]$
 $+ 0.01875 h^3 \left(\frac{B}{B_0} \right)^{12/7} \left(\frac{d_s'}{d_{s0}'} \right)^{4/7} \left[\left(\frac{B_0}{B} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) - 2 \left(\frac{d_{s0}'}{d_s'} \right) \left(\frac{\partial d_s'}{\partial x} \right) \right] \dots \dots \dots (8) \quad Z_{ay} = 4.22 + \sum_{y=0}^{30} \Delta Z_{ay} \dots \dots \dots (9)$

この計算結果を示すと図-7の曲線②のごとくになる。

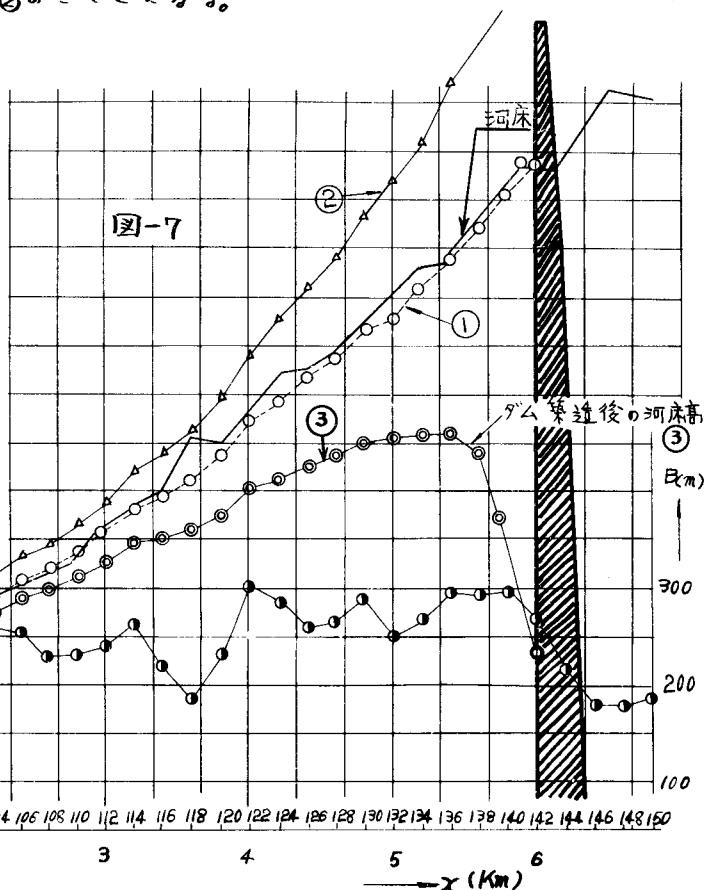
(c) 河床低下量の計算 グラム築造前

の静的平衡河床高に対する河床変動量 δZ_{by} は $\delta Z_{by} = Z_{by} - Z_{ay}$

----- (10) で与えられる。こゝに、
 Z_{ay} : グラム築造後の静的平衡河床高、
 Z_{by} : グラム築造前の静的平衡河床高、
 Z_y : グラム築造後の河床高 Z_y は次式で与えられる。

$Z_y = Z_{by} + \delta Z_{by} \dots \dots \dots (11)$

Z_y と x の関係を示すと図-7の曲線③のごとくになる。またグラム築造前の実測河床高 Z_{py} に対する変動量 δZ_{py} は、



$\delta Z_{py} = 2 Z_{by} - (Z_{ay} + Z_{py}) \dots \dots \dots (12)$ 図-6の d_s の曲線が合理的に決定されれば静的平衡勾配の理論を適用してグラム築造後の河床低下量を推定できることを示す。今後はこの d_s の分布を研究するのが大きな研究課題であり、河川の縦断方向における粒径変化とその分布を合理的に推定する方法を実験的に研究するため今年度は25mの実験水路を15m程度に延長して「数種類の砂と」を研究する予定である。

参考文献

- 1) Einstein, H.A.; Needs in Sedimentation, Proc. ASCE, Vol. 87, No. HY2, March, 1961.
- 2) Gamal Mostafa, M.; River Bed Degradation Below Large Capacity Reservoirs, Proc. ASCE, Vol. 81, Sept., 1955.
- 3) 佐藤清一; 河床変動量の予測, 土木技術資料 (1-2).
- 4) 増田重臣, 河村三郎; 河川の静的平衡勾配について, 土木学会論文集 70号, pp. 17-25.
- 5) 岩垣雄一; 限界搬送力に関する基礎的研究, 土木学会論文集 41号, 1956.
- 6) 増田重臣, 河村三郎; 荒砂の河川における平衡勾配について, 土木学会論文集 70号, pp. 8-16.