

20 低ダム群設置による河床変動計算について

北海道開発局 土木試験所 ○福田 義昭
清水 康行

はじめに

複数のダムを連続的に配置した場合の河床変動計算では、ダムにより不連続となる部分が多く、その境界条件の与え方によっては計算結果が大きく異なる。本報告では、境界条件の与え方を中心に、急勾配水路上に低ダム群または床固工群を設置した場合の河床変動の数値計算法を検討するとともに、前報¹⁾における水路実験に適用し、実験値との比較検討を行ったものである。

1. 河床変動の基本式

砂防施設を必要とするような河川においては、土石流や土砂流のような集合流動から、浮遊砂、掃流砂のような各個運搬まで、各種の土砂移動形態が考えられる。ここでは計算が比較的容易であり、かつ水路実験が掃流～土砂流形態の範囲に位置していることから、掃流形態として計算を行うこととした。計算モデルは流下方向の一次元モデルとし、基本式²⁾は以下に示すとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Z+h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) + i_e = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial (q_B \cdot B)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} + \frac{1}{a(1-\lambda)B} \left\{ \frac{\partial (q_{B_i} \cdot B)}{\partial x} - P_i^* \frac{\partial (q_B \cdot B)}{\partial x} \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$P_i^* = \begin{cases} P_i : \partial Z / \partial t \geq 0 \\ P_o : \partial Z / \partial t \leq 0 \end{cases}$$

ここで、(1)式は不等流の式、(2)式は流砂の連続式、(3)式は粒径別の流砂の連続式であり、 Z は河床高、 h は水深、 Q は流量、 A は断面積($A=B \cdot h$)、 α ：エネルギー補正係数、 g は重力加速度、 i_e はエネルギー勾配($i_e = n^2 Q^2 / B^2 h^{10/3}$ 、 n はマンシングの粗度係数、 R (径深) $=h$ としている)、 λ は河床砂れきの空けき率、 a は交換層の厚さ、 P_i 、 P_o は粒径 d_i の砂れきが交換層および交換層下に占める割合、 q_{B_i} は単位幅単位時間当りの粒径別流砂量、 q_B は単位幅単位時間当りの全流砂量($q_B = \sum q_{B_i}$)、 B は水路幅、 x は縦断方向距離、 t は時間である。

2. 数値計算法

水位の計算は、河床勾配が急勾配であり流れがほとんど射流と考えられるので、上流端に等流水深を与え、(1)式を差分化した式により、上流から下流に向って解を求めた。また、マンシングの粗度係数 n は次式で与えた。

$$n = \frac{h^{1/6}}{\sqrt{g} \{6.0 + 5.75 \log(h/2d_m)\}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

水位計算過程において、局部的に流れが常流になる等の原因により、不等流計算が不可能となる場合が考えられる。そこで、このようなことが生じた場合は、限界水深を与えて計算を進めた。

河床高の変動については、その微小擾乱の伝播速度の向きはフルード数 $Fr=1$ を境にして変化し、 $Fr < 1$ の場合は流下方向に対して正、 $Fr > 1$ の場合は負となる。したがって、差分メッシュを図-1 のようにとると Δt 時間後の河床高 Z_j^{n+1} は点 (n, j) と点 $(n, j+1)$ の諸量で決定され、差分スキームの取り方は距離、時間に関してどちらも前進差分としなければならない²⁾。

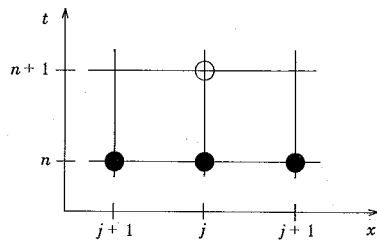


図-1 差分メッシュ

一方、粒度分布の擾乱は常に正で下流向きに伝播するので、 Δt 時間後の交換層に d_i の砂れきが占める割合 P_i^{n+1} は点 $(n, j-1)$ と点 (n, j) の諸量で決定され、差分スキームの取り方は距離に関して後退差分、時間に対して前進差分としなければならない²⁾。

そこで、河床変動計算は(2)式、粒度分布の変化は(3)式をそれぞれ前述の方法で差分化した次式により解を求めた。

$$\frac{Z_j^{n+1} - Z_j^n}{\Delta t} = \frac{1}{(1-\lambda)B_j^n} \frac{(q_B \cdot B)_j^n - (q_B \cdot B)_{j+1}^n}{\Delta x} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{a(1-\lambda)B_j^n} \left\{ \frac{(q_{Bi} \cdot B)_{j-1}^n - (q_{Bi} \cdot B)_j^n}{\Delta x} - P_i^n \frac{(q_B \cdot B)_{j-1}^n - (q_B \cdot B)_j^n}{\Delta x} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 a は最大粒径とした。また、添字 j, n はそれぞれ距離および時間軸の差分メッシュを表す。(図-1参照)

河床変動および粒度変動は上流から下流に向って計算を行い、ダム設置位置については次のような境界条件を与えることにした。

①ダム直下流部では、段落ちの影響により交換層が破壊され粒度分布はほとんど変化しないと考えられる。そこで、ダム直下の P_i については変化しないものとする。

②ダム設置位置で計算された Δt 時間後の河床高 Z_{jk}^{n+1} がダムの高さ ZD よりも低くなった場合は、 $Z_{jk}^{n+1} = ZD$ (添字 jk は距離の差分メッシュの内、ダム設置位置を示す) とし、同時にダム直下の粒径別流砂量 $q_{Bi}{}_{jk+1}^n$ は流砂量式から求められた粒径別流砂量を $q'_{Bi}{}_{jk+1}^n$ 、全流砂量を $q_B{}_{jk+1}^n$ とすると、(7)式で与えるものとする。また、全流砂量 $q_B{}_{jk+1}^n$ は(8)式で与える。

$$q_{Bi}{}_{jk+1}^n = q'_{Bi}{}_{jk+1}^n \cdot q_B{}_{jk+1}^n / q_B{}_{jk}^n \cdot B_{jk}^n \dots\dots\dots (7)$$

$$q_B{}_{jk+1}^n = q_B{}_{jk}^n \cdot B_{jk}^n / B_{jk+1}^n = \sum q_{Bi}{}_{jk+1}^n \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $Z_{jk}^{n+1} \geq ZD$ の場合は、①の条件を除いて他の差分メッシュの位置と同じように計算する。
また、ダム以外でも、河床低下ができない所(たとえば、水路実験では固定床の部分)においては、②の条件を採用した。

3. 水路実験への適用

数値計算は、上流から土砂流出がある場合とない場合の2ケースの実験について行った。実験水路概

要はそれぞれ図-2に示す。

TYPE1の実験は、上流水路幅0.3mに対して下流水路幅を0.3~0.9m(拡幅比 $Tr=1\sim3$)と拡幅したほか、上流側を移動床、下流のダム設置区間を固定床とした。ただし、初期河床縦断形としてダム上流側に河床勾配の1/2勾配で堆砂させている。この実験では、ピーク流量が3ℓ/sになるような三角波形(通水時間300秒、ピークまでの時間100秒)で水を流し、上流から移動してきた土砂の堆積状況を観測した。

TYPE2の実験は、水路幅を上下流ともに0.3mとし、上流側を固定床、下流側を移動床とした。この実験では上流より定流(0.4ℓ/s)で水を流し、ダム設置区間の洗掘状況を観測した。

これらの実験の移動床材料には、混合粒径の砂($d_{max}=9.54, d_{min}=0.1, d_m=1.4$ mm)を使用している。

(1) TYPE1の計算

混合砂れき河床では、河床砂れきが流水による分級作用をうけてその粒度構成に変化をきたす場合が多いと考えられる。しかし、TYPE1の実験においては、ピーク流量が比較的大きく全河床砂が移動していると考えられるので、粒度変動については考慮せず、平均粒径 d_m の均一砂れきとして計算した。

流砂量については、実験により得られた関係、(9)式を流砂量式として採用した。

$$q_b/\sqrt{sgd^3}=40(\tau_*-\tau_{*c})^{2.1} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力

($\tau_{*c}=0.04$)である。

TYPE1の実験について数値計算を行い、実験値と比較した1例を図-3に示す。また、計算値については河床高の時間的な変化も示した。最終形状については、実験値と計算値はよく一致していると言える。また、河床高の時間的な変化については、水路実験での測定値がなく正確な比較はできなかったが、実験中の観察および堆積状況写真から、定性的にはよく表現できているようである。

(2) TYPE2の計算

TYPE2においては、流量が比較的小さいため、*armor*ing現象が生じていると考えられる。また、このことは水路実験の観察により確認された。以上の観点から、TYPE2の計算においては、混合粒径で粒度構成の変化を考慮した河床変動計算を行った。

粒径別掃流砂量については、土研式を粒径別に表示した平野の式³⁾を用いる。

$$q_{b,i}/\sqrt{sgd_i^3}=P_i \cdot \phi \cdot f(u_{*ci}^2/u_*^2) \tau_{*i}^{3/2} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $f(u_{*ci}^2/u_*^2)$ は土研式中の関数、 τ_{*i} は粒径別無次元掃流力($\tau_{*i}=u_*^2/sgd_i$)、 u_{*ci} は混合砂における粒径別限界摩擦速度であり、Egiazaroffの式を修正した平野の式³⁾を用いた。

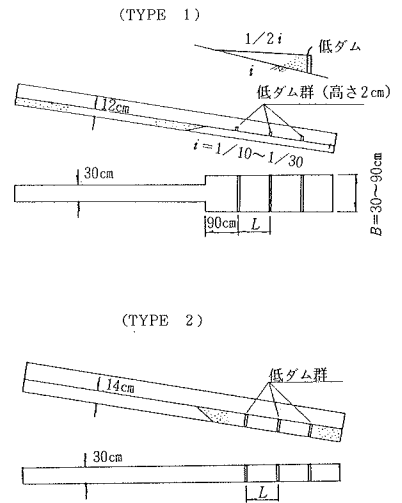


図-2 実験水路概要図

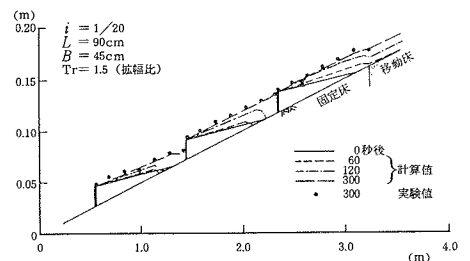


図-3 実験値と計算値の比較

TYPE2の実験について数値計算を行い、実験値と比較した1例を図-4に示す。各ダム間の河床高は、実験値と計算値がよく一致しているが、最上部のダムより上流側の河床高については、計算値が低く実験値と一致していない。これは、上流側の流れが片側に偏倚しており、数値計算が実験を良好には再現していないためと考えられる。したがって、数値計算の再現性については、下流のダム設置区間で評価するものとした。また、本報告での計算法は、ダム前庭部の洗掘については表現できない。図-4に示されるように粒度変動については、実験値と計算値がよく一致している。

以上の結果から、本計算法は、河床変動および粒度分布の変動のどちらも再現性はよく、河床変動予測に有効な手法の一つと言えよう。ただし、初期河床高がダム天端高以下の場合とarmor coatが完全に破壊されるような場合には適用できず、今後の検討課題である。

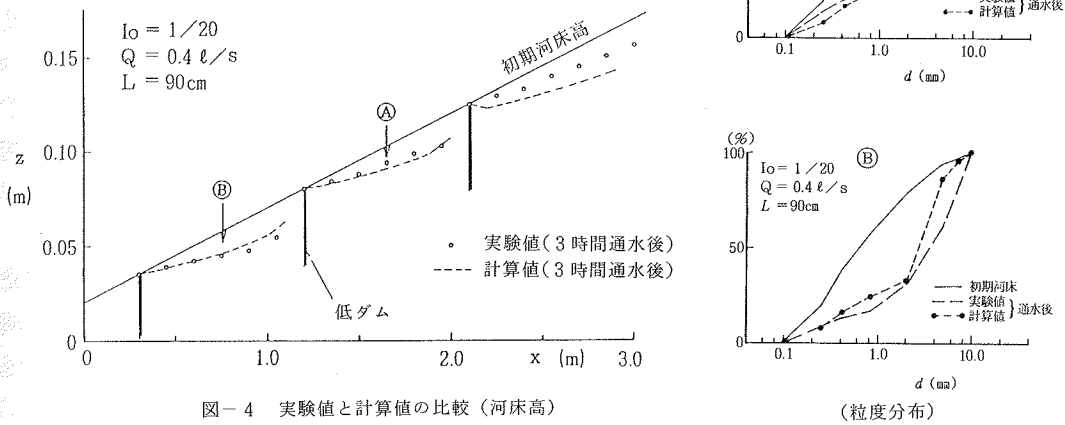


図-4 実験値と計算値の比較(河床高)

(粒度分布)

あ と が き

以上、低ダム群または床固工群を設置した場合の河床変動について、その計算法と再現性について検討を行った。その結果、本計算法はその適用範囲内において再現性はよく、定性的かつ定量的な把握が可能な手法であると言える。また、計算方法を改良することにより、砂防施設以外の河川構造物(床土工等)にも適用できるものと考えている。

本報における数値計算法は、砂防施設周辺の河床変動、すなわち、その施設の堆砂効果を明らかにする一手法として考案したものであるが、土砂移動形態を掃流形態として行ったものであり、今後は土砂流、土砂流における数値計算法についても検討したいと考える。

参 考 文 献

- 1) 福田義昭, 吉井厚志, 星 清: 低ダム群の効果に関する実験, 砂防学会研究発表会概要集, 昭和60年5月
- 2) 黒木幹男, 岸 力, 清水康行: 河床変動の数値計算法に関する研究, 第17回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 1980年.
- 3) 平野宗夫: *Armoring*をとまなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, 1971年10月.