

常流・射流が混在する条件下での河床変動の計算法

徳島大学工学部 正員 岡部健士

徳島県庁 正員 ○岩根定利

四国建設コンサルタント 正員 天羽誠二

1. まえがき： 1次元河床変動の数値解法は、現状においても実際問題にある程度対応できる水準に達している。しかしながら、とくに山地上流部の河川のように、河道の幾何条件がきわめて不整で、流れの遷移が各所で頻繁に発生する場を対象にした計算に関しては、従来の知見やノウハウだけでは十分対応できない重要な問題が残されている。本報告は、とくに土砂の連続式の差分方法に注目し、従来の手法に内在する問題点の改善を図るものである。

2. 河床擾乱の伝播特性： 従来、河床擾乱の伝播速度 ω は次式のように表示されている。

$$\omega \equiv (dx/dt)_z = 1/(1-F_r^2)/(1-\lambda) \cdot \partial q_B / \partial h \quad (1)$$

ここに、 F_r ：フルード数（ $\equiv v/\sqrt{gh}$ ）、 λ ：空隙率、 q_B ：単位幅流砂量、 h ：水深、 v ：平均流速、 g ：重力加速度である。これによると、 F_r が1に近づくとき伝播速度が ∞ になるという矛盾が生じる。これは、流れを定常とした基礎式より伝播速度を導いたためである。詳細は省略するが、流れ・流砂ともに非定常とした基礎式に特性曲線理論を適用すると、抵抗則としてManning式を用いる場合、つぎのような特性曲線式が得られる。

$$w^3 - 2w^2 + w = 1/6 \cdot \xi w^2 + (1/F_r^2 - 1/6 \cdot \xi)w - 7/6 \cdot \xi / F_r^2 \quad (2)$$

ここに、 $w = \omega/v$ 、 $\xi = 1/(1-\lambda)/h \cdot \partial q_B / \partial h$ である。(2)式は、 ξ が異常に大でない限り3実根を持ち、それらを小さいものから順に w_1 、 w_2 、 w_3 とすれば、 $-1 < w_1 \leq 0$ 、 $0 \leq w_2 \leq 1$ 、 $w_3 \geq 1$ である。したがって、河床擾乱は上下流の2方向に伝播するものと推察される。ただし、 w_3 は河床擾乱には無関係と思われる。

3. 河床変動量の計算法と安定条件： 従来の河床変動計算では、流砂の連続式

$$\partial z / \partial t + 1/(1-\lambda) / B \cdot \partial Q_T / \partial x = 0 \quad (3)$$

の差分表示にあたり、(1)式を参照して、常流・射流に応じてそれぞれ後退・前進差分（いずれも片側差分）を採用してきた。ここに、 z ：河床位、 B ：河幅、 Q_T ：断面内の総流砂量である。このような差分法を流れが遷移する場の計算に適用すると土砂の連続性が完全には保証されない¹⁾。そこで、筆者らは上述の河床擾乱に関する考察の結果に基づき、以下のような河床変動量の計算法を提案したい。すなわち、図-2の模式図のように2断面間における流砂量の不均衡がもたらす河床砂礫層の容積変化 ΔQ_B を、擾乱の伝播速度を考慮しつつ上下流の2断面に振り分けるものである。このとき、上下流の2断面への ΔQ_B の影響は、 $|w_1|$ と w_2 の逆数に比例するものとみなせば、

$$\text{上流側断面には } w_2 / (|w_1| + w_2) \cdot \Delta Q_B \quad (4-a)$$

$$\text{一方、下流側断面には } |w_1| / (|w_1| + w_2) \cdot \Delta Q_B \quad (4-b)$$

を受け持たせることになる。なお、この方法は、 F_r が1からある程度離れると、従来の差分法に帰着する。つぎに、安定条件について述べる。(1)式を用いてCFL条件を満足させようとするれば、 $F_r \rightarrow 1$ で計算の時間ステップ $\Delta t \rightarrow 0$ となる。しかし、 w_1 と w_2 は、 $\xi \neq 0$ である限り同時には0にならないので、これらに基づく方が合理的である。

4. 粒度分布の計算法： 交換層の粒度分布の計算には、平野が導いた次式が用いられる。

$$\partial P_j / \partial t = 1/a_s / (1-\lambda) / B \cdot \partial Q_j / \partial x - P_{0j} / a_s \cdot \partial z / \partial t \quad (5)$$

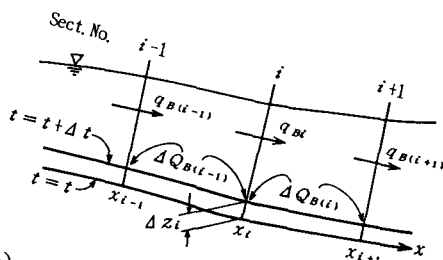


図-1 計算方法の模式図

ここに、 P_j ：粒径 d_j の砂礫が交換層中に占める割合、 Q_j ：粒径別流砂量、 a_s ：交換層厚さ、 P_{0j} ：河床上昇の場合は P_j 、河床低下の場合は粒径 d_j の砂礫が交換層下に占める割合である。さて、従来、(5)式右辺第1項の差分は後退差分で行われている。この方法には射流の場合に、河床変動量と粒度変化の差分方向が一致しないという矛盾がある。したがって、むしろ中央差分の方が適当ではないかと思われる。

5. 計算例：河幅と勾配が

かなり著しく変化し、下流端にダムをもつ河道を例にとり、従来の計算方法と筆者らの方法の比較計算を行った結果を図-2に示す。河道の横断面形状は、2次曲線で近似することとした。河幅と初期縦断面形状は、図-2に併記しており、初期堆砂層の粒度分布は全断面において図-3のように仮定した。また、図-4のように流れのハイドログラフを与え5回の通水を行った。下流端では水位を10.0mに固定し、上流端の断面では河床位と勾配を固定し、この断面の等流に対する平衡流砂量を上流からの供給土砂とした。各断面の掃流砂量、浮遊砂量の計算では、粒径を10階級に分割しそれぞれ声田・道上式、声田式を用いて求めた。また、不等流計算における支配断面の予測には石川ら²⁾の方法を用いた。計算結果は、著者らの方法が従来のものより滑らかで安定しており不自然な箇所は見当たらない。また、 Δt を

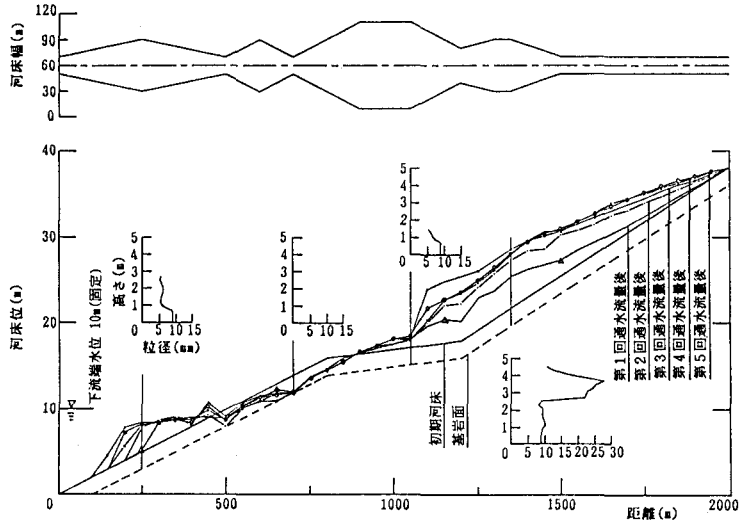


図-2. a 従来の方法による計算結果

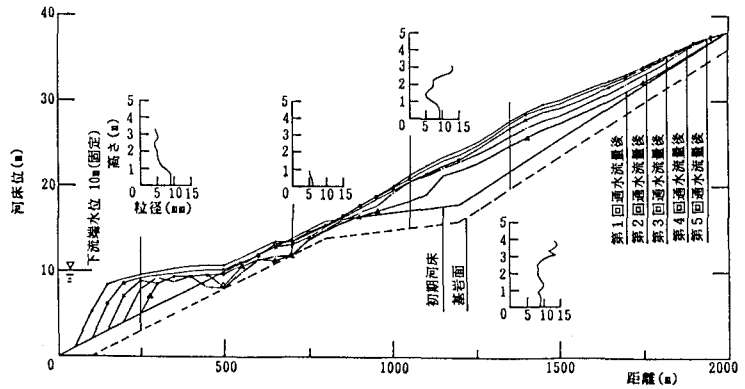


図-2. b 著者らの方法による計算結果

(2)式より求める

ために計算時間が1/5程度に短縮された。

【参考文献】

- 道上・藤田・前田：水工論文集，第34巻，1990.
- 石川：土木技術資料，第25巻3号，1983.

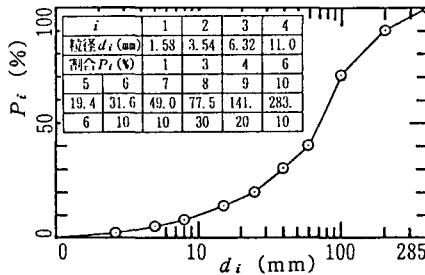


図-3 粒度分布

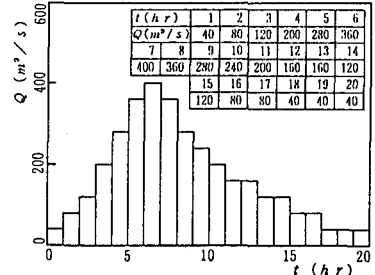


図-4 ハイドログラフ