

実用的河床変動計算法について

北海道開発局土木試験所 正員 清水康行

1. はじめに 蛇行河川における洗掘・堆積の位置、範囲及び量を予測することは河川計画上重要な課題の1つである。すなわち、河川の改修に際してその河道形状や水衝部対策の範囲の決定を行う場合、あらかじめ洪水時の河床変動や長期的な河床の安定形状を予測することが必要であり、これにより防災上最も有利な河道形状が得られるとともに将来における再改修費や維持管理費を最小限に抑えることができる。

河床変動を正確に予測するためには3次元の流れを正確に表現することが必要である。このため、流れの計算は3次元モデルを使用するのが最も妥当と思われるが、この場合の計算は非常に複雑になるとともに計算に費やされる時間、費用などの制約から現在のところ実際の河川計画等への応用が可能な段階には至っていない。

そこで、本文においては比較的計算の簡単な2次元モデルにより流れの計算を行い、これにらせん流の効果を別途加えることにより河床付近の流向を推定し、さらに斜面の効果を考慮した流砂量式を用いて河床変動の計算を行うこととした。

2. 計算方法 2次元流れの運動方程式を(1),(2)式、連続式を(3)式で与える。ここに、 s, n は流下方向, 横断方向座標, u, v は s, n 方向の水深平均流速, h は水深, p は圧力, ρ は流体の密度, r は曲率半径 r は s 軸上の曲率半径である。摩擦項はマンニング則を用いて(4),(5)式で与える。 ϵ は渦動粘性係数であり(6)式で与える。(1)~(3)式の計算は流路を格子状に細分し差分法により行う。境界条件としては下流端で水位、上流端で流速を与える。

(1),(2)式で得られた u, v から河床付近の流速は Englund¹⁾の方法により(7),(8)式で計算する。ただし、 u', v' は平均流による s, n 方向の河床付近の流速成分である。

蛇行流路では、平面的な流れの他にらせん流が生じこれは本来、流れの3次元性を考慮した計算を行うことにより得られる。ただ、従来より円弧水路における発達したらせん流による底面流速については(9)式の形の式が提案されており、ここでは流路のすべての点において(9)式が成立するものとした。ただし、(9)式中の N_* は Englund¹⁾と同様に7とし、 χ は側壁の影響を考慮するための係数で Rozovskii²⁾による関数形(両岸で0、水路中央で1)を用いる。

従って、底面における n 軸方向の流速を v_b とすると、 v_b は平均流とらせん流の効果を合わせて(10)式ようになる。

流砂量は、 s 軸方向には M. P. M. (11)式、 n 軸方向には斜面の効果を考慮した長谷川³⁾の(12)式を用いて求める。ただし、 q_{Bs}, q_{Bn} は s, n 軸方向の単位幅流砂量、 ρ_s は砂礫の密度、 g は重力加速度、 d は粒径、 τ_* は無次元有効せん断力、 τ_{*c} は無次元限界せん断力、 μ_s, μ_k は砂礫の静止及び動摩擦係数、 z は河床高である。また、 τ_* は、岸・黒木⁴⁾の(13)式を用いて求める。ただし、 λ は空隙率である。

河床変動の計算は(14)式を用いて行う。

3. 計算例

以上の計算法を Table 2 に示す長谷川³⁾による水路実験に適用した。ここで、ME-2 は sine-generated curve、ME-6

Table 1 Summary of Equations

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{\tau_s}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) \quad (1) \\ u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \frac{u^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - \frac{\tau_n}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) \quad (2) \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial n} &= 0 \quad \dots (3) \quad \frac{\tau_s}{\rho h} = \frac{gn^2}{h^{4/3}} uv \sqrt{u^2 + v^2} \quad \dots (4) \\ \text{where } ds &= ds_0 r / r_0 \quad \frac{\tau_n}{\rho h} = \frac{gn^2}{h^{4/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad \dots (5) \\ \epsilon &= \frac{K}{6} u_* h \quad \dots (6) \quad u' = \gamma u \quad \dots (7) \quad v' = \gamma v \quad \dots (8) \\ \text{where } \gamma &= 3(1-\beta)/(3-\beta), \quad \beta = 6.5/(u/u_* + 2.17) \\ \hat{v} &= -N_* \frac{h}{r} u' \chi \quad \dots (9) \quad v_b = v' + \hat{v} \quad \dots (10) \\ q_{Bs} &= 8\sqrt{(\rho_s/\rho - 1)g} d^{3/2} (\tau_*' - \tau_{*c})^{1.5} \quad \dots (11) \\ q_{Bn} &= q_{Bs} \left(\frac{v' + \hat{v}}{u'} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad \dots (12) \\ \frac{u}{u_*} &= 7.66 \left(\frac{h}{2d} \right)^{1/6} \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} \right)^{2/3} \quad \dots (13) \\ \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_{Bs}}{\partial s} + \frac{\partial q_{Bn}}{\partial n} \right) &= 0 \quad \dots (14) \end{aligned}$$

Table 2 Experimental Conditions

実験番号	流路幅 B(m)	蛇行長 L(m)	河床材料 中央粒径 d(cm)	平均河床 勾配 I	流量 Q(L/s)	安定に達するまでの時間 (min)
ME-2	30	220	0.043	1/300	1.87	240
ME-6	22	432	0.043	1/80	0.94	17

は蛇曲河道による実験でありいずれも初期河床は平坦とし一定流量を
 通水し河床が十分に安定した後に河床を固定し流速および河床形の測
 定が行われている。計算も初期河床は平坦として実験と同流量を流し、
 河床が十分に安定に達するまで行った。計算上で河床が安定に達する
 までの時間は ME-2 で 100分、ME-6 で 40分であった。このときの流
 速ベクトルおよび河床形状の計算結果と実測値の比較を Fig. 1-4 に
 示す。ただし、流速はいずれも水深平均値である。

ME-2 の流れは、流路の形状より下流側に位相がずれた形で蛇行し
 ており、この結果、深掘れ・堆積は曲頂部より下流側に発生している。
 また、凸岸部下流に平面剥離が生じている。計算結果はこれらの特徴
 を良く表現している。

ME-6 では、主流線が湾曲部上流内岸側から外岸側へ急激に移動し、
 従って、NO.11-12 左岸側へ流れが集中しこの付近に深掘れが生じて
 いる。実測の流れはこの地点から下流へ向かって広がる傾向が見られ、
 この結果この下流における深掘れは顕著ではない。これに対して、
 計算値は外岸側に沿った流れが続いており深掘れも広範囲である。

ただ、大局的には流況・河床形共に
 計算値と実測値の適合度は良好で
 あり、特に深掘れの箇所が一致し
 ていることは、注目に値する。

Fig. 5 は ME-6 で計算された主
 流線の時間的変化を示したもので
 ある。水衝部の位置は、時間とと
 もに a, b と上流へ移動し最終的
 には湾曲部上流内岸側の河岸線
 を下流へ延長した c 点付近まで移動
 し、この結果この点に流れが集中
 し深掘れが生じたものと考えられ
 る。この様な傾向は、ME-2 にお

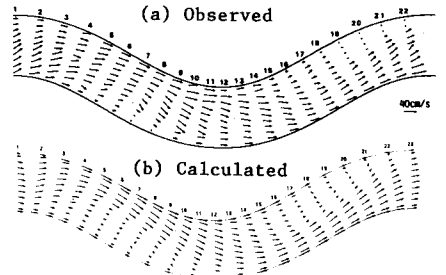
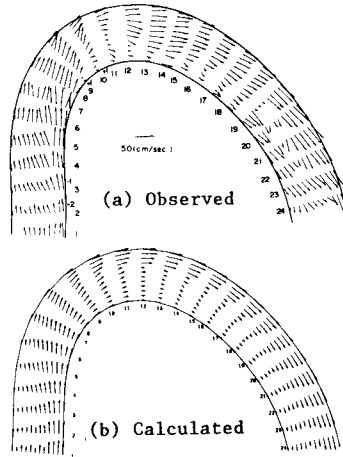


Fig. 1 Run ME-2 Velocity Vector

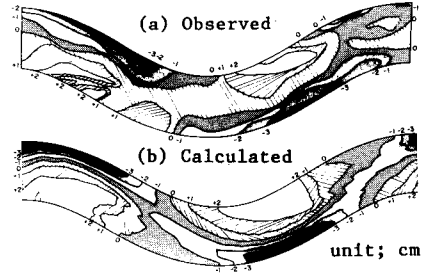


Fig. 2 Run ME-2 Bed Contour

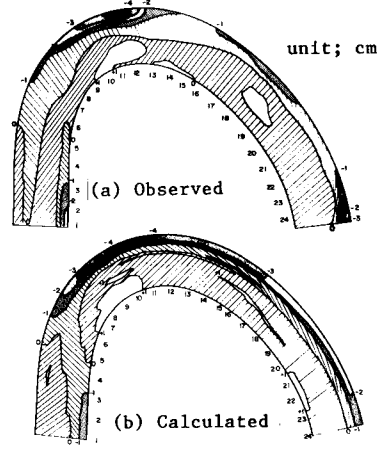


Fig. 3 Run ME-6 Velocity Vector Fig. 4 Run ME-6 Bed Contour

いても見られこの点は河川計画等においても注意すべき点であると考えられる。

4. 糸冬(り)とこ 2次元の流れの計算と河床変動の計算を組合せ、蛇
 行および蛇曲水路による実験結果と比較した。この結果、実用上十分な程
 度に河床形状を再現し得ることが確かめられた。今後は、実河川の適用例
 を増やし、河川計画へ役立てたい。最後に御指導いただいた北海道大学工
 学部 森明巨氏、長谷川和義氏、並びに土木試験所 板倉忠興第一研究部長
 に対して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) Engelund, F. ;Flow and bed topography in channel bends, Proc. of ASCE, Vol. 100, HY11, 1974.
- 2) Rozovskii, I. L.; Flow of Water in Bends of Open Channels, Academy of science of the Ukrainian S. S. R., Translated from Russian, Israel Program for Scientific Translations.
- 3) 長谷川和義; 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究、北海道大学博士論文、1984.
- 4) 岸力、黒木幹男; 移動床における河床形態と流体抵抗(I)、北海道大学工学部研究報告第67号、1973.

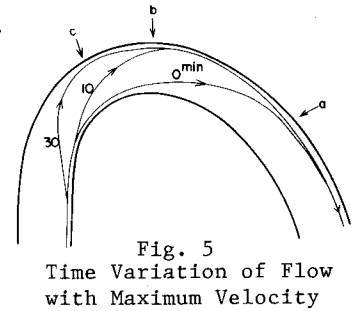


Fig. 5 Time Variation of Flow with Maximum Velocity