

観測水面形に基づく小規模河床形態発生時の移動床流れと河床抵抗・掃流砂量の推定

九州工業大学工学部 学生会員 ○松本 昌大
九州工業大学名誉教授 フェロー会員 秋山 壽一郎

九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲
九州工業大学大学院 学生会員 金屋 諒

1. はじめに

近年、河道の維持管理を行う上で、洪水時の水位、流量、抵抗特性、河床位、流砂量の時空間変化等を総合的に把握することが重要となる¹⁾。小規模河床形態の発生は、洪水時の抵抗を変化させることから、その変化の把握は極めて重要である。本研究は、以上のような背景を踏まえ、水面形の経時変化に基づく流量・粗度係数・河床位・流砂量の時空間推定法を新たに提案するとともに、小規模河床形態発生時の抵抗変化の予測精度について検討したものである。

2. 水面形の経時変化に基づく流量・粗度係数・河床位・流砂量の推定法の概要

本推定法は、常流を対象とし、水面形と上下流端での河床位の経時変化を与条件として、1次元浅水流方程式と流砂の連続の式に基づき、流量・粗度係数・河床位・流砂量の時空間分布を推定する手法である。基礎方程式は、式(1)の1次元浅水流方程式と式(2)の流砂の連続の式¹⁾である。式(1)の離散化には流束差分法を用い、発生・消滅ベクトル S に

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + S &= 0; U = (A \quad Q)^T; E = (Q \quad Q^2/A + gI)^T; S = (0 \quad gI_2 + gA(S_0 - S_f))^T \dots (1) \\ \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} - \frac{\lambda_b}{(1 - \lambda_b)} \frac{\partial x}{\partial t} &= 0 \dots (2) \quad U_i^{t+\Delta t} = U_i^t - \left[\frac{\partial E_{i+1/2}}{\partial x} + \frac{\partial E_{i-1/2}}{\partial x} \right] \Delta t / \Delta x \dots (3) \\ \delta E_{i+1/2}^t &= \sum_{j=1}^2 \left[\frac{\left\{ 1 \pm \operatorname{sgn}(\tilde{\lambda}^j) \right\} (\tilde{\lambda}^j \tilde{a} - \tilde{\beta}^j)}{2} \right] \tilde{e}^j; \operatorname{sgn}(a) = \begin{cases} 1 & a > 0 \\ -1 & a \leq 0 \end{cases} \quad \tilde{a}^1 = (\tilde{\lambda}^1 \Delta A - \Delta Q) / 2\tilde{c}; \tilde{a}^2 = (\Delta Q - \tilde{\lambda}^2 \Delta A) / 2\tilde{c}; \tilde{\beta}^1 = -\tilde{S}_2 / 2\tilde{c}; \tilde{\beta}^2 = -\tilde{\beta}^1 \\ C_{i-1/2} \Delta n_{i-1/2}^2 - C_{i+1/2} \Delta n_{i+1/2}^2 &= D_i; C_{i+1/2} = - \left(gA_{i+1/2} / 2C_{i+1/2} \right) u_{i+1/2} \left| u_{i+1/2} \right| / R_{i+1/2}^{4/3} \dots (4) \quad n_{i+1/2}^2 = n_{i+1/2}^2 + \Delta n_{i+1/2}^2 \dots (5) \\ D_i &= \frac{A_{i+1/2}^{t+\Delta t} - A_{i+1/2}^t}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ \tilde{\lambda}_{i+1/2}^1 \tilde{a}_{i+1/2}^1 + \tilde{\lambda}_{i+1/2}^2 \tilde{a}_{i+1/2}^2 \right\} \frac{g \tilde{A}_{i+1/2}}{2\tilde{c}_{i+1/2}} \left\{ (Z_{b,i+1} - Z_{b,i}) + (h_{i+1} - h_i) - (A_{i+1} - A_i) / \tilde{B}_{i+1/2} \right\} + \frac{g \tilde{A}_{i-1/2}}{2\tilde{c}_{i-1/2}} \left\{ (Z_{b,i} - Z_{b,i-1}) + (h_i - h_{i-1}) - (A_i - A_{i-1}) / \tilde{B}_{i-1/2} \right\} \\ q_B &= \frac{A_{i+1/2}^{t+\Delta t} - A_{i+1/2}^t}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ \tilde{\lambda}_{i+1/2}^1 \tilde{a}_{i+1/2}^1 + \tilde{\lambda}_{i+1/2}^2 \tilde{a}_{i+1/2}^2 \right\} \frac{g \tilde{A}_{i+1/2}}{2\tilde{c}_{i+1/2}} \left\{ (Z_{b,i+1} - Z_{b,i}) + (h_{i+1} - h_i) - (A_{i+1} - A_i) / \tilde{B}_{i+1/2} \right\} + \frac{g \tilde{A}_{i-1/2}}{2\tilde{c}_{i-1/2}} \left\{ (Z_{b,i} - Z_{b,i-1}) + (h_i - h_{i-1}) - (A_i - A_{i-1}) / \tilde{B}_{i-1/2} \right\} \\ q_B / \sqrt{sgd^3} &= \frac{17}{\cos \theta (1 - \tan \theta / \mu_s)} \tau_{*c}^{3/2} (1 - \tau_{*c} / \tau_{*c0}) (1 - \sqrt{\tau_{*c} / \tau_{*c0}}) \dots (6) \quad \tau_* = \frac{u_*^2}{sgd}, \quad \tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd}, \quad \tau_{*c0} = \tau_{*c0} \cos \theta \left(1 - \frac{\tan \theta}{\mu_s} \right) \end{aligned}$$

U =保存量ベクトル, E =流束ベクトル, S =発生項・消滅項ベクトル, h =水深, q =単位幅流量, g =重力加速度, S_0 =河床勾配, z_b =河床位, S_f =摩擦勾配, n =マンニングの粗度係数, u =流速, R =径深, c =波速, $\Delta t, \Delta x$ =時間, 空間の刻み幅, i =空間に対する添字, $\tilde{S}_g$ =河川形状に関する項, s =水中比重, $\tilde{S}_\tau$ =底面摩擦項, λ_b =空腔率, q_B =単位幅流砂量, ρ =水の密度, σ =砂の密度, d =砂の粒径, τ_* =無次元掃流力, τ_{*c} =無次元有効掃流力, τ_{*c0} =斜面勾配の影響を考慮した無次元限界掃流力, μ_c =土粒子の動摩擦係数, u_* =摩擦速度, u_{*c} =有効摩擦速度, τ_{*c0} =無次元限界掃流力, μ_s =土粒子の静止摩擦係数

ついては特性速度で風上化を行った。式(2)の離散化には風上差分を用いた。

図-1に、推定手順を示す。流量の推定には式(3)の運動方程式を、粗度係数の推定には式(4)の連立1次方程式と式(5)を、河床位の推定には式(2)の流砂の連続の式を、流砂量の推定には式(6)のKovacs and Parker式²⁾を用いた。式(4)の連立1次方程式を解くためには、一区間の粗度係数が既知である必要があるが、本研究では最上流区間の粗度係数を既知とした。なお、本推定法で得られる粗度係数は、摩擦抵抗と形状抵抗に加え、水路側壁による抵抗が含まれる合成粗度係数であるが、河床変動解析では摩擦抵抗のみを考慮している。入力条件の水位、河床位には測定結果を、上流端の粗度係数には実験値のエネルギー勾配から算出した粗度係数を与えた。

3. 実験結果に基づく推定法の検証

(1) 実験の概要

実験装置は、図-2に示すような水路長9m、幅0.35mの水路である。河床材料には、砂漣が発生しないように³⁾、水中比重1.53、粒径0.601mmの一樣砂を用いた。実験では、表-1に示す河床勾配で一樣砂を敷き詰めた後、表-1に示す流量を供給することで、小規模河床形態が砂堆(CaseS-DI)、遷移河床(CaseS-T)⁴⁾となるようにした。なお、流量については、浮遊砂が顕著とならず、また、中規模河床形態が発生しない条件下⁵⁾で設定している。測定

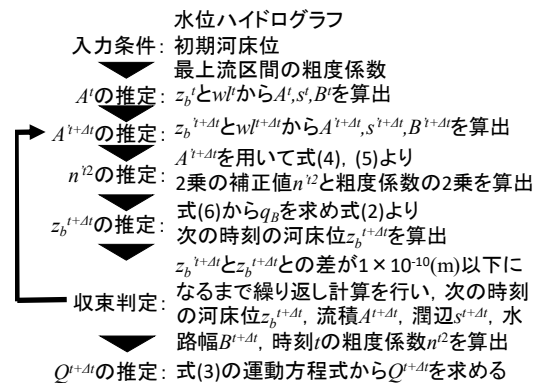


図-1 推定手順の概要

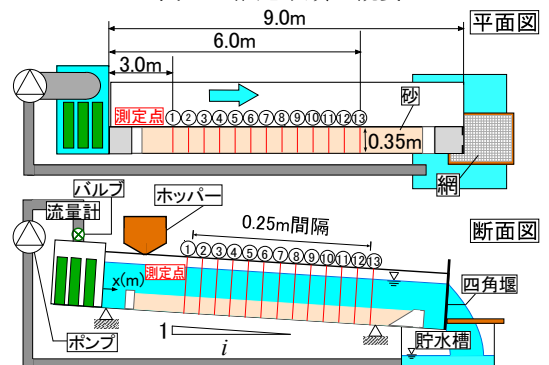


図-2 実験装置の概要

表-1 実験条件

Case名	河床形態	流量(m ³ /s)	河床勾配	粒径(mm)
CaseS-DI	砂堆 I	0.010	1/600	0.601
CaseS-T	遷移河床 I	0.015	1/300	

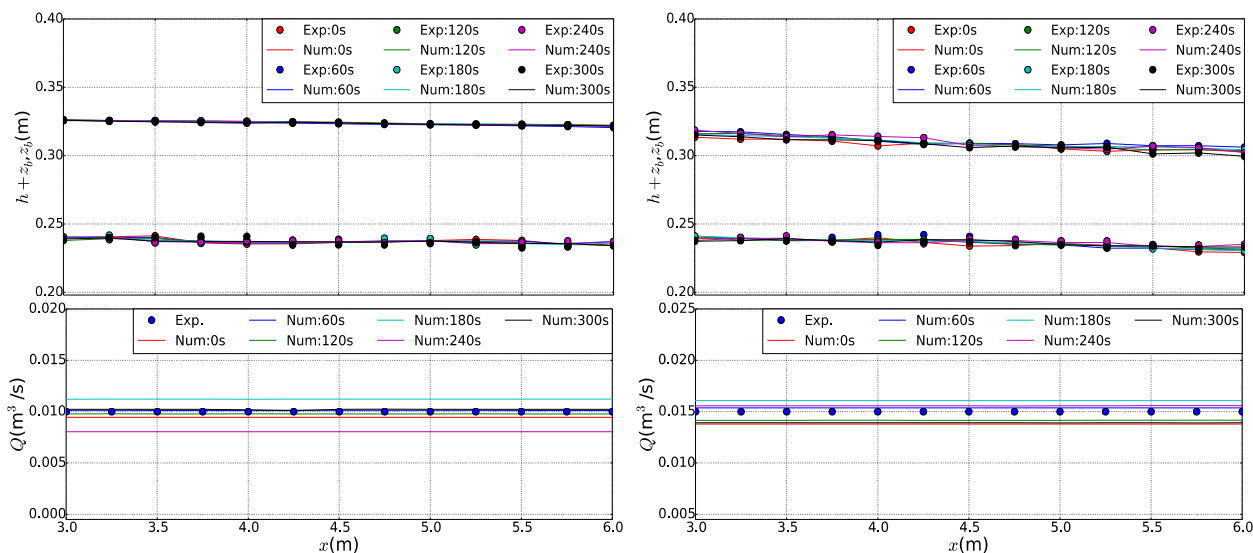


図-3 河床位、流量の推定結果と実測値との比較(左:CaseS-DI, 右:CaseS-T)

項目は水位 H (m), 河床位 z_b (m), 流量 Q (m³/s), 流砂量 Q_B (m³/s)である。水位及び河床位は、ビデオカメラで撮影した図-2の測定点の画像を画像解析することで計測した。流量に関しては、流量計で計測した。下流端の流砂量は、ふるいで回収した砂を乾燥させ重量を計測し、土砂の単位重量で除することで求めた。

(2) 結果と考察

図-3に、入力条件である水面形の実測値の経時変化と河床形状、流量の推定結果と実測値との比較を示す。これより、推定結果は、(1)平均的な河床形状の実測値を再現していること、(2)CaseS-DIで1.2~19.6%程度のばらつきはあるものの、時間平均すると実測流量を2.1%程度の誤差で再現できること、(3)CaseS-Tで2.4~8.1%程度のばらつきがあるものの、時間平均すると実測流量を4.9%程度の誤差で再現でき

ることなどが確認できる。図-4に、流速係数 $\phi(=u/u_*)$ と無次元掃流力 τ_* 、無次元掃流力 τ_* と無次元有効掃流力 τ'_* の時空間平均値の推定結果と実測値との比較を示す。なお、図中には、各小規模河床形態の岸・黒木の式⁶⁾に基づく関係も併せて示している。これより、無次元掃流力 τ_* と無次元有効掃流力 τ'_* の関係は、岸・黒木の式との関係に沿っており、各小規模河床形態の変化による抵抗特性の変化を再現していることが確認できる。図-5に、CaseS-DIとTの単位幅流砂量の推定結果と実測値との比較を示す。これより、(1)推定結果は、 $t=250$ s以前では最大で264.5%の誤差あるものの、それ以降は流砂量の実測値を再現していることが確認できる。これは、本解析では実測の初期河床を与え定常状態を作成した後、解析を実施しているが、この結果が実際の状況と異なり、時間の経過とともにその影響が小さくなったためと考えられる。このことを踏まえると、本推定法は、小規模河床形態発生時の無次元有効掃流力 τ'_* についても適正に評価していると考えられる。

4. おわりに

本研究から、河床変動を考慮した推定法は、局所的な河床位や粗度係数の再現性には課題が残るものの、小規模河床形態発生時の平均的な河床位と流量、流砂量、流速係数を再現できることが確認された。このように、本推定法は、小規模河床形態発生時の抵抗の推定に有用なツールであると考えられる。

参考文献：1)国土交通省：河川砂防技術基準調査編，2012.，2) Kovacs, A. & Parker, G., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 267, pp. 153-183, 1994., 3)水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会，土木学会論文報告集，第210号，p65-91, 1973.，4)黒木ら：水理講演会論文集，第29巻，pp461-466, 1985.，5)黒木・岸：土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96, 1984.，6)岸・黒木：北海道大学工学部研究報告，第67号，pp.1-23, 1973.