

観測水位に基づく流量・粗度係数の準二次元推定法の構築

九州工業大学大学院 学生会員 ○武久 晋太郎 九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲
九州工業大学名誉教授 フェロー会員 秋山 壽一郎

1. はじめに

近年、既存の治水施設の機能を適切に評価し、その維持や改善を行う計画型管理が求められている¹⁾。水位データから、河道内の底面粗度や樹木群による抵抗特性の変化を把握することができれば、河道の維持管理に有用なツールになると考えられる。本研究では、水面形の経時変化に基づく流量と粗度係数の時空間変化の準二次元推定法を新たに構築するとともに、複断面水路の実験結果に基づき、その予測精度について検討した。

2. 推定法の概要

基礎方程式は、式(1)に示す任意の水路形状に適用可能な1次元浅水方程式と式(2)の分割断面での運動方程式である。式(2)では、分割断面間の流速差による干渉効果や樹木群の抵抗が境界混合係数 f を含む項で考慮される。本推定法では、初期流量、河床位、高水敷粗度係数、一区間の低水路粗度係数を与条件として、水面形の経時変化を与えることで、計算格子点での流量、各分割断面での流速と計算格子点間の低水路粗度係数が推定される。な

$$\frac{\partial U}{\partial t} + dE/dx = S \quad U = (A \quad Q)^T; E = (Q \quad Q^2/A + gI_1)^T; S = (0 \quad gI_2 + gA(S_0 - S_f))^T \quad \dots (1)$$

$$gn_j^2 s_j / R_j^{1/3} \cdot u_j^2 + \sum_j f \cdot s_{wj} \cdot u_j^2 + \sum_{kj} f \cdot \text{sgn}(\Delta u_{kj}) \cdot u_{kj}^2 s_{wki} = gA_j S_f \quad \dots (2)$$

$$S_f = N_c^2 Q^2 / (A^2 R_c^{4/3}); R_c = (A_j R_j^{2/3} / A)^{3/2} \quad \dots (3)$$

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, Q : 流量, g : 重力加速度, S_0 : 水路床勾配, S_f : 摩擦勾配, n_j : 断面 j での粗度係数, u_j : 断面 j での流速, f : 境界混合係数, j : 分割断面番号, k : 分割断面境界についての添字, kj : 分割断面境界 k で分割断面 j に関わる量についての添字, s_j : 断面 j での潤辺長, s_{wj} : 断面 j での樹木群境界長, s_{wk} : 断面境界 k での境界長, A : 流積, R : 径深, $\text{sgn}(\bullet)$: $\bullet$ が正の場合1を、負の場合-1を返す関数, Δu_{kj} : 分割断面境界 k での流速差

お、方程式の離散化には流束差分法を用いた。

流量・粗度の推定手順は次の通りである。1)時刻 t の各格子点の水位より流積、水面幅、潤辺を、時刻 $t+\Delta t$ の水位から流積を求める。2)離散化された連続の式より、底面摩擦および樹木群等によるエネルギー損失を摩擦勾配 S_f として求め、式(2)の分割断面の運動方程式と連続の式から流速 u_j と低水路粗度係数 n_j を求める。3)手順2)で求めた摩擦勾配 S_f を用いて、運動方程式から時刻 $t+\Delta t$ での流量 $Q^{t+\Delta t}$ を求める。

3. 実験の概要

実験装置は、図-1に示す長さ9m、低水路幅0.4m、高水敷幅0.6m、低水路高さ0.049m、水路床勾配1/500の複断面水路である。低水路沿いに樹木を設置しないCaseC-R、設置したCaseC-RVの実験を行った。低水路と高水敷の粗度係数 n は等流実験より、それぞれ $0.012\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 、 $0.033\text{m}^{-1/3}\text{s}$ であることが確認されている。流れは非定常流とし、上流から一定流量 $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、定常状態とした後、計測開始時刻から、流量計が70秒後に $Q=0.0298\text{m}^3/\text{s}$ 、140秒後に $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ となるようにバルブを調整した。下流端の堰高は、初期の水面形が、堰上げ背水と低下背水となるように設定した。測定項目は、水位 $H(\text{m})$ 、単位幅流量 $q(\text{m}^2/\text{s})$ である。水位については、図-1の測定点①～⑨において、ビデオカメラで撮影した画像を画像解析することで測定した。各分割断面での流量については、測定点①・⑤・⑨において、表面流速をPTVで測定し、この結果とlog則から水深平均流速を算定し、これと水位観測に基づく水深から求めた流積により流量を算定した。

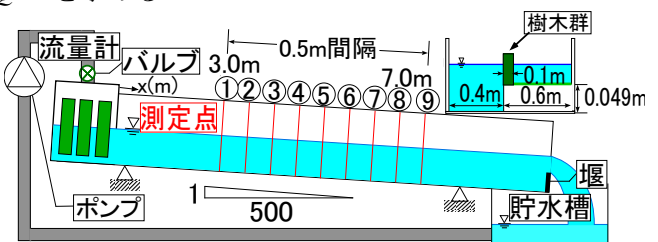


図-1 実験装置の概要

が確認されている。流れは非定常流とし、上流から一定流量 $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、定常状態とした後、計測開始時刻から、流量計が70秒後に $Q=0.0298\text{m}^3/\text{s}$ 、140秒後に $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ となるようにバルブを調整した。下流端の堰高は、初期の水面形が、堰上げ背水と低下背水となるように設定した。測定項目は、水位 $H(\text{m})$ 、単位幅流量 $q(\text{m}^2/\text{s})$ である。水位については、図-1の測定点①～⑨において、ビデオカメラで撮影した画像を画像解析することで測定した。各分割断面での流量については、測定点①・⑤・⑨において、表面流速をPTVで測定し、この結果とlog則から水深平均流速を算定し、これと水位観測に基づく水深から求めた流積により流量を算定した。

4. 推定法の検証

図-2にCaseC-R、RV-M2の流量・低水路粗度係数の推定結果と実験値との比較を示す。なお、上流端の低水路粗度係数と高水敷粗度係数については、等流実験より求めた値を与えた。境界混合係数 f は、河道計画検討の手引きに基づきCaseC-Rで $f=0.17$ 、CaseC-RVで $f=0.10$ とした。図-2より、本推定法は、(1)実験値の流量ハイドログラフを再現していること、(2)低水路粗度係数の推定結果は等流実験値周辺を振動していること、(3)CaseC-Rでは、振動の幅は水位上昇・下降時に変化しないものの、CaseC-RVでは水位上昇・下降時に粗度係数の振動が大きくなり、

ピーク付近では振動の幅が小さくなること、(4)単断面から複断面に遷移する水深 $h=0.049\text{m}$ 付近で鉛直方向の渦によりエネルギー損失が生じるため、低水路粗度係数の推定結果が大きくなることなどが確認できる。粗度係数の推定値に振動が生じている理由は、1次元浅

水流方程式では表せない3次元的な流れの影響や準2次元解析では樹木群を死水域として取り扱っているため、これらの影響が推定された粗度係数に含まれるためと考えられる。

図-3に各Caseのピーク流量時の横断流速分布の推定結果と実験結果との比較を示す。これより、本推定法は、(1)いずれのCaseにおいても、実験値の流速分布を概ね再現しており、その誤差は最大で20%程度となること、(2)CaseC-RVは、CaseC-Rに比べ、予測精度が低いことも確認できる。CaseC-RVの予測精度が低い要因は、前述したように準2次元解析では樹木群内を死水域として取り扱っているためであり、本推定法ではその影響が、低水路粗度係数に全て含まれるようになるためと考えられる。

図-4に、CaseC-R, RVの水深と合成粗度係数 N との比較を示す。合成粗度係数 N は、式(2)の摩擦勾配 S_f を、式(3)の井田による合成径深 R_d による S_f とすることで求めた。これより、本推定法の推定結果は、(1)流れが低水路から高水敷へ乗り上がった後は高水敷の粗度の影響により、水深の上昇とともに大きく、水深の減少とともに小さくなり、水深による粗度係数の変化を捉えていること、(2)ばらつきはあるものの、水深に応じた合成粗度係数周辺にプロットされていること、(3)断面境界や樹木群境界に作用するせん断力の影響を含む値となっており、CaseC-RVはCaseC-Rに比べ合成粗度係数が大きくなることから、樹木群による抵抗の増加が適切に捉えられていることなどが確認できる。

5. おわりに

本研究から、本推定法は、(1)複断面水路において、横断方向に作用するせん断力の影響を捉えることができ、その結果、(2)流量及び合成粗度係数値、さらに低水路粗度係数と流速分布を十分な精度で推定できることが確認された。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：16K06515)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献：1)国土交通省：河川砂防技術基準維持管理編，2011。

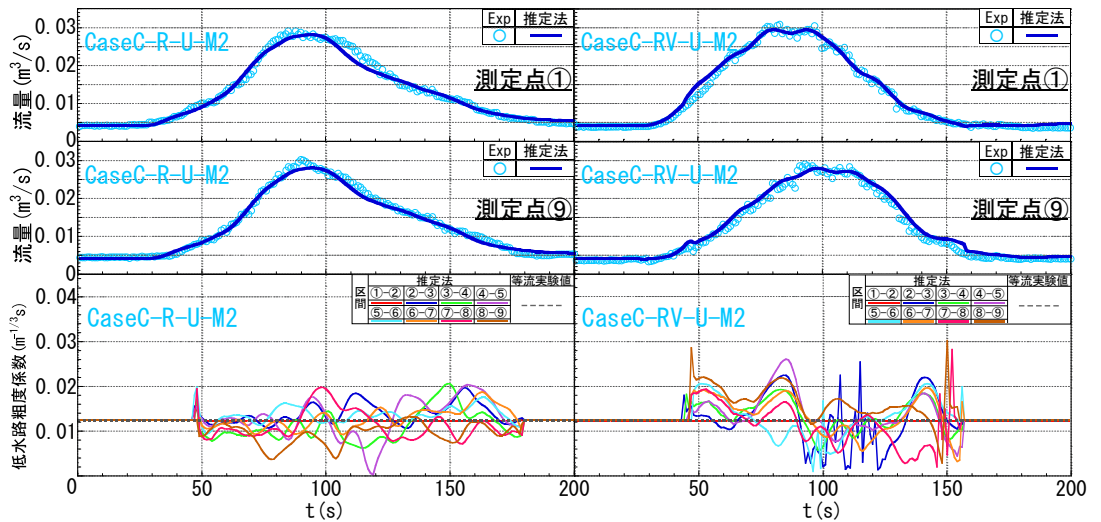


図-2 非定常実験結果に基づく検証(左:CaseC-R, 右:CaseC-RV)

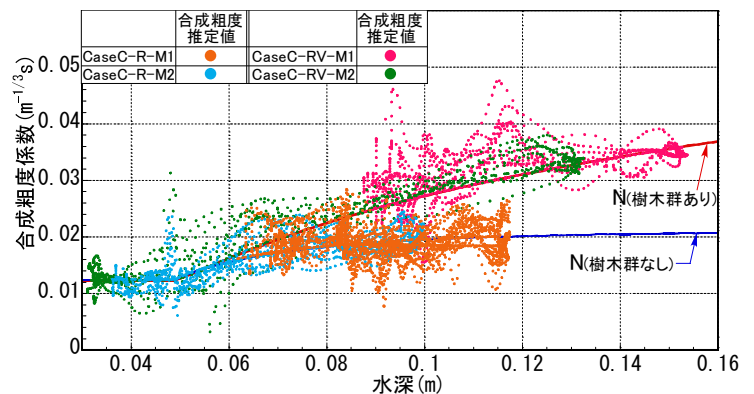


図-3 合成粗度係数と水深との関係

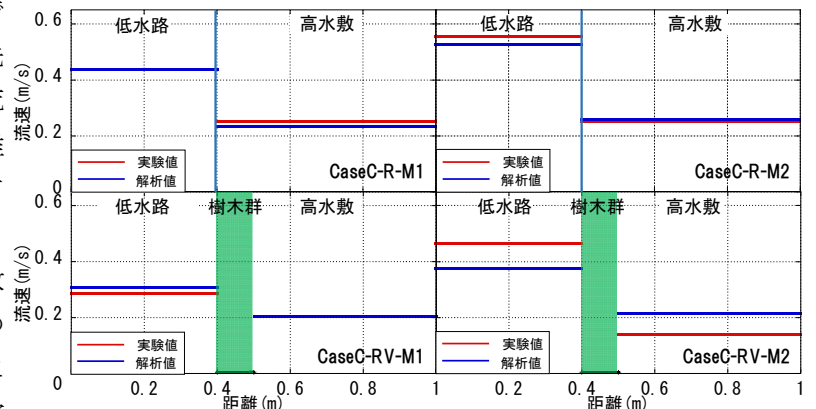


図-4 横断流速分布(上:CaseC-R, 下:CaseC-RV)