

観測水位を用いた流量・低水路粗度係数の推定

九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学研究系 重枝 未玲

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⁾。このような管理を行う上で、洪水時の水位、流量、抵抗特性の時空間変化を総合的に把握することが重要である。本研究では、既存の観測水位を与条件とした流量、粗度係数の推定法²⁾に、低水路と高水敷での流速差による断面間の流れの干渉効果や樹木群境界に作用するせん断力を新たに考慮した流量、低水路粗度係数、横断流速分布を求める準二次元推定法を開発し、実験結果と実河道での痕跡水位の観測結果に基づき同推定法の予測精度を検証した。

2. 観測水位に基づく流量・粗度係数の準二次元推定法の概要

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次元浅水流方程式と式(2)の分割断面での運動方程式である。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + dE/dx = S; U = (A, Q)^T; E = (Q, Q^2/A + gl_1)^T; S = (0, gl_2 + gA(S_0 - S_f))^T \quad (1)$$

$$n_j \cdot s_j / (A_j R_j^{1/3}) \cdot \hat{u}_j^2 + \sum_{k_j} f_{k_j} \cdot s'_{wk} \cdot \text{sgn}(\Delta u_{k_j}) / g A_j \Delta \hat{u}_{k_j}^2 + \sum_{k_j} f_{k_j} \cdot s_{wk} / g A_j \hat{u}_j^2 = 1 \quad (2)$$

$Q = \sum_j u_j A_j$; $\hat{u}_j = u_j / S_f^{1/2}$; $\Delta \hat{u}_{k_j} = \Delta u_{k_j} / S_f^{1/2}$; t : 時間, x : 流下方向, 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, A : 流積, Q : 流量, g : 重力加速度, S_0 : 河床勾配($=-\partial z_b / \partial x$), I_1 : 静水圧項, I_2 : 河道幅の変化による静水圧項, S_f : 摩擦勾配, n : 分割断面の粗度係数, s : 潤辺, f : 境界混合係数, k : 分割断面境界についての添字, k_j : 分割断面境界 k で分割断面 j にかかわる量についての添字, s'_{wk} : 分割断面境界の潤辺, s_w : 樹木群境界の潤辺長, Δu_{k_j} : 分割断面境界 k での流速差, $\text{sgn}(\bullet)$: \bullet が正の場合1を、負の場合-1を返す関数

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境界に作用するせん断力が境界混合係数 f を含む項で考慮される。なお、樹木群内は死水域として取り扱われる。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。なお、方程式の離散化には流束差分離³⁾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。流れは定常流(CaseC-R, RV-S)および非定常流(CaseC-R, RV-U)とした。CaseC-R, RV-Sでは上流から一定流量 $Q=0.0298\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、CaseC-R, RV-Uでは上流から一定流量 $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ 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、定常実験ではポイントゲージで、非定常実験では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。流量については、定常実験では流量計で、非定常実験では測定点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との積で算定した。

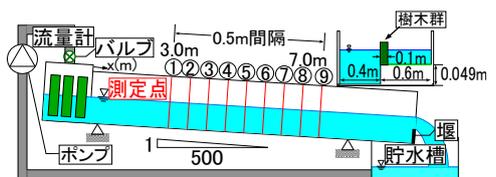


図-1 実験装置の概要

図-1 実験装置の概要

4. 実験結果に基づく推定法の検証

解析の与条件である上流端区間の低水路粗度係数は $0.011\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした。この値は、洪水後の実河川において縦断的な水面形は痕跡水位に限定されることから、痕跡水位を与条件として既知の低水路粗度係数区間を

変化させた準二次元推定法を実施し得られた粗度係数値を平均したものである。高水敷粗度係数には等流実験値の $0.033\text{m}^{-1/3}\text{s}$ を与えた。CaseC-R と RV の境界混合係数 f の値は、それぞれ標準値⁴⁾の $f=0.17, f=0.10$ とした。この値は CaseC-R, RV-S の実験結果から逆算した値とも一致していた。図-2 に CaseC-R, RV-U の流量・低水路粗度係

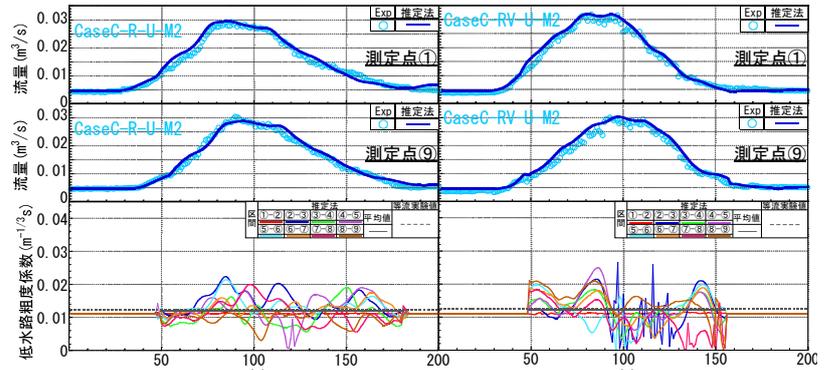


図-2 実験装置非常実験結果に基づく検証(左:CaseC-R-U, 右:CaseC-RV-U)

数の推定結果と実験値との比較を示す。これより、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おり、最大で 121%の差はあるものの平均的には等流実験値と概ね一致していること、(3)CaseC-R-U 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-U 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などが確認できる。

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いること、(2) CaseC-RV-U は、CaseC-R-U に比べ予測精度が低いこと、などが確認できる。CaseC-RV-U で精度が低くなる要因は、準二次元解析では樹木群内を死水域として取り扱っているが、実際の現象では樹木群内で流速が発生しているためと考えられる。

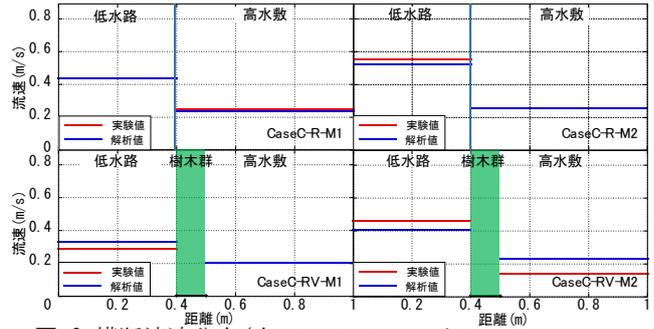


図-3 横断流速分布(上:CaseC-R-U, 下:CaseC-RV-U)

5. 実河川への適用

最後に、準二次元推定法を遠賀川での 2012 年 7 月 13~14 日の出水へ適用し、流量と低水路粗度係数の把握を試みた。入力条件には痕跡水位を用いた。本推定法が常流を対象としているため、セグメント 2 より下流で、河道形状が複断面となっている区間を対象とした。図-4 は、推定結果の一例として、遠賀川の距離標 16~18.6km 地点の推定結果を示したものである。これより、本推定法は、同出水のピーク流量を再現していること、砂州や橋梁など抵抗を増加させる要因がある区間を除き、粗度係数を河床材料から推定される低水路粗度係数を再現していること、などが確認できる。このように、本準二次元推定法は、洪水痕跡を与条件とすることで出水時のピーク流量、低水路粗度係数を把握できることが確認された。

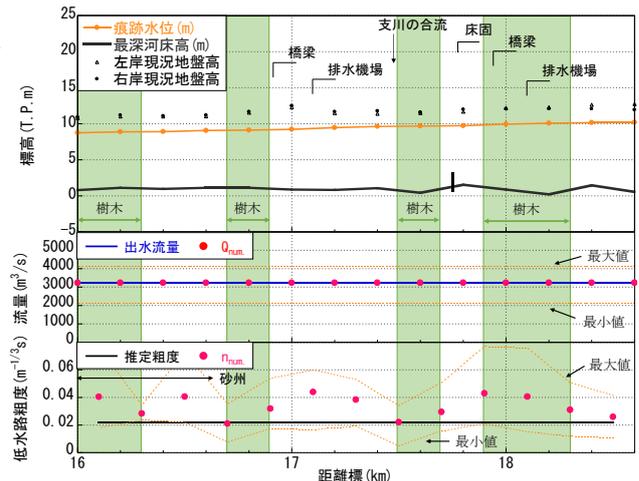


図-4 遠賀川 16~18.6km 区間の推定結果

6. おわりに

本研究から、本準二次元推定法は、(1)複断面水路実験での流量、低水路粗度係数、流速分布を十分な精度で再現できること、(2)実出水での洪水痕跡から実河川での流量、低水路粗度係数の把握が可能であること、などが確認された。

参考文献: 1) 国土交通省:河川砂防技術基準調査編, 2) 重枝未玲ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, I_649-I_654, 2018., 3) Roe, P. L.: *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372, 1981.2012, 4) 国土技術研究センター(編): 河道計画検討の手引き, 山海堂, 2002.