

複断面流れを対象にした水面形を与条件とした流量・合成粗度係数の推定

九州工業大学工学部 学生会員 ○木原 寛満 九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲
九州工業大学 フェロー会員 秋山 壽一郎 九州工業大学大学院 学生会員 武久 晋太郎

1. はじめに

近年、河道や治水施設の治水機能の現状を把握し、その機能の維持や改善を行うための計画型管理、いわゆるストックマネジメントが求められている¹⁾。本研究は、上記の基礎データとなる洪水時の水位、流量、抵抗特性の時空間変化の総合的な把握²⁾を目的に、水面形の経時変化に基づく流量と粗度係数の時空間推定法³⁾を複断面流れに適用し、その予測精度を実験結果に基づき検証したものである。

2. 推定法の概要

基礎方程式は、任意の水路形状に適用可能な1次元浅水流方程式である。数値解析手法には流束差分法を用いた。同推定法では、水位ハイドログラフ、初期流量、河床位、一区間の粗度係数を与条件として、計算格子点での流量 Q と計算格子間の合成粗度係数 N_c が推定される。

$$S_f = N_c^2 Q^2 / (A^2 R_c^{4/3}); R_c = (\sum A_j R_j^{2/3} / A)^{3/2} : (1) \quad S_f = Q^2 / \{ \sum A_j R_j^{2/3} / n_j \}^2 : (2) \quad S_f = (Q / \sum \hat{u}_j A_j)^2 : (3)$$

$$n_j^2 s_j / (A_j R_j^{1/3}) \cdot \hat{u}_j^2 + \sum_{kj} f \cdot \text{sgn}(\Delta u_{kj}) / (g A_j) \cdot \Delta \hat{u}_{kj}^2 s_{wkj} = 1 : (4) \quad N_{c2} = A R_c^{2/3} / (\sum \frac{A_j R_j^{2/3}}{n_j}) : (5) \quad N_{c3} = A R_c^{2/3} / (\sum \hat{u}_j A_j)^2 : (6)$$

Q :流量, A :流積, R :径深, s :潤辺, g :重力加速度, n :分割断面での粗度係数, N_c :合成粗度係数, f :境界混合係数,
 s_w :分割断面境界の潤辺長, 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, $\text{sgn}(\bullet)$: $\bullet$ 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, $\hat{u} = u / S_f^{1/2}$

N_c の推定には、式(1)に示す井田による合成径深 R_c による摩擦勾配 S_f を用いた。この摩擦勾配を用いることで、低水路と高水敷の断面を分割して取り扱うことが可能となる。一般に、複断面河道では低水路と高水敷の粗度係数が異なり、低水路と高水敷の流速差が生じることによって抵抗が増加する。摩擦勾配 S_f は、低水路と高水敷の粗度分布を考慮した場合には式(2)で、粗度分布と低水路と高水敷の流速差による干渉効果を考慮した場合には式(3)で表される。ここに、式(4)は低水路と高水敷の粗度分布と低水路と高水敷の流速の干渉効果を考慮した分割断面 j に関する運動方程式である。式(1)と式(2), (3)を等値として、合成粗度係数 N_c で整理すると、式(1)の合成粗度係数で表した N_{c2} , N_{c3} が式(5)と(6)のように得られる。

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 $t+\Delta t$ の水位からその時の流積を求める。2)離散化された連続の式より合成粗度係数の2乗の補正量 ΔN_c^2 を求め、時刻 t の合成粗度係数 N_c' を求める。3) 手順2)で求めた粗度係数 N_c' を用いて、運動方程式から流量 Q を求める。なお、同推定法の詳細については参考文献³⁾を参考されたい。

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。粗度係数は等流実験より、低水路で $n=0.012\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 、高水敷で $n=0.033\text{m}^{-1/3}\text{s}$ であることが確認されている。流れは定常流

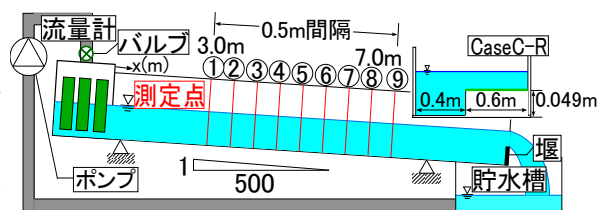


図-1 実験装置の概要

(CaseC-R-S)および非定常流(CaseC-R-U)とし、CaseC-R-Sについては、上流から一定流量 $Q=0.0242\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、水面形が堰上げ背水と低下背水となるように下流端の堰高を設定した。CaseC-R-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、CaseC-R-Sではポイントゲージで、CaseC-R-U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。単位幅流量については、CaseC-R-Sでは流量計で測定し、CaseC-R-U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により単位幅流

量を求めた。

4. 推定法の検証

図-2に、CaseC-R-Sの観測水面形、流量および粗度係数の推定値と実験結果との比較を示す。粗度係数の実験結果には、等流実験の低水路および高水敷の粗度係数、低水路と高水敷の粗度分布のみを考慮した合成粗度係数 N_{c2} 、標準的な境界混合係数値 $f=0.17$ とした合成粗度係数 N_{c3} 、実験結果より算定したエネルギー勾配に基づく合成粗度係数 N_{cE} を示している。これより、(1)いずれのCaseについても推定法は流量と粗度係数を再現していること、(2)推定された粗度係数の平均値はCaseC-R-S-M1で $N_c=0.020\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、CaseC-R-S-M2で $N_c=0.022\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ であり、 N_{c2} 値に比べ高く、干渉効果を考慮した N_{c3} 値付近の値となることがわかる。

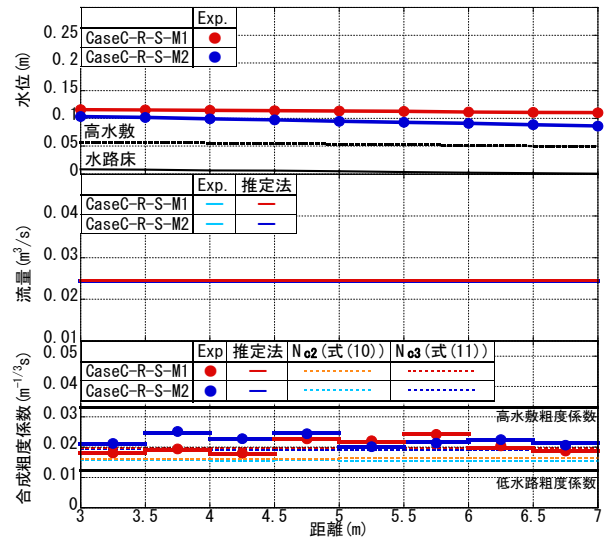


図-2 CaseC-R-Sの定常実験結果に基づく検証

図-3に、CaseC-R-Uの流量・粗度係数の推定結果と実験値との比較を示す。上流端の粗度係数については、境界混合係数 f の経時変化が不明なため、水路断面形状に基づき $f=0.17$ とした N_{c3} を与えた。これらより、本推定法は、(1)流量ハイドログラフの実験結果を再現していること、(2)CaseC-R-U-M1では合成粗度係数の推定結果は、振動はあるものの概ね一定であること、(3)CaseC-R-U-M2では合成粗度係数の推定結果は、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、などが確認できる。なお、流れが低水路から高水敷へあるいはその逆の場合に粗度係数が急増する要因は、そこで発生する鉛直方向の渦の影響により、底面粗度以外のエネルギー損失が発生するためと考えられる。

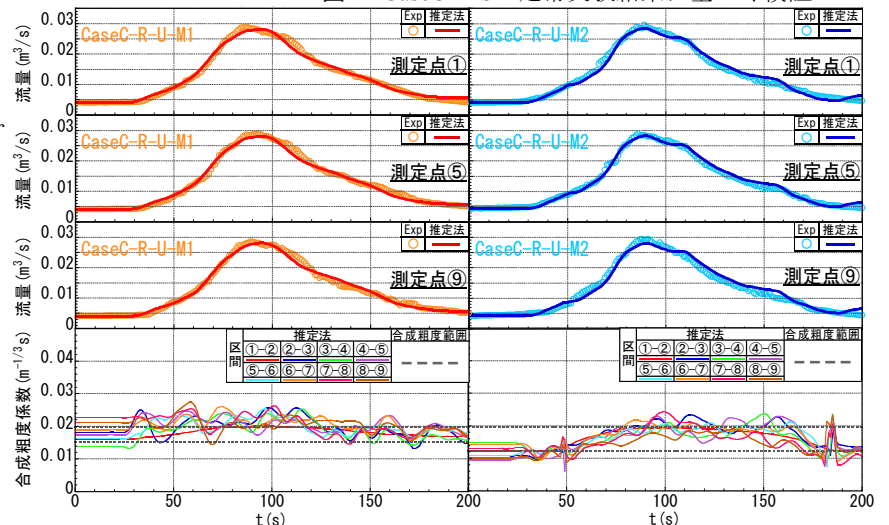


図-3 CaseC-R-Uの非定常実験結果に基づく検証

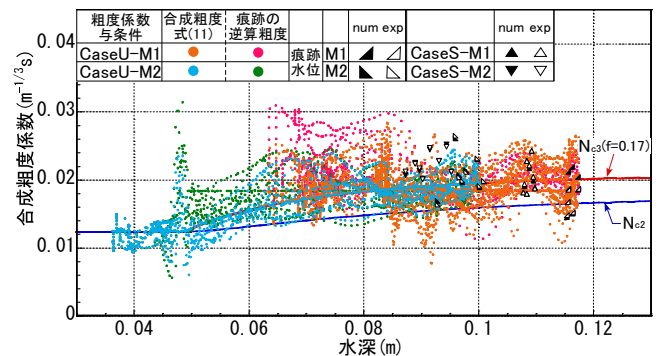


図-4 合成粗度係数と水深との関係

図-4に、水深とCaseC-Rの粗度係数、 N_{c2} 、 N_{c3} の関係について比較を示す。 N_{c3} と水深 h との関係は $f=0.17$ で求めた。

これより、本推定法の推定結果は、(1)粗度係数は水深に対して増加傾向にあること、(2)単断面から複断面水路へと遷移する水深 $h=0.049\text{m}$ 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、粗度係数の値が大きくなること、(3)ばらつきはあるものの、 $f=0.17$ のときの N_{c3} 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、などが確認できる。なお、推定結果に基づく近似曲線では $f=0.20$ 程度であり、 $f=0.17$ と同程度であった。

5. おわりに

本研究から、本推定法は、(1)低水路と高水敷の流速差による干渉効果の影響を捉えることができ、その結果、(2)複断面流れの流量及び合成粗度係数値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。2)国土交通省：河川砂防技術基準調査編，2012。3)重枝未玲ら：洪水痕跡によるピーク水位時の流量と粗度係数の推定，河川技術論文集，第23巻，pp.73-78，2017。