

水位を与条件とした漸縮・漸拡矩形断面水路での流量・粗度係数の時空間推定

九州工業大学大学院 学生会員 ○西山 晋平 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 田口 英司

1. はじめに

安全・安心が持続可能な河川管理にとって、洪水時の水位、流量、抵抗特性の時空間変化等を総合的に把握し、そのデータを蓄積することは重要である。本研究は、任意の縦横断面形状の水路を対象に、上・下流端水位を境界条件とした1次元不定流解析による流量と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を構築するとともに、漸縮・漸拡矩形断面水路での定常・非定常流を対象に、その予測精度について検討したものである。

2. 水位を境界条件とした不定流解析と水面形の経時変化を用いた流量・粗度係数の時空間推定の概要

本研究では対象とする流れを常流とする。両手法の基礎方程式は、式(1)の任意の水路形状に適用可能な1次元浅水方程式である。同方程式を流束差分法により離散化したものが式(2)となる。不定流解析法では、初期の流積・流量、粗度係数、河床位を与条件とし、上・下流端の水位ハイドログラフを境界条件として与え、時刻 t の諸量から時刻 $t+\Delta t$ の流量 Q と流積 A の予測を式(2)より行う。推定法では、水位の多点計測結果より流積の経時変化を算定し、初期水深、初期流量、河床位、一区間の粗度係数を与条件として与え、時刻 $t+\Delta t$ の流積 A と時刻 t の諸量から、粗度係数の2乗の補正量 Δn^2 を式(3)より求め、式(4)より時刻 t の補正粗度係数値 n^t を推定した後、時刻 $t+\Delta t$ の流量 Q を式(2)より推定する。式(3)は、式(2)中の連続の式を $\Delta n^t_{i+1/2}$ で整理すると得られ、一区間の粗度係数の補正値を0とすることで解くことができる。なお、 n^t は摩擦や断面変化に伴う渦の発生等の影響を含んだ値となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} &= S; U = (A \quad Q)^T; E = (Q \quad Q^2/A + gI_1)^T; S = (0 \quad gI_2 + gA(S_0 - S_f))^T \cdots (1) \\ U_i^{t+\Delta t} &= U_i^t - \Delta t / \Delta x [\delta E_{i+1/2}^- + \delta E_{i-1/2}^+] \cdots (2) \quad \delta E_{i+1/2}^\pm = \Sigma_{j=1}^2 \left\{ 1 \pm \text{sgn}(\tilde{\lambda}^j) \right\} / 2 \cdot (\tilde{\lambda}^j \alpha^j - \beta^j) \tilde{e}^j; \text{sgn}(a) = \begin{cases} 1 & a > 0 \\ -1 & a \leq 0 \end{cases} \\ \alpha^1 &= (\tilde{\lambda}^1 \Delta A - \Delta Q) / 2\tilde{c}; \alpha^2 = -(\tilde{\lambda}^1 \Delta A - \Delta Q) / 2\tilde{c}; \beta^1 = -\tilde{S}_2 / 2\tilde{c}; \beta^2 = -\beta^1; \tilde{S}_2 = \tilde{S}_g - \tilde{S}_f; \Delta A_{i+1/2} = A_{i+1} - A_i; \Delta Q_{i+1/2} = Q_{i+1} - Q_i \\ C_{i-1/2} \Delta n_{i-1/2}^2 - C_{i+1/2} \Delta n_{i+1/2}^2 &= D_i; C_{i+1/2} = -(gA_{i+1/2} / 2C_{i+1/2}) u_{i+1/2} |u_{i+1/2}| / R_{i+1/2}^{4/3} \cdots (3) \quad n_{i+1/2}^2 = n_{i+1/2}^2 + \Delta n_{i+1/2}^2 \cdots (4) \\ D_i &= \frac{A_i^{t+\Delta t} - A_i^t}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda_{i+1/2}^1 \alpha_{i+1/2}^1 + \lambda_{i-1/2}^2 \alpha_{i-1/2}^2 - \frac{gA_{i+1/2}}{2C_{i+1/2}} \left[(z_{bi+1} - z_{bi}) + (h_{i+1} - h_i) - (A_{i+1} - A_i) / B_{i+1/2} \right] + \frac{gA_{i-1/2}}{2C_{i-1/2}} \left[(z_{bi} - z_{bi-1}) + (h_i - h_{i-1}) - (A_i - A_{i-1}) / B_{i-1/2} \right] \right\} \\ U &= \text{保存量ベクトル}, E = \text{流束ベクトル}, S = \text{発生項・消滅項ベクトル}, A = \text{流積}, h = \text{水深}, q = \text{単位幅流量} \\ g &= \text{重力加速度}, S_0 = \text{水路床勾配}, z_b = \text{水路床高}, S_f = \text{摩擦勾配}, n = \text{マンニングの粗度係数}, u = \text{流速}, R = \text{径深}, c = \text{波速} \\ \Delta t, \Delta x &= \text{時間, 空間の刻み幅}, i = \text{空間に対する添字}, \tilde{S}_g = \text{河川形状に関する項}, \tilde{S}_f = \text{底面摩擦項} \end{aligned}$$

3. 実験の概要

実験装置は、図-1に示す長さ9m、水路床勾配は1/1,000、粗度係数 $n=0.012(\text{m}^{-1/3}\text{s})$ の水路である。水路横断面形状は矩形とし、CaseR-Cでは水路幅を $x=4.0\sim 6.0\text{m}$ で1mから0.6mに漸縮、CaseR-E1では $x=4.0\sim 6.0\text{m}$ で1mから1.4mに漸拡、CaseR-E2では $x=4.0\sim 4.5\text{m}$ で1mから1.4mに漸拡させた。CaseR-E2についてのみ、水路幅の変化により形状損失が発生する設定とした。

流れは定常流(CaseR-C-S, CaseR-E1, 2-S)および非定常流(CaseR-C-U, CaseR-E1, 2-U)とし、定常流については、上流から一定流量

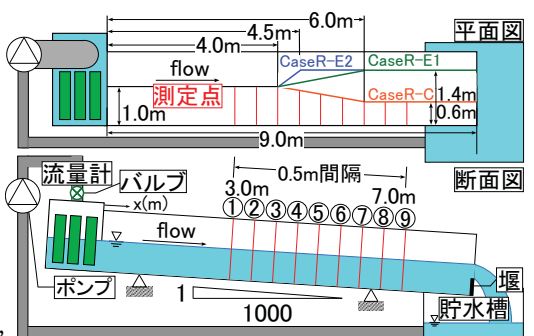


図-1 実験装置の概要

$Q=0.001(\text{m}^3/\text{s})$ 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。非定常流についてはCaseR-C-U, CaseR-E1-Uでは上流から一定流量 $Q=0.0037(\text{m}^3/\text{s})$ を供給し定常状態とした後、計測開始時刻から、70秒後に $Q=0.0108(\text{m}^3/\text{s})$ 、140秒後に $Q=0.0037(\text{m}^3/\text{s})$ となるように、CaseR-E2-Uでは上流から一定流量 $Q=0.0089(\text{m}^3/\text{s})$ を供給し定常状態とした後、計測開始時刻から、流量計が40秒後に $Q=0.0145(\text{m}^3/\text{s})$ 、80秒後に $Q=0.0089(\text{m}^3/\text{s})$ となるように流量を調整した。

測定項目は水位および流量である。水位については、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、流量については、定常実験では流量計で、非定常実験ではビデオカメラの撮影によるPTV解析より流速を求め、これと水位観測より得られる流積の積より求めた。

キーワード 水面形、粗度係数、不定流解析、漸縮水路、漸拡水路、形状損失

連絡先 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1 九州工業大学建設社会工学科 TEL:093-884-3125

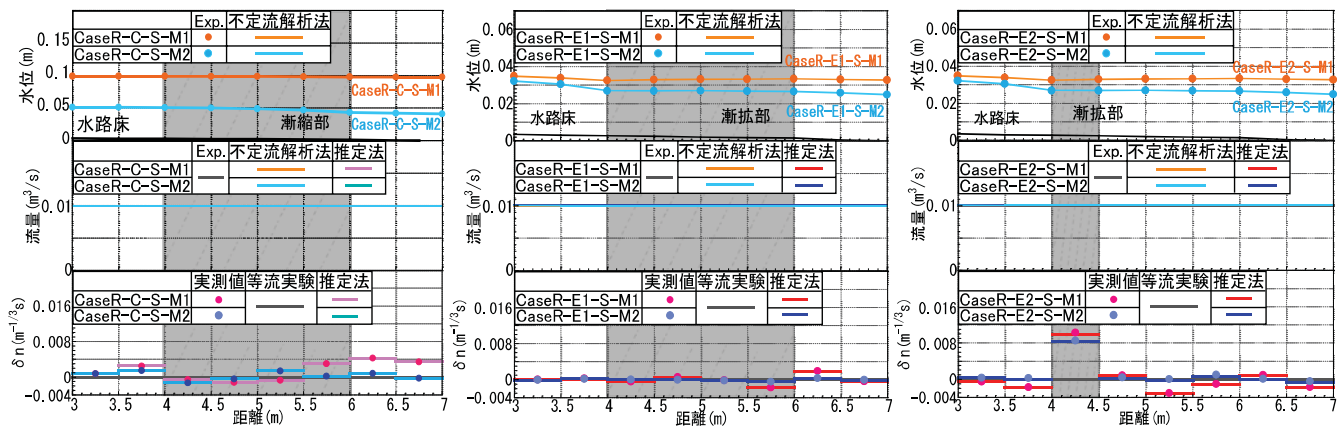


図-2 定常実験に基づく検討

4. 実験結果に基づく不定流解析および推定法の検証

不等流解析結果を観測値として用いた場合、両手法は不等流解析条件を再現可能であることは確認されている。推定法の与条件となる水位ハイドログラフに浅水方程式で表現できない現象が含まれる場合、流量や粗度係数の結果に振動が発生する。これを防ぐ目的で、区分的3次エルミート内挿多項式補間(PCHIP補間)とローパスフィルタを施した。

(1) 定常実験結果に基づく両手法の検証

図-2は、定常流について、両手法の結果と実験値との比較したものである。粗度係数の補正值 δn ($=n'-n$)は、等流実験より求めた値を n' として求めた。図中には、エネルギー勾配より求めた補正值も示している。これより、いずれのCaseについても(1)不定流解析法は、水位および流量を再現していること、(2)推定法は、流量とエネルギー勾配より求めた粗度係数の補正值を再現していること、形状損失の発生するCaseR-E2では、(3)漸拡部分の補正值は、形状損失が生じるため他の測定箇所と比べ大きくなること、(4)推定法は、このような現象を捉えていること、などが確認できる。

(2) 非定常実験結果に基づく両手法の検証

図-3は、非定常流について、両手法の結果と実験値との比較を行ったものである。粗度係数の補正值は、定常実験と同様に、等流実験の値を用いて求め、形状損失が発生するCaseR-E2の不定流解析のみ、推定法で算出された粗度係数の推定結果の値より求めた。水面形の変化より、(1)不定流解析結果は、水位を概ね再現していること、流量ハイドログラフより、(2)不定流解析結果と推定結果のいずれも一部の時間帯以外では実測値を再現していること、粗度係数の補正值 δn より、(4)推定結果はCaseR-E2-U-M2の区間③~④を除いて、いずれのCaseについても0付近で振動していること、(5)区間③~④では、補正值 δn は正となることが確認できる。本推定法で得られた粗度係数の時空間変化を与え不定流解析を実施したところ、解析結果は水位・流量ハイドログラフを再現していた。これを踏まえると、本推定法は、漸拡部での渦の発生の影響を含んだ粗度係数を補正しており、これは、本推定法が、壁面摩擦と流体内部の乱れによるエネルギー損失を適切に評価していることを示している。

5. おわりに

本研究から、本不定流解析法は漸縮・漸拡矩形水路での水位・流量ハイドログラフの推定が可能であること、本推定法は流量ハイドログラフの推定が可能であること、粗度係数の推定値は摩擦損失と形状損失が含まれた値であることが確認された。このように、本不定流解析法と推定法は流量や粗度係数の推定を行う基本ツールとしての性能を有していると考えられる。

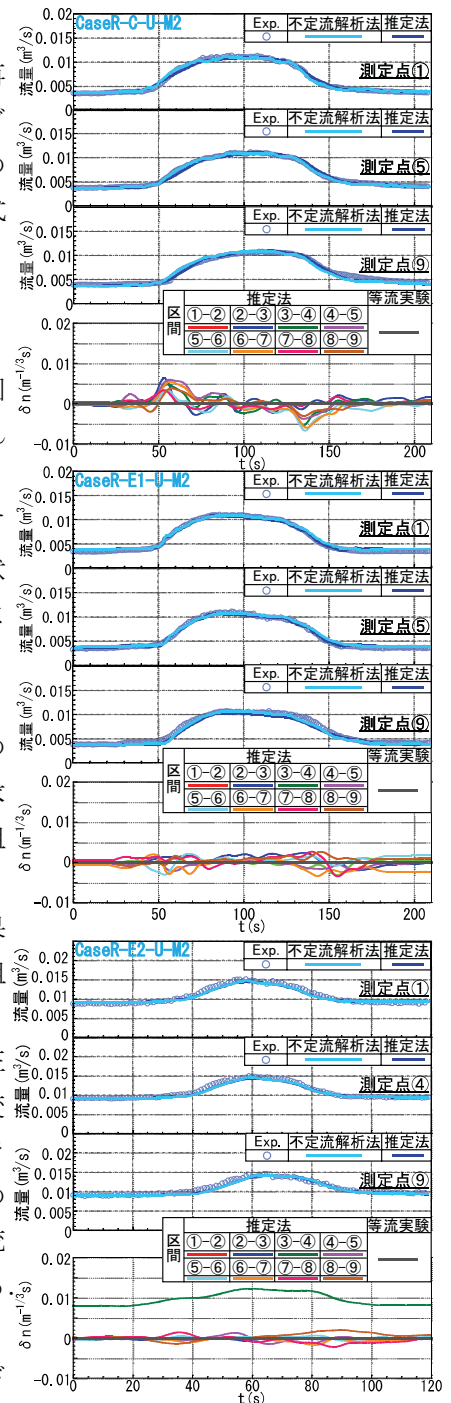


図-3 非定常実験に基づく検討