

市街地浸水氾濫流れの特性曲線法を用いた一次元流出解析モデル

愛媛大学大学院 学生会員 ○中野寛隆 愛媛大学大学院 正会員 渡辺政広
愛媛大学大学院 学生会員 Sijapati Sweata 愛媛大学大学院 正会員 友近榮治

1. はじめに

近年、各地の都市下水道流域で、都市化（アスファルト舗装など）の進展による浸透域の激減やいわゆるゲリラ豪雨の多発などにより、下水道管渠網に大量の雨水が流入し、浸水氾濫を伴う雨水流出が発生して浸水氾濫災害に頻繁に見舞われるようになってきている。これまで、こうした水災害から人命と財産を守るための各種対策が立案されてきているが、これがためにも、下水道管渠網内の複雑な雨水の流れと下水道管渠網からオーバーフローした流出水の地表面上での複雑な流れを精度高くシミュレートできる、市街地の雨水流出シミュレーションモデルの必要性・重要性が益々大きくなってきている。

このような市街地の雨水流出シミュレーションモデルとして、現在まで、数多くのモデルが提案^{1)~4)}されているが、それらの中でも、InfoWorks モデル、MOUSE モデル、XP-SWMM モデルの3つのいわゆる海外モデル⁵⁾が、わが国では、広く実用に供されてきている。著者らは、しかしながら、これら海外モデルで行われている市街地浸水氾濫流の解析は、実際の浸水氾濫流を精度高くシミュレートできていないのではないかと疑問を持っており、本報告では、それら3モデルの浸水氾濫流解析法への疑問について、またそれら解析法の改良の方向性について考察したところを述べる。

2. 市街地浸水氾濫流の一次元流出解析モデル

市街地の地表面は、図1に示すように、道路（流水域）とその両側の間地などの貯留域とから成る単位排水区画が、多数、集合して構成されていると考えることができる。また、地表面氾濫流は、両サイドに氾濫域（間地）をもつ道路面上の一次元流れ（図1、図2）が組み合わされた流れを主体とするものであると見なせる（もちろん、二次元流れの取扱が必要である地表面部分も存在しているが）。

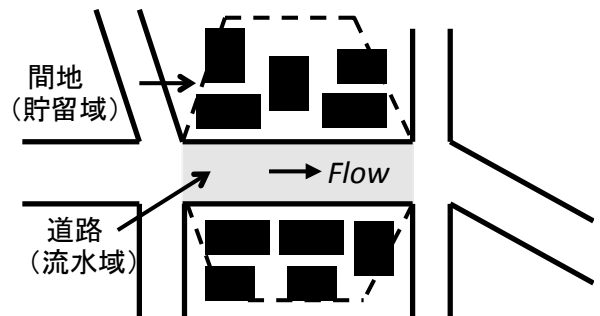


図1 市街地における浸水氾濫流

したがって、都市域の浸水氾濫流の流れの基礎式（連続の式および運動方程式）は、次式のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{A}{B+B'} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{VB}{B+B'} \frac{\partial h}{\partial x} = r \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \left(2 - \frac{B}{B+B'} \right) \frac{\partial V}{\partial x} + \left(1 + \frac{V^2}{gh} - \frac{V^2}{gh} \frac{B}{B+B'} \right) \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} + \frac{Vr}{gh} = 0 ; \quad \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = S_f \quad (2)$$

ここに、 h ：水深、 B ：流水域の水面幅、 B' ：貯留域（氾濫域）の水面幅、 V ：断面平均流速、 S_0 ：道路勾配、 R ：径深、 n ：マンニングの粗度係数、 r ：降雨強度、 x ：距離、 g ：重力加速度、 t ：時間、 x ：距離。

なお、マンニングの粗度係数について、海外モデル⁵⁾では、概ね $0.04 \sim 0.08 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ が用いられているが、本解析法では $0.015 \sim 0.020 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ 程度が妥当と考えている。

都市域の道路面上の浸水氾濫流の基礎式 (1), (2) の数値解析には、特性曲線法を用いる。これは、都市域の道路面の勾配は、限界勾配の前後のものが多く、したがって、道路面上

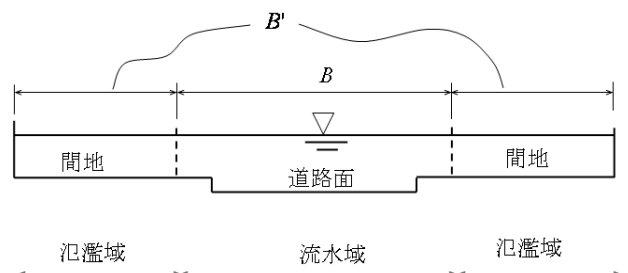


図2 都市域の浸水氾濫流

の流れは、段落ち流れ、せき上げ背水流れ、段波、移動跳水（moving hydraulic jump）などが発生する非常に複雑な非定常流れとなることが考えられ、こうした流れの数値解析には、計算精度の高さと計算の安定性において特に優れていると言われている特性曲線法が最も適していると判断されたからである。

3. 特性曲線法による流出計算

(4)

特性曲線法を用いた道路面上の流れの数値解析においては、解決されねばならない2つの問題が残されている。一つ目は、通常の数値計算手法（差分の方法）によっては、移動跳水を追跡することが困難なことである。二つ目は、低下背水流れ（段落ち流れ）の計算においても、通常の数値計算手法（差分の方法）によっては、計算結果に実用上からも問題となる大きな誤差が生ずる、あるいは計算不能に陥ることである。

すなわち、通常の数値計算手法においては、正の特性曲線式およびこれに沿って成り立つ特性方程式は、通常、次のように差分表示されている。

$$x_p - x_r = \frac{1}{2} \{ (V+c)_p + (V+c)_r \} \Delta t \quad (3)$$

$$V_p - V_r + \frac{g}{2} \left(\frac{1}{c_p} + \frac{1}{c_r} \right) (y_p - y_r) - \left\{ S_0 - \frac{1}{2} (S_{fp} + S_{fr}) \right\} \Delta t = 0 \quad (4)$$

こうした差分の方法では、上述したように、大きな誤差が発生する。これは、特性曲線に沿って、 $1/c$ と S_f の時空間変化がかなりの急激（曲線的）であることによる。

そこで、ここでは、図2に示すように、段落ち流れ部の Δx 区間については、時間の Δt 区間を数10分割し、特性曲線式と特性方程式を逐次積分する数値計算手法を考えた。

表1に示すように、道路を洪水（sine型）が流下する3caseの数値流出実験を行った結果、上述の数値計算手法を用いれば、数値計算誤差を実用上まで低下させることが分かった。

4. おわりに

本報告では、道路（流水域）とその両側の間地などから成る貯留域とを単位排水区画として、これらが多数、組み合わせられて構成されていると考え、地表面氾濫流は、両サイドに氾濫域（間地）をもつ道路面上の一次元流れが組み合わせられたものが主体であると考えることができるとする、浸水氾濫流の解析モデルについて言及した。

参考文献

1) 川池健司・井上和也・戸田圭一：非構造格子の都市氾濫解析への適用，水工学論文集，第44巻，pp. 461-466，2000。 2) 井上和也：洪水氾濫解析モデル，京都大学防災研究所年報，第48号A，pp. 1-13，2005。 3) 内田龍彦・川原能久：任意の境界条件を有する二次元浅水流の高精度解析手法の開発，水工学論文集，第50巻，pp. 799-804，2006。 4) 関根正人・中村 淳・中村康朋：河川からの越水を伴う都市域の内水・外水氾濫過程に関する数値解析，水工学論文集，第52巻，pp. 865-870，2008。 5) (財)下水道新技術推進機構：流出解析モデル活用マニュアル-雨水対策における流出解析モデルの運用手引き-，(財)下水道新技術推進機構，2006。

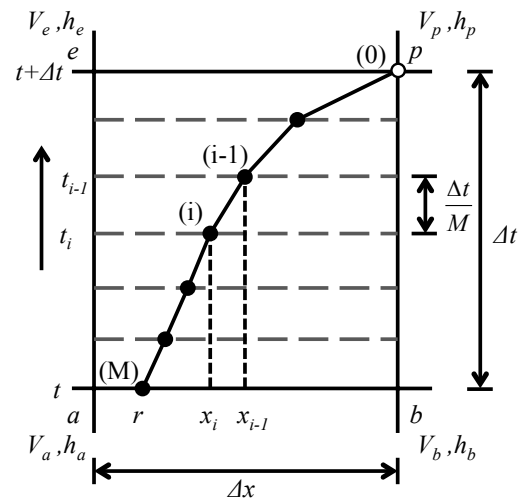


図-3 特性曲線の逐次積分

表1 数値流出実験の概要

水路長	L	500 m
水路幅	B	20 m
粗度係数	n	0.015 sec m ^{-1/3}
基底流量	Q_{BASE}	0.1 m ³ sec ⁻¹
最大流量	Q_{PEAK}	5.1 m ³ sec ⁻¹
流入流量ハイドロ周期	T_{cycle}	3600 sec
シミュレーション時間	T	5400 sec
時間刻み	Δt	0.25 sec
距離刻み	Δx	2.0 m

表2 流出流量誤差 (%)

各Caseの 流出流量誤差	従来方式	提案方式
CaseA($S_0=0.1\%$)	5.44	5.11
CaseB($S_0=0.5\%$)	4.85	2.49
CaseC($S_0=1.0\%$)	3.72	1.56